

阿尔泰造山带南缘中泥盆世苦橄岩 及其大地构造和岩石学意义

张招崇^{1,2}, 闫升好³, 陈柏林⁴, 周刚⁵, 何永康⁵, 柴凤梅¹, 何立新⁵

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

5. 新疆地质矿产局第四地质大队, 新疆阿尔泰 836500

摘要: 阿尔泰造山带南缘中泥盆世苦橄岩位于北塔山组地层的下部, 其上依次为玄武岩和安山岩。3种岩性共同的特点是贫钛、富铁, 具 Nb 和 Ta 的负异常以及高场强元素的丰度与 MORB 相当, 具有典型的岛弧火山岩系的特点, 是准噶尔洋板块向南西俯冲的结果。苦橄岩和玄武岩的 Zr/Nb 和 Sm/Nd 比值与 MORB 相当, 表明其源区为亏损的 MORB 源。然而玄武岩的 Ti/V 和 Zr/Sm 比值均高于苦橄岩, 而且玄武岩的稀土元素配分曲线呈平缓型, 而苦橄岩则显示出低的稀土总量以及弱富集轻稀土型, 指示了玄武岩是被从俯冲的洋壳释放的流体交代的含角闪石的尖晶石橄榄岩的地幔源区低程度部分熔融形成的, 苦橄岩则是在高温条件下被流体交代过的石榴石橄榄岩高程度熔融的产物。安山岩则可能是榴辉岩部分熔融形成的。

关键词: 苦橄岩; 地球化学; 岛弧; 中泥盆世; 阿尔泰造山带。

中图分类号: P588

文章编号: 1000-2383(2005)03-0289-09

收稿日期: 2005-02-28

Middle Devonian Picrites of South Margin of Altay Orogenic Belt and Implications for Tectonic Setting and Petrogenesis

ZHANG Zhao-chong^{1,2}, YAN Sheng-hao³, CHEN Bai-lin⁴, ZHOU Gang⁵, HE Yong-kang⁵, CHAI Feng-mei¹, HE Li-xin⁵

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

5. No. 4 Geological Team, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Altay 836500, China

Abstract: Middle Devonian picrites of the south margin of Altay orogenic belt occur in the lower part of the Beitashan Fm., overlain by basalts and andesite. They are characterized by a depletion of Ti and enrichment of Fe, negative anomalies of Nb and Ta with abundance of HFSE as MORB, exhibiting typical island arc magmas. They may result from the southwestward subduction of the Junggar ocean plate. The Zr/Nb ratios of the picrites and basalts resemble the MORB, suggesting MORB-like sources. However, Ti/V and Zr/Sm ratios are higher than those of picrites, and the basalts display flat-type REE-chondrite patterns whereas the picrites are characterized by lower total REE concentrations and a slight enrichment of light REE. All suggest that the basalts were generated by lower partial melting of amphibole-bearing spinel peridotite, which was metasomatized by fluids released from the subducted oceanic crust, and the picrites resulted from the higher degree of partial melting of metasomatized garnet peridotite under high temperatures. The andesite may have resulted from the partial melting of eclogites.

基金项目: 国家“305”项目(No. 2001BA609A-07-02); 地质过程与矿产资源国家重点实验室基金项目; 国家“973”项目(No. 2001CB409807)。

作者简介: 张招崇(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事火成岩岩石学和金属矿床的研究工作。E-mail: zhangzhaochong@sohu.com

Key words: picrite; geochemistry; island arc; Middle Devonian; Altay orogenic belt.

近年来,新疆地区在地质构造演化和矿产资源的研究方面取得了很大的进展,但是在很多方面还存在很大的分歧,如该区的古构造格局、古洋盆最后闭合的位置和时间等(李锦轶和徐新,2004),这些问题的存在某种程度上制约了人们对亚洲大陆形成与演化的认识,也影响到该区矿产资源的勘查与开发工作。最近,在阿尔泰造山带南缘中泥盆世北塔山组地层中发现了希勒克特哈腊苏斑岩铜矿,并且可能是我国继东天山之后又一条具有潜在的斑岩铜矿带(杨文平等,2005),因而该地层的构造背景也引起人们的关注。然而,前人对该地层的构造背景还存在不同的认识,概括起来主要有 2 种:一是岛弧(于学元等,1993;许继峰等,2001);二是陆内裂谷(卫管一和倪志耀,1990;韩宝福,1991)或地幔柱成因(王登红等,2002)。造成不同认识的原因主要是通过对其已经发生演化(如分离结晶作用和同化混染作用以及岩浆的混合作用等)的玄武岩及其共生岩石的地球化学特征得出的,因为岩浆的演化会模糊源区的地球化学信号。

苦橄岩是一种高温下形成的高镁熔岩,其低的粘度使其上升速度快,由此保证了岩浆从形成到喷发过程中基本不发生演化(Anderson, 1994),因此,苦橄岩可以更好地反映其源区特点。然而,苦橄岩十分稀少,北塔山组地层中苦橄岩的发现为探讨岩浆源区特征提供了很好的机会,本文试图通过对其地球化学特征的研究,在揭示其源区特征的基础上,探索其古构造背景。

