1000-0569/2009/025(04)-0916-24 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

扎河坝蛇绿混杂岩内富铌玄武(安山)岩的地球化学特征及其地质意义*

牛贺才[1] 单强[1] 于学元[1] 张兵[3] 罗勇[1,2] 杨武斌[1,2]

NIU HeCai[1], SHAN Qiang[1], YU XueYuan[1], ZHANG Bing[3], LUO Yong[1,2] and YANG WuBin[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地球科学学院,北京 100049
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队,乌苏 833000
1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*
2. *College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3. *No.*7 *Geological Survey Team, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration, Wusu* 833000, *China*

2008-11-25 收稿, 2009-03-15 改回.

Niu HC, Shan Q, Yu XY, Zhang B, Luo Y and Yang WB. 2009. Geochemistry of the Nb-enriched basalt and its significances in Zaheba ophiolite melange. ***Acta Petrologica Sinica*****, 25(4):916 – 924**

Abstract Nb-enriched basaltic rocks are identified within the Zaheba ophiolite melange in the eastern Junggar, northern Xinjiang. They show high Nb contents of 7.22×10^{-6} to 21.91×10^{-6}, SiO_2 contents of 46.71% to 57.65% and TiO_2 contents of 1.00% to 1.76%, similar to Nb-enriched basalts from Archaean greenstone belt. The REE patterns are of LREE enrichment with weak Eu anomalies, suggesting obvious fractionation. Moreover, they are characterized by obviously negative Nb anomalies and negative Ti anomalies, suggesting that the Nb-enriched basalts were probably derived from partial melting of mantle peridotite that interacted with slab melt under high geothermal gradient in the intra-ocean arc setting of the Paleo-Asian Ocean. Moreover, Nb-enriched basalts occurred in the Zaheba ophilite as a fore-arc accretionary prism. The association of the Nb-enriched basalts with ultra-high pressure metamorphic rocks found previously by the authors implies that more than two times of the Paleo-Asian oceanic crust subduction with different characteristics were recorded in the ophiolite. Therefore, multiple partial melting of the subducting oceanic crust and ocean sediments, and the succedent interactions between the slab melt and peridotite in the mantle wedge was probably responsible for the crust growth and the formation of central Asian orogenic belts.

Key words Nb-enriched basalt; Zaheba ophiolite melange; Oceanic crust subduction; Oceanic sediment

摘 要 在新疆北部东准噶尔的扎河坝蛇绿混杂岩中发现的富铌玄武(安山)岩,其 SiO_2 含量介于 46.71% ~57.65%,TiO_2 含量为 1.00% ~1.76%,与太古代绿岩带内富铌玄武(安山)岩相似,Na_2O 含量为 3.86% ~6.64%,P_2O_5 为 0.34% ~0.82%,明显高于太古代绿岩带富铌玄武(安山)岩。扎河坝富铌玄武岩铌含量介于 7.22×10^{-6} ~21.91×10^{-6} 之间,大于 7×10^{-6},与典型的富铌玄武岩相同。该岩石轻重稀土元素分馏较明显,其分布模式为无明显铕至弱负铕异常的右倾曲线。尽管铌的绝对含量较高,但由于钍和轻稀土元素更加富集,在微量元素蛛网图中扎河坝富铌玄武(安山)岩仍表现为铌的明显亏损,同时高场强元素 Zr、Hf 及 Ti 也表现出一定程度的亏损。微量元素地球化学特征显示,扎河坝蛇绿混杂岩内富铌玄武(安山)岩形成于古亚洲洋的洋内弧,它是被埃达克质岩浆交代的地幔楔橄榄岩部分熔融的产物,同时大洋沉积物及俯冲板块释放的流体对成岩作用也有一定的贡献。富铌玄武(安山)岩作为弧前增生楔定位在扎河坝蛇绿混杂岩体内,与早前报道的超高压变质岩共存表明,该蛇绿混杂岩体至少记录了两次性质不同的古亚洲洋洋壳俯冲,这更进一步证实新疆北部晚古生代新增陆壳是

* 国家自然科学基金(40673036)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-107)和"十一五"国家科技支撑计划(2006BAB07B02-03)联合资助.

第一作者简介:牛贺才,男,1963 年生,研究员,地球化学专业,E-mail: niuhc@gig.ac.cn

古亚洲洋多次俯冲作用的产物。

关键词 富铌玄武(安山)岩;扎河坝蛇绿混杂岩体;洋壳俯冲;大洋沉积物

中图法分类号 P588.144

1 引言

在中亚造山带分布着数量众多的蛇绿岩(Sengor *et al.*, 1993; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2002, 2004; Xu *et al.*, 2003; 朱永峰和徐新, 2006; 徐新等, 2007),它们的组成复杂多变,其中有些蛇绿混杂岩体内存在着高压-超高压变质岩岩片和玻镁安山岩岩块(Ota *et al.*, 2007; Zhang LF *et al.*, 2005,2007;Zhu and Ogasawara, 2002)。这些非蛇绿岩单元的研究不但可以揭示洋壳俯冲及蛇绿岩定位的动力学机制,而且对于探讨中亚造山带的形成演化具有重要的启示意义。扎河坝—阿尔曼泰蛇绿岩带位于新疆准噶尔盆地的东北缘(图 1),蛇绿岩块呈北西西向断续产出,总长约130km,宽约3~5km,它位于中亚造山带的东段,是中亚古生代造山带的重要组成部分(何国琦等, 2001; 李锦轶, 1995, 2004;肖文交等, 2006)。

本文在扎河坝蛇绿混杂岩体内发现了富铌玄武(安山)岩(以下简称富铌玄武岩)。富铌玄武岩是受埃达克岩熔体交代的地幔楔橄榄岩部分熔融的产物,其形成深度为70~100km,它在时空上与埃达克岩具有一致性(Defant *et al.*, 1992; Hollings and Kerrich, 2000; Polat and Kerrich, 2001; Sajona *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2003)。由于地质历史时期地球动力学背景不同,因此富铌玄武岩与埃达克岩共生组合所约束的构造环境也有所区别:新生代的富铌玄武岩与埃达克岩组合出现在岛弧的构造环境,同时表明俯冲板块是一个年轻的和(或)热的洋壳;太古代的富铌玄武岩与埃达克岩组合则出现在弧后的构造环境(Hollings and Kerrich, 2000)。最近的研究显示,在有些SSZ型蛇绿混杂岩体内存在埃达克岩块体(Ahmed, 2003; Ishiwatari *et al.*, 2006; Kerrich and Polat, 2006; Li and Li, 2003; Payot *et al.*, 2007; Qiu *et al.*, 2007; Scarrow *et al.*, 2001; Zhang SH *et al.*, 2007;边千韬等,2007)。尽管富铌玄武岩与埃达克岩在时空上紧密共生,但尚无显生宙蛇绿混杂岩体内发现富铌玄武岩岩块的报道,扎河坝富铌玄武岩的厘定填补了这一空白。系统的地球化学特征的研究不仅可以揭示该富铌玄武岩的形成环境及成因,而且还有助于进一步理解扎河坝蛇绿混杂岩体的形成机制和演化过程。

