

新疆北山地区坡北镁铁-超镁铁岩体单斜辉石的 矿物学特征及其地质意义

刘艳荣¹, 吕新彪^{1,2}, 梅 微¹, 代玉才³

(1. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 新疆地矿局第六地质大队, 新疆 哈密 839000)

摘 要: 单斜辉石是坡北镁铁-超镁铁杂岩体的主要造岩矿物之一, 在各岩相中普遍存在。本文对岩体各岩相中单斜辉石的矿物化学组成进行了电子探针和 LA-ICPMS 分析, 以探明岩体性质、形成的构造背景及演化过程。分析表明, 单斜辉石主要氧化物含量为: SiO_2 1.05% ~ 54.00%、 MgO 13.95% ~ 17.64%、 CaO 19.87% ~ 23.56%、 FeO 3.44% ~ 6.58%、 TiO_2 0.13% ~ 1.36%、 Al_2O_3 2.17% ~ 4.21%、 Na_2O 0.17% ~ 0.50%、 Cr_2O_3 0.01% ~ 1.27%。岩石判别图解表明寄主岩浆为亚碱性拉斑玄武岩, 形成于岛弧环境。单斜辉石的结晶温度范围介于 1141~1221℃。 ΣREE 和 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 值表明从(异剥)橄辉岩和橄辉单斜辉石岩到橄辉长岩和角闪辉长岩, 岩浆结晶作用增强。与岩浆正常结晶演化相比(异剥)橄辉岩和橄辉单斜辉石岩中单斜辉石的 SiO_2 、 Na_2O 含量有所增大, 角闪辉长岩和橄辉长岩中单斜辉石的 CaO 含量略有富集, 结合前人研究成果和围岩性质, 初步认为成岩过程中, 可能发生过地壳同化混染作用, 其中大理岩为角闪辉长岩和橄辉长岩提供了部分 Ca 元素, 而黑云母石英片岩则为(异剥)橄辉岩和橄辉单斜辉石岩贡献了 Si、Na 等。(异剥)橄辉岩和橄辉单斜辉石岩具较低的 FeO 含量, 此外黑云母石英片岩混入其中, 这可能是引起硫化物熔离的重要因素。

关键词: 坡北镁铁-超镁铁杂岩体, 单斜辉石, 岩浆系列, 构造背景, 同化混染

中图分类号: P578.954

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)02-0212-13

Mineralogy of clinopyroxene from Pobei mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang, and its geological significance

LIU Yan-rong¹, LÜ Xin-biao^{1,2}, MEI Wei¹ and DAI Yu-cai³

(1. Faculty of Resource Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. No. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Hami 839000, China)

Abstract: As the major rock-forming mineral in Pobei mafic-ultramafic complex, clinopyroxene is distributed in almost every rock phase. In order to find out the nature, evolution and tectonic setting of magma, the authors analyzed chemical compositions of clinopyroxene by means of EPMA and LA-ICPMS. The results demonstrate that clinopyroxene is characterized by SiO_2 (51.05% ~ 54.00%), MgO (13.95% ~ 17.64%), CaO (19.87% ~ 23.56%), FeO (3.44% ~ 6.58%), TiO_2 (0.13% ~ 1.36%), Al_2O_3 (2.17% ~ 4.21%), Na_2O (0.17% ~ 0.50%), and Cr_2O_3 (0.01% ~ 1.27%). The clinopyroxene discrimination diagrams show that the parent magma was sub-alkaline tholeiite and probably formed in an island arc setting. Clinopyroxene thermobarometer calculation shows that the crystallization temperature was from 1141℃ to 1221℃. ΣREE and $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ values

收稿日期: 2011-06-27; 修订日期: 2011-11-22

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAB06B04-05)

作者简介: 刘艳荣(1978-), 女, 博士研究生, 研究方向铜镍硫化物矿床岩浆演化与成矿; 通讯作者: 吕新彪, E-mail: lvxb_01@163.com

suggests that magma crystallization was intensified from wehrlite and olivine pyroxenite to olivine gabbro and hornblende gabbro. Combined with other data available, the authors believe that the magma was assimilated when it experienced fractional crystallization. Wehrlite and olivine pyroxenite have more SiO_2 and Na_2O , which might have come from biotite quartz schist, whereas olivine gabbro and hornblende gabbro have more CaO , which probably came from marble. Wehrlite and olivine pyroxenite have lower FeO and were assimilated by biotite quartz schist, which might have led to sulfide segregation.

Key words: Pobei mafic-ultramafic complex; clinopyroxene; igneous series; tectonic setting; assimilation

新疆北山早二叠世岩浆活动强烈,其中分布有大量的镁铁-超镁铁杂岩体,岩体规模较大,并普遍具有铜镍矿化,区内已发现的铜镍矿床(点)有坡北、罗东、红石山、笔架山、旋涡岭和蚕东等。坡北镁铁-超镁铁杂岩体是新疆“国家三〇五项目Ⅲ9”课题组在1989年发现的,岩体含矿性较好,具有一定的铜镍找矿前景,详细分析该岩体的形成背景、来源及演化,对认识含矿母岩中成矿元素的分配与富集机制具有重要意义。

近年来,前人对坡北岩体的地球化学特征和成岩成矿作用进行了大量研究(姜常义等,2006;李华芹等,2006,2009;孙燕等,2009),但岩体形成的构造背景和岩浆的演化过程等方面还存在较大分歧。目前对该区构造背景的认识主要有3种:岛弧环境(Ao *et al.*, 2010; 颜炜等,2011)碰撞造山后伸展阶段(李华芹等,2006,2009; Mao *et al.*, 2008)以及地幔柱成因(Qin *et al.*, 2011)。岩石地球化学特征和同位素特征均表明岩浆演化过程中发生过结晶分异作用和地壳物质混染作用(姜常义等,2006;李华芹等,2006,2009;颜炜等,2011),但没有指出详细的演化过程(如不同阶段发生了什么矿物的分离结晶?什么阶段什么位置混染了什么物质?)。造岩矿物作为岩浆演化的最终产物,蕴含着丰富的成岩、成矿作用信息,对其进行研究可以更细微地了解岩浆演化过程。此外,成矿元素在岩浆中的迁移、分配和富集与岩浆成分、演化过程和物理化学条件有着密切关系。