1 火山岩的地质特征

研究区位于额尔齐斯—玛因鄂博断裂南侧,该断裂以南为准噶尔造山带,断裂以北为阿尔泰造山带。苦橄岩产于中泥盆世北塔山组地层中,该地层和下泥盆统托让格库都克组和下石炭统南明水组地层均呈断层接触关系。北塔山组地层呈北西向展布(图 1),出露厚度约 10~15 km,总体上为一套海相火山—沉积岩系。其底部由火山角砾岩和集块角砾岩夹玄武岩组成,中下部主要为熔岩,其中苦橄岩位于下部,有 2 层,第一层厚约 10 m,第二层厚 20~50 m,2 层苦橄岩之间为玄武岩,中部主要为玄武岩和安山岩(图 2),其中安山岩位于玄武岩之上。其中

苦橄岩与玄武岩、玄武岩和安山岩的界线均清楚,而不是渐变过渡关系。而玄武岩通常有 2 种形式,一种为有明显辉石斑晶的辉斑玄武岩,另一种是致密的无斑玄武岩,两者往往呈互层,但辉斑玄武岩厚度较小,只有 2~5 m,而无斑玄武岩则往往可达数十米。北塔山组的上部为沉积岩,主要为凝灰质粉砂岩、砂岩,偶夹灰岩和硅质岩。在北塔山组地层中还侵入有与其同时代的中酸性斑岩,其成分属埃达克质(杨文平等,2005)。

苦橄岩呈斑状结构,斑晶主要为橄榄石,多数已蛇纹石化,大多只保留橄榄石的轮廓,呈半自形,但亦有少量新鲜的核。斑晶含量约 1%,有时有少量的单斜辉石。基质呈全晶质,但普遍很细小,呈微晶,主要由粒状的橄榄石、单斜辉石和少量的斜长石和铁钛氧化物。

玄武岩呈斑状结构,无论是辉斑玄武岩还是无斑玄武岩均存在单斜辉石斑晶,无斜长石斑晶的基质呈交织结构或拉斑玄武结构,主要由柱状斜长石和粒状辉石组成。后者充填在前者组成的格架内,其中斜长石大多已钠长石化。另外还有少量的他形磁铁矿。

安山岩亦呈斑状结构,斑晶主要为斜长石和单斜辉石,但以前者为主,斑晶约占总体积的 2%~5%。基质呈交织结构,主要由针状的斜长石和粒状单斜辉石组成,其中斜长石约占其中的 70%。另有少量的铁钛氧化物。

2 地球化学特征

主要元素、稀土和微量元素分析结果见表 1。由表 1 可知,苦橄岩、玄武岩和安山岩在主要元素特征上既存在相似性,又有明显的区别,相似性表现在它们的 TiO_2 含量均较低($<1.3\%$)。苦橄岩相对于玄武岩和安山岩而言,具有高的 MgO 、 FeO^* 和 CaO 含量以及低的 TiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3 含量。第一层苦橄岩 MgO 的含量达 22%,按照国际地科联对高镁火山岩的最新分类(Le Bas, 2000),其应属于科马提岩。苦橄岩的 $\text{Mg}\#$ 为 0.75~0.80(表 1),落在原生岩浆的 $\text{Mg}\#$ 范围内。玄武岩的 $\text{Mg}\#$ 略低,为 0.61~0.66。安山岩的 $\text{Mg}\#$ 为 0.41。

在 $\text{FeO}^*/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 图解(图 3)上,苦橄岩落在钙碱性区域,而玄武岩和安山岩则落在拉斑玄武