2 扎河坝富铌玄武岩的产状和岩石学特征

扎河坝蛇绿混杂岩体呈北西西向定位在下泥盆统的托让格库都克组地层中。下泥盆统托让格库都克组包括三个亚组:下亚组以凝灰质岩石为主;中亚组以安山岩和玄武岩为主,并有少量的凝灰质角砾岩和凝灰岩;上亚组则主要为火山碎屑岩并夹有少量的灰岩和含铁硅质岩。在扎河坝地区并不存在着完整的蛇绿岩组合,蛇绿混杂岩体主要由蛇纹岩(原岩为方辉橄榄岩、纯橄榄岩、二辉橄榄岩)、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、斜长花岗岩和硅质岩等组成,有些基性和超基性岩块与泥盆系托让格库都克组呈构造接触,显示其仰冲就位。扎河坝富铌玄武岩呈大小不等的岩块分布在蛇纹石化的超基性岩中,与其呈断层接触。岩石主要由斜长石和辉石组成,斑晶主要是自形板状斜长石,其次为少量辉石,两者粒度大小接近;基质主要由斜长石微晶组成,斜长石微晶呈交织状排列。岩石的后期蚀变主要表现为辉石的角闪石化、绿泥石化和斜长石的绢云母化和绿帘石化。此外,在薄片中还可以发现少量的葡萄石和碳酸岩矿物。

3 扎河坝富铌玄武岩的地球化学特征

3.1 主量元素地球化学特征

扎河坝蛇绿混杂岩体内富铌玄武岩 SiO_2 含量介于46.71%~57.65%(表 1)。TiO_2 含量为1.00%~1.76%,与加拿大 Superior Province 北部太古代绿岩带内富铌玄武岩的 TiO_2 含量相当(Hollings, 2002)。Al_2O_3 含量为14.92%~18.41%,一般大于16%。Fe_2O_3 含量为7.02%~12.51%,MgO 含量为2.82%~7.21%,CaO 含量为3.41%~7.21%。Na_2O 含量为3.86%~6.64%,K_2O 含量为0.09%~2.40%,一般大于1.0%,$Na_2O + K_2O$ 为4.90%~6.96%,明显高于太古代绿岩带和新生代富铌玄武岩(Hollings, 2002; Sajona *et al.*, 1996)。在 SiO_2-K_2O 图解中其投影点主要落在中钾玄武岩-玄武安山岩区域内(图略)。扎河坝富铌玄武岩 P_2O_5 含量介于0.34%~0.82%之间,明显高于太古代绿岩带富铌玄武岩,显示该类富铌玄武岩明显富磷。

3.2 微量元素地球化学特征

扎河坝富铌玄武岩铌含量介于 7.22×10^{-6}~21.9×10^{-6} 之间,大于 7×10^{-6},与典型的富铌玄武岩相同(Hollings, 2002; Sajona *et al.*, 1996)。La 含量为 16.8×10^{-6}~40.1×10^{-6},Yb 含量为 1.23×10^{-6}~2.34×10^{-6},与太古代绿岩带内典型富铌玄武岩的 La 和 Yb 含量相同(Polat and Kerrich, 2001),但 Y 含量为 13.2×10^{-6}~22.5×10^{-6},明显低于太古代绿岩带内富铌玄武岩(18.4×10^{-6}~59.4×10^{-6}),其 Zr 含量为 94.8×10^{-6}~243×10^{-6}。在 $(La/Yb)_{PM}$-Nb 和 Yb_{PM}-Nb 图解中(Polat and Kerrich, 2001),扎河坝富铌玄武岩的投影点均落在显生宙富铌玄武岩的区域内(图 2a, b),在 Nb/Y-Zr/TiO_2 ×0.0001 图解中其投影点主要

