

新疆喀喇昆仑阿然保泰二叠纪 OIB 型玄武岩地球化学特征及其地质意义*

任广利^{1,2} 王核^{1**} 刘建平^{1,2} 吴玉峰^{1,2} 付王伟^{1,2} 黄朝阳^{1,2}

REN GuangLi^{1,2}, WANG He^{1**}, LIU JianPing^{1,2}, WU YuFeng^{1,2}, FU WangWei^{1,2} and HUANG ChaoYang^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2010-04-08 收稿, 2010-05-26 改回.

Ren GL, Wang H, Liu JP, Wu YF, Fu WW and Huang CY. 2010. Geochemistry and tectonic significance of Permian OIB-type basalts from Aranbaotai in Karakorum Mts., Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10):3085–3094

Abstract A suits of Middle Permian strata consists of limestone, tuff and pillow basalts outcrop in Aranbaotai area, locating the west of Karakorum fault (Taxkorgan fault) in Karakorum Mts. The basalts distribution in NW strike with 12km long and 4.5km wide in west Aranbaotai. The basalt has typical pillow structure, with pillow size from 0.5m to 0.8m, with stoma and amygdaloidal structure. The rock contents SiO₂ from 44.14% to 48.81%, TiO₂ from 1.11% to 1.83%, plotting in the boundary area of the picrobasalt, basalt, and tephrite basanite, belong to alkaline series. The rare earth elements (REE) contents vary from 54.40×10^{-6} to 139.89×10^{-6} , with no Eu and Ce anomaly and $(La/Yb)_N$ of 2.87 to 6.29. In the chondrite-normalized diagram, the patterns of the basalts are slight right dip type. The basalts contents variable large ion lithophile elements (LILE) (e.g. K, Rb and Ba), and relatively deplete in the high field-strength elements (eg. Nb, Ta, Zr, Hf and P), show Ti slight negative anomaly. The geochemical characteristics of the basalts show they have ocean island basalts, derived from the partial melting of spinel lherzolite. These Middle Permian basalts from Aranbaotai area in Karakorum Mts. maybe present the location of the main ocean basin of the Paleo-Tethys Ocean.

Key words OIB-type basalts; Trace element; Geochemistry; Aranbaotai; Karakorum Mts.

摘要 位于喀喇昆仑山喀喇昆仑断裂(塔什库尔干断裂)西侧的阿然保泰一带发育一套中二叠统灰岩-凝灰岩-枕状玄武岩地层。枕状玄武岩分布在北西向长约12km,宽约4.5km范围内。该套玄武岩枕状构造十分典型,岩石具气孔、杏仁状构造。玄武岩 SiO₂ 含量为44.14%~48.81%、TiO₂ 为1.11%~1.83%,在 Si₂O-(Na₂O+K₂O)图中落入苦橄玄武岩、玄武岩和碱玄武岩交界区,属于碱性岩石。稀土元素含量较高(54.40×10^{-6} ~ 139.9×10^{-6}),Eu、Ce无异常, $(La/Yb)_N$ 比值为2.87~6.29,配分模式为右倾型。大离子亲石元素富集(K、Rb、Ba等),但含量变化较大,高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf和P)相对亏损,Ti出现弱的负异常。玄武岩的地球化学特征显示阿然保泰玄武岩具洋岛玄武岩特征,源区为尖晶石二辉橄辉岩,其形成构造环境为板内拉张环境。阿然保泰 OIB 型玄武岩的发现证实了喀喇昆仑阿然保泰地区属于古特提斯主洋盆一部分。

关键词 洋岛玄武岩;微量元素;地球化学;阿然保泰;喀喇昆仑山

中图法分类号 P588.145

* 本文受中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-107-03)和国家“十一五”科技支撑项目(2006BAB07B01-04)联合资助。

第一作者简介:任广利,男,1984年生,博士研究生,岩石学专业, E-mail:renguanglei9977@163.com

** 通讯作者:王核,男,1966年生,研究员,主要从事成矿预测研究, E-mail:wanghe@gig.ac.cn

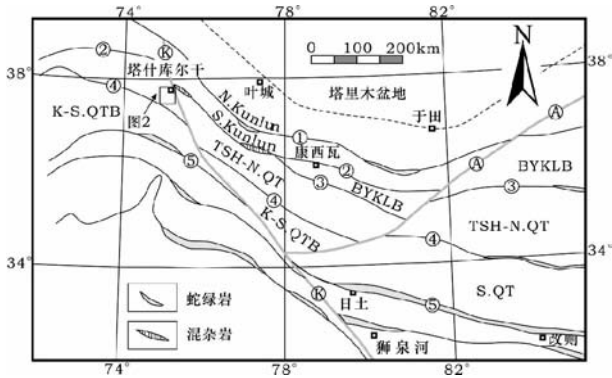


图1 青藏高原西北部构造单元图(据潘桂棠等,2004;李荣社等,2008 修改)

①-库地-其曼于特缝合带;②-麻扎-康西瓦-木孜塔格缝合带;③-郭扎错-西金乌兰湖缝合带;④-乔尔天山-红山湖-双湖缝合带;⑤-班公湖-怒江缝合带;K-喀喇昆仑走滑断裂;A-阿尔金走滑断裂

Fig. 1 Tectonic map of northwestern Tibet (after Pan *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2008)

①-Kudi-Qimanyute suture; ②-Mazar-kangxiwar-Muztag suture; ③-Gozha Co -Xijir Ulan suture; ④-Qiaortianshan-Hongshanhu-Shuanghu suture; ⑤-Bangong Co-Nujiang suture; K-Karakorum Tagh fault; A-Altyn Tagh fault

1 引言

新疆喀喇昆仑-西昆仑山地区处于青藏高原西构造结(West Syntaxis)的东侧,是当前国际地学的热点地区之一(肖序常等,2004)。该区也是我国重要的铁铜铅锌成矿远景区(董永观等,2003;孙海田等,2003)。然而该区极其恶劣的自然条件,地质矿产研究程度相对薄弱。2000~2005年开展的1:25万地质调查,加深了该地区的认识程度(李荣社等,2008),但多条缝合带汇聚在这一地区(图1),加上阿尔金走滑断裂(许志琴等,1999)和喀喇昆仑走滑断裂影响(李海兵等,2006,2007),人们对其地质构造认识仍然存在很多争议。该区仅在西昆仑北部一带发育蛇绿岩套,位于第五缝合带内,其第三、第四缝合带西侧均没有典型的蛇绿岩出露(邓万明,1995)。最近发现苏巴什蛇绿岩与康西瓦断裂带相连,形成时代为石炭纪-中二叠世(计文化等,2004),为该区构造演化提供了新的证据。

喀喇昆仑地区地质构造复杂,分布多条重要断裂,如麻扎-康西瓦断裂、阿塔西-乔尔天山-红山湖断裂(中国科学院青藏高原综合科学考察队,2000)、乔戈里-空喀山断裂等(图1),而且这些断裂西延情况存在不同认识(中国科学院青藏高原综合科学考察队,2000;孙海田等,2003;崔建堂等,2006;李荣社等,2008;计文化等,2009)。丁道桂等(1996)对该区明铁盖一带哈尼沙里地火山岩研究认为其具边缘盆地所具有洋脊、板内拉张和岛弧的混合特征,属弧后(间)盆地