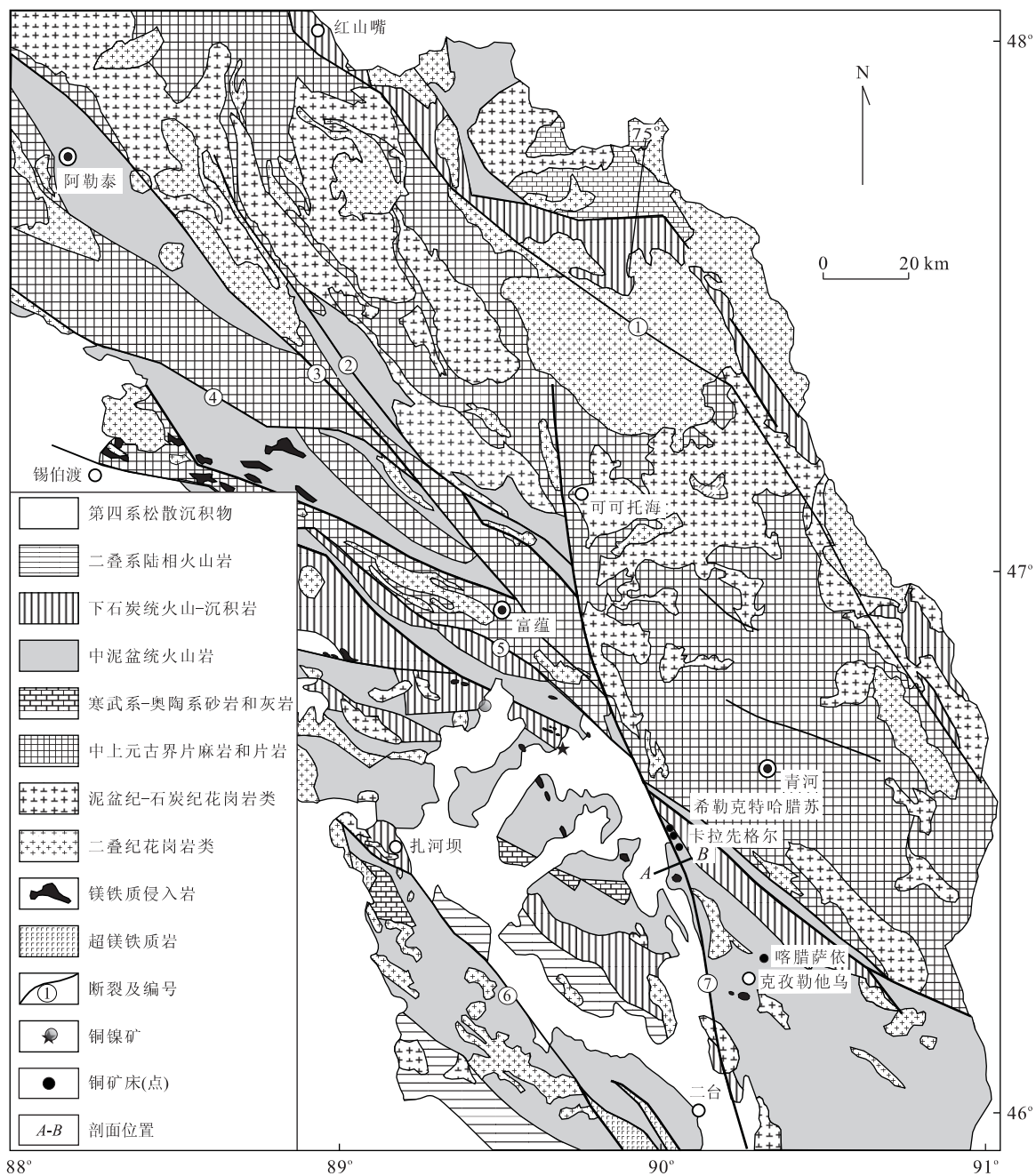


图1 阿尔泰山南缘区域地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of the south margin of Altay mountains

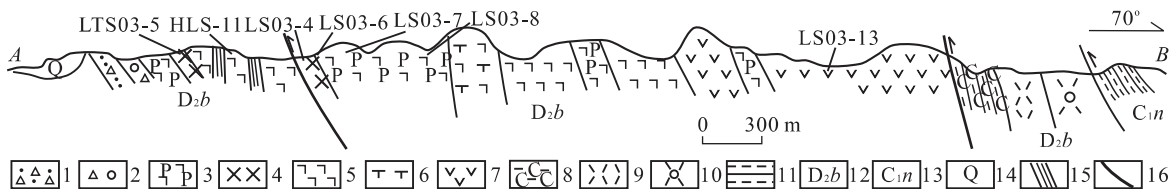


图2 中泥盆统北塔山组地质剖面

Fig. 2 Geological section showing the sequence of Middle Devonian Beitashan Formation

1. 凝灰角砾岩; 2. 火山角砾岩; 3. 辉斑玄武岩; 4. 苦橄岩; 5. 无斑玄武岩; 6. 钠长斑岩; 7. 安山岩; 8. 碳质板岩; 9. 凝灰岩; 10. 凝灰质含砾砂岩; 11. 硅质岩; 12. 中泥盆统北塔山组; 13. 下石炭统; 14. 第四系; 15. 破碎带; 16. 断裂

表 1 北塔山组火山岩主要元素和微量元素分析结果

Table 1 Major and minor element analyses of the volcanic rocks of the Beitashan Formation