单斜辉石是镁铁-超镁铁岩的主要造岩矿物之一,也是坡北岩体所有岩相的主要矿物之一,所以其化学成分对确定坡北岩体母岩浆性质、分析岩浆演化过程及其物理化学条件、验证地壳物质混染作用以及探讨其构造环境具有重要意义。本文拟采用电子探针和LA-ICPMS技术,详细分析坡北镁铁-超镁铁杂岩体不同岩相内单斜辉石的矿物化学组成(包括主量和微量元素),旨在揭示该岩体的母岩浆性质和岩浆结晶分异过程,判别岩体是否经受过地壳物

质混染,具体混染物质是什么,并为岩体形成的构造环境提供约束条件。

1 岩体地质特征

坡北镁铁-超镁铁岩体位于北山裂谷带西段,夹持于白地洼断裂带和小长山南-平梁子断裂带之间。围岩主要为中元古界白湖群的黑云斜长变粒岩、大理岩和黑云母石英片岩夹似层状、透镜状白(绢)云母石英片岩,次为元古代变质侵入岩体。坡北岩体呈大型葫芦状产出,长轴方向为北东向,出露面积约 180 km^2 (图1)。岩体分带明显,主要岩相为角闪辉长岩相、辉长苏长岩相、橄榄辉长岩相、橄榄辉石岩和异剥橄榄岩相、斜长岩相。野外可观察到角闪辉长岩相出露面积最大,主要分布在岩盆中心部位,按岩体内部构造特征可分为东、西两个“颈状”相连的盆状侵入体。辉长苏长岩相分布在角闪辉长岩相之内,呈北东东向不规则小岩株及细长岩脉状产出。橄榄辉长岩相呈环形脉状及岩墙状产出,分布局限在角闪辉长岩相内。橄榄辉石岩-异剥橄榄岩相分布在杂岩体西段盆状岩体的近中心部位,呈透镜状、脉状岩枝产出,穿侵于环状橄榄辉长岩之中。斜长岩相呈东西向小岩脉状产于辉长苏长岩相单元之中,出露面积非常小(校培喜等,2004;孙燕等,2009)。

2 主要岩相学特征

角闪辉长岩相:为杂岩体最早侵位的岩石单元,也是主体岩相。岩石呈暗灰、暗灰绿色,具他形-自形粒状结构、辉长结构、嵌晶结构及反应边结构,流状构造、块状构造。主要由斜长石、单斜辉石和角闪石组成,其中斜长石呈自形-他形粒状,含量 $50\% \sim 70\%$,部分斜长石发生帘石化、粘土化。单斜辉石为半自形-他形粒状,含量 $20\% \sim 40\%$,常和斜长石构

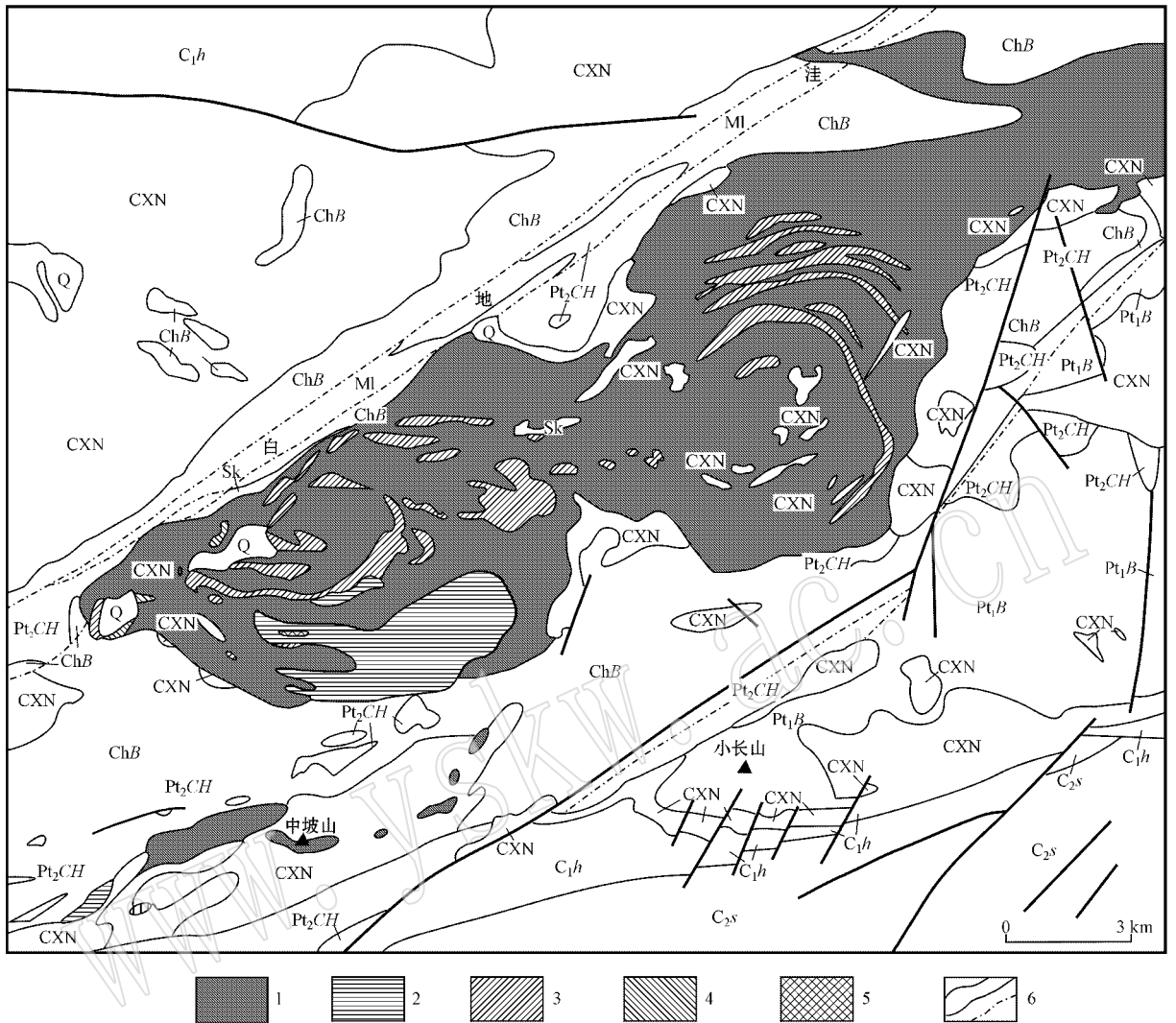


图 1 坡北杂岩体地质图(据孙燕等 2009 改绘)