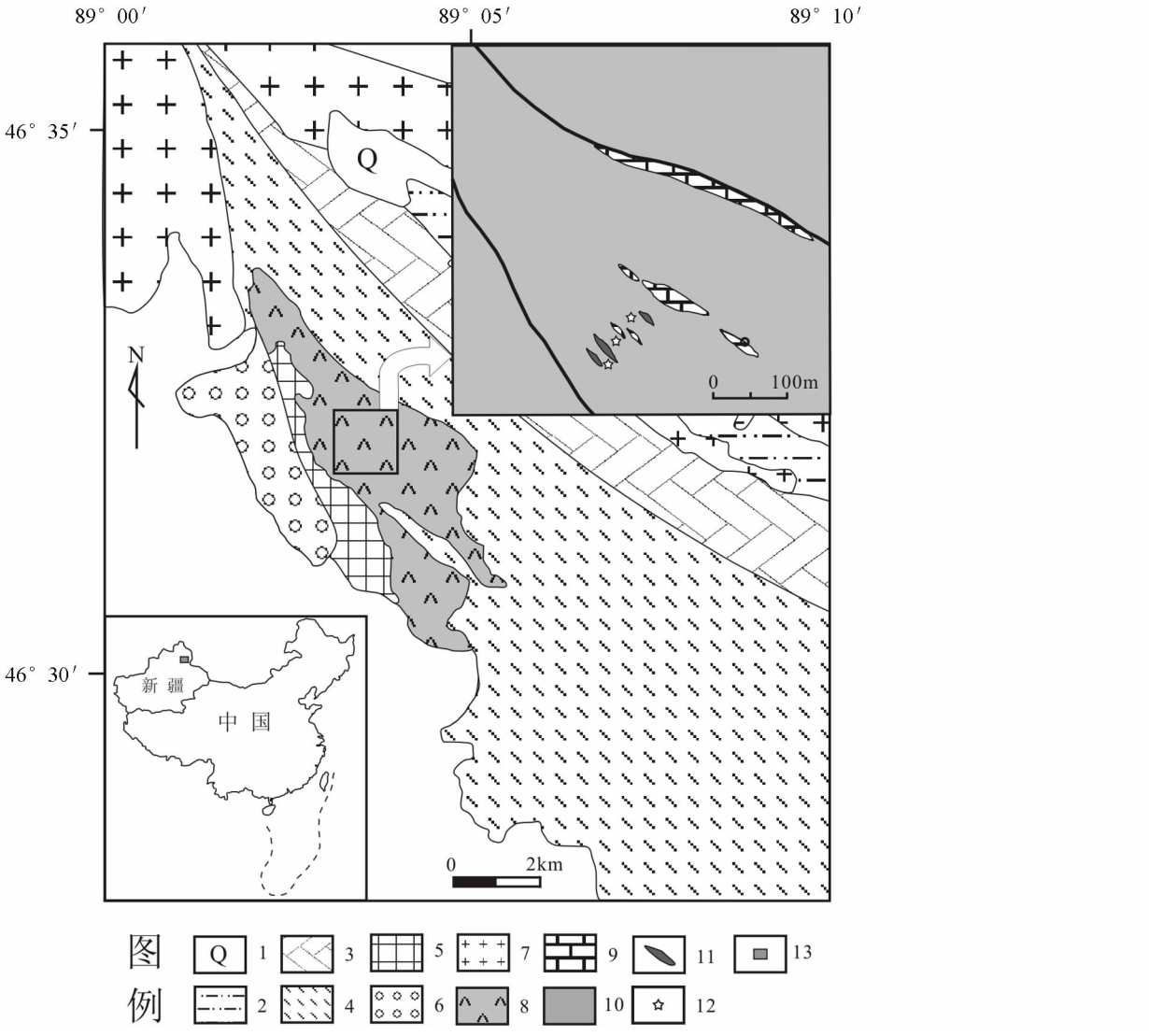

图 1 东准噶尔扎河坝地区地质简图

1-第四系;2-石炭系;3-中泥盆统蕴都喀拉组;4-下泥盆统托让格库都克组;5-下泥盆统卡希翁组;6-下泥盆统江孜库都克组;7-花岗岩体;8-蛇绿混杂岩体;9-石英菱镁岩;10-蛇纹岩;11-石榴辉石岩或石榴角闪岩脉;12-富铌玄武岩; 13-研究区

Fig. 1 Simplified geological map of the Zaheba area, eastern Junggar

1-Quaternary; 2-Carboniferous; 3-Middle Devonian Wendukala Formation; 4-Lower Devonian Tuoranggekuduke Formation; 5-Lower Devonian Kawengda Formation; 6-Lower Devonian Jiangzierkuduke Formation; 7-Granite; 8-Ophiolites; 9-Quartz-magnesitite; 10-Serpentinite; 11-Garnet-noiclinopyroxenite and garnet amphibolite; 12-Nb-enriched basalt; 13-Study area

集中在亚碱性玄武岩的区域内,有少部分落在碱性玄武岩区域内(图 2c)。扎河坝富铌玄武岩的 Th 含量为 1.98×10^{-6} ~ 9.41×10^{-6},Ta 含量为 0.42×10^{-6} ~ 1.35×10^{-6},前者明显高于太古代绿岩带内富铌玄武岩,而后者与之相当(Hollings, 2002),在 Ta/Yb-Th/Yb 图解中(Kramer *et al.*, 2005),其投影点均落在钙碱性玄武岩的区域内(图 2d)。其它微量元素的分析结果也显示该富铌玄武岩具有钙碱性玄武岩的地球化学特征,如 Zr/Y 为 5.04 ~ 18.4, 属过渡型和钙碱性玄武岩,La/Yb 为 7.17 ~ 32.5,均大于 6,为典型的钙碱性玄武岩(Doebrich *et al.*, 2007; Kramer *et al.*, 2005)。大离子亲石元素锶和钡含量分别为 719×10^{-6} ~ 1336×10^{-6} 和 405×10^{-6} ~ 1994×10^{-6},明显高于太古代绿岩带和新生代富铌玄武岩(Hollings, 2002; Sajona *et al.*, 1996),锶和钡异常富集是扎河坝富铌玄武岩特有的地球化学特征。扎河坝富铌玄武岩稀土元素总量为 104×10^{-6} ~ 198×10^{-6},其 $(La/Yb)_{CN}$ 为 5.14 ~ 23.3,与太古代绿岩带内富铌玄武岩(2.65 ~ 18.19)相近(Polat and Kerrich, 2001),稀土元素分布模式为无明显铕异常至弱的负铕异常的右倾曲线(图 3a)。尽管铌的绝对含量较高,但由于钍和轻稀土元素更加富集,在微量元素蛛网图中扎河坝富铌玄武岩仍表现为铌的

表 1 扎河坝富铌玄武(安山)岩主量元素(wt%)和微量元素($\times10^{-6}$)含量

Table 1 Major(wt%) and trace($\times10^{-6}$) element abundances for Nb-enriched basalts from the Zaheba Ophiolite

样品号	03Z15	03Z22-2	03Z17	04Z06	04Z24	04Z24a	04Z29	04Z57
SiO_2	46.71	47.91	57.65	55.38	50.24		50.85	49.66
TiO_2	1.49	1.33	1.02	1.00	1.08		1.76	1.29
Al_2O_3	17.27	18.41	16.41	16.98	14.92		16.22	17.73
Fe_2O_3	12.51	10.51	9.06	7.02	8.41		9.95	10.58
MnO	0.18	0.16	0.12	0.11	0.11		0.12	0.16
MgO	6.55	4.47	2.82	4.68	7.21		5.50	4.96
CaO	4.78	7.90	3.41	5.16	7.96		6.06	6.58
Na_2O	3.86	4.81	5.55	6.64	4.19		4.38	4.35
K_2O	1.80	0.09	1.23	0.32	2.12		2.40	1.07
P_2O_5	0.41	0.40	0.34	0.41	0.51		0.82	0.36
LOI	4.11	3.76	2.36	1.68	3.30		1.78	2.96
Sc	35.2	27.7	20.3	13.4	20.5	18.6	17.7	31.3
Ti	8737	8737	4370	6475	6699	6466	10710	7899
V	3158	317	265	144	184	175	214	322
Cr	51.3	7.36	5.04	158	162	164.	128	9.36
Co	38.1	26.5	20.2	20.6	30.9	29.0	28.9	25.6
Ni	42.5	13.6	7.02	89.1	114	108	75.5	25.1
Rb	42.3	0.83	17.2	4.90	18.1	18.1	22.0	23.3
Sr	780	1336	776	971	831	849	1118	719
Y	22.5	20.2	20.1	13.2	13.2	13.4	14.7	17.5
Zr	114	122.	151	243	133	132	164	94.8
Nb	9.23	11.2	12.2	20.2	12.7	12.6	21.9	7.22
Ba	1994	405	1191	795	736	747	899	616
La	16.8	27.5	26.4	30.6	32.2	32.6	40.1	23.5
Ce	36.7	58.1	52.5	57.8	62.9	64.2	82.3	48.1
Pr	5.09	7.54	6.40	6.97	7.84	8.07	10.5	6.35
Nd	21.9	30.5	24.4	27.5	31.2	31.9	43.1	27.3
Sm	5.00	5.93	4.85	4.59	5.28	5.23	6.89	5.14
Eu	1.29	1.80	1.03	1.45	1.58	1.64	2.07	1.54
Gd	5.38	5.07	4.23	3.56	4.01	4.02	5.35	4.60
Tb	0.77	0.76	0.63	0.49	0.54	0.55	0.64	0.67
Dy	4.47	4.13	3.75	2.57	2.77	2.80	3.24	3.65
Ho	0.91	0.81	0.78	0.49	0.52	0.54	0.59	0.71
Er	2.49	2.21	2.25	1.32	1.37	1.43	1.45	1.94
Tm	0.38	0.30	0.34	0.19	0.20	0.21	0.20	0.28
Yb	2.34	1.90	2.13	1.25	1.23	1.27	1.24	1.68
Lu	0.36	0.30	0.34	0.20	0.17	0.19	0.17	0.26
Hf	2.63	3.01	3.72	5.37	3.27	3.35	4.16	2.75
Ta	0.42	0.60	0.68	1.35	0.68	0.69	1.16	0.48
Pb	3.96	1.09	21.06	8.13	8.07	8.72	4.18	1.18
Th	1.98	5.09	9.41	4.50	2.63	2.81	3.20	3.73
U	0.61	1.00	2.59	1.79	0.67	0.74	1.46	0.65