样品号	LS03-7	LS03-8	LS03-13	LS03-6	LS03-4	HLS-11	LTS03-5
岩石名称	辉斑玄武岩	辉斑玄武岩	安山岩	苦橄岩	苦橄岩	玄武岩	苦橄岩
SiO ₂	47.00	48.00	56.88	47.71	47.73	50.90	45.74
TiO ₂	1.09	1.20	0.48	0.47	0.46	0.72	0.40
Al ₂ O ₃	15.41	16.47	17.44	9.85	9.45	12.91	7.14
Fe ₂ O ₃	4.48	4.52	3.86	4.86	4.84	3.61	4.01
FeO	5.69	5.66	2.71	5.42	5.77	5.62	7.35
MnO	0.17	0.16	0.13	0.18	0.19	0.19	0.20
MgO	9.10	7.55	2.12	15.12	14.84	8.27	21.00
CaO	6.71	4.56	3.81	9.47	9.83	8.66	8.88
Na ₂ O	2.98	3.36	7.96	1.60	1.82	3.38	0.42
K ₂ O	2.62	3.54	1.51	1.18	0.83	1.65	0.19
P ₂ O ₅	0.19	0.19	0.41	0.23	0.23	0.25	0.27
H ₂ O ⁺	3.52	3.62	1.64	3.84	3.72	2.28	4.18
CO ₂	0.59	0.50	1.49	0.05	0.14	1.13	0.09
total	99.55	99.33	100.44	99.98	99.85	99.57	99.87
Mg#	0.66	0.61	0.41	0.76	0.75	0.66	0.80
FeO*	9.72	9.73	6.18	9.79	10.13	8.87	10.96
Ba	1355	2735	492	199	162	260.00	15.30
Cu	109	124	19.1	48.3	9.03	90.10	55.50
Sr	894	1180	202	350	232	300.00	83.30
V	208	249	90.9	188	213	210.00	175.00
Zn	79.4	78.7	87.4	72.7	74.6	80.20	66.50
Co	44.0	40.2	16.2	52.3	53.2	34.80	76.40
Ga	16.5	20.7	19.6	12.5	12.6	15.00	9.49
Pb	6.44	4.56	5.42	6.42	6.15	3.26	1.27
Rb	41.5	73.5	18.5	17.5	14.3	30.30	5.55
Sc	30.4	38.1	8.08	38.3	38.2	31.40	18.10
Th	0.28	0.24	0.96	0.71	0.30	0.86	0.43
U	0.30	0.12	0.37	0.43	0.20	0.46	0.34
Cr	622	259	6.92	946	888	444.00	1241.00
Ni	156	86.0	4.51	285	283	91.20	555.00
Zr	56.1	58.1	62.2	25.8	24.6	65.00	30.60
Nb	1.21	0.88	2.66	0.97	1.05	2.08	1.03
Hf	1.75	1.72	1.82	0.79	0.77	1.64	0.67
Ta	0.12	0.10	0.21	0.10	0.07	0.25	0.21
Y	20.1	21.2	16.7	9.10	9.94	17.60	8.68
La	4.03	3.85	11.1	4.59	2.80	6.75	4.7
Ce	11.0	10.9	24.5	10.0	6.89	15.1	10.8
Pr	1.77	1.82	3.21	1.37	1.08	2.14	1.59
Nd	9.38	9.91	14.0	6.22	5.34	9.78	7.61
Sm	3.02	3.27	3.25	1.80	1.73	2.8	2.01
Eu	1.06	1.15	1.04	0.58	0.60	0.88	0.65
Gd	3.70	4.19	3.21	1.93	2.02	2.94	1.89
Tb	0.62	0.68	0.50	0.33	0.33	0.51	0.28
Dy	3.99	4.39	3.16	2.13	2.18	3.17	1.65
Ho	0.80	0.91	0.67	0.43	0.44	0.65	0.33
Er	2.31	2.56	1.93	1.24	1.29	1.92	0.9
Tm	0.32	0.35	0.27	0.18	0.19	0.28	0.13
Yb	2.01	2.18	1.76	1.21	1.22	1.88	0.85
Lu	0.29	0.30	0.26	0.17	0.18	0.29	0.13
∑REE	44.3	46.46	68.86	32.18	26.29	49.09	33.52

分析方法: 主要元素为 XRF; 稀土和微量元素为 ICP-MS. 分析单位: 国家地质实验测试中心. $Mg\# = Mg/(Mg+Fe)$, 其中假定 $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 0.15$, $FeO = 0.9 \cdot Fe_2O_3 + FeO$; 主要元素单位为 %, 稀土和微量元素单位为 10^{-6} .

岩区域, 但是所有分析的样品均落在两者的边界附近, 显示出具有钙碱性和拉斑系列过渡的特点.

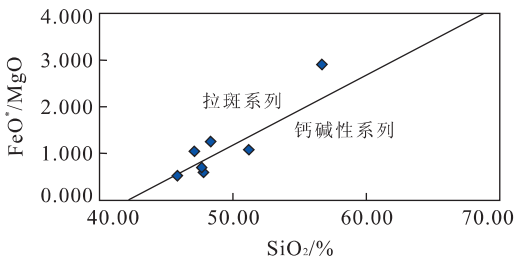


图 3 FeO*/MgO—SiO₂ 图解(据 Miyashiro, 1974)
Fig. 3 Diagram of FeO*/MgO vs. SiO₂

苦橄岩、玄武岩和安山岩之间展示了不同的稀土元素特征,总体上,苦橄岩的稀土总量较低,玄武岩次之,安山岩最高,即从超基性岩、酸性岩到中性岩稀土总量升高,三者分别为 $26 \times 10^{-6} \sim 32 \times 10^{-6}$ 、 $34 \times 10^{-6} \sim 47 \times 10^{-6}$ 、 69×10^{-6} 。它们的稀土元素配分曲线亦显示出不同的形式,苦橄岩呈轻稀土略富集型(La 的丰度大约是球粒陨石的 10 倍),玄武岩显示出平缓型的配分模式,安山岩则显示出轻稀土中等富集型(La 的丰度是球粒陨石的 30 倍,表 1,图 4a)。从总体上看,不同类岩石的稀土丰度均较低,比大陆内部的相应的岩石类型的稀土丰度低(其 La 大约是球粒陨石的 50~200 倍)。

微量元素分析结果表明,苦橄岩 Cr、Ni 等相容元素含量较高,分别为 $880 \times 10^{-6} \sim 1\ 250 \times 10^{-6}$ 、 $280 \times 10^{-6} \sim 560 \times 10^{-6}$,而 Rb、Sr、Ba 等不相容元素含量较低。在不相容元素 MORB 标准化图解上,它们总体上显示出相似的曲线,均显示出大离子亲石元素(LILE,如 Sr、K、Rb、Ba)的富集和高场强元素(HFSE)的相对亏损,并且均存在明显 Nb、Ta 的负异常、Ti 的低度负异常以及 P 和 Sm 的低正异常。苦橄岩和玄武岩在 MORB 标准化曲线上的主要

