

· 专题研究 ·

阿尔泰山南缘中泥盆统苦橄岩低钙橄榄石的成因探讨

张招崇¹, 蔡劲宏², 闫升好³, 陈柏林⁴, 周刚⁵, 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. 桂林工学院 环境与资源工程系, 广西 桂林 541004; 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: 阿尔泰山南缘中泥盆统北塔山组地层发育世界罕见的总厚度达百米的苦橄质熔岩。苦橄岩的斑晶主要为蛇纹石化的自形-半自形橄榄石。对橄榄石斑晶的电子探针分析结果表明, 其成分相当均匀, 其 F_o 含量为 79.8% ~ 81.8%, 并且具有异常低的 CaO 含量 (0~0.06%), 明显比典型岛弧苦橄岩中橄榄石的 F_o 含量和 CaO 含量要低得多。根据前人对 Ca 在橄榄石-硅酸盐熔体中的行为实验成果推测, 这种橄榄石可能是高硅、低铁、低碱的玄武质岩浆结晶形成的。

关键词: 低钙橄榄石, 苦橄岩, 分配系数, 岛弧, 阿尔泰山南缘

中图分类号: P578.94⁺2; P588.14⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)03-0171-06

A discussion on the low-Ca olivine phenocrysts in Middle Devonian picritic lavas on the southern margin of the Altay Mountains

ZHANG Zhao-chong¹, CAI Jing-hong², YAN Sheng-hao³, CHEN Bai-lin⁴, ZHOU Gang⁵ and HE Li-xin⁵

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Altay 836500, China)

Abstract: A total of nearly 100 m-thick picritic lava succession rarely seen in the world was recognized in the Middle Devonian Beitashan Formation on the southern margin of the Altay Mountains. Serpentinized euhedral-subhedral olivine phenocrysts are dominant in the picrites. Electron microprobe analyses of the olivine phenocrysts reveal their homogeneous composition, with F_o contents ranging from 79.8% to 81.8% and CaO contents being extremely low (0~0.06%), much lower than their values in typical arc picrites. Based on previous experiments on Ca partitioning between olivine and silicate melt, it can be inferred that such low-Ca and low-Mg olivine crystals might have been generated by crystallization of high-Si, low-Fe and low alkali basalts.

Key words: low-Ca olivine; picrite; distribution coefficient; island arc; southern margin of Altay Mountains

收稿日期: 2008-03-03; 修订日期: 2008-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772045, 40572047), 国家 305 项目(2001BA609A-07-02), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0728), 教育部 111 计划(B07011)

作者简介: 张招崇(1965-), 男, 教授, 主要从事火山岩岩石学及金属矿物的研究, E-mail: zhangzhaochong@hotmail.com。

Ca 在橄榄石中属于微量元素。对大量的火成岩中橄榄石的成分分析(单矿物化学分析和电子探针分析)表明,其 CaO 的含量(质量分数,下同)变化范围为 0.01%~2.0% (Sahama and Hytonen, 1958; Simkin and Smith, 1970; Stormer, 1972; Ferguson, 1978)。相关的实验研究表明,橄榄石中 Ca 的含量与岩浆的化学成分和物理化学条件有关(Libourel, 1999)。但是一般而言,火山岩中橄榄石斑晶的 Ca 含量比较高,其 CaO 含量一般在 0.1% 以上,而地幔橄榄岩中橄榄石的 CaO 含量一般在 0.1% 以下,因此许多学者也借此来区分火山岩中高 F_o 含量的橄榄石是斑晶还是地幔的捕虏晶(如 Thompson and Gibson, 2000; Krishnamurthy *et al.*, 2000; Larsen and Pedersen, 2000)。但是近年来,在现代的岛弧火山岩中也发现有低 CaO 含量的橄榄石,一般称为低钙橄榄石,其形成被认为与低钙的岩浆有关(Kamenetsky *et al.*, 2006)。最近,笔者在阿尔泰山南缘形成于中泥盆世岛弧(于学元等, 1993; 张招崇等 2005, 2007)的北塔山组苦橄岩中也发现了低钙的橄榄石斑晶,在此报道其基本特征,并探讨其成因,这可以为解释岛弧苦橄岩的成因提供重要的信息。