注:04Z24 和 04Z24a 为微量元素分析的平行样

明显亏损,同时高场强元素 Ta、Zr、Hf 及 Ti 也表现出一定程度的亏损(图 3b),显示出岛弧岩浆岩特有的地球化学特征。在 Hf-Th-Nb 三角图解中,扎河坝富铌玄武岩的投影点相对集中,均落在 D 区下半部(图 4a),也反映了该岩石具有岛弧钙碱性玄武岩的特征(Doebrich *et al.*, 2007)。在 Ba-Ba/Nb 和 La-La/Nb 图解中(图 4b、c),扎河坝富铌玄武岩的投影点均落在岛弧玄武岩区域内。

微量元素地球化学特征显示,本文所报道的玄武岩是形成于岛弧环境的富铌玄武岩。

袁超等(2006)曾报道在扎河坝蛇绿混杂岩体东北部的托让格库都克组地层中存在着反映洋壳消减的钾质玄武岩,尽管该类岩石与本文富铌玄武岩在许多地球化学特征上具有可比性,但前者是钾质岩系,其 $K_2O/Na_2O>0.6$,而后则为钠质火山岩,其 $K_2O/Na_2O<0.55$,此外二者在微量元素地球化学特征方面也存在着一定的差别。

4 富铌玄武岩的成岩机制探讨

尽管扎河坝富铌玄武岩的 Nb、La、Yb 含量变化较大(表 1),其变异系数分别为 37.99% 、22.26% 和 27.96%,但原始地幔标准化的 $(Nb/La)_{PM}$ 却十分稳定,在 $(Nb/Yb)_{PM}$-$(Nb/La)_{PM}$ 和 $(La/Yb)_{PM}$-$(Nb/La)_{PM}$ 图解中其投影点均平行于 X 轴($(Nb/Yb)_{PM}$ 和 $(La/Yb)_{PM}$)分布(图 5a, b),显示该岩石的形成主要受不含钛矿物相的岩石批式部分熔融过程的控

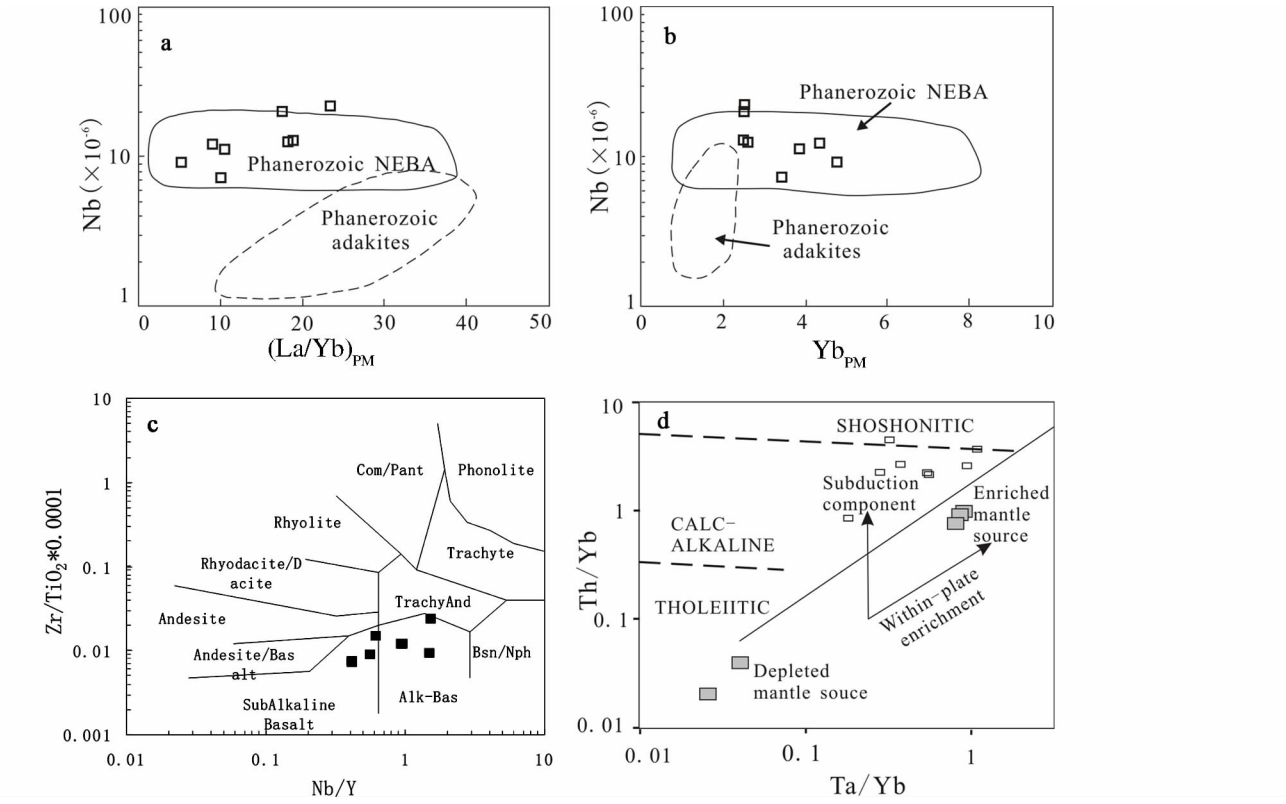

图 2 扎河坝富铌玄武岩(La/Yb)$_{PM}$-Nb (a), Yb$_{PM}$-Nb (b), Nb/Y-Zr/TiO$_2$ ×10^{-4}(c)和 Ta/Yb-Th/Yb(d)图解

a 和 b 据 Polat and Kerrich (2001); c 据 Winchester and Floyd (1977); d 据 Kramer *et al.* (2005)

Fig. 2 The (La/Yb)$_{PM}$-Nb(a), Yb$_{PM}$-Nb(b), Nb/Y-Zr/TiO$_2$ ×10^{-4}(c) and Ta/Yb-Th/Yb(d) diagrams for Nb-enriched basalts from the Zaheba Ophiolite

a and b after Polat and Kerrich(2001); c after Winchester and Floyd (1977), d after Kramer *et al.* (2005)