差别表现在苦橄岩的 HFSE 比 MORB 要低,而玄武岩则基本上和 MORB 相当(图 4b)。

3 讨论

3.1 构造意义

北塔山组火山岩具有从拉斑玄武岩系列向钙碱性玄武岩系列过渡的特点,暗示了其构造背景为板块边缘,而非板内环境。地球化学特征表明,其 TiO₂ 含量较低(<1.2%),玄武岩高的 Al₂O₃ 含量、低的稀土含量,并且稀土元素曲线具有平缓型到轻稀土低度富集的特点,显示出岛弧岩浆的特点,与大陆板内以及大洋板内火山岩存在明显的区别,后者往往具有高钛和轻稀土强烈富集的特点。另外,微量元素 MORB 标准化图解上,它们均具有很强的 Nb 和 Ta 的负异常以及 Ti 的低度负异常以及 P 和 Sm 的低正异常,显示出典型岛弧岩浆的特点(Pearce and Peate, 1995),而与其他构造背景的岩浆特点有明显的区别,如板内玄武岩 LILE 富集程度高,不存在 Ti 的负异常,而 HFSE 的含量也高于 MORB;而大洋中脊玄武岩也不存在 Ti 的负异常,其 LILE 通常是相对亏损的,也不存在 Nb 和 Ta 的负异常。

有关本区的构造单元划分还存在不同的认识(于学元等,1993;何国琦等,1994;叶庆同等,1998;Wang *et al.*, 2000),有的认为阿尔泰山带和准噶尔造山带的分界线是额尔齐斯断裂,有的认为是乌伦古河断裂,前者主要基于断裂两侧地层变形程度明显不同,而后者主要基于该断裂带存在蛇绿岩,并且认为北塔山组火山岩是蒙古洋板块向南俯冲的结果,而前者则相反,认为是准噶尔板块向北俯冲的结

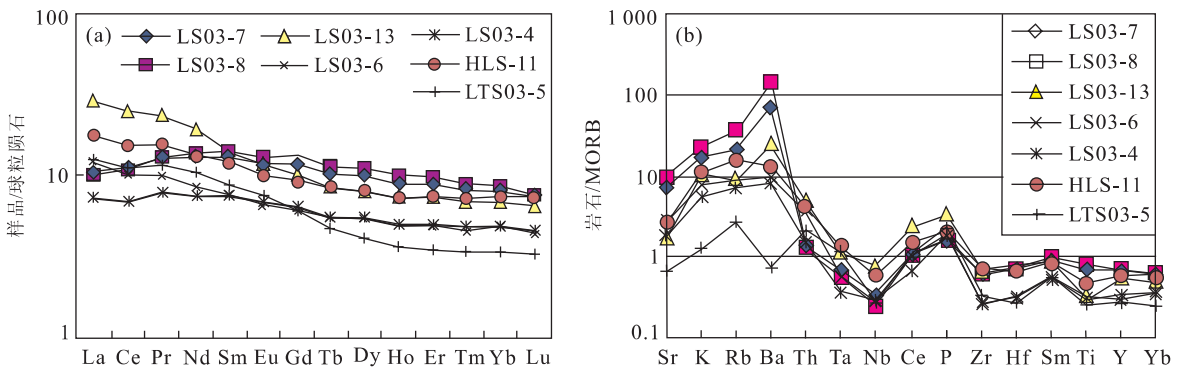


图 4 北塔山组火山岩稀土元素球粒陨石配分(a)和微量元素 MORB 标准化(b)曲线(数据据 Sun and McDonoug, 1989)

Fig. 4 REE chondrite-normalized patterns (a) and trace element MORB-normalized patterns (b) of the volcanic rocks of the Beitashan Formation

果. 前已述及, 火山岩从下至上依次为苦橄岩、玄武岩、安山岩, 反应了岩浆从南西向北东演化的特点, 由此可见, 大洋板块是从南西向北东俯冲的, 这与其他方面得出的结论一致(李锦轶, 1991).

3.2 岩石成因

苦橄岩高的 $Mg\#$ 值指示了其是地幔直接熔融形成的, 而玄武岩和安山岩相对低的 $Mg\#$ 值暗示了其不是地幔直接熔融形成的, 而是经过了后期的分离结晶作用或同化混染作用. 由于本文数据有限以及后期的蚀变作用, 因此难以准确鉴别矿物的斑晶组成, 目前尚难区分具体的分离结晶作用过程, 在此主要用地球化学方法来推测其源区特征.

岛弧岩浆的成因及其源区特征不仅对建立岛弧岩浆的成因模型具有重要意义, 而且对认识岛弧岩浆和大陆壳的生长也具有重要的意义. 目前, 有关岛弧火山岩的源区尽管有不同的认识, 但是通常认为, 其源区有地幔楔中 MORB 型的亏损地幔、大洋壳(包括大洋沉积物和蚀变的玄武岩)以及从大洋壳中释放的流体(Morris *et al.*, 1990; McCulloch and Gamble, 1991; Hawakesworth *et al.*, 1993, 1997; Plank and Langmuir, 1993, 1998; Miller *et al.*, 1995; Rea and Ruff, 1996), 但是对于大洋沉积物和蚀变玄武岩卷入源区的比例还存在不同的认识(Macdonald, *et al.*, 2000).