Fig. 1 Geological map of the Pobei complex (modified after Sun *et al.*, 2009)

Q—第四纪； C_2s —上石炭统石板山组； C_1h —下石炭统红柳园组；ChB—中元古界白湖群； Pt_1B —古元古界北山群；CXN—小长山南超单元侵入岩； Pt_2CH —中元古界赤石山北超单元侵入岩；MI—糜棱岩；Sk—矽卡岩；1—角闪辉长岩；2—辉长苏长岩；3—橄榄辉长岩；4—橄榄辉石岩和异剥橄榄岩；5—斜长岩；6—实测地质界线/断层

Q—Quaternary； C_2s —upper Carboniferous Shibanshan Formation； C_1h —lower Carboniferous Hongliuyuan Formation；ChB—Mesoproterozoic Baihu Group； Pt_1B —Paleoproterozoic Beishan Group；CXN—Xiaochangshan south super-unit intrusion； Pt_2CH —Mesoproterozoic Chishishan north super-unit intrusion；MI—mylonite；Sk—skarn；1—hornblende gabbro；2—gabbro norite；3—olivine gabbro；4—olivine pyroxenite and wehrlite；5—plagioclase；6—geological boundary/fault

成辉长结构,局部包含斜长石嵌晶(图 2a),边缘和表面被角闪石交代形成反应边或补丁状,蚀变强烈,常发生纤闪石化和绿泥石化。角闪石呈褐色-绿褐色,多为他形粒状,含量 5%~10%,充填在斜长石和单斜辉石的边缘或颗粒间隙。

橄榄辉长岩相:该岩相侵位时间较角闪辉长岩相略晚。主要岩石类型包括橄榄辉长岩和橄长岩。

橄榄辉长岩 岩石呈深灰色、褐灰色,中-细粒辉长结构、包橄结构及反应边结构,块状构造。斜长石为半自形-他形板粒状,含量 40%~65%,和单斜辉石构成辉长结构。单斜辉石多呈半自形-他形粒状,含量 20%~30%,边缘或表面发生角闪石化形成反应边和补丁状。橄榄石呈浑圆粒状,含量 5%~8%,被斜长石、辉石和角闪石包含形成包橄结构,裂理发

育,沿裂理或边缘发生伊丁石化、蛇纹石化,蚀变较强。角闪石具他形粒状,含量2%~4%,分布在辉石边缘或其他矿物颗粒间隙中。

橄长岩:灰白色、灰色,半自形-他形板粒状结构、包橄结构,块状构造。斜长石为半自形-他形粒状,局部发生黝帘石化、绿泥石化,含量60%~80%。橄榄石呈半自形-浑圆状,被斜长石包裹形成包橄结构,发育裂理,沿裂理和边缘发生蛇纹石和滑石化,含量15%~30%。辉石多为他形粒状,分布在橄榄石边缘或斜长石颗粒间隙,含量2%~3%。

橄榄辉石岩和异剥橄榄岩相:为杂岩体较晚侵位的岩石单元,是铜镍矿体的主岩。该岩相主要的岩石类型包含(异剥)橄榄岩和橄榄单辉辉石岩。

橄榄单辉辉石岩:深灰色或灰绿色,自形-半自

形粒状结构、嵌晶结构、包橄结构,块状构造。单斜辉石呈自形-半自形粒状(图2b),个别颗粒的边缘或裂隙被角闪石交代,蚀变中等,含量70%~90%。橄榄石呈浑圆状,被单斜辉石包含构成典型的包橄结构,裂理发育,沿边缘和裂理发生蛇纹石和伊丁石化,含量5%~15%。斜长石量少,充填在单斜辉石的颗粒间隙或呈嵌晶包含在辉石颗粒中,含量3%~5%。

(异剥)橄榄岩:黑色或黑绿色,他形-自形粒状结构、包橄结构、堆晶结构,块状构造、流状构造。橄榄石呈自形-半自形粒状结构、包橄结构(图2c)、堆晶结构(图2d),裂理发育,沿边缘和裂隙蛇纹石化、绿泥石化及伊丁石化强烈,多可见橄榄石残留晶,含量60%~95%。单斜辉石分布在橄榄石颗粒间隙或