1 苦橄岩的产出特征和岩相学特征

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,以北为阿尔泰造山带。苦橄岩产于中泥盆世北塔山组(D_2b)地层中,北塔山组火山岩被认为形成于岛弧环境(于学元等, 1993; 张招崇等 2005, 2007)。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 3~5 km,总体上为一套海相火山-沉积岩系,从底到顶可以划分为 3 个岩性段,第 1 岩性段主要由玄武岩、玄武质凝灰岩、玄武质角砾岩、苦橄岩和富辉橄玄岩(ankaramite,指斑晶以辉石为主 $MgO > 12\%$ 的熔岩),其中苦橄岩在哈旦逊岩体的西侧出露厚度最大,总厚度达 100 余米(一般由 5~20 层熔岩组成),这在世界上极为罕见。向西北方向本层苦橄岩的厚度逐渐减薄,直至慢慢消失。但是薄片观察表明,其岩性沿走向变化不大。富辉橄玄岩产于第 1 岩性段的顶部,厚度大约为 10~20 m,从老山口往西北方向一直断续延伸到乔夏哈拉一带。玄武岩主要为无斑

玄武岩,局部出现辉斑玄武岩。另外还有类似球粒的玄武岩。第 2 岩性段的下部主要为无斑玄武岩和辉斑玄武岩的互层,每层厚度大约为 2~10 m,是组成中泥盆统北塔山组的主要岩石类型,上部出现安山岩,其厚度大约 100~300 m。第 3 岩性段主要为沉凝灰岩、硅质岩、粉砂岩、砂岩等。其中苦橄岩的岩相学特征如下:

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,但亦有少量新鲜的核,蛇纹石化的橄榄石中存在因蚀变而析出的他形磁铁矿(图 2a)。橄榄石一般呈半自形-自形,有时呈聚斑结构,斑晶含量约 10%~20%。也有的橄榄石斑晶包含有硫化物和熔融包裹体(图 2b)。有些苦橄岩也有少量的单斜辉石斑晶,呈半自形-自形(图 2c、d),有时包含有铬尖晶石(图 2c)。基质呈全晶质,但普遍很细小,呈微晶(图 2d),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。另外还有很细小的铬尖晶石分布于基质中。

2 分析测试条件

电子探针分析分别在中国地质大学(北京)样品 SJ04-22)和中国科学院地质与地球物理研究所(样品 XJ-21-22 和 XJ21-20)进行。中国地质大学的分析条件是:仪器型号 JCXA-733,加速电压 15 kV,电流 10 nA,束斑 2 μm ,修正方法 PRZ,标准样品为美国 PI 公司 53 种矿物。中国科学院地质与地球物理研究所的分析条件为:仪器型号 CAMEXA SX51,加速电压 15 kV,电流 20 nA,电子束斑 3 μm 。CaO 的测定误差为 0.03%。

3 橄榄石的成分特征

此次分析只对橄榄石斑晶进行了测定,基质橄榄石因太小而未测定。代表性的橄榄石斑晶的电子探针分析结果见表 1,苦橄岩的全岩主要元素分析结果见表 2。由表 1 可以看出,无论是不同样品还是同一个颗粒,其成分非常均匀,其 F_o 含量为 79.8%~81.8%。另外还有一个非常显著的特点是,CaO 的含量非常低,为 0~0.06%,基本上在电子探针的检测线以下,比一般俯冲带火山岩中橄榄石斑晶的 CaO 含量(0.15%~0.25%, Sigurdsson *et al.*, 1993; Smith and Leeman, 2005)要低的多,并且比所罗门