不相容元素因其相似的分配系数, 所以其受后期的分离结晶作用较小, 因此常被用来推测其源区特征. 由表 1 可知, 除安山岩外, 苦橄岩和玄武岩的 MgO 含量均在 6% 以上, 说明同化混染作用的影响可以忽略(Thirlwall *et al.*, 1994). 由图 4b 可以看出, 无论是苦橄岩还是玄武岩, 大多数不相容元素与 MORB 相似, 指示了其源区与 MORB 源相似. 通常认为, 岛弧火山岩在 MORB 标准化图解上显示富集的元素是由于从洋壳释放出的流体交代地幔楔的结果(Pearce and Peate, 1995). 根据图 4b, Rb、Ba、Th、K 具有明显的富集特征, 这些元素在大洋玄武岩中并不富集, 所以推测是由大洋沉积物释放出来的流体带来的. 另外, 苦橄岩和玄武岩的 Zr/Nb 比值为 23~66(图 5), 与 MORB 的 Zr/Nb 比值的范围接近(10~60, Davidson, 1996), 同样其 Sm/Nd 比值(0.26~0.33)也落在 MORB 的范围内(平均值为 0.32, Anderson, 1994), 可由此推测其源区为 MORB 源的亏损地幔.

苦橄岩与玄武岩不同的稀土元素配分曲线指示

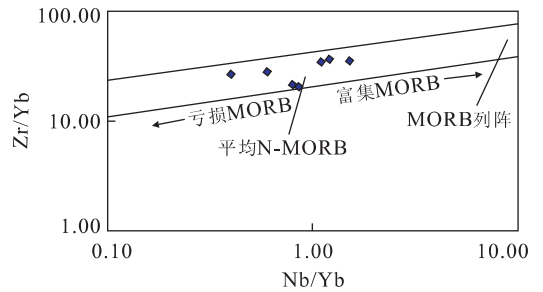


图 5 北塔山组火山岩 $Nb/Yb-Zr/Yb$ 图解(底图据 Pearce and Parkinson, 1993)

Fig. 5 Plot of Nb/Yb against Zr/Yb for the volcanic rocks of the Beitashan Formation

了其源区的不同, 苦橄岩相对富集轻稀土, 而玄武岩则为平缓型, 对此可能有 2 种解释: 一为同源不同的熔融程度, 轻稀土富集者其熔融程度低; 二是源区的不同, 如石榴子石橄榄岩的熔融产生的熔体呈轻稀土富集型, 而尖晶石橄榄岩的熔融产生平缓型的稀土配分模式. 实验岩石学表明高镁的苦橄岩是在高温高的熔融程度条件下熔融的产物(Green *et al.*, 2001), 因此, 造成苦橄岩和玄武岩不同的稀土元素配分曲线的原因可能是苦橄岩的源区为石榴子石橄榄岩, 而玄武岩的源区为尖晶石橄榄岩. 此外, 苦橄岩和玄武岩的 Zr/Sm 比值亦有明显不同, 其中苦橄岩的 Zr/Sm 比值为 14.2~15.2, 玄武岩的 Zr/Sm 比值为 17.8~23.2, 因此, 玄武岩的 Zr/Sm 比值明显比苦橄岩大. 由于 Sm 在角闪石中的分配系数 $\gg Zr$, 所以玄武岩相对高的 Zr/Sm 比值可能是由于其源区残留有角闪石的缘故.

由表 2 可以看出, 苦橄岩的 Ti/V 比值为 14~17, 比 MORB 的 Ti/V 比值要低(平均比值为 25.4, Pearce and Parkinson, 1993), 而玄武岩则比 MORB 要略高. 苦橄岩低的 Ti/V 比值有 2 种原因, 一是源区比 MORB 的源区相对亏损 Ti , 另一是其熔融程度比 MORB 高, 因为 Ti 是不相容元素, 而 V 是中等相容元素. 因为 Ti 、 Nb 等元素在地幔中均富集在金红石、榍石等副矿物中(Wilson, 1989), 而 Zr/Nb 比值均与 MORB 相当, 所以第一种可能性似乎可以排除. 如上所述, 由于苦橄岩通常是高的熔融程度条件下熔融的(Green *et al.*, 2001), 所以低的 Ti/V 比值是由于高的熔融程度的结果, 这也与其总稀土含量较低的结果一致. 另一方面, 玄武岩高的 Ti/V 比值可能暗示了其熔融程度较低, 这也与上述其源区残留有角闪石的推论一致(因为高的熔融程

表 2 北塔山组火山岩不相容元素某些特征比值参数

Table 2 Some incompatible element ratios of the volcanic rocks of the Beitashan Formation