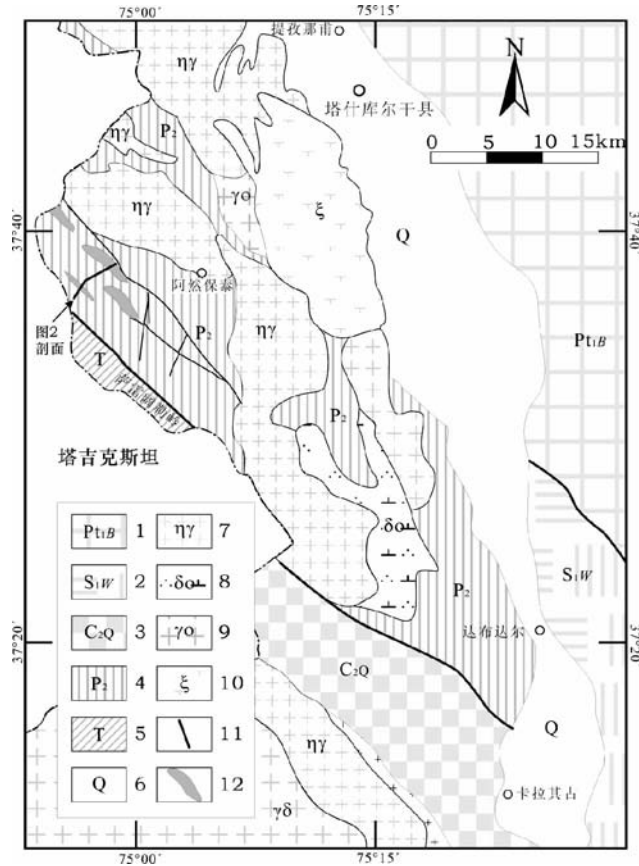


图2 喀喇昆仑阿然保泰地区地质简图(据河南省地质调查院,2004 编绘;玄武岩出露范围据本文实测)

1-古元古界布伦纳勒群;2-志留系温泉组;3-石炭系恰提尔群;4-中二叠统未分;5-三叠统未分;6-第四系;7-二长花岗岩;8-石英闪长岩;9-英云闪长岩;10-正长岩;11-断层;12-枕状玄武岩

Fig. 2 Geological map of Aranbaotai region in Karakorum Mts. showing the distribution of pillow basalts studied in this paper

1-Paleoproterozoic bulunkuo Group; 2-Silurian wenquan Formation; 3-Carboniferous Qiatier Group; 4-Middle Permian; 5-Triassic system; 6-Quaternary system; 7-Monzogranite; 8-quartz diorites; 9-quartz-mica diorites; 10-syenite; 11-faults; 12-pillow basalts

环境。笔者在喀喇昆仑一带地质矿产调研过程中,发现阿然保泰西侧一带广泛地分布一套灰岩-枕状玄武岩-凝灰岩地层,对该区玄武岩仅在部分地质报告(杨万志等,2000^①)中有简单记录,我们对玄武岩的分布、地质特征开展了地质调查,本文报道这套枕状玄武岩的地质-岩石学和地球化学特征,初步探讨了其大地构造环境,为地质演化认识提供基础资料。

2 区域地质及玄武岩地质特征

喀喇昆仑塔什库尔干河谷(图2)东侧为早元古界布伦

① 杨万志等. 2000. 新疆塔什库尔干塔吉克自治县矿产资源综合调查及靶区优选报告, 1-122

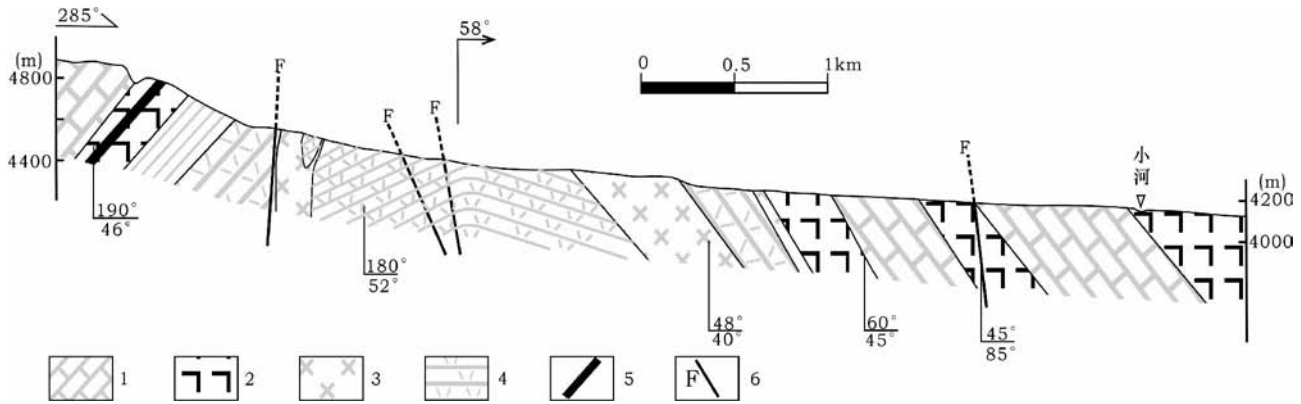


图3 阿然保泰火山-沉积岩地质剖面

1-灰岩;2-枕状玄武岩;3-辉长岩;4-凝灰岩;5-层状硅质岩;6-断层

Fig. 3 The geological section of the volcanic-sedimentary rock in Aranbaotai

1-limestone; 2-pillow basalts; 3-gabbro; 4-tuff; 5-bedded siliceous rocks; 6-faults

阔勒群和下志留统的温泉沟群变质岩系,西侧被大量中生代-新生代花岗岩和碱性侵入岩占据,中生代花岗岩年龄在123~94Ma(河南省地质调查院,2004^①),新生代碱性侵入岩为54~11Ma(中国科学院青藏高原综合科学考察队,2000),出露地层分别为石炭系的泥晶灰岩、含生物碎屑泥晶灰岩-灰岩和中二叠统的灰岩、安山质火山熔岩及火山碎屑岩。

阿然保泰一带出露的火山岩东侧在1:25万区调报告(河南省地质调查院,2004)中将其称为恰迪尔塔什沟火山岩,岩性主要为安山质晶屑凝灰岩及少量玄武安山岩。该套火山岩位于地层的底部,向上逐渐过渡到以沉积地层为主,沉积岩中含有丰富的孢粉化石,鉴定时代为早二叠世晚期至晚二叠世早期。本文报道的玄武岩位于阿然保泰西侧,分布从克其克汗尤力沟上游经阿克希腊克沟上游到国界,往西北方向延伸到塔吉克斯坦境内,向南西方向可能延伸到达布达尔北西一带。在阿然保泰西侧枕状玄武岩呈带状分布,其长为12km,其宽可达4.5km。

作者在乃扎塔什沟实测了一条地层剖面(图2、图3),枕状玄武岩产在厚层状灰岩,凝灰岩中,局部可见红色硅质岩(图4c)。该火山岩地层被辉石岩、辉长岩穿插,发生了强烈的构造变形,地层产状陡倾、甚至倒转。与典型的蛇绿岩套相比,该套火山岩缺少橄榄岩、层状辉长岩等,不具蛇绿岩套特征。在阿克希拉克沟北部一带,枕状玄武岩发生了强烈的片理化。枕状玄武岩的岩枕保存完整(图4a、b),大小变化不大(0.5~0.8m),部分岩枕被压扁。部分岩枕的横断面有放射状裂隙。枕状玄武岩的大部分含有方解石组成的杏仁,杏仁边部出现绿泥石集合体。枕状玄武岩以斜长石斑晶为主,在部分样品中可见到橄榄石和辉石斑晶;基质由具毡状结构的斜长石、辉石和玄武玻璃组成(图4d)。