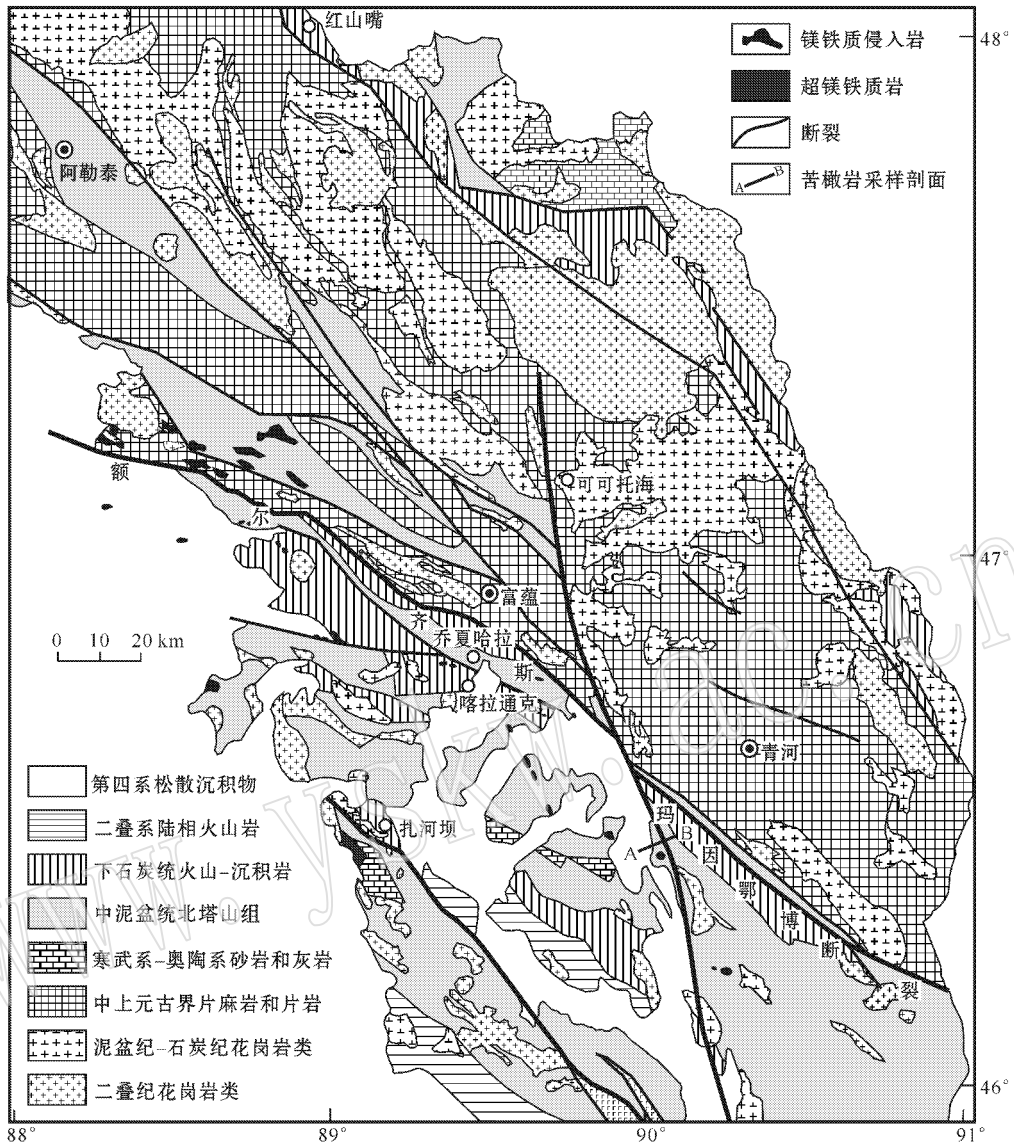


图 1 阿尔泰山南缘区域地质简图

Fig. 1 Regional sketch geological map of the southern margin of the Altay Mountains