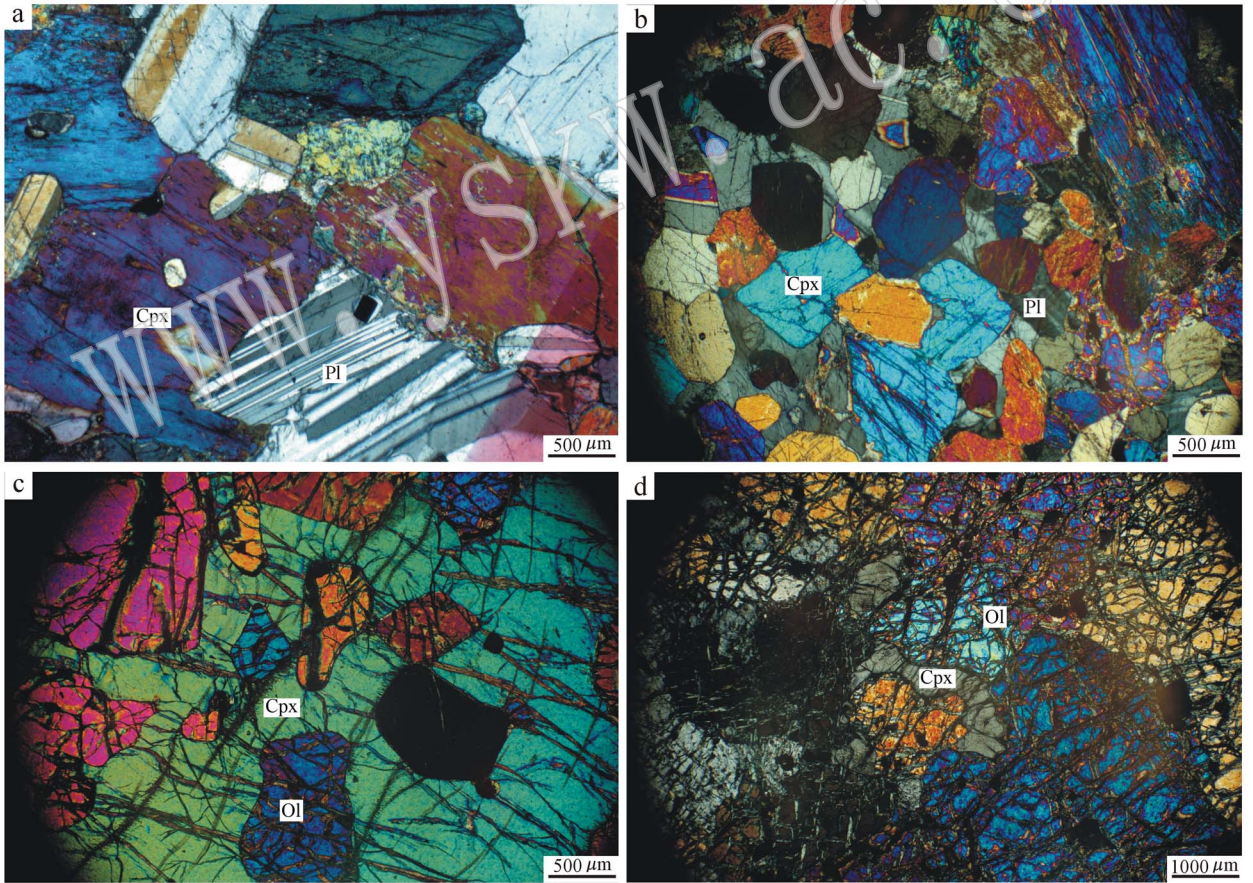


图2 坡北杂岩体岩石学特征(正交偏光)

Fig. 2 Photomicrographs of representative rocks from Pobei complex (crossed nicols)

a—角闪辉长岩,辉长结构和嵌晶结构; b—橄榄单辉辉石岩,自形-半自形单斜辉石间隙充填他形斜长石; c—异剥橄榄岩,包橄结构;

d—橄榄岩,堆晶结构; Ol—橄榄石; Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石

a—gabbro texture and poikilitic texture in hornblende-gabbro; b—euhedral-subhedral clinopyroxene with interstitial plagioclase in olivine-clinopyroxene; c—olivine inclusions in wehrlite; d—olivine cumulus crystals in peridotite; Ol—olivine; Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase

包含橄榄石,常蚀变为纤闪石和绿泥石,其在橄榄岩中含量较少(4%~8%),异剥橄榄岩中含量增多,约10%~40%。角闪石呈不规则状粒状分布在辉石边缘和表面,或者其他矿物的颗粒间隙,含量1%~4%左右。此外,含极少量的斜长石1%~2%。

3 样品分析及结果

用于电子探针及 LA-ICPMS 分析的样品均制备成 0.05 mm 厚的光薄片。单斜辉石电子探针成分分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室电子探针室完成,仪器型号为 JCSA-733 型,分析条件为:加速电压 15 kV,电流 20 nA,分析束斑直径为 10 μm ,峰计数时间 20 s,背景计数时间 10 s,分析精度为 0.01%,测试结果见表 1。单斜辉石的微量和稀土元素测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室的 LA-ICPMS 室完成。激光剥蚀系统是配备有 193 nm Agilent 7500a 激光器的 GeoLas2005 型,分析采用的激光剥蚀半径为 40 μm ,激光脉冲为 8 Hz,能量为 80 mJ,针对不同的元素,检测限 $< 46 \times 10^{-6}$,测试结果见表 2。

4 矿物化学成分

4.1 主量元素特征

坡北镁铁-超镁铁岩体单斜辉石的主要氧化物成分见表 1,其中 SiO_2 51.05%~54.00%、 MgO 13.95%~17.64%、 CaO 19.87%~23.56%、 FeO 3.44%~6.58%、 TiO_2 0.13%~1.36%、 Al_2O_3 2.17%~4.21%、 Na_2O 0.17%~0.50%、 Cr_2O_3 0.01%~1.27%,总体上表现为低 Ti、Al、Na 特征,与东疆造山带镁铁-超镁铁质杂岩中单斜辉石的特征(TiO_2 0.09%~1.77%、 Al_2O_3 1.5%~4.8%、 Na_2O 0.27%~0.97%)相似(顾连兴等,1994)。(异剥)橄榄岩、橄榄单辉辉石岩中单斜辉石的 $\text{Mg}^\# = 85.40 \sim 88.62$ 橄长岩、橄榄辉长岩和角闪辉长岩中单斜辉石的 $\text{Mg}^\# = 80.40 \sim 82.69$,随着岩石基性程度降低, $\text{Mg}^\#$ 呈逐渐降低趋势, Cr_2O_3 与 $\text{Mg}^\#$ 具正相关关系,表明单斜辉石由富镁、铬向富铁演化。 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 CaO 、 SiO_2 与 $\text{Mg}^\#$ 之间没有明显的相关性(图 3)。橄长岩具有最高的 TiO_2 、 Al_2O_3 含量,可能是上侵过程中快速冷却的原因(Grove & Bence, 1979)。

根据 Morimoto(1988)的辉石分类命名方案,坡北岩体所有的单斜辉石均属 Ca-Mg-Fe 辉石族,在 Wo-En-Fs 图中(图 4),主要位于透辉石和普通辉石区($\text{Wo} = 40.79 \sim 48.81$ 、 $\text{En} = 40.98 \sim 49.72$ 、 $\text{Fs} = 5.71 \sim 11.02$)与新疆同类岩体相比(图 4),其特征与白石泉岩体($\text{Wo} = 40.85 \sim 49.13$ 、 $\text{En} = 41.02 \sim 51.21$ 、 $\text{Fs} = 7.94 \sim 11.70$,柴凤梅等,2006)的单斜辉石成分一致,但比旋窝岭($\text{Wo} = 28.4 \sim 47.1$ 、 $\text{En} = 45.5 \sim 55.2$ 、 $\text{Fs} = 6.3 \sim 16.5$,苏本勋等,2010)、黄山东($\text{Wo} = 32.93 \sim 48.85$ 、 $\text{En} = 43.87 \sim 52.90$ 、 $\text{Fs} = 2.41 \sim 18.77$,倪志耀,1994)和红石山($\text{Wo} = 27.0 \sim 47.7$ 、 $\text{En} = 44.6 \sim 66.6$ 、 $\text{Fs} = 5.5 \sim 22.6$,苏本勋等,2009)等岩体中单斜辉石的化学成分变化范围小,表明其经历了较弱的结晶分异程度。