制。扎河坝富铌玄武岩的 Yb$_{CN}$ 值为 7.22 ~ 13.76,(La/Yb)$_{CN}$为 5.14 ~ 23.29,在 Yb$_{CN}$-(La/Yb)$_{CN}$图解中其投影点一部分落在板片成因的熔岩区域内,一部分则落在了脱水板片熔岩区域内(Polat and Kerrich, 2001),在 Y-Sr/Y 图解中,其投影点集中在埃达克质岩浆的区域内(图略)。上述微量元素地球化学特征显示,板片成因熔体确实参与了扎河坝富铌玄武岩的成岩作用。该富铌玄武岩的(Gd/Yb)$_{CN}$值的变化范围为 1.64 ~ 3.58,显示部分熔融的残余相中含有石榴子石,这说明扎河坝富铌玄武岩的成岩过程发生在相对浅的地幔环境(Hollings and Kerrich, 2006)。

图 2d 显示,扎河坝富铌玄武岩 Th/Yb 值不但高于亏损地幔源区,而且还高于富集地幔源区,同时其演化趋势也偏离了板内富集的演化趋势,该岩石 Th 的富集显然与俯冲板块的贡献有关。扎河坝富铌玄武岩的 Th/Nb 比值为 0.15 ~ 0.77,不但高于原始地幔(0.12)和 EM Ⅱ 型洋岛玄武岩(0.16),而且有的甚至高于陆壳的平均值(0.44)(Stern *et al.*, 2006),Turner *et al.* (1997)在研究洋岛玄武岩时发现,高的 Th/Nb 比值与俯冲洋壳上沉积物的熔融有关。Th 的高度富集表明俯冲洋壳上的沉积物参与了扎河坝富铌玄武岩成岩过程。图 5d 的投影则显示,扎河坝富铌玄武岩的 Zr/Nb 比值介于大洋中脊玄武岩平均值与大洋沉积物平均值之间,明显低于亏损地幔,这也在一定程度上反映了大洋沉积物对该类岩石成岩作用的影响。

前文已叙及扎河坝富铌玄武岩与其它地区同类岩石相比,锶和钡明显富集,锶的富集则可以用埃达克岩浆的交代来解释,那么又是什么机制导致钡的富集? 扎河坝富铌玄武岩的 Ba/Th 值大于大洋中脊玄武岩的 Ba/Th 值,且变化范围很大,表现为一部分低于大洋沉积物熔体的 Ba/Th 值(150 ~ 180),而另一部分则明显高于大洋沉积物熔体,因此洋壳沉积物的加入虽然合理地解释了钍的富集,但不能合理解释该岩石中钡的明显富集。Ba/Th-La/Sm 图解显示,扎河坝富铌玄武岩钡的富集主要受俯冲板片释放的流体控制。Zr/Nb-U/Th 图解显示(图 5d),扎河坝富铌玄武岩的 U/Th 比值高于沉积物和大洋中脊玄武岩,且其投影点变化趋势显示铀的富集受流体作用的控制,这也说明俯冲板片释放出的流体参与了该岩石的成岩作用。

上述研究显示,扎河坝蛇绿混杂岩中富铌玄武岩也是被埃达克质岩浆交代的地幔楔橄榄岩部分熔融的产物,但在其成岩过程中沉积物及俯冲板块释放的流体发挥了重要作用,并导致该岩石明显富集 Sr、Ba 及 Th 等元素。

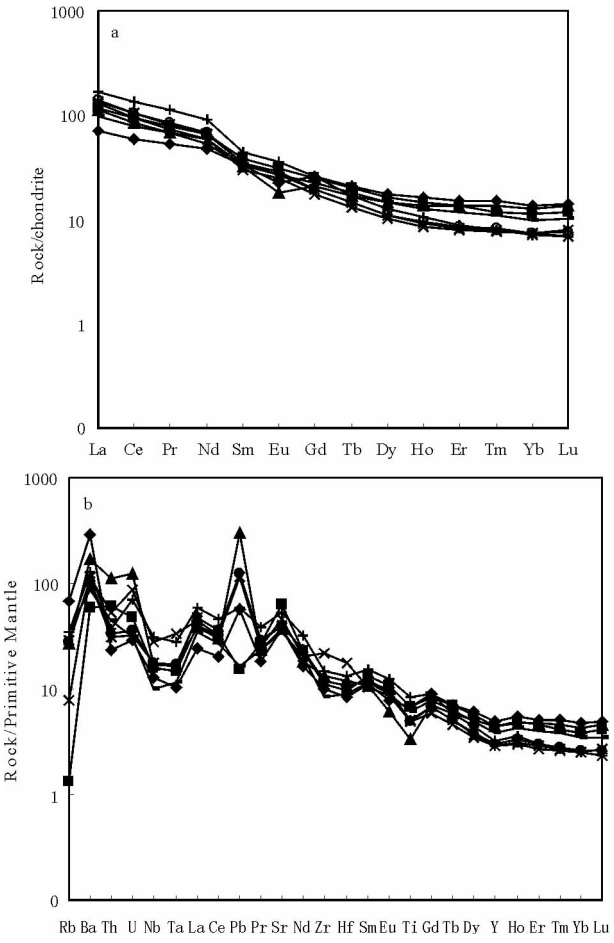

图3 扎河坝富铌玄武岩的稀土元素分布图(a)和微量元素蛛网图(b)(球粒陨石标准化数据引自 Evensen *et al.*, 1978; 原始地幔标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) of the Nb-enriched basalts from Zaheba Ophiolite (Normalizing values and plotting order are from Evensen *et al.*, 1978; Sun and McDonough, 1989)

5 扎河坝富铌玄武岩发现的地质意义

地球化学特征研究显示,扎河坝富铌玄武岩是弧火山岩,不是扎河坝蛇绿岩的组成单元,它实际上是一个俯冲带的增生楔。在洋壳俯冲过程中增生楔形成于大洋的海沟,它一般是由大洋沉积物和火山岩组成(如岛弧火山岩、洋岛玄武岩)。在许多造山带内增生楔、高压或(和)超高压变质岩岩片及蛇绿岩块共存,构成一个混杂岩体出现在板块缝合带,如在印度板块与亚洲板块的聚合带和中亚造山带均有这类混杂岩体的存在(Furnes *et al.*, 1991; Ota *et al.*, 2007)。作者在扎河坝蛇绿岩内厘定出了超高压变质的石榴石单斜辉石岩和石英菱镁岩(牛贺才等,2007;Niu *et al.*, 2008),本