岛的低钙橄橄榄石的 CaO 含量(0.02% ~ 0.15% , Schuth *et al.* , 2004 ; Rohrbach *et al.* , 2005 ; Kamenetsky *et al.* , 2006) 还要低 , 而且所罗门岛火山岩橄橄榄石斑晶的 CaO 含量是连续变化的 , 最高达 0.4% , 即所谓的低钙橄橄榄石和高钙橄橄榄石是人为划分的 , 其分界线为 0.15% (Kamenetsky *et al.* , 2006) 。 但是这些俯冲成因的火山岩中的橄橄榄石的 F_o 含量要比其他背景火山岩中的橄橄榄石显著富镁 , 其 F_o 含量可达 92% ~ 95% 。

4 低钙橄橄榄石的成因探讨

火山岩中低钙橄橄榄石比较少见 , 目前报道只见于几个岛弧火山岩 , 如印度尼西亚、所罗门岛、Kamchatka 和 Valu Fa Ridge (Rohrbach *et al.* , 2005 ; Kamenetsky *et al.* , 2006) 。 对于这些低钙橄橄榄石的成因还存在不同的认识 , 大多数学者认为其是地幔或者岩石圈的捕虏晶 (如 Ramsay *et al.* , 1984 ; Bouldier ,

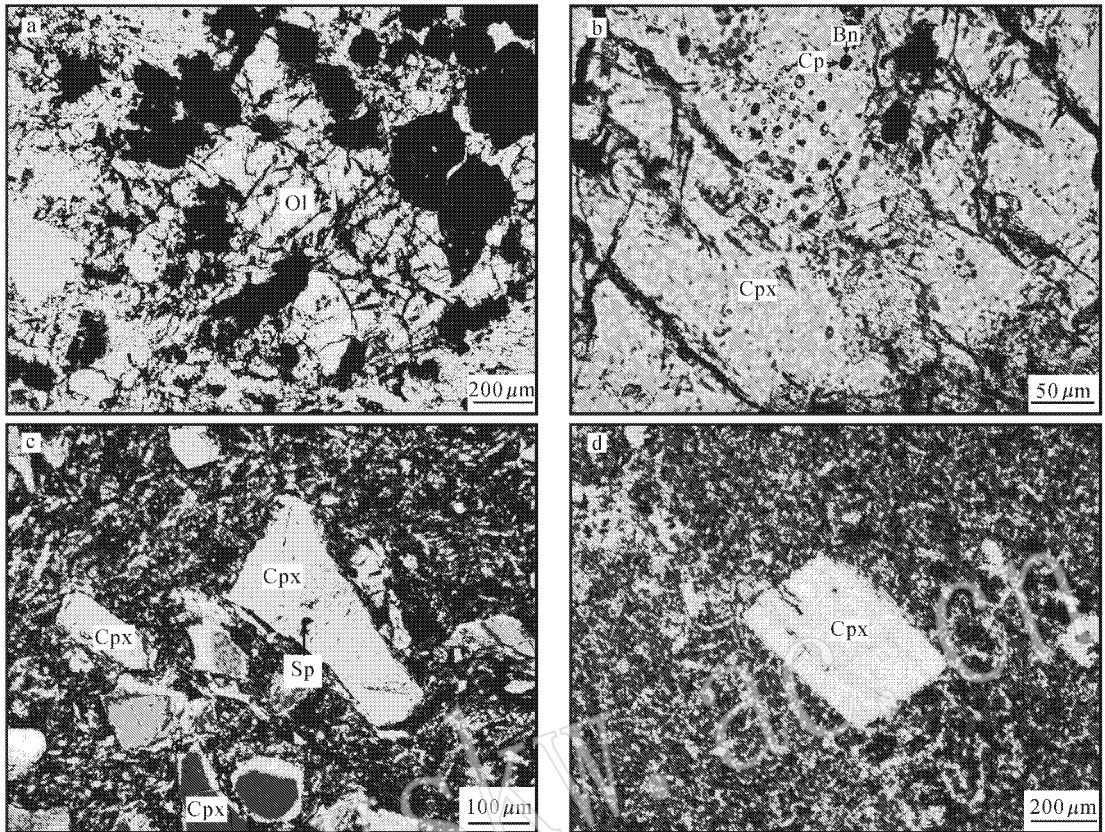


图 2 苦橄岩的岩相学特征

Fig. 2 Photomicrograph of picritic samples

a—橄榄石斑晶,由于受应力作用产生裂纹,部分已蛇纹石化,并析出他形的磁铁矿(单偏光);b—橄榄石斑晶中含有大量的熔体包裹体和少量的硫化物(单偏光);c—半自形的辉石斑晶,其内含有铬尖晶石(正交偏光);d—自形的辉石斑晶和微晶的基质(单偏光);Ol—橄榄石;

Cpx—单斜辉石;Sp—尖晶石;Bn—斑铜矿;Cr—黄铜矿

a—olivine phenocrysts with lots of cracks formed by effects of stress, some of them having been replaced by serpentine with separated anhedral magnetite (plane-polarized light); b—numerous melt inclusions and some sulfides included in an olivine phenocryst (plane-polarized light); c—subhedral clinopyroxene phenocryst, some