4.2 微量元素和稀土元素特征

坡北岩体的单斜辉石具有相同的 REE 配分模式,稀土元素配分曲线(图 5a)整体表现为两端轻、重稀土元素低、中稀土略富集呈微弱上凸的弧形,中稀土富集可能是单斜辉石富钙的缘故。轻稀土亏损型的配分模式表明在源区有早期的部分熔融作用,亏损轻稀土后,再次部分熔融形成的(郭伟等,2006)。单斜辉石的稀土总量相对较高(表 2),其中橄长岩中单斜辉石的 ΣREE 最高,在 $32.85 \times 10^{-6} \sim 48.65 \times 10^{-6}$ 之间,平均 40.75×10^{-6} ;橄长辉长岩和角闪辉长岩中单斜辉石的稀土总量次之, $\Sigma\text{REE} = 16.67 \times 10^{-6} \sim 24.99 \times 10^{-6}$,平均 21.75×10^{-6} ;橄长单辉辉石岩和(异剥)橄长岩中单斜辉石的 ΣREE 最低,为 $10.77 \times 10^{-6} \sim 37.92 \times 10^{-6}$,平均 19.28×10^{-6} 。稀土元素的分馏程度也具有一定的变化规律,橄长岩中单斜辉石的 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N = 0.18 \sim 0.24$,橄长辉长岩和角闪辉长岩中单斜辉石的 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N = 0.47 \sim 0.81$ (异剥)橄长岩和橄长单辉辉石岩中除了一个数据 > 1 外,其他样品的 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N = 0.25 \sim 0.7$ 、 $\delta\text{Eu} = 0.71 \sim 1.31$,矿物具有弱的正铈或负铈异常。

在单斜辉石微量元素原始地幔标准化图(图 5b)上可以看出,大离子亲石元素(Ba、Rb、Sr、K)亏损,而高场强元素(Th、U、Y、HREE)较为富集。Rb 是典型的亲岩分散稀有碱性元素,Sr 和 Ba 是碱土金属族分散元素,它们在岩浆岩中不易形成独立矿物,大多与钾和钙呈类质同像替代关系,在火成岩类岩石中主要应富集于碱性长石、斜长石等富 K、Ca 矿物相中(刘英俊等,1984),推测单斜辉石中大离子亲石元素亏损可能是早期结晶的少量斜长石造成或岩体来

表1 坡北镁铁-超镁铁杂岩体中单斜辉石电子探针分析结果

Table 1 Composition of clinopyroxene from Pobei mafic-ultramafic complex

岩石名称 样品编号	橄榄岩		异剥橄榄岩		橄榄单辉辉石岩						橄长岩						橄辉长岩			角闪辉长岩			w _B /%
	py-1-2-6	py-1-2-4	ps-5-1-2	ps-5-1-4	ps-7-1-1	ps-7-1-3	ps-7-1-4	ps-7-1-6	py-3-1-3	py-3-1-4	py-3-1-6	ps-2-3-4	ps-2-3-3	py-4-1-9	py-4-1-6	py-4-1-2	py-5-1-6	py-5-1-3	py-5-1-1				
SiO ₂	51.49	52.32	51.84	51.47	52.72	52.64	52.86	53.15	53.17	52.47	53.28	51.42	51.05	52.39	52.28	52.59	51.87	54.00	53.23				
TiO ₂	0.35	0.36	0.28	1.09	0.27	0.47	0.45	0.33	0.16	0.13	0.22	1.36	0.73	0.58	0.64	0.64	0.30	0.20	0.23				
Al ₂ O ₃	3.99	3.69	3.54	3.87	2.43	3.13	3.18	2.28	2.41	2.85	3.15	4.21	3.98	2.92	2.58	2.47	2.95	2.17	2.56				
Cr ₂ O ₃	1.20	1.25	1.27	1.25	0.69	0.69	0.45	0.56	0.58	0.94	0.80	0.69	0.80	0.14	0.17	0.16	0.01	0.10	0.10				
FeO	3.44	3.60	3.67	4.69	4.19	4.57	3.86	5.38	4.60	4.19	4.41	5.99	6.58	6.10	5.78	6.23	5.69	6.12	5.71				
MnO	0.03	0.16	0.16	0.11	0.22	0.10	0.13	0.22	0.04	0.29	0.15	0.04	0.28	0.06	0.13	0.15	0.11	0.18	0.14				
MgO	14.85	15.38	16.04	16.84	16.11	17.00	15.38	17.64	16.72	15.27	16.16	15.48	16.24	14.64	13.95	14.37	14.75	16.04	15.33				
CaO	23.13	22.40	21.81	19.96	22.44	20.47	23.56	20.14	21.30	22.96	21.89	20.33	19.87	22.97	22.64	22.56	23.19	21.48	22.26				
Na ₂ O	0.50	0.47	0.35	0.36	0.25	0.26	0.29	0.17	0.34	0.42	0.43	0.37	0.34	0.44	0.37	0.34	0.37	0.28	0.32				
Total	98.98	99.63	98.96	99.64	99.32	99.33	100.16	99.87	99.32	99.52	100.49	99.89	99.87	100.24	98.54	99.51	99.24	100.57	99.88				
以6个氧离子为单位计算阳离子																							
Si	1.904	1.917	1.912	1.886	1.941	1.929	1.93	1.942	1.951	1.934	1.935	1.888	1.882	1.928	1.953	1.948	1.928	1.967	1.955				
^{IV} Al	0.096	0.083	0.088	0.114	0.059	0.071	0.07	0.058	0.049	0.066	0.065	0.112	0.118	0.072	0.047	0.052	0.072	0.033	0.045				
^{VI} Al	0.078	0.077	0.066	0.053	0.047	0.064	0.067	0.040	0.056	0.057	0.07	0.070	0.055	0.055	0.066	0.056	0.057	0.060	0.066				
Ti	0.010	0.010	0.008	0.030	0.008	0.013	0.012	0.009	0.005	0.004	0.006	0.038	0.020	0.016	0.018	0.018	0.008	0.006	0.006				
Cr	0.035	0.036	0.037	0.036	0.020	0.020	0.013	0.016	0.017	0.027	0.023	0.020	0.023	0.004	0.005	0.005	0.000	0.003	0.003				
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.035	0.017	0.000	0.000	0.038	0.000	0.000				
Fe ²⁺	0.106	0.111	0.113	0.144	0.129	0.140	0.118	0.164	0.141	0.122	0.134	0.185	0.167	0.171	0.181	0.194	0.138	0.187	0.176				
Mn	0.001	0.005	0.005	0.004	0.007	0.003	0.004	0.007	0.001	0.009	0.005	0.001	0.009	0.002	0.004	0.005	0.004	0.006	0.004				
Mg	0.818	0.840	0.882	0.920	0.884	0.929	0.837	0.961	0.915	0.839	0.875	0.847	0.893	0.803	0.777	0.794	0.817	0.871	0.839				
Ca	0.916	0.879	0.862	0.784	0.885	0.803	0.922	0.788	0.837	0.907	0.852	0.800	0.785	0.906	0.906	0.896	0.923	0.838	0.876				
Na	0.035	0.033	0.025	0.025	0.018	0.019	0.021	0.012	0.024	0.030	0.030	0.027	0.024	0.031	0.027	0.024	0.026	0.019	0.023				
辉石端员组分																							
Wo	48.81	47.07	45.67	41.76	46.03	42.42	48.48	40.79	43.64	47.38	44.94	43.00	41.04	46.95	47.81	46.85	47.43	43.62	45.68				
En	43.59	44.97	46.73	49.03	45.99	49.03	44.02	49.72	47.67	43.84	46.17	45.57	46.67	41.63	40.98	41.52	41.98	45.33	43.75				
Fs	5.71	6.18	6.26	7.85	7.07	7.57	6.42	8.85	7.42	7.21	7.31	10.00	11.02	9.82	9.79	10.37	9.23	10.03	9.38				
Ac	1.89	1.78	1.33	1.36	0.91	0.98	1.08	0.64	1.28	1.57	1.58	1.43	1.27	1.61	1.42	1.26	1.36	1.01	1.18				
Cr [#]	16.81	18.56	19.46	17.80	15.90	12.91	8.66	14.12	13.79	18.10	14.48	9.83	11.89	3.18	4.12	4.12	0.27	3.06	2.53				
Mg [#]	88.50	88.37	88.62	86.48	87.26	86.88	87.65	85.40	86.63	86.68	86.71	82.11	81.53	81.07	81.07	80.40	82.27	82.32	82.69				

注: Mg[#] = Mg/(Mg+Fe), Cr[#] = Cr/(Cr+Al)。

$\omega_B/10^{-6}$

表 2 坡北镁铁-超镁铁杂岩体中单斜辉石微量元素及稀土元素含量

Table 2 REE and trace elements abundances of clinopyroxenes in Pobei mafic-ultramafic complex

岩石名称 样品编号	橄榄岩				异剥橄榄岩				橄榄单辉石岩				橄辉单辉石岩				单斜橄长岩				橄辉长岩				角闪辉长岩					
	py-1-2-4	py-1-2-6	ps-5-1-2	ps-5-1-4	ps-5-1-2	ps-5-1-4	py-3-1-3	py-3-1-4	py-3-1-6	ps-7-1-1	ps-7-1-3	ps-7-1-4	ps-7-1-6	ps-2-3-3	ps-2-3-4	py-4-1-2	py-4-1-6	py-4-1-7	py-4-1-9	py-5-1-1	py-5-1-3	py-5-1-6	py-5-1-1	py-5-1-3	py-5-1-6	py-5-1-1	py-5-1-3	py-5-1-6		
Rb	0.15						0.06	0.13	0.08		0.16	0.01					0.17	0.04		0.15	0.03				0.03	0.07		0.03	0.05	0.00
Ba		0.16	0.29				0.00	0.42	0.04		0.59							0.26		0.36	0.02				0.23	0.20	0.25	0.21		
Th	0.14	0.00	0.02				0.03	0.06	0.02		0.03	0.13						0.05		0.15	0.12				0.10	0.06	0.05	0.06		
U	0.06	0.01	0.01				0.01	0.01	0.04		0.04	0.02						0.01		0.05	0.05				0.05	0.02	0.04	0.02		
Nb	0.09	0.04	0.05				0.04	0.10	0.10		0.09	0.04						0.12		0.08	0.04				0.04	0.09	0.00	0.09	0.07	
Ta	0.01	0.01	0.01				0.01	0.01	0.02		0.01							0.01		0.01	0.01				0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	
K	0.94	2.53	0.91	3.56			7.83	9.72	2.03	3.59	20.65	8.20	1.02	51.45	11.08	24.90	4.28	15.44	11.63	3.91	11.79	1.85			11.63	3.91	11.79	1.85		
La	0.72	0.32	0.42	0.78			0.44	0.58	0.41	0.63	0.59	0.68	0.66	0.45	0.42	0.86	0.89	0.86	0.92	0.91	0.64	0.95			0.86	0.92	0.91	0.64	0.95	
Ce	3.60	1.76	2.12	3.85			2.20	2.52	2.55	1.69	1.80	2.22	2.33	3.76	2.46	3.68	3.61	3.58	3.41	3.80	2.98	3.63			3.41	3.80	2.98	3.63		
Pb	0.03	0.00	0.19	0.13			0.19	0.23	0.11	0.20	0.19	0.18	0.10	0.19	0.09	1.84	0.07	0.15	0.13	0.08	0.18	0.05			0.13	0.08	0.18	0.05		
Pr	0.65	0.60	0.51	0.99			0.44	0.62	0.43	0.39	0.35	0.38	0.50	1.10	0.63	0.80	0.73	0.70	0.81	0.73	0.55	0.71			0.81	0.73	0.55	0.71		
Sr	13.13	13.61	22.11	24.52			17.70	19.33	18.38	16.61	18.49	16.75	15.06	19.85	17.35	27.87	26.25	26.79	28.59	31.30	26.37	32.42			26.79	28.59	31.30	26.37	32.42	
Nd	5.96	4.17	4.03	7.36			2.67	3.27	2.61	1.77	2.62	3.23	2.34	8.27	5.08	4.77	4.59	5.53	4.67	4.26	4.17	4.30			4.77	4.59	4.17	4.30		
Zr	18.90	16.17	19.22	29.94			10.12	12.87	8.96	6.22	8.45	7.46	5.87	44.47	24.42	15.32	16.96	18.26	14.45	10.14	9.96	14.48			14.45	10.14	9.96	14.48		
Hf	0.87	0.66	0.78	1.51			0.41	0.64	0.50	0.31	0.57	0.52	0.29	1.92	0.80	0.79	0.78	0.69	0.69	0.38	0.31	0.41			0.69	0.38	0.31	0.41		
Sm	2.24	1.86	1.75	3.12			1.48	1.62	1.26	1.10	1.47	1.08	0.93	3.94	2.67	2.04	1.83	1.60	2.14	1.04	0.85	1.54			2.04	1.04	0.85	1.54		
Eu	0.95	0.80	0.71	1.17			0.50	0.52	0.37	0.30	0.38	0.48	0.35	1.25	0.91	0.82	0.80	0.77	0.94	0.55	0.52	0.49			0.82	0.55	0.52	0.49		
Gd	3.66	3.00	3.43	5.65			1.67	1.83	2.04	0.96	1.63	1.62	1.80	7.01	4.32	2.89	3.33	2.74	3.49	1.96	1.69	2.09			3.49	1.96	1.69	2.09		
Tb	0.68	0.64	0.55	0.82			0.39	0.38	0.42	0.23	0.28	0.32	0.21	1.35	0.95	0.46	0.50	0.58	0.51	0.41	0.28	0.29			0.51	0.41	0.28	0.29		
Dy	3.97	3.72	3.18	5.96			2.27	2.36	2.23	1.63	2.18	2.01	1.94	9.02	5.71	2.98	3.32	2.42	3.36	2.05	1.77	1.99			3.36	2.05	1.77	1.99		
Y	21.22	19.06	17.10	28.22			11.55	10.89	12.53	8.85	10.19	9.45	9.27	43.83	30.51	15.38	16.32	16.68	15.92	12.17	10.94	9.92			15.92	12.17	10.94	9.92		
Ho	0.86	0.75	0.74	1.12			0.41	0.49	0.54	0.28	0.44	0.42	0.34	1.54	1.20	0.59	0.61	0.70	0.70	0.51	0.45	0.45			0.70	0.51	0.45	0.45		
Er	2.33	2.10	1.90	3.35			1.38	1.29	1.55	0.89	1.11	1.16	0.97	5.47	3.99	1.88	1.98	1.64	1.85	1.44	1.30	1.19			1.85	1.44	1.30	1.19		
Tm	0.27	0.25	0.22	0.47			0.19	0.16	0.18	0.13	0.17	0.15	0.12	0.62	0.45	0.21	0.25	0.19	0.24	0.20	0.15	0.18			0.24	0.20	0.15	0.18		
Yb	2.11	1.94	1.93	2.95			1.40	1.12	1.60	0.67	1.22	1.22	0.60	4.38	3.71	1.70	2.13	1.92	1.78	1.30	1.20	1.24			1.78	1.30	1.20	1.24		
Lu	0.17	0.20	0.17	0.34			0.18	0.10	0.15	0.12	0.12	0.10	0.10	0.50	0.36	0.21	0.21	0.19	0.17	0.17	0.11	0.13			0.17	0.17	0.11	0.13		
∑REE	28.16	22.11	21.66	37.92			15.62	16.86	16.36	10.77	14.35	15.08	13.19	48.65	32.85	23.89	24.79	23.42	24.99	19.35	16.67	19.17			23.42	19.35	16.67	19.17		
δEu	1.01	1.04	0.86	0.84			0.97	0.91	0.71	0.87	0.75	1.10	0.80	0.72	0.82	1.03	0.97	1.11	1.05	1.16	1.31	0.83			1.05	1.16	1.31	0.83		
(La/Yb) _N	0.24	0.12	0.15	0.19			0.23	0.37	0.18	0.68	0.34	0.40	0.79	0.07	0.08	0.37	0.30	0.32	0.37	0.50	0.38	0.55			0.37	0.50	0.38	0.55		
(Ce/Yb) _N	0.47	0.25	0.31	0.36			0.44	0.62	0.44	0.70	0.41	0.51	1.08	0.24	0.18	0.60	0.47	0.52	0.53	0.81	0.69	0.81			0.53	0.81	0.69	0.81		

注:表中空白为没有达到检测限。

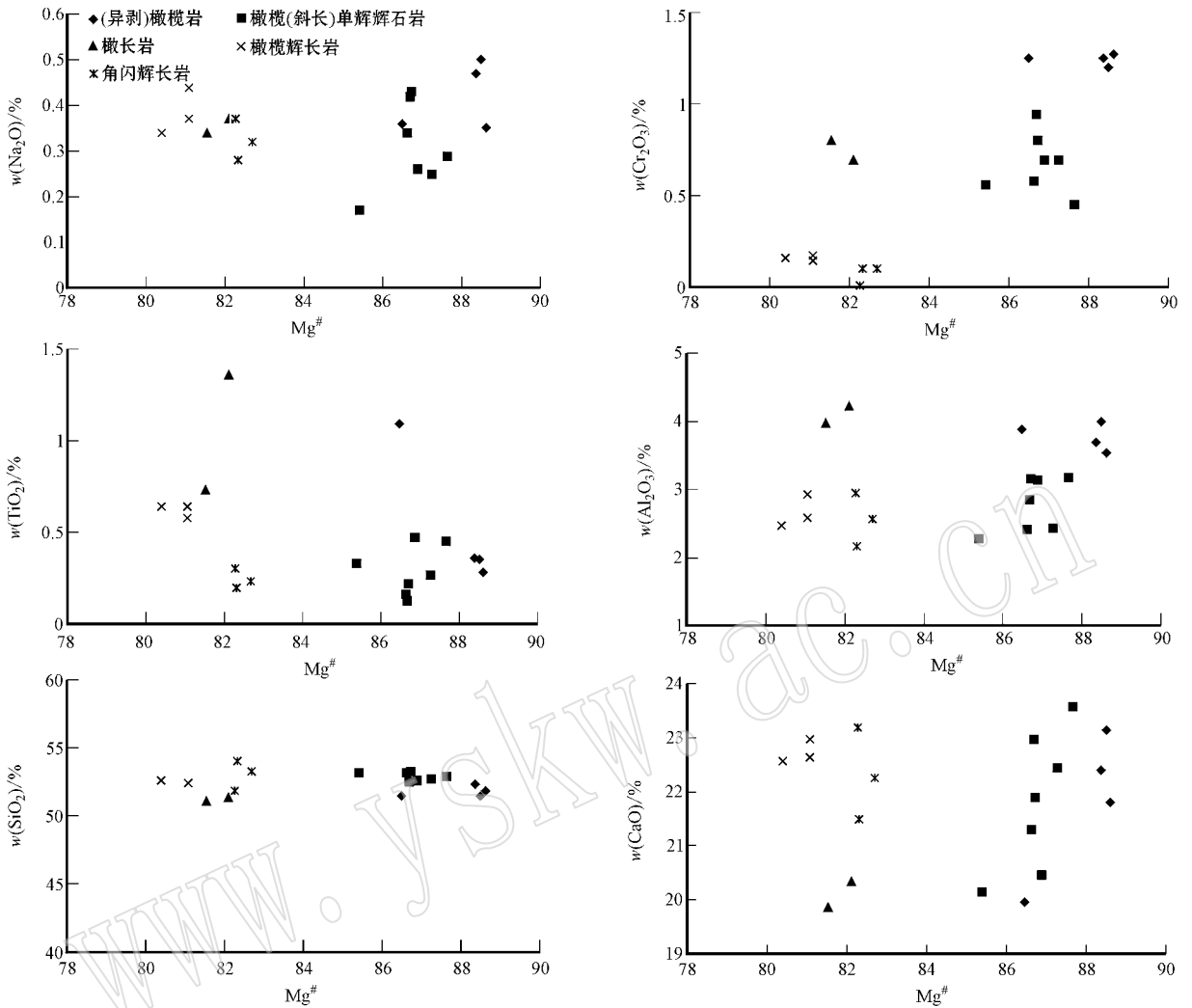


图 3 单斜辉石化学组分相关图

Fig. 3 Oxide compound correlation diagrams of clinoproxenes

源于亏损地幔。此外,在原始地幔标准化图上, Nb/Ta 和 Zr/Hf 分馏明显, Nb 和 Zr 显示负异常, Ta 和 Hf 具有弱的正异常,这与它们在单斜辉石和玄武岩熔体间的分配系数相符,表明造成其分馏的原因主要是单斜辉石结晶分异作用。

5 讨论

5.1 岩体母岩浆成分系列

对坡北岩体母岩浆性质的研究已取得一定的进展。岩石系列划分 SiO₂-全碱图解上,样品落在亚碱性玄武岩区,AFM 图解上,样品大部分落在拉斑玄武岩系列岩区,少部分位于钙碱性系列岩区,表明岩体母岩浆主要为亚碱性拉斑玄武岩(姜常义等,

2006)。岩石铂族元素特征分析也证实其母岩浆为高镁玄武岩(未发表)。

研究表明,单斜辉石的成分可以很好地反映母岩浆的成分特点(Le Bas, 1962; 邱家骧等, 1996)。Kushir(1960)与 Le Bas(1962)研究发现,火成岩中 Si 与 Al 具互不相容的作用,它们可以作为确定母岩浆类型的标型元素。在单斜辉石的 SiO₂-Al₂O₃ 图解上(图 6a),所有样品均落在亚碱性区域,表明其母岩浆属亚碱性系列。单斜辉石具低 TiO₂、Al₂O₃、Na₂O 特征,在 Al^{IV}-Si 图解上(图 6b)均位于拉斑玄武岩区,表明母岩浆应属拉斑玄武岩系列。此外,随着岩石基性程度降低,单斜辉石的成分由富镁向富铁演化,与拉斑玄武岩的演化趋势相一致(Deer *et al.*, 1992)。

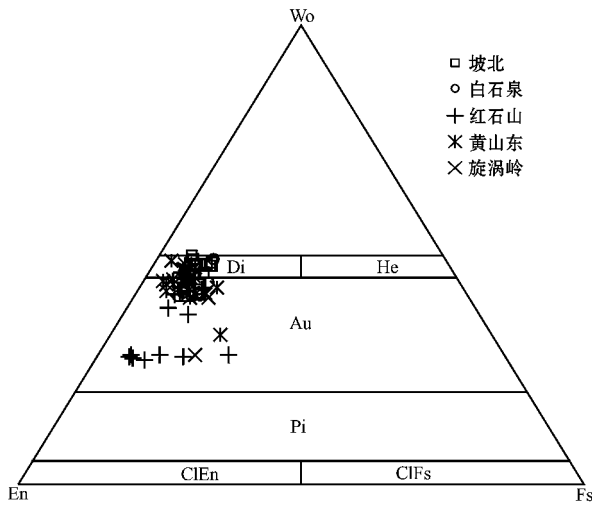
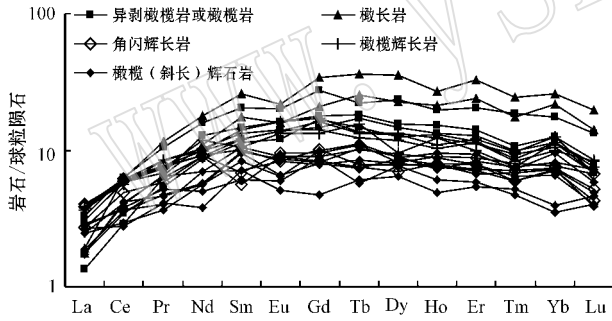


图 4 单斜辉石的 Wo-En-Fs 图解 (据 Morimoto, 1988)
Fig. 4 Wo-En-Fs diagram of clinoproxenes (after Morimoto, 1988)

Di—透辉石; He—钙铁辉石; Au—普通辉石; Pi—紫苏辉石;
ClEn—古铜辉石; ClFs—铁紫苏辉石
Di—diopside; He—prothoitite; Au—augite; Pi—hypersthene;
ClEn—bronzite; ClFs—ferrohypersthene



5.2 岩浆演化过程

5.2.1 分离结晶过程

单斜辉石从(异剥)橄长岩和橄长单辉辉石岩到橄辉长岩和角闪辉长岩,其 $Mg^\#$ 、 Cr_2O_3 含量降低, FeO 含量略为增大,符合拉斑玄武岩从富镁向富铁的演化趋势。同一母岩浆随着结晶分异作用的进行,由于稀土元素在单斜辉石和熔体之间的分配系数 < 1 ,残余岩浆中的稀土元素总量将会增加,所以后结晶矿物比先结晶矿物含有更高的稀土元素。此外,单斜辉石的 $K_{DLREE}^{Cpx/L} < K_{DHREE}^{Cpx/L} (K_{DLREE}^{Cpx/L}, K_{DHREE}^{