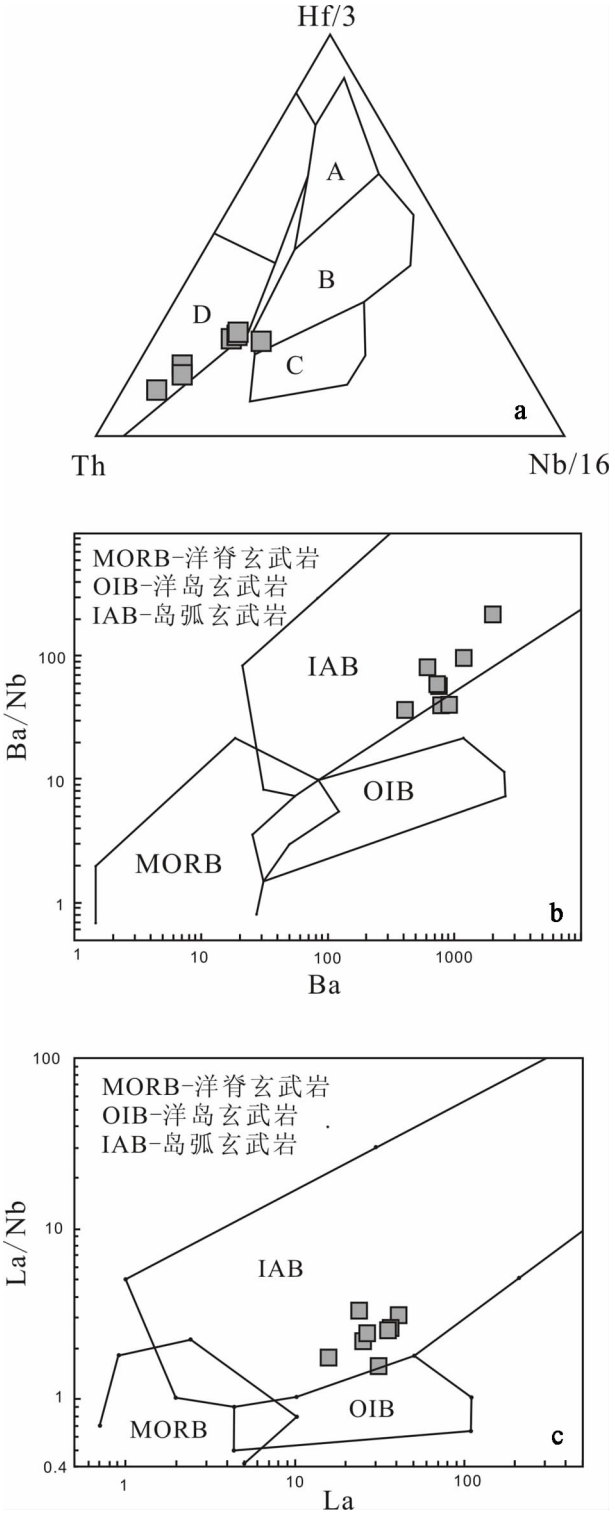

图4 扎河坝富铌玄武岩 Hf-Th-Nb(a)、Ba-Ba/Nb(b)和 La-La/Nb (c)图解(a 据 Wood, 1980;b 和 c 据李曙光, 1993)

Fig. 4 The Hf-Th-Nb (a), Ba-Ba/Nb (b) and La-La/Nb (c) for the Nb-enriched basalts from Zaheba Ophiolite (a after Wood, 1980; b and c after Li SG, 1993)

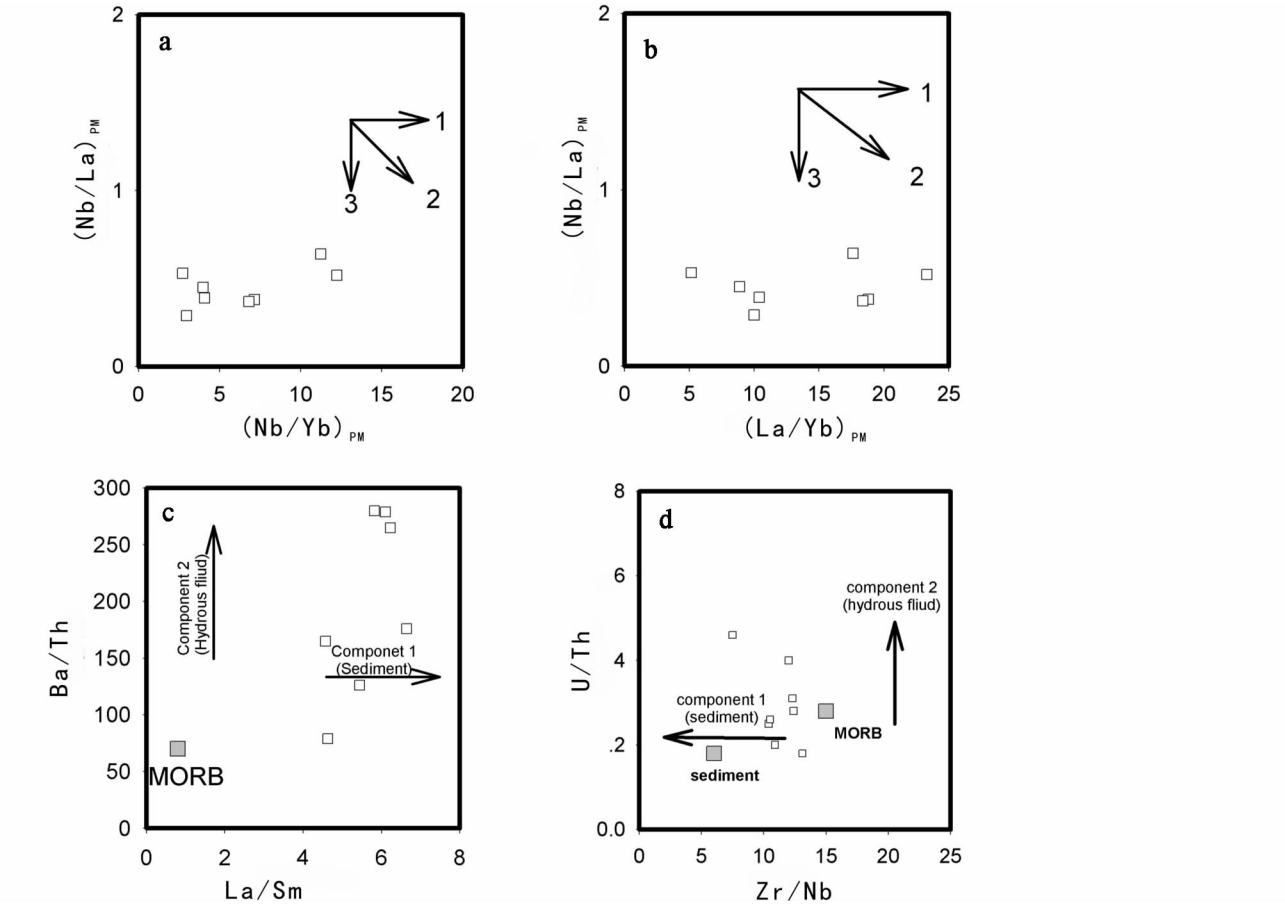

图 5 扎河坝富铌玄武岩的 $(Nb/Yb)_{PM}$-$(Nb/La)_{PM}$(a), $(La/Yb)_{PM}$-$(Nb/La)_{PM}$(b), Ba/Th-La/Sm(c)及 Zr/Nb-U/Th (d)图解

a-矢量 1 表示不含钛矿物相岩石批式部分熔融,矢量 2 表示含钛矿物相 + 流体相岩石的批式部分熔融或开放体系的分馏结晶,矢量 3 表示封闭体系具有高 Nb 分配系数矿物的分馏或表示同化混染,在同化混染期间混染的质量与结晶的质量相等;b-矢量所代表的意义与 a 相同;图 a 和 b 据 Hollings (2002)修改,图 c 和 d 则据 Stern *et al.* (2006)修改