样品号	LS03-7	LS03-8	LS03-13	LS03-6	LS03-4	HLS-11	LTS03-5
La/Nb	3.33	4.38	4.17	4.73	2.68	3.25	4.56
Th/Ta	2.33	2.40	4.57	7.10	4.29	3.44	2.05
La/Sm	1.33	1.18	3.42	2.55	1.62	2.41	2.34
Sm/Nd	0.32	0.33	0.23	0.29	0.32	0.29	0.26
Zr/Sm	18.58	17.77	19.14	14.33	14.19	23.21	15.22
Ce/Yb	5.47	5.00	13.92	8.26	5.65	8.03	12.71
Zr/Nb	46.36	66.02	23.38	26.60	23.49	31.25	29.71
Nb/Yb	0.60	0.40	1.51	0.80	0.86	1.11	1.21
Zr/Yb	27.91	26.65	35.34	21.32	20.12	34.57	36.00
Ti/V	34.92	32.12	35.19	16.66	14.39	22.85	15.23
Sr/Th	3 192.86	4 916.67	210.42	492.96	773.33	348.84	193.72
Th/Ce	0.03	0.02	0.04	0.07	0.04	0.06	0.04

度条件下不可能有角闪石的残留)。

由于安山岩与玄武岩的稀土元素配分曲线不同(图 4a),所以安山岩不太可能是玄武岩通过分离结晶作用形成的。通常认为岛弧安山岩的形成是洋壳的熔融结果,但是大洋玄武岩熔融形成的岩浆中的 $Mg\# < 0.4$ (Rapp *et al.*, 1991),而本区安山岩的 $Mg\#$ 为 0.41,因此不是由俯冲的大洋玄武岩熔融形成的。由于安山岩不可能是地幔直接熔融形成的,同时考虑到其稀土曲线呈中等富集,暗示源区可能有石榴石的残留,所以由此推测其源区可能是榴辉岩,这与实验岩石学的结论一致。

由以上讨论并结合岛弧的形成过程模型,笔者初步提出如下的北塔山组火山岩形成的岩石学模型:准噶尔洋板块向北俯冲,当俯冲深度达到 50~60 km 时,俯冲洋壳上部沉积物中的角闪石开始脱水,其释放出的流体对其上部的地幔楔进行交代,使得亏损的地幔楔富集大离子亲石元素(Sr、Ba、Rb、K),脱水的洋壳密度变大,由此拖曳大洋板块进一步向下俯冲(其深度可达到 110 km 左右)。释放出的流体降低了固相线温度,促使地幔楔发生部分熔融,开始时熔融程度较低,但富含挥发份,所以形成少量爆发性的玄武质碎屑岩。随着熔融程度的增加,地幔发生底辟作用向上运动,当运动到高温区域时,由于压力的降低促使该区域的地幔进一步发生熔融,形成苦橄质岩浆。底辟地幔进一步上升到低温区域时,降压作用导致地幔熔融形成玄武质岩浆。其后,底辟地幔热的作用使得上部的榴辉岩发生熔融形成安山质岩浆。

4 结语

苦橄岩是一种稀少而又重要的岩石类型,由于其接近原始岩浆成分,所以常被用来反演源区的物质组成和熔融条件(张招崇等,2003)。本文对研究区中泥盆世北塔山组苦橄岩及其共生岩石的地球化学特征的初步研究结果表明:北塔山组火山岩形成于岛弧环境,是准噶尔洋板块向北西俯冲的结果;苦橄岩、玄武岩和安山岩可能形成于不同的源区,苦橄岩和玄武岩的地幔源区可能为 MORB 源的亏损地幔,但两者的源区的物质组成并不相同,苦橄岩的源区为地壳释放出的流体交代过的含石榴石橄榄岩,苦橄岩是在高温高的熔融程度条件下形成的,而玄武岩的源区可能为含角闪石的尖晶石橄榄岩,它是在相对低温低的熔融程度下形成的。安山岩则可能是在较浅位置榴辉岩部分熔融的产物。需要指出的是,由于分析的数据有限,目前尚不能分析岩浆的详细演化过程,上述的结论和认识也只是初步的,需要进一步完善。但是有限的分析结果却表明,该地区岩浆的形成和演化过程复杂,有必要对此进行进一步研究,这对研究古岛弧的演化过程和该地区的区域演化具有十分重要的意义。

References

- Anderson, D. L., 1994. Komattites and picrites: Evidence that "plume" source is depleted. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 128:303-311.
- Davidson, J. P., 1996. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism. Subduction top to bottom. *Geophys. Monogr.*, 96, American Geophysical