3 地球化学特征

在剖面上采集了6件玄武岩样品(样号LH-B5、8、10、

11、19、21),同时还采集了2件辉长岩(LH-B16、17)用于对比研究。对全部样品进行了主量元素、稀土元素、微量元素分析,所有样品元素分析均在中国科学院矿床地球化学重点实验室完成,主量元素分析采用X荧光光谱仪,仪器型号: PANalytical Axios XRF。选用标样GSR1、GSR2、GSR3来控制测量精度,测量精度为3%~5%。微量元素分析采用ICP-MS(ELEMENT型)分析,分析精度优于10。主量元素、稀土元素和微量元素分析结果见表1。

3.1 主量元素

由表1可以看出,阿然保泰玄武岩 SiO_2 和 TiO_2 含量分别介于44.14%~48.81%和1.11%~1.83%之间,较加拿大Flin Flon带的Long Bay的洋岛玄武岩(SiO_2 49.63%~52.04%和 TiO_2 1.35%~2.29%)低(Stern *et al.*, 1995); Al_2O_3 含量为13.60%~15.62%, MgO 含量为6.21%~9.79%, CaO 含量为4.54%~11.57%, Na_2O 含量为2.32%~4.06%, K_2O 含量在0.17%~2.64%,均较Long Bay的洋岛玄武岩高, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为2.97%~5.12%,大部分 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, $\text{Mg}^\#$ 范围为57~68,岩石在 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)图解(图5a)上,玄武岩样品落在苦橄玄武岩、玄武岩和碱玄岩的交界区位置,在Ir的附近和上方,表明属于碱性系列岩石。但在 Na_2O - K_2O 图解(图5b)中,显示了由钠质向偏钾质过渡的特征。岩石各氧化物对氧化硅图解(图6)中,显示阿然保泰与Long Bay的洋岛玄武岩具相似的变化特征。此外,本区辉长岩的主量元素组成与玄武岩相当,只是 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 含量略低, CaO 含量略高(表1)。

3.2 微量元素特征

阿然保泰枕状玄武岩的稀土元素总量较高($54.40 \times$

^① 河南省地质调查院. 2004. 1:25万克其克吐鲁克幅和塔什库干自治县幅区域地质调查报告, 1-304

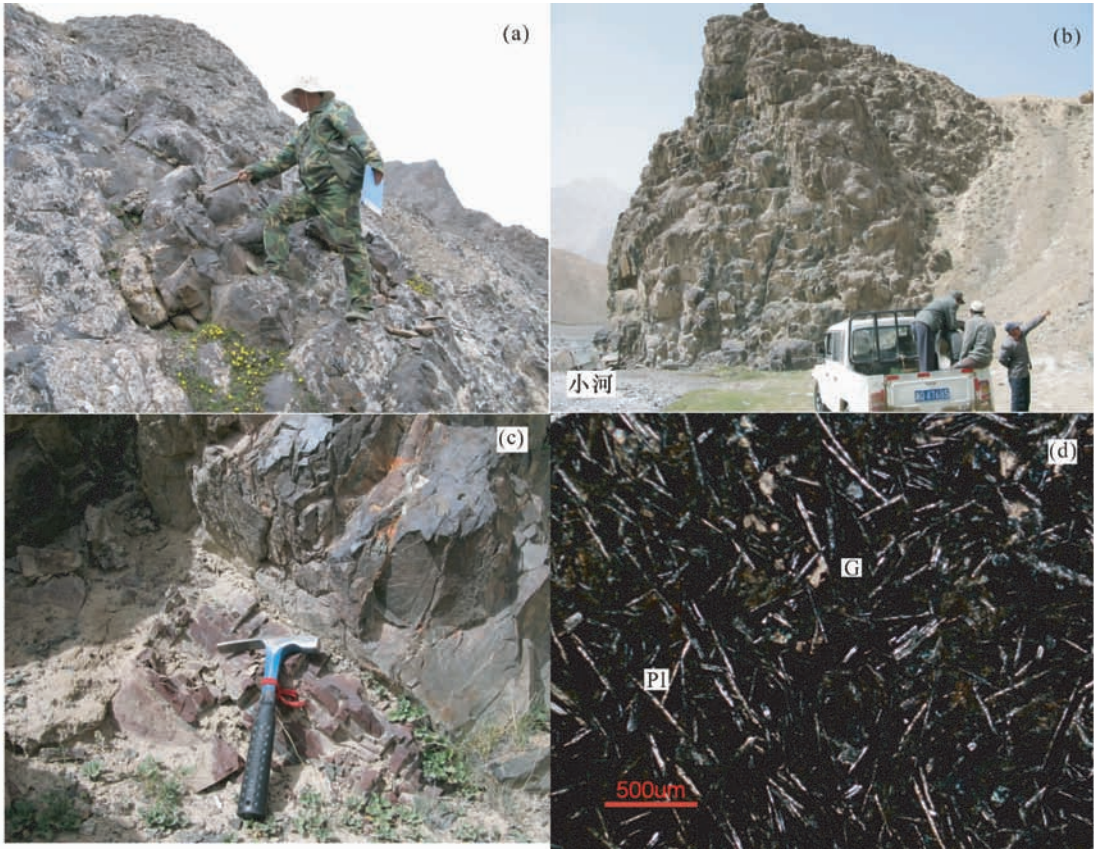


图4 阿然保泰玄武岩野外和显微照片

(a)-玄武岩枕状构造景观,图3剖面西端;(b)-玄武岩,图3剖面东端;(c)-产于玄武岩中层状硅质岩;(d)-玄武岩具毡状结构斜长石等组成的基质,正交偏光;Pl-斜长石;G-玄武玻璃

Fig. 4 Outcrops and microphotographs of pillow basalts

(a)-outcrops of pillow basalts in the west part of section in Fig. 3; (b)-outcrops of pillow basalts in the east part of section in Fig. 3; (c)-bedded siliceous rocks; (d)-the microphotographs of basalts, Pl-plagioclase; G-tachylite

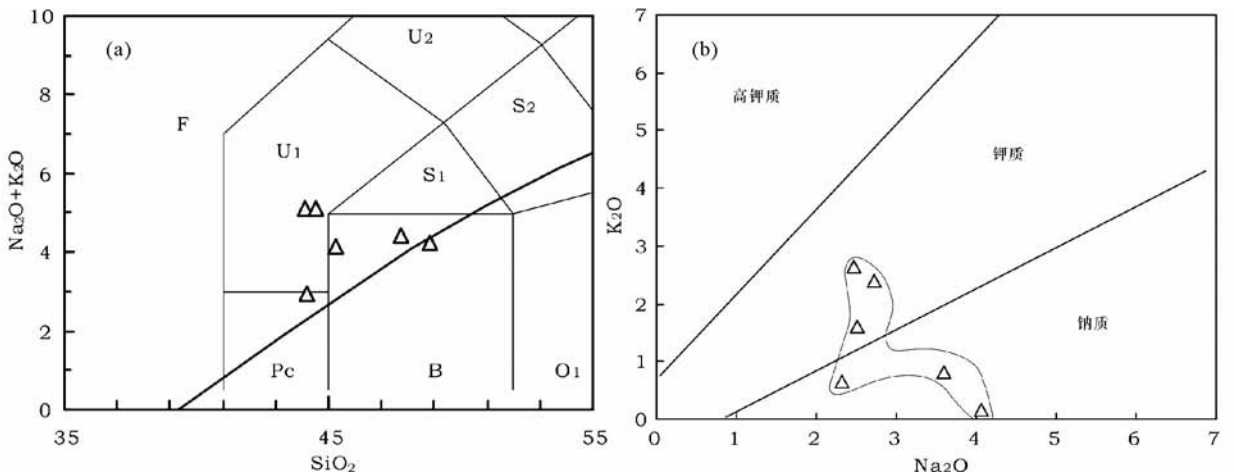


图5 阿然保泰枕状玄武岩 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解(a)和 K_2O - Na_2O 图解(b)