of which includes small subhedral Cr-spinel crystals, roundmass contains chiefly microcrystal clinopyroxene, plagioclase and glass (cross-polarized light); d—euhedral clinopyroxene phenocryst in a matrix of plagioclase, clinopyroxene and glass (plane-polarized light); Ol—olivine; Cpx—clinopyroxene; Sp—spinel; Bn—bornite; Cr—chalcopyrite

1991; Schuth *et al.*, 2004), 但是 Kamenestky 等 (2006) 认为是火山岩斑晶,反映了熔体中低的钙含量和高的硅含量。

如前所述,北塔山组苦橄岩中橄榄石斑晶的 F_o 含量较低,其最高值仅为 82%,并且具有自形-半自形,缺乏地幔橄榄石典型的扭折带,所以可以肯定这些橄榄石不是地幔橄榄石,而是斑晶,因为地幔橄榄石的 F_o 含量一般在 90% 以上,他形,并且常具有扭折带。当然还存在另一种可能性,就是地幔橄榄岩与熔体发生反应,使得橄榄石贫镁富铁,并保留低钙的特征 (Varfalvy *et al.*, 1996), 反应可表示为 $(Mg, Fe)_2SiO_4$ (镁橄榄石) + 熔体 1 \rightarrow $(Mg \downarrow, Fe \uparrow)_2SiO_4$ (富铁橄榄石) + 熔体 2。然而,自形-半自形的外表

明其不是地幔橄榄岩捕虏晶。如果其为岩浆成因,那么这些如此低钙的橄榄石又是如何形成的呢?

对于 Ca 在橄榄石和硅酸盐熔体的分配系数,前人已做了大量的实验研究,结果表明,Ca 在橄榄石和硅酸盐熔体中的分配系数是压力、橄榄石的 F_o 含量以及熔体成分(尤其是 Ca、Si、Fe 和碱)的函数,而与温度无关(如 Simkin & Smith, 1970; Jurewicz and Watson, 1988; Libourel, 1999),但是 Libourel (1999) 认为压力对 Ca 的分配系数影响不大。具体而言,Ca 的分配系数与橄榄石的 F_o 含量和熔体中的 SiO_2 含量呈反相关,而与熔体中的 CaO、FeO 和碱含量呈正相关。但是对很多地区橄榄石的电子探针分析结果表明,橄榄石的 CaO 含量与其主岩的 CaO