- Union, Washington DC, 251—262.
- Green, D. H., Falloon, T., Eggins, S. M., et al., 2001. Primary magmas and mantle temperatures. *European Journal of Mineralogy*, 13: 37—451.
- Han, B. F., 1991. The Middle Devonian bimodal association of volcanic rocks in the northern area of east Junggar, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 65: 317—326 (in Chinese with English abstract).
- Hawkesworth, C. J., Gallagher, K., Hergt, J. M., et al., 1993. Mantle and slab contributions in arc magmas. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 21: 175—204.
- Hawkesworth, C. J., Turner, S., McDermott, F., et al., 1997. U-Th isotopes in arc magmas for element transfer from the subducted crust. *Science*, 276: 551—555.
- He, G. Q., Li, M. S., Liu, D. Q., et al., 1994. Paleozoic crust and its evolution of Xinjiang, China. Xinjiang People's Press, Wulumuqi (in Chinese).
- Le Bas, M. J., 2000. IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks. *J. Petrol.*, 41(10): 1467—1470.
- Li, J. Y., 1991. On evolution of Paleozoic plate tectonics of east Junggar, Xinjiang, China. In: Xiao, X. C., Tang, Y. Q., eds., *Tectonic evolution of the southern margin of the paleo-Asian composite megasuture*. Beijing Scientific and Technical Publishing House, Beijing, 92—108 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xu, X., 2004. Major problems on geologic structures and metagenesis of northern Xinjiang, Northwest China. *Xinjiang Geology*, 22(2): 119—124 (in Chinese with English abstract).
- Macdonald, R., Hawkesworth, C. J., Heath, E., 2000. The Lesser Antilles volcanic chain: A study in arc magmatism. *Earth Sci. Rev.*, 49: 1—76.
- McCulloch, M. T., Gamble, J. A., 1991. Geochemical and geodynamic constraints on subduction zone magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 102: 358—374.
- Miller, D. M., Goldstein, S. L., Langmuir, C. H., 1995. Cerium/lead and lead isotope ratios in arc magmas and the enrichment in lead of the contents. *Nature*, 368: 514—520.
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.*, 274: 321—355.
- Morris, J. D., Leeman, W. P., Tera, F., 1990. The subducted component in island arc lavas: Constraints from Be isotope and B-Be systematics. *Nature*, 344: 31—36.
- Pearce, J. A., Parkinson, I. J., 1993. Trace-element models for mantle melting: Application to volcanic arc petrogenesis. *Geo. Soc. London, Spec. Publ.*, 76: 373—403.
- Pearce, J. A., Peate, D. W., 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 76: 373—403.
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1993. Tracing trace-elements from sediment input to volcanic output at subduction zones. *Nature*, 362: 739—743.
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, 145: 325—394.
- Rapp, R. P., Watson, E. B., Miller, C. F., 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities. *Precambrian Res.*, 51: 1—25.
- Rea, D. K., Ruff, L. J., 1996. Composition and mass flux of sediment entering the world's subduction zones: Implications for global sediment budgets, great earthquakes and volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 140: 1—12.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society London, *Special Publication*, 42: 313—345.
- Thirlwall, M. F., Smith, T. E., Graham, A. M., et al., 1994. High field strength element anomalies in arc lavas: Source or process? *J. Petrol.*, 35: 819—838.
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Xu, Z. G., et al., 2002. Metallogenic series and regularities in Altay metallogenic province. Atomic Energy Press, Beijing, 493 (in Chinese).
- Wang, J. B., Zhang, J. H., Ding, R. F., et al., 2000. Tectonic-metallogenic system in the Altay orogenic belt, China. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 485—491.
- Wei, G. Y., Ni, Z. Y., 1990. Preliminary study of the rift volcanic rocks of the Irtysh volcanic area, Xinjiang. *J. Mineral. Petrol.*, 10(3): 15—23 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. London Unwin Hyman, London.
- Xu, J. F., Mei, H. J., Yu, X. Y., et al., 2001. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: Products of slab melting. *Chinese Science Bulletin*, 46: 684—688 (in Chinese).
- Yang, W. P., Zhou, G., Zhang, Z. C., et al., 2005. Discovery of the Xileketehalsu porphyry copper deposit in the south margin of the Altay metallogenic belt. *Geology in China*, 32(1): 107—114 (in Chinese with English abstract).

- Ye, Q. T., Fu, X. J., Wang, B. L., 1998. Metallogeny of poly-metallic belts on the southern margin of the Altay mountains, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 72(4): 349—357 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. Y., Mei, H. J., Yang, X. C., et al., 1993. Volcanic rocks and tectonic evolution of the Irytish region. In: Tu, G. C., ed., *New progress of solid earth sciences of the northern Xinjiang*. Science Press, Beijing, 185—198 (in Chinese).
- Zhang, Z. C., Hao, Y. L., Wang, F. S., 2003. Picrites in large igneous province and implications. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 347—358 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等, 1994. 中国新疆古生代地壳及演化. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.
- 韩宝福, 1991. 新疆东准噶尔北部中泥盆世双峰式火山岩组合. *地质学报*, 65(4): 317—328.
- 李锦轶, 1991. 试论中国新疆准噶尔山系古生代板块构造演化. 见: 肖序常, 汤耀庆编, 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化. 北京: 北京科学技术出版社, 92—108.
- 李锦轶, 徐新, 2004. 新疆北部地区构造和成矿作用的主要问题. *新疆地质*, 22(2): 119—124.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等, 2002. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京: 原子能出版社, 493.
- 卫管一, 倪志耀, 1990. 新疆额尔齐斯火山岩地区裂谷火山岩的初步研究. *矿物岩石*, 10(3): 15—23.
- 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 等, 2001. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与古俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物. *科学通报*, 46: 684—688.
- 杨文平, 周刚, 张招崇, 等, 2005. 阿尔泰山铜矿带南缘希勒克特哈腊苏斑岩铜矿的发现及其意义. *中国地质*, 32(1): 107—114.
- 叶庆同, 傅旭杰, 王宝良, 1998. 新疆阿尔泰山南缘多金属成矿带的成矿规律. *地质学报*, 72(4): 349—357.
- 于学元, 梅厚钧, 杨学昌, 等, 1993. 额尔齐斯火山岩及构造演化. 见: 涂光炽编, 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 185—198.
- 张招崇, 郝艳丽, 王福生, 2003. 大火成岩省中苦橄岩的研究意义. *地学前缘*, 10(3): 347—358.