Pc-苦橄玄武岩;B-玄武岩;U1-碱玄武岩、碧玄武岩

Fig. 5 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (a) and K_2O - Na_2O (b) diagram for pillow basalts in Aranbaotai

Pc-Picritic basalt; B-basalt; U1-tephrite, basanite

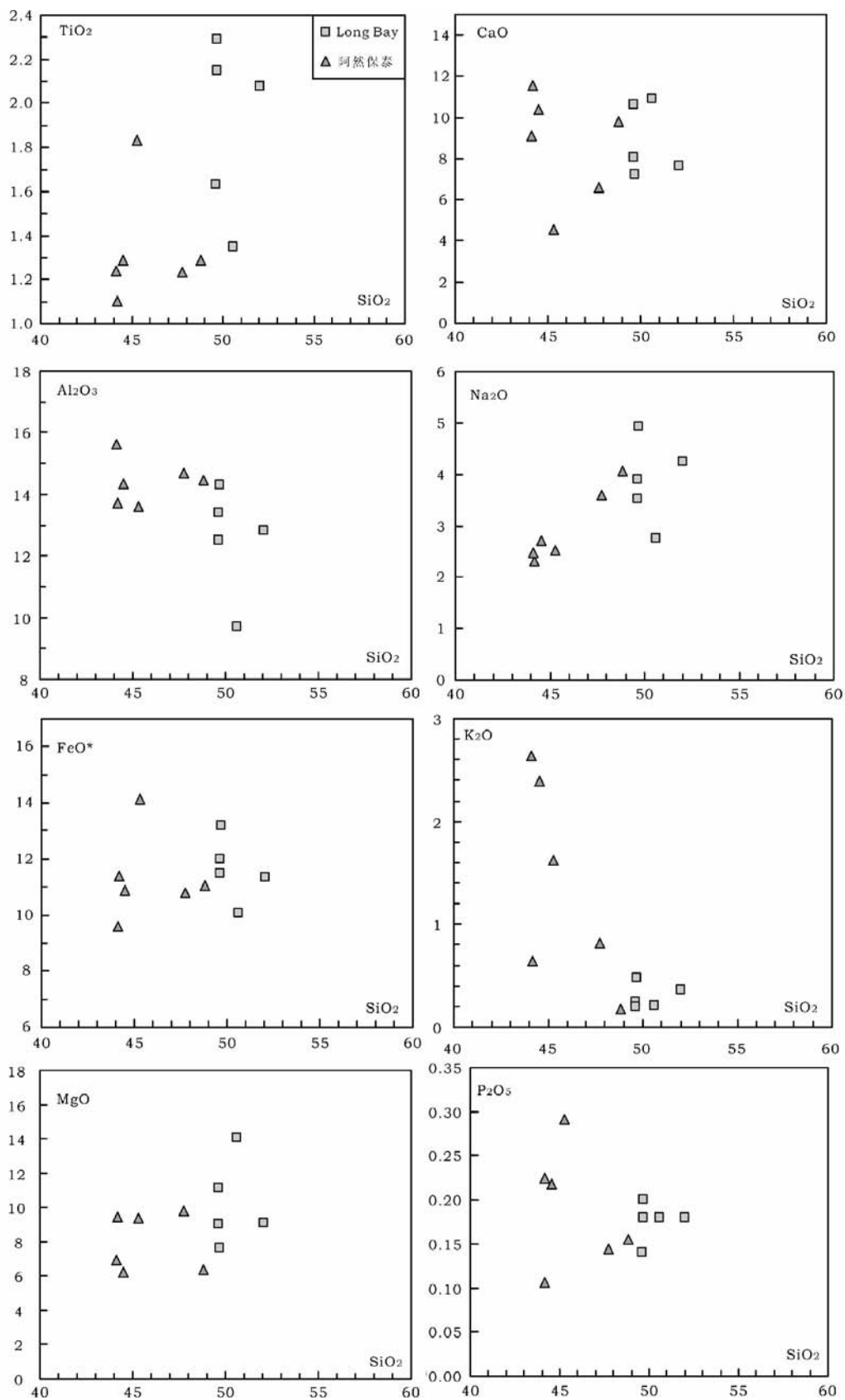


图6 阿然保泰玄武岩哈克图解 (Long Bay OIB 数据参考 Stern *et al.*, 1995)

Fig. 6 Harker diagram of Aeranbaotai (Long Bay OIB data after Stern *et al.*, 1995)

表1 阿然保泰枕状玄武岩及辉长岩主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 The compositions of major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the pillow basalts and gabbros in Aranbaotai