表 1 苦橄岩中橄橄榄石的电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Microprobe analyses of olivines from picrites

点号	样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Total	Fo
1-1-01-c		38.86	0.00	0.00	18.58	0.30	42.19	0.00		100.00	80.19
1-1-01-b		38.10	0.00	0.00	19.02	0.35	42.11	0.00		99.63	79.78
1-1-01-c		38.18	0.00	0.00	18.64	0.28	41.95	0.01		99.07	80.05
1-1-01-b		39.13	0.01	0.03	18.06	0.35	42.32	0.00		99.93	80.68
1-2-01-c		38.23	0.01	0.01	18.72	0.30	41.78	0.00		99.06	79.91
1-2-01-b		38.25	0.00	0.00	18.91	0.32	42.36	0.01		99.87	79.97
1-2-01-c		38.51	0.00	0.00	18.04	0.31	42.80	0.00		99.69	80.88
1-2-01-b		38.84	0.00	0.00	18.55	0.33	42.15	0.00		99.87	80.20
1-3-01-c		38.80	0.00	0.00	18.68	0.31	42.28	0.00		100.08	80.14
1-3-01-b	SJ04-22	38.51	0.01	0.00	18.94	0.28	42.21	0.00		99.98	79.89
1-3-01-c		38.38	0.00	0.00	18.61	0.28	42.89	0.00		100.15	80.42
1-4-01-c		38.63	0.03	0.01	18.61	0.25	42.03	0.03		99.59	80.10
1-3-01-b		38.46	0.00	0.00	18.94	0.35	41.97	0.01		99.75	79.80
1-4-01-b		38.64	0.00	0.00	18.68	0.29	41.54	0.00		99.15	79.86
1-4-01-c		38.69	0.00	0.00	18.77	0.28	41.38	0.00		99.12	79.72
1-4-01-b		38.73	0.00	0.00	18.81	0.28	42.25	0.00		100.10	80.02
1-5-01-c		38.33	0.01	0.01	19.27	0.26	41.73	0.01		99.62	79.43
1-5-01-b		38.67	0.00	0.00	19.01	0.26	42.00	0.00		99.94	79.75
1-5-01-c		38.40	0.01	0.02	18.67	0.26	41.86	0.04		99.29	79.99
1-5-01-b		38.51	0.01	0.02	18.81	0.31	42.17	0.05		99.89	79.99
10		38.56	0.00	0.00	17.09	0.26	42.61	0.04	0.20	98.77	81.63
11	XJ21-22	38.36	0.00	0.02	17.34	0.30	42.50	0.05	0.23	98.82	81.37
12		38.65	0.01	0.00	16.97	0.31	42.85	0.06	0.26	99.12	81.82
23		38.81	0.00	0.01	17.38	0.42	42.15	0.00	0.17	98.94	81.21
24	XJ21-20	38.82	0.00	0.00	17.12	0.35	42.87	0.00	0.15	99.34	81.70
25		38.71	0.00	0.04	16.97	0.37	42.83	0.00	0.22	99.13	81.81

表 2 苦橄岩全岩主要元素分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Major element analyses of whole rock picrites

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Mg [#]	CaO/Al ₂ O ₃
LTS03-5	47.85	0.42	7.47	4.19	7.69	0.21	21.97	9.29	0.44	0.20	0.28	4.40	81	1.24
XJ21-18	48.27	0.36	5.45	5.34	6.25	0.30	25.42	7.86	0.32	0.23	0.20	5.80	84	1.44
20020	47.20	0.45	6.45	5.32	6.26	0.17	25.12	7.31	1.26	0.23	0.23	2.31	84	1.13
SJ04-21	46.01	0.48	7.90	7.10	4.96	0.19	22.75	9.64	0.44	0.17	0.35	4.09	82	1.22
SJ04-22	48.26	0.43	7.06	5.88	4.56	0.16	24.08	8.42	0.61	0.29	0.24	5.01	84	1.19
20005	47.44	0.42	9.16	3.69	6.58	0.17	22.22	9.42	0.56	0.11	0.23	3.07	83	1.03
20012	47.35	0.49	6.77	5.92	5.67	0.18	23.36	9.44	0.40	0.18	0.24	4.62	83	1.39
XJ21-20	45.92	0.71	8.67	5.15	6.37	0.25	21.56	10.46	0.50	0.16	0.26	3.62	81	1.21
XJ21-22	47.73	0.48	8.33	2.21	8.57	0.26	25.15	6.68	0.25	0.10	0.25	3.01	84	0.80
SJ04-29	48.41	0.61	7.34	3.17	7.15	0.19	22.86	8.92	0.69	0.34	0.31	3.27	84	1.22

分析方法 XRF 其中 FeO 和 Fe₂O₃ 由湿化学分析,分析单位 国家地质实验测试中心,表中所列的全岩分析数据已去掉烧失量后进行重新计算以便比较。

含量并不存在相关性(如 Thompson and Gibson, 2000; Krishnamurthy *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006),其原因目前尚不清楚。由表 2 可以看出,苦橄岩除了 1 个样品外,其他所有样品的 CaO/Al₂O₃ 都大于 1,表明全岩是富钙的,这样如果单从这方面来考虑,结晶出的橄橄榄石也应该是富钙的。另一方面,北塔山组苦橄岩的 SiO₂ 含量相对较高(45%),

如果考虑到有大量橄橄榄石的堆晶(大量的橄橄榄石斑晶),那么去掉这些橄橄榄石的堆晶后,其 SiO₂ 含量则可达约 51%,比典型苦橄岩的 SiO₂ 含量明显要高(<45%, Le Bas, 2000)。另外,苦橄岩全岩的 FeO 和全碱含量也较低,分别为约 7.9% 和 0.9%,这可能也是导致橄橄榄石 Ca 含量低的原因。至于橄橄榄石的 Fo 含量比一般的岛弧苦橄岩中橄橄榄石 Fo 含量低

的多的原因是由于原始岩浆 MgO 含量低造成的,亦即原始岩浆不是苦橄岩,而可能是低 MgO 含量的玄武质岩浆,现在的苦橄岩高的 MgO 含量则是由于有大量橄榄石堆晶的结果。而橄榄石成分均匀的原因则可能是与矿物的结晶条件有关,即橄榄石在岩浆房中的结晶时间很长,结晶的橄榄石有充足的时间与熔体处于平衡状态,这一点也可以解释为什么橄榄石晶体的中心并没有出现高 Fo 含量的现象。

5 结论

阿尔泰山南缘中泥盆统北塔山组苦橄岩低钙橄榄石和典型岛弧苦橄岩中的橄榄石的特征明显不同,前者的 Fo 含量明显要低,而且其 CaO 含量比其他岛弧苦橄岩的低钙橄榄石还要低,其形成可能与原始岩浆中低的 MgO 、 FeO 和全碱含量以及高的 SiO_2 含量有关。

References

Bouldier F. 1991. Olivine xenocrysts in picritic magmas: an experimental and microstructural study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109: 114~123.

Ferguson A K. 1978. Ca-enrichment in olivines from volcanic rocks[J]. *Lithos*, 45: 189~194.

Jurewicz A J G and Watson E B. 1988. Cations in olivine, Part 1: calcium partitioning and calcium-magnesium distribution between olivines and coexisting melts, with petrologic applications[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99: 176~185.

Kamenetsky V S, Elburg M, Arculus R, et al. 2006. Magmatic origin of low-Ca olivine in subduction-related magmas: Co-existence of contrasting magmas[J]. *Chem. Geol.*, 233: 346~357.

Krishnamurthy P, Gopalan K and MacDougall J D. 2000. Olivine compositions in picrite basalts and the Deccan volcanic cycle[J]. *J. Petrol.*, 41: 1057~1069.

Larsen L M and Pedersen A K. 2000. Processes in high-Mg, high-T magmas: evidence from olivine, chromite and glass in Palaeogene picrites from West Greenland[J]. *J. Petrol.*, 41: 1071~1098.

Le Bas M J. 2000. IUGS reclassification of the high-Mg and picrite volcanic rocks[J]. *J. Petrol.*, 41: 1467~1470.

Libourel G. 1999. Systematics of calcium partitioning between olivine and silicate melt: implications for melt structure and calcium content of magmatic olivines[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 136: 63~80.

Ramsay W R, Crawford A J and Foden J D. 1984. Field setting, mineralogy, chemistry, and genesis of arc picrites, New Georgia, Solomon Island[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88: 386~402.

Rohrbach A, Schuth S, Ballhaus C, et al. 2005. Petrological constraints on the origin of arc picrites, New Georgia Group, Solomon Island[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 149: 685~698.

Sahama T G and Hytonen K. 1958. Calcium-bearing magnesium-iron olivines[J]. *Am. Mineral.*, 43: 862~871.

Schuth S, Rohrbach A, Munker C, et al. 2004. Geochemical constraints on the petrogenesis of arc picrites and basalts, New Georgia Group, Solomon Island[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 288~304.

Sigurðsson I A, Kamenetsky V S, Crawford A J, et al. 1993. Primitive island arc and oceanic lavas from the Hunter ridge-Hunter fracture zone. Evidence from glass, olivine and spinel compositions[J]. *Mineral. Petrol.*, 47: 149~169.

Simkin T and Smith J V. 1970. Minor-element distribution in olivine[J]. *J. Geol.*, 78: 304~325.

Smith D R and Leeman W P. 2005. Chromian spinel-olivine phase chemistry and the origin of primitive basalts of the southern Washington Cascade[J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 140: 49~66.

Stormer J C. 1972. Mineralogy and petrology of the Raton-Clayton volcanic field, north-eastern New Mexico[J]. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 83: 3299~3320.

Thompson N R N and Gibson S A. 2000. Transient high temperatures in mantle plume heads inferred from magnesian olivines in Phanerozoic picrites[J]. *Nature*, 407: 502~506.

Varfalvy V, Hebert R and Bedard J H. 1996. Interactions between melt and upper-mantle peridotites in the North Arm Mountain massif, Bay of Islands ophiolite, Newfoundland, Canada: Implications for the genesis of boninitic and related magmas[J]. *Chem. Geol.*, 129: 71~90.

Yu Xueyuan, Mei Houjun, Yang Xuechang, et al. 1993. Volcanic rocks and tectonic evolution of the Irytish region[A]. *Tu Guangzhi. New Improvement of Solid Geosciences in Northern Xinjiang*[C]. Beijing: Science Press, 185~198 (in Chinese).

Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, et al. 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China[J]. *J. Petrol.*, 47(10): 1997~2019.

Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, et al. 2005. Middle Devonian Picrites of South Margin of Altay Orogenic Belt and Implications for Tectonic Setting and Petrogenesis[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 289~297 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Yan Shenghao, et al. 2007. Geology and Geochemistry of the Late Paleozoic Volcanic Rocks of the South Margin of the Altai Mountains and Implications for Tectonic Evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 344~358 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

于学元, 梅厚钧, 杨学昌, 等. 1993. 额尔齐斯火山岩及构造演化[A]. 涂光炽. 新疆北部固体地球科学新进展[C]. 北京: 科学出版社, 185~198.

张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2005. 阿尔泰山南缘中泥盆统苦橄岩及其大地构造和岩石学意义[J]. *地球科学*, 30(3): 289~297.

张招崇, 周刚, 闫升好, 等. 2007. 阿尔泰山南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示[J]. *地质学报*, 81(3): 344~358.