Fig. 5 The $(Nb/Yb)_{PM}$-$(Nb/La)_{PM}$(a), $(La/Yb)_{PM}$-$(Nb/La)_{PM}$(b), Ba/Th-La/Sm (c) and Zr/Nb-U/Th (d) diagrams for the Nb-enriched basalts from Zaheba Ophiolite

a-Vectors are the effect of (1) bulk partial melting with no Ti-bearing phase, (2) bulk partial melting with a Ti-bearing phase + slab fluids or open-system fractionation, and (3) closed-system fractionation of aminerak with a high K_d for Nb or by assimilation of periodotite where mass assimilated equals the mass crystallized. b-Vectors are of the same effect as a; a and b after Hollings (2002), c and d after Stern *et al.* (2006)

文的研究又显示其内存在富铌玄武质的火山岩,这说明扎河坝蛇绿岩带实际上是一个由增生楔、超高压变质岩块及蛇绿岩组成的构造混杂岩体。富铌玄武岩所代表的增生楔与超高压变质岩关系如何?这对于揭示扎河坝构造混杂岩体的形成演化,反演准噶尔盆地东北缘陆壳增生过程以及探讨新疆北部中亚造山带的形成机制均具有重要的启示。微量元素地球研究表明,扎河坝富铌玄武岩形成于古亚洲洋的岛弧。在岛弧演化过程中最先形成的是拉斑玄武岩,而后可能出现玻镁安山岩,埃达克岩和富铌玄武岩的出现说明岛弧已经进入了一个相对成熟期。微量元素地球化学特征显示,扎河坝富铌玄武岩形成深度相对较浅,这就要求弧下地幔具有较高的地热梯度,且俯冲板片是一个相对热的洋壳(相对年轻)。已有的研究显示,与超高压变质岩相关的洋壳俯冲应发生在一个低地热异常的构造环境,其俯冲带的地热梯度一般应≦5℃/km(Liou *et al.*, 2000, 2007; Zhang RY *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005)。显然,扎河坝富铌玄武岩和超高压变质岩形成的地球动力学背景有明显差异,揭示二者之间的相互关系及它们与扎河坝蛇绿岩块本身的具体成因联系尚需进行更系统的地质学、岩石学、地球化学及同位素年代学的研究。

富铌玄武岩的厘定及超高压变质岩的发现表明扎河坝蛇绿岩带是一个典型的构造混杂岩带,它记录了不同动力学性质的洋壳俯冲过程,这更进一步证明新疆北部晚古生代大陆增生过程中古亚洲洋洋壳的俯冲方式不尽相同。由于大

洋岩石圈的地热结构不同,洋壳的性质及演化历史不同(如洋壳上是否含有沉积物,洋壳是热的还冷的等等)及俯冲动力学性质不同,不同性质的洋壳俯冲过程形成了不同的构造-岩浆地质体,从而使新疆北部晚古生代造山带的物质组成复杂多变。

6 结论

(1)岩石化学及微量元素地球化学研究显示,扎河坝蛇绿混杂岩内存在着富铌玄武岩,该富铌玄武岩形成于洋内岛弧环境,它是被埃达克质岩浆交代的地幔楔橄榄岩部分熔融的产物,大洋沉积物及俯冲板块释放的流体也参与了其成岩过程;

(2)富铌玄武岩的厘定及超高压变质岩的发现表明扎河坝蛇绿带是一个典型的构造混杂岩带,它记录了不同性质的古亚洲洋洋壳俯冲过程。由于大洋岩石圈的地热结构不同,洋壳的组成和演化历史及俯冲动力学性质不同,不同性质的洋壳俯冲过程形成了不同的构造-岩浆地质体,从而使新疆北部晚古生代造山带的物质组成复杂多变。

致谢 本文野外考察和资料收集工作得到新疆维吾尔自治区 305 项目办公室的大力支持,在样品分析过程中得到中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室及 The University of Queensland Centre for Microscopy and Microanalysis 的大力支持,赵志丹教授、钱青博士对论文初稿提出了建设性的修改意见,在此一并表示谢忱!

References

Ahmed Z. 2003. Geochemical and genetic implications of adakites associated with the suprasubduction-type Al-Ays ophiolite, northwestern Arabian shield. International Geology Review, 45: 176 – 190

Bian QT, Pospelov II, Li HM *et al.* 2007. Discovery of the end-Early Paleozoic adakite in the Buqingshan area, Qinghai Province, and its tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 23: 925 – 934 (in Chinese with English abstract)

Defant MJ, Jackson TE, Drummond MS *et al.* 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa-rica: An overview. Journal of the Geological Society, 49: 569 – 579

Doebrich JL, Al-Jehani AM, Siddiqui AA *et al.* 2007. Geology and metallogeny of the Ar Rayn terrane, eastern Arabian shield: Evolution of a Neoproterozoic continental-margin arc during assembly of Gondwana within the East African orogen. Precambrian Research, 158:17 – 50

Evensen NM, Hamilton PJ and O'Nions RK. 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42:1199 – 1212

Furnes H, Pedersen RB, Hertogen J *et al.* 1991. Magma development of the leka ophiolite complex, central Norwegian Caledonides. Lithos, 27: 259 – 277

He GQ, Li MS, Jia JD *et al.* 2001. A discussion on age and tectonic significance of ophiolite in eastern Junggar, Xinjiang. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis, 37: 852 – 858 (in Chinese with English abstract)

Hollings P. 2002. Archean Nb-enriched basalts in the northern Superior Province. Lithos, 64: 1 – 14

Hollings P and Kerrich R. 2000. An Archean arc basalt-Nb-enriched basalt-adakite association: The 2.7 Ga Confederation assemblage of the Birch-Uchi greenstone belt, Superior Province. Contrabutions to mineroalogy and petrology, 139: 208 – 226

Hollings P and Kerrich R. 2006. Light rare earth element depleted to enriched basaltic flows from 2.8 to 2.7 Ga greenstone belts of the Uchi Subprovince, Ontario, Canada. Chemical Geology, 227: 133 – 153

Ishiwatari A, Yanagida Y, Li YB *et al.* 2006. Dredge petrology of the boninite-and adakite-bearing Hahajima Seamount of the Ogasawara (Bonin) forearc: An ophiolite or a serpentinite seamount? Island Arc, 15: 102 – 118

Kerrich R and Polat A. 2006. Archean greenstone-tonalite duality: Thermochemical mantle convection models or plate tectonics in the early Earth global dynamics? Tectonophysics, 415: 141 – 165

Kramer W, Siebel W, Romer RL *et al.* 2005. Geochemical and isotopic characteristics and evolution of the Jurassic volcanic arc between Arica (18 degrees 30·S) and Tocopilla (22 degrees S), North Chilean Coastal Cordillera. Chemie Der Erde-Geochemistry, 65: 47 – 78