样品号	LH-B5	LH-B8	LH-B10	LH-B11	LH-B19	LH-B21	LH-B16	LH-B17	样品号	LH-B5	LH-B8	LH-B10	LH-B11	LH-B19	LH-B21	LH-B16	LH-B17
岩石类型	玄武岩								辉长岩								
SiO ₂	44.18	44.14	47.74	44.52	48.81	45.29	46.01	44.70	Sn	3.72	0.70	7.56	2.73	0.87	1.28	0.66	0.56
TiO ₂	1.11	1.24	1.23	1.29	1.29	1.83	1.06	0.90	Sb	0.77	0.37	1.18	0.70	0.77	0.53	0.38	0.54
Al ₂ O ₃	13.73	15.62	14.68	14.33	14.44	13.60	16.30	14.89	Cs	2.7	3.6	2.74	4.37	0.679	3.15	3.39	1.32
Fe ₂ O ₃	11.40	9.61	10.81	10.86	11.06	14.14	10.14	9.83	Ba	149	527	189	220	46.9	253	468	198
MnO	0.17	0.16	0.15	0.15	0.19	0.12	0.16	0.16	Hf	1.96	2.74	2.55	2.79	2.68	4.23	2.27	1.95
MgO	9.46	6.91	9.79	6.21	6.39	9.38	7.78	9.32	Ta	0.76	1.16	0.72	0.78	0.72	2.43	0.97	0.83
CaO	11.57	9.12	6.62	10.42	9.79	4.54	12.22	12.85	W	11.2	21.5	23.5	25.1	31	15.4	36	25.3
Na ₂ O	2.32	2.48	3.59	2.72	4.06	2.52	1.86	1.73	Tl	0.03	1.30	0.13	0.11	0.06	0.09	0.23	0.09
K ₂ O	0.65	2.64	0.82	2.40	0.17	1.62	1.18	0.62	Pb	0.43	1.46	1.15	1.14	2.89	1.34	4.47	2.33
P ₂ O ₅	0.11	0.23	0.14	0.22	0.15	0.29	0.23	0.17	Bi	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
LOI	5.34	7.58	5.52	6.72	3.38	6.89	3.39	3.57	Th	1.4	3.26	2.27	2.49	2.48	3.85	2.93	2.45
Total	100.02	99.72	101.10	99.82	99.73	100.21	100.33	98.72	U	0.34	0.82	0.56	0.46	0.57	1.12	0.63	0.54
Mg [#]	66	63	68	57	57	61	64	69	La	7.95	18.6	12.2	13.8	11.7	27.9	23.9	19.5
Li	62.85	62.02	49.24	39.51	30.48	86.65	64.25	91.57	Ce	16.9	34.5	24	25.8	23.9	51.2	43.9	35.8
Be	0.71	1.33	0.69	1.03	0.89	1.43	0.98	0.84	Pr	2.33	4.34	3.16	3.51	3.21	6.38	5.26	4.35
Sc	40.84	43.49	48.09	48.21	45.68	38.31	44.76	51.77	Nd	10.5	17	13.3	14.7	13.6	25.3	20	16.6
V	261	274	291	332	302	360	251	238	Sm	2.79	4.04	3.6	3.77	3.64	5.7	4.2	3.58
Cr	325	183	215	182	152	34.9	407	515	Eu	1.01	1.45	1.21	1.34	1.20	1.88	1.40	1.26
Co	55.3	42.9	48.8	42	54.9	50.4	51.2	52.9	Gd	3.03	3.94	3.81	4.10	4.07	5.67	3.92	3.57
Ni	217	65.6	105	60.9	92.6	34.4	121	155	Tb	0.60	0.74	0.79	0.81	0.78	1.03	0.70	0.60
Cu	31.4	80.5	69.6	39	74.1	78.5	92.3	109	Dy	3.59	4.39	4.62	4.78	4.7	5.84	4.02	3.45
Zn	86.3	72.9	82.7	99.9	80.5	118	78.1	68.3	Ho	0.83	1.01	1.06	1.11	1.07	1.32	0.86	0.79
Ga	16.9	17.5	16.1	17.8	17	20.1	15.9	14.5	Er	2.26	2.72	2.83	3.04	2.94	3.52	2.31	1.93
Ge	1.73	1.53	1.34	1.93	1.30	1.36	1.27	1.30	Tm	0.31	0.38	0.40	0.42	0.42	0.50	0.31	0.29
Rb	8.58	38.4	13.2	44.7	3	20.3	41.1	19.1	Yb	1.99	2.48	2.67	2.77	2.71	3.18	2.02	1.81
Sr	308	284	331	317	326	205	670	740	Lu	0.31	0.37	0.41	0.41	0.42	0.46	0.29	0.25
Y	20	24.5	26.1	27.6	26.5	31.2	21.3	19	ΣREE	54.40	95.97	74.06	80.35	74.37	139.9	113.1	93.79
Zr	75.3	111	100	107	105	179	92.1	75.2	LREE/HREE	3.21	4.98	3.46	3.61	3.35	5.50	6.84	6.39
Nb	11.8	19.5	11.3	12	11.4	37.1	16.9	13.7	(La/Yb) _N	2.87	5.38	3.28	3.57	3.10	6.29	8.49	7.73
Mo	0.46	0.43	1.11	0.51	0.21	0.44	0.24	0.28	δEu	1.06	1.10	0.99	1.03	0.95	1.00	1.04	1.06
Cd	0.15	0.07	0.23	0.21	0.17	0.09	0.16	0.13	δCe	0.95	0.91	0.93	0.89	0.94	0.91	0.92	0.91
In	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.10	0.06	0.06									

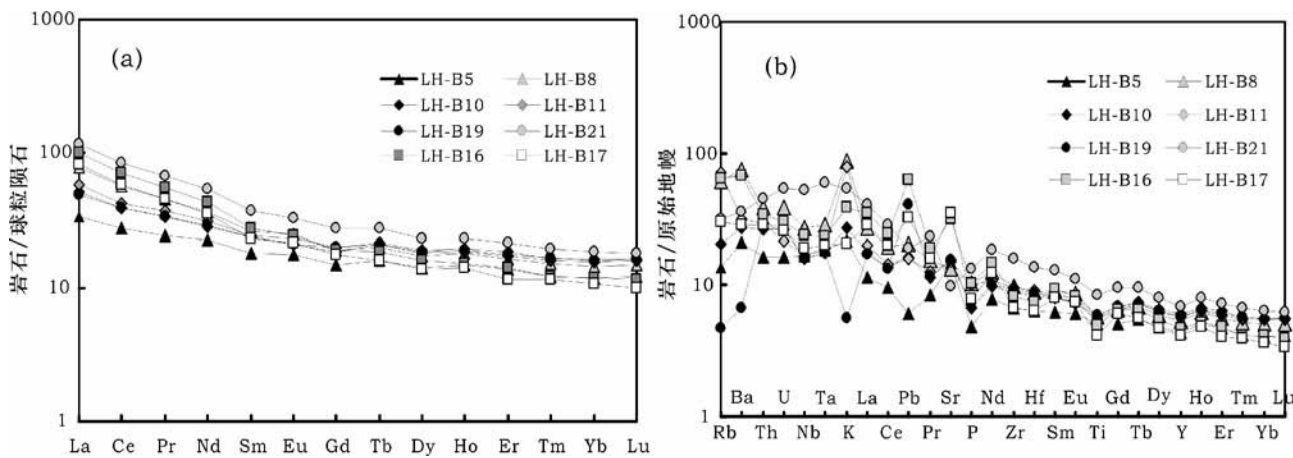


图7 球粒隕石标准化 REE 配分模式图(a)和原始地幔标准化图解(b) (据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and PM-normalized trace elements patterns (b) (after Sun and McDonough, 1989)

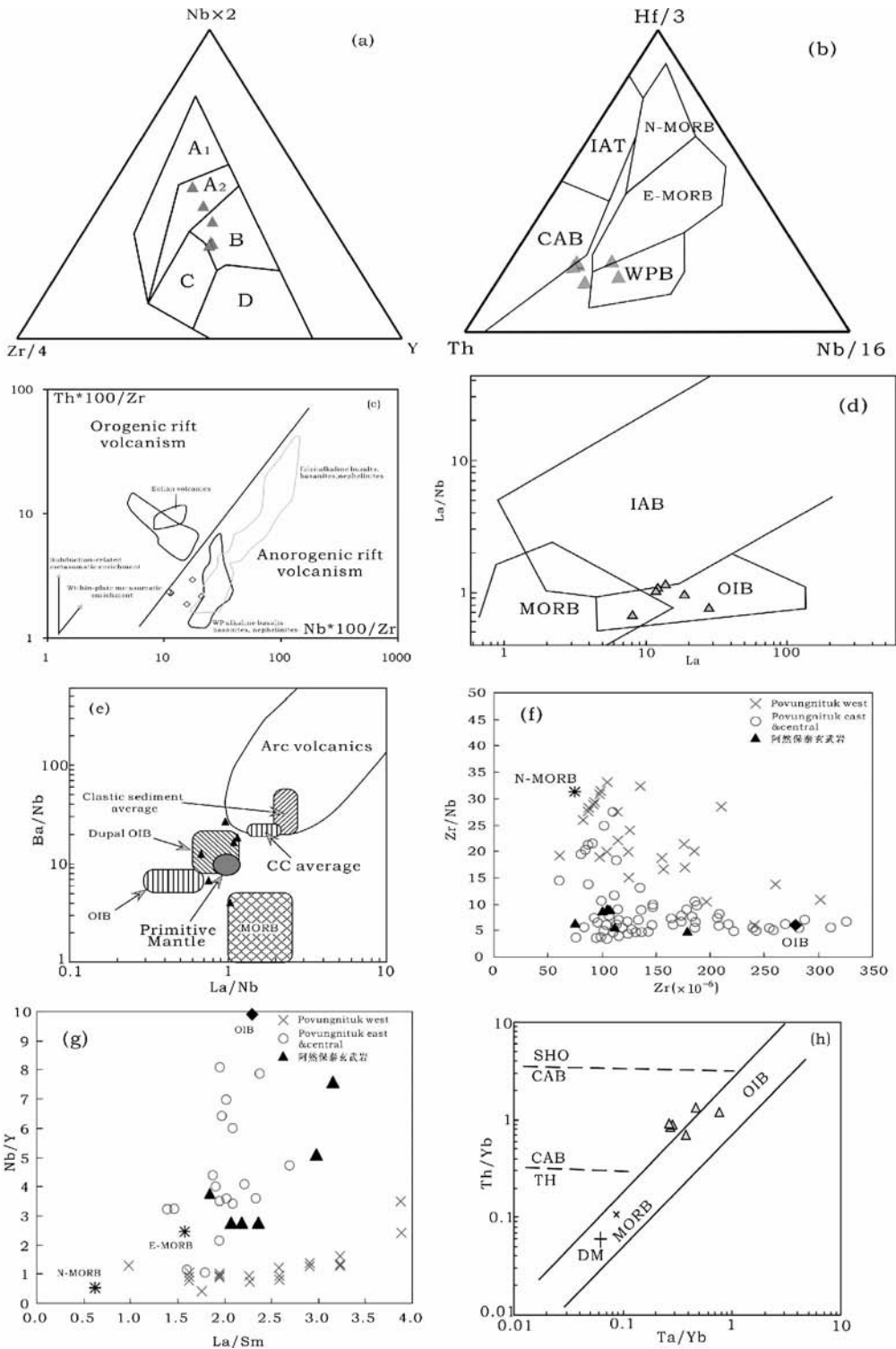


图8 阿然保泰玄武岩图解 Nb * 2-Zr/4-Y (a)、Hf/3-Th-Nb (b)、Th * 100/Zr-Nb * 100/Zr (c)、La-La/Nb (d)、Ba/Nb-La/Nb (e)、Zr-Zr/Nb (f)、La/Sm-Nb/Y (g)、Ta/Yb-Th/Yb (h) 图解

(a) 据 Meschede, 1986, A1-板内碱性玄武岩; A2-板内碱性玄武岩、板内拉斑玄武岩; B-E-MORB; C-板内拉斑玄武岩, 火山弧玄武岩; D-N-MORB、火山弧玄武岩; (b) 据 Wood, 1980, CAB-钙碱性玄武岩; IAT-岛弧拉斑玄武岩; WPB-板内玄武岩; (c) Bianchini *et al.*, 2008; (d) 据李曙光, 1993, IAB-岛弧玄武岩; MORB-大洋中脊玄武岩; OIB-洋岛玄武岩; (e) 据 Jahn *et al.*, 1999; (f) 和 (g) 据 Dunphy *et al.*, 1995; (h) 据 Pearce, 1983

Fig. 8 The Nb * 2-Zr/4-Y (a), Hf/3-Th-Nb (b), Th * 100/Zr-Nb * 100/Zr (c), La-La/Nb (d), Ba/Nb-La/Nb (e), Zr-Zr/Nb (f), La/Sm-Nb/Y (g) and Ta/Yb-Th/Yb (h) diagrams for basalts in Aranbaotai

(a) after Meschede, 1986, A1-within plate alkaline basalt; A2-within plate alkaline basalt, within plate tholeiite; B-E-MORB; C-within plate tholeiite, volcanic arc basalt; D-N-MORB, volcanic arc basalt; (b) after Wood, 1980, CAB-calc alkaline basalt; IAT-island arc tholeiite; WPB-within plate basalt; (c) after Bianchini *et al.*, 2008; (d) after Li, 1993, IAB-island arc basalt; MORB-mid-ocean ridge basalt; OIB-ocean island basalt; (e) after Jahn *et al.*, 1999; (f) and (g) after Dunphy *et al.*, 1995; (h) after Pearce, 1983

$10^{-6} \sim 139.9 \times 10^{-6}$), 无明显 Eu 和 Ce 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.95 \sim 1.10$, $\delta\text{Ce} = 0.89 \sim 0.95$)。在球粒陨石标准化曲线图上(图 7a), 样品轻稀土略富集, 重稀土相对略亏损, 轻重稀土轻度分馏, 说明岩浆上升较快, 没有发生斜长石的结晶分异作用, 地球化学特征基本反映源区的性质。稀土配分模式图(图 7a)呈右倾与典型的洋岛玄武岩相似(Sun and McDonough, 1989)。且辉长岩与玄武岩具有相似的稀土元素配分模式, 表明二者为同源岩浆的产物。

阿然保泰枕状玄武岩相容元素 Ni, Cr 含量较低(分别为 $34.4 \times 10^{-6} \sim 217 \times 10^{-6}$, $34.9 \times 10^{-6} \sim 325 \times 10^{-6}$) 低于原生玄武岩浆(Ni = $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$, Cr = $300 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$; Frey *et al.*, 1978; Hess, 1992), 表明该玄武岩经历了显著的橄榄石、单斜辉石等镁铁质矿物的分离结晶。阿然保泰枕状玄武岩 Nb、Ta 含量较高, Nb 介于 $11.3 \times 10^{-6} \sim 37.1 \times 10^{-6}$, Ta 含量介于 $0.72 \times 10^{-6} \sim 2.43 \times 10^{-6}$, 显示该玄武岩经历了明显的分异作用。在微量元素蛛网图(图 7b)中, 阿然保泰枕状玄武岩的大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Sr 较富集, 但含量变化较大。高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 相对亏损, Ti 表现出弱的负异常。玄武岩高场强元素 Nb/Ta 比值为 $15.27 \sim 16.81$, 平均为 15.76, 接近原始地幔值(Nb/Ta 为 17.5 ± 2.0), Zr/Hf 比值为 $38.42 \sim 42.32$, 平均为 39.67, 略高于原始地幔(Zr/Hf 为 36.27), 但远高于大陆地壳值(Nb/Ta 为 $12 \sim 13$; Zr/Hf 为 11), 表明岩浆在源区和上升过程中受地壳混染作用比较小。2 个辉长岩样品的曲线显示与玄武岩具有相似特征, 同样也表明二者为同源岩浆。

4 讨论

4.1 玄武岩构造环境分析

在 Nb-Zr-Y 三角图解(图 8a)中阿然保泰玄武岩落到板内碱性玄武岩、拉斑玄武岩和 E-MORB 两个区域内, 在 Hf-Th-Nb 三角图解(图 8b)中, 阿然保泰枕状玄武岩也落到到板内玄武岩和 E-MORB 两个区域内, 这两个图解中显示该枕状玄武岩可能为板内玄武岩和富集的洋中脊玄武岩, 需借助其他图解进一步判别。在 $\text{Th} \times 100/\text{Zr}-\text{Nb} \times 100/\text{Zr}$ 图解(图 8c)中该玄武岩形成于非造山环境, 是板内交代富集作用的产物。在 La-La/Nb 图(图 8d)中阿然保泰枕状玄武岩落入 OIB 区域中, 在 La/Nb-Ba/Nb 图解(图 8e)中, 主要落在洋岛玄武岩和 Dupal 洋岛玄武岩区域附近(Jahn *et al.*, 1999)。此外, 阿然保泰枕状玄武岩还显示出具有相对较低的 Zr/Nb 和较高 $(\text{Nb}/\text{Y})_N$ 特征(图 8f, g), 与加拿大魁北克 Cape Smith 带中 Povungnituk 东部和中部的玄武岩一致, 而不同于

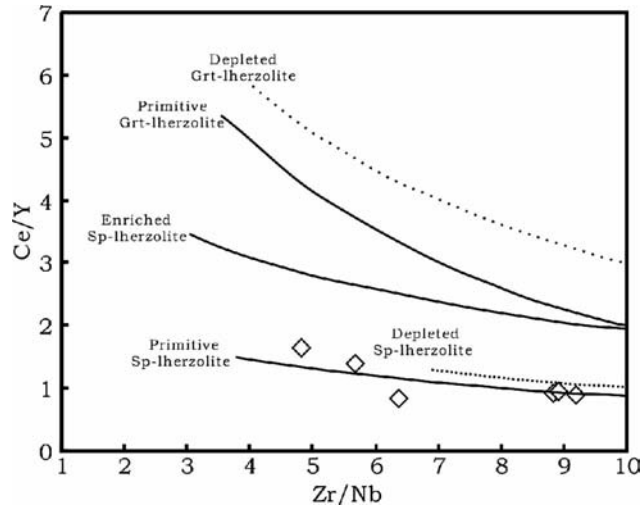


图9 阿然保泰玄武岩 Ce/Y-Zr/Nb 图解(据 Viccaro and Cristofolini, 2008)

Fig. 9 The Ce/Y-Zr/Nb diagrams of basalts in Aranbaotai (after Viccaro and Cristofolini, 2008)

Povungnituk 西部玄武岩(Dunphy *et al.*, 1995)。在 Ta/Yb-Th/Yb 图中该枕状玄武岩落入到洋岛玄武岩附近(图 8h)。阿然保泰枕状玄武岩 Zr/Nb ($4.82 \sim 9.21$)、Ba/Nb ($4.11 \sim 27.69$)、Ba/Th ($18.91 \sim 161.66$)、Rb/Nb ($0.26 \sim 3.73$)、Th/Nb ($0.1 \sim 0.22$)、Th/La ($0.12 \sim 0.21$)、Ba/La ($4.01 \sim 28.33$) 和 La/Nb ($0.67 \sim 1.42$) 等微量元素比值特征均与洋岛玄武岩(OIB)相近。因此, 阿然保泰枕状玄武岩为典型洋岛玄武岩, 其形成构造环境为板内环境。共生红色硅质岩发育则表明阿然保泰枕状玄武岩喷发于大洋环境。

4.2 源区地球化学性质

微量元素特征比值表明玄武岩在演化过程受地壳混染较小, 其地球化学特征指示源区特征。在图 7h 中, 玄武岩落入地幔序列中, 部分点落在 MORB-OIB 区域线附近, 表明这些元素受岩浆源区的控制, 后期过程影响较小。

阿然保泰玄武岩低 Sm/Yb 值($\text{Sm}/\text{Yb} = 1.34 \sim 1.79$) 表明它们的原始岩浆应来源于岩石圈地幔尖晶石二辉橄榄岩的局部熔融。其 $(\text{Dy}/\text{Yb})_N$ 为 $1.15 \sim 1.23 < 1.5$, 也显示为源岩为尖晶石二辉橄榄岩。在 Zr/Nb-Ce/Y 图(图 9)中样品落入原始的尖晶石二辉橄榄岩趋势线上。尖晶石二辉橄榄岩稳定深度相对较浅, 使其部分熔融需要高的热流值(Géraldine *et al.*, 2008), 因此, 阿然保泰枕状玄武岩的形成于拉张环境。在拉张情况下, 压力的降低有利于岩石的熔

融;同时,地壳的拉张减薄还可伴随深部软流圈地幔的上涌和幔源岩浆的底侵作用,使地壳加热而进一步发生部分熔融。

4.3 地质意义

早期区调资料将喀喇昆仑一带二叠系地层划分为下二叠统加温达坂组,为一套海相碎屑岩和灰岩,为南羌塘沉积台地相-浅海相沉积。韩芳林(2006)根据阿然保泰一带纯的灰岩、生物灰岩与中、基性火山岩共生出露的特征,推测认为其洋岛建造,阿然保泰玄武岩地球化学特征证实其为洋岛玄武岩,表明该区发育洋壳建造。

区域大地构造研究表明青藏高原西北部(图2),康西瓦-木孜塔格-阿尼玛卿缝合带以南到班公错-怒江缝合带以北地区为晚古生代裂谷进一步演化的洋盆,其间夹持若干地块,构成复杂的多陆块海洋格局(李荣社等,2008)。在西藏西北部的龙木错-双湖缝合带以南的羌塘中部地区出露大量的二叠纪玄武岩,多为裂谷到准洋中脊玄武岩(王权等,2006;翟庆国等,2006)可能代表了古特提斯洋洋盆的位置(李荣社,2009^①)。但在羌塘中部以西,该时期的玄武岩出露小,研究中关注较少。阿然保泰一带发育的二叠纪洋岛玄武岩,可能代表该主洋盆西端演化的记录。为喀喇昆仑地区晚古生代多岛洋格局提供了新的证据。

5 结论

阿然保泰西部一带发育一套玄武岩、灰岩、凝灰岩地层,其玄武岩,枕状构造十分典型,岩石具气孔、杏仁状构造。玄武岩岩石化学 SiO_2 为 44.14% ~ 48.81%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 2.97% ~ 5.12% 属于碱性系列岩石,微量元素特征显示为洋岛玄武岩,地球化学特征表明源岩为尖晶石二辉橄榄岩。该洋岛玄武岩的发现表明该区晚古生代曾发育洋壳建造。阿然保泰玄武岩可能是古特提斯洋洋盆在喀喇昆仑地区演化的记录,为探讨该区的地质构造演化提供新的资料。

致谢 本文野外地质工作得到了国家 305 项目办公室和新疆喀什库车干县县委及国土资源局的支持,实验室分析测试工作得到中国科学院矿床地球化学国家重点实验室胡静高工、胡晓燕的帮助,在此一并致谢。

References

Bianchini G, Beccaluva L and Siena F. 2008. Post-collisional and intraplate Cenozoic volcanism in the rifted Apennines/Adriatic domain. *Lithos*, 101:125 - 140

Cui JT, Bian XW and Wang GB. 2006. Geological composition and evolution of the western Kunlun. *Geology of Shaanxi*, 24(1): 1 - 11 (in Chinese with English abstract)

Deng WM. 1995. Geological features of ophiolite and tectonic significance in the Karakorum-West Kunlun Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 11

(Suppl.): 98 - 111 (in Chinese with English abstract)

Ding DG, Liu WX, Wang DX and Sun SQ. 1998. Early Permian back-arc basin in the Karakorum Mountains. *Regional Geology of China*, 17(1):74 - 79 (in Chinese)

Dong YG, Guo KY, Xiao HL, Zhang CL, Wang AG and Zhao Y. 2003. Ore prospects of the West Kunlun area in western China. *Geology in China*, 30(2):173 - 178 (in Chinese with English abstract)

Dunphy JM, Ludden JN and Francis D. 1995. Geochemistry of mafic magmas from the Ungava orogen, Qukbec, Canada, and implications for mantle reservoir compositions at 2.0Ga. *Chemical Geology*, 120: 361 - 380

Frey FA, Green DH and Roy SD. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis; A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from southeastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal of Petrology*, 19:463 - 513

Géraldine H, Jean-Philippe E, Bernardo B, Erwan B, Michel F and Jo C. 2008. Geochemical and petrological constraints on rear-arc magma genesis processes in Ecuador: The Puyo cones and Mera lavas volcanic formations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176:107 - 118

Han FL. 2006. Tectonic evolution and mineralization of the western Kunlun accretion-type orogen. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1 - 164 (in Chinese with English summary)

Hess PC. 1992. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalts. In: Morgan JP, Blackman DK and Sinton JM (eds.). *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges*. Geophysical Monograph 71, American Geophysical Union, 67 - 102

Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157: 119 - 146

Ji WH, Han FL, Wang JC and Zhang JL. 2004. Composition and geochemistry of the Subashi ophiolitic mélange in the West Kunlun and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 23(12):1196 - 1201 (in Chinese with English abstract)

Ji WH, Chen SJ, Li RS, He SP, Zhao ZM and Wang C. 2009. Geological feature of copper mineralization and its ore-prospecting significance in Kungai Mountains, West Kunlun, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9):1361 - 1367 (in Chinese with English abstract)

Li HB, Vaili F, Xu ZQ, Yang JS, Tapponnier P, Laeassin R, Chen SY, Qi XX and Chevalier ML. 2006. Deformation and tectonic evolution of the Karakorum fault western Tibet. *Geology in China*, 33(2):239 - 255 (in Chinese with English abstract)

Li HB, Valli F, Liu DY, Xu ZQ, Yang JS, Arnaud N, Tapponnier P, Laeassin R, Chen SY and Qi XX. 2007. The formation age of Karakorum fault; Constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons. *Chinese Science Bulletin*, 52(4):438 - 447 (in Chinese)

Li RS, Ji WH and Yang YC. 2008. *Geology of Kunlun Mountains and Its Adjacent Areas*. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 400 (in Chinese)

Li SG. 1993. Ba-Nb-TH-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2):146 - 157 (in Chinese with English abstract)

Meschede MA. 1986. Method of discriminating between different types of mid-ocean basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem. Geol.*, 56:207 - 218

Pan GT, Zhu DC, Wang LQ, Liao ZL, Geng QR and Jiang XS. 2004. Bangong Lake-Nu River suture zone as the northern boundary of Gondwanaland; Evidence from geology and geophysics. *Earth Science Frontiers*, 11(4):371 - 382 (in Chinese with English abstract)

① 李荣社. 2009. 第二届构造地质与地球动力学学术研讨会报告(西安)

- Pearce JA. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: Hawkesworth *et al.* (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich: Shiva, 230–249
- Stern RA, Syme EC and Lucas SB. 1995. Geochemistry of 1.9Ga MORB- and OIB-like basalts from the Amisk collage, Flin Flon Belt, Canada; Evidence for an intra-oceanic origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(15):3131–3154
- Sun HT, Li CJ, Wu H, Wang HJ, Qi SJ, Chen GM, Liu ZT and Gao P. 2003. Introduction to the Western Kunlun Metallogenic Province. Beijing: Geological Publishing House, 1–255 (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- The Integrated Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau, Chinese Academy of Sciences. 2000. *The Geological Formation and Evolution of the Karakorum-Kunlun Mountains*. Beijing: Science Press, 1–525 (in Chinese)
- Viccaro M and Cristofolini R. 2008. Nature of mantle heterogeneity and its role in the short-term geochemical and volcanological evolution of Mt. Etna (Italy). *Lithos*, 105: 272–288
- Wang Q, Xu SC, Wei RX, Yang YS, Tian ZY, Dong AG, Yang WB and Wei YF. 2006. Characteristic and tectonic setting of volcanic rocks of the Permian Zhanjia Formation in the Tuoheping Co area, northern Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 25(1–2):146–155 (in Chinese with English abstract)
- Wood DA. 1980. 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. *Earth Planet Sci. Lett.*, 50:11–30
- Xiao XC, Liu X and Gao R. 2004. The Crustal Structure and Tectonic Evolution of South Xinjing, China. Beijing: Commercial Press, 1–270 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Zhang JX, Jiang M, Li HB and Cui JW. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3):193–205 (in Chinese with English abstract)
- Zhai QG, Li C and Huang XP. 2006. Geochemistry of Permian basalt in the Jiaomuri area, Central Qiangtang, Tibet, China, and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 25(12):1419–1427 (in Chinese with English abstract)
- 盆地. 中国区域地质, 17(1):74–79
- 董永观, 郭坤一, 肖惠, 张传林, 王爱国, 赵宇. 2003. 西昆仑地区成矿远景. *中国地质*, 30(2):173–178
- 韩芳林. 2006. 西昆仑增生造山带演化及成矿背景. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1–164
- 计文化, 韩芳林, 王炬川, 张俊量. 2004. 西昆仑于田南部苏巴什蛇绿混杂岩的组成、地球化学特征及地质意义. *地质通报*, 23(12): 1196–1201
- 计文化, 陈守建, 李荣社, 何世平, 赵振明, 王超. 2009. 西昆仑昆盖山北坡铜矿化点的地质特征及其找矿意义. *地质通报*, 28(9): 1361–1367
- 李海兵, Franck Valli, 许志琴, 杨经绥, Paul Tapponnier, Robin Lacassin, 陈松永, 戚学祥, Marie-Luce Chevalier. 2006. 喀喇昆仑断裂的变形特征及构造演化. *中国地质*, 33(2):239–255
- 李海兵, Franck Valli, 刘敦一, 许志琴, 杨经绥, Nicolas Arnaud, Paul Tapponnier, Robin Lacassin, 陈松永, 戚学祥. 2007. 喀喇昆仑断裂的形成时代: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的制约. *科学通报*, 52(4):438–447
- 李荣社, 计文化, 杨永成. 2008. 昆仑山及邻区地质. 北京: 地质出版社, 1–400
- 李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Nb-Th-La 判别图. *岩石学报*, 9(2):146–157
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 廖忠礼, 耿全如, 江新胜. 2004. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据. *地学前缘*, 11(4):371–382
- 孙海田, 李纯杰, 吴海, 王宏君, 祁世军, 陈贵民, 刘振涛, 高鹏. 2003. 西昆仑金属成矿省概论. 北京: 地质出版社, 1–255
- 王权, 续世朝, 魏荣珠, 杨月生, 田志勇, 董挨管, 杨五宝, 魏云峰. 2006. 青藏高原羌塘北部托和平错一带二叠系展金组火山岩的特征及构造环境. *地质通报*, 25(1–2):146–155
- 肖序常, 刘训, 高锐. 2004. 新疆南部地壳结构及构造演化. 北京: 商务印书馆, 1–270
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 73(3):193–205
- 翟庆国, 李才, 黄小鹏. 2006. 西藏羌塘中部角木日地区二叠纪玄武岩的地球化学特征及其构造意义. *地质通报*, 25(12):1419–1427
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 2000. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社, 1–525

附中文参考文献

- 崔建堂, 边小卫, 王根宝. 2006. 西昆仑地质组成与演化. *陕西地质*, 24(1):1–11
- 邓万明. 1995. 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. *岩石学报*, 11(增刊):98–111
- 丁道桂, 刘伟新, 王道轩, 孙世群. 1998. 喀喇昆仑地区早二叠世弧后