Li JY. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China. Geological Review, 50: 304 – 322 (in Chinese with English abstract)

Li JY. 1995. Main characteristics and emplacement processes of the East Junggar ophiolites, Xinjiang China. Acta Petrologica Sinica, 11 (suppl.):73 – 84 (in Chinese with English abstract)

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

Li WX and Li XH. 2003. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China: Geochemical and Nd isotopic evidence. Precambrian Research, 122: 29 – 44

Liou JG, Hacker BR and Zhang RY. 2000. Geophysics-Into the forbidden zone. Science, 287: 1215 – 1216

Liou JG, Zhang RY and Ernst WG. 2007. Very high-pressure orogenic garnet peridotites. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104: 9116 – 9121

Niu HC, Zhang HX, Shan Q *et al.* 2008. Discovery of super-silicic, super-titanic garnets in garnet-pyroxenite in Zaheba ophiolite and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 14:2186 – 2191

Niu HC, Shan Q, Zhang HX *et al.* 2007. $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the ultrahigh-pressure metamorphic quartz-magnesitite in Zaheba, eastern juggar, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 23: 1627 – 1634 (in Chinese with English abstract)

Ota T, Utsunomiya A, Uchio Y *et al.* 2007. Geology of the Gorny Altai subduction-accretion complex, southern Siberia: Tectonic evolution of an Ediacaran-Cambrian intra-oceanic arc-trench system. Journal of Asian Earth Sciences, 30: 666 – 695

Payot BD, Jego S, Maury RC *et al.* 2007. The oceanic substratum of Northern Luzon: Evidence from xenoliths within Monglo adakite (the Philippines). Island Arc, 16: 276 – 290

Polat A and Kerrich R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt – andesites, and adakites from late-Archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: Implications for late Archean subduction zone petrogenetic processes. Contributions to Mineralogy and Petrology, 141:36 – 52

Qiu RZ, Zhou S, Li TD *et al.* 2007. The tectonic-setting of ophiolites in the western Qinghai-Tibet Plateau, China. Journal of Asian Earth Sciences, 29: 215 – 228

Sajona FG, Maury RC, Bellon H *et al.* 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene Island arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao (Philippines). Journal of Petrology, 37: 693 – 726

Scarrow JH, Pease V, Fleutelot C *et al.* 2001. The late Neoproterozoic Enganepe ophiolite, Polar Urals, Russia: An extension of the

Cadomian arc? Precambrian Research, 110: 255 – 275
Sengor AMC, Natalin BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364: 299 – 307
Stern RJ, Kohut E, Bloomer SH *et al.* 2006. Subduction factory processes beneath the Guguan cross-chain, Mariana Arc: No role for sediments, are serpentinites important? Contributions to Mineralogy and Petrology, 151: 202 – 221
Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Oceanic Basins Geological Society London Special Publication. 42: 313 – 345
Turner S, Hawkesworth C, Rogers N *et al.* 1997. U-Th isotope disequilibria and ocean island basalt generation in the Azores. Chemical Geology, 139: 145 – 164
Wang Q, Zhao ZH, Bai ZH *et al.* 2003. Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basaltic rocks association in the Alataw Mountains, north Xinjiang: Interactions between slab melt and mantle peridotite and implications for crustal growth. Chinese Science Bulletin, 48: 2108 – 2115
Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20:325 – 343
Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. Journal of the Geological Society, 164: 31 – 47
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 and Planetary Science Letters, 50:11 – 30
Xiao WJ, Windley BF, Yan QR *et al.* 2006. SHRIMP zircon age of the aermantai ophiolite in the north Xinjiang area, China andits tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 80: 32 – 37 (in Chinese with English abstract)
Xiao WJ, Windley BF, Hao J *et al.* 2002. Arc-ophiolite obduction in the Western Kunlun Range (China): Implications for the Palaeozoic evolution of central Asia. Journal of the Geological Society, 159: 517 – 528
Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ *et al.* 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of Central Asia. American Journal of Science, 304: 370 – 395
Xu JF, Castillo PR, Chen FR *et al.* 2003. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: Implications for back-arc mantle evolution. Chemical Geology, 193: 137 – 154
Xu X, Zhu YF and Chen B. 2007. Petrology of the Kamste ophiolite melange from east Junggar, Xinjiang, NW China. Acta Petrologica Sinica, 23:1603 – 1610 (in Chinese with English abstract)
Yuan C, Xiao WJ, Chen HL *et al.* 2006. Zhaheba potassic basalt, eastern Junggar (NW China): Geochemical characteristics and tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 80: 254 – 263 (in Chinese with English abstract)
Zhang LF, Ai YL, Song SG *et al.* 2007. A brief review of UHP meta-ophiolitic rocks, southwestern Tianshan, western China. International Geology Review, 49: 811 – 823
Zhang LF, Song SG, Liou JG *et al.* 2005. Relict coesite exsolution in omphacite from Western Tianshan eclogites, China. American Mineralogist, 90: 181 – 186
Zhang RY, Yang JS, Wooden JL *et al.* 2005. U-Pb SHRIMP geochronology of zircon in garnet peridotite from the Sulu UHP terrane, China: Implications for mantle metasomatism and subduction-zone UHP metamorphism. Earth and Planetary Science Letters, 237: 729 – 743
Zhang SH, Zhao Y, Song B *et al.* 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a late Palaeozoic active continental margin. Journal of the Geological Society, 164: 451 – 463
Zhao RX, Liou JG, Zhang RY *et al.* 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Xugou UHP eclogite, Sulu terrane, eastern China. International Geology Review, 47: 805 – 814
Zhu YF and Ogasawara Y. 2002. Carbon recycled into deep Earth: Evidence from dolomite dissociation in subduction-zone rocks. Geology, 30: 947 – 950
Zhu YF and Xu X. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite melange in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China. Acta Petrologica Sinica, 22: 2833 – 2842 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

边千韬, Pospelov II, 李惠民等. 2007. 青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义. 岩石学报, 23: 925 – 934
何国琦, 李茂松, 贾进斗等. 2001. 中国新疆北部奥陶-志留系岩石组合的古构造、古地理意义. 北京大学学报(自然科学版), 37: 99 – 110
李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. 地质论评, 50: 304 – 322
李锦铁. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的主要特征及其侵位历史. 岩石学报, 11(增刊): 73 – 84
李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图. 岩石学报, 9:146 – 157
牛贺才, 单强, 张海祥等. 2007. 东准噶尔扎河坝超高压变质成因石英菱镁岩的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素年代学信息及地质意义. 岩石学报, 23: 1627 – 1634
袁超, 肖文交, 陈汉林等. 2006. 新疆东准噶尔扎河坝钾质玄武岩的地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 80: 254 – 263
肖文交, Windley BF, 阎全人等. 2006. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义. 地质学报, 80: 32 – 37
徐新, 朱永峰, 陈博. 2007. 卡姆斯特蛇绿混杂岩的岩石学研究及其地质意义. 岩石学报,23: 1603 – 1610
朱永峰,徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩. 岩石学报, 22:2833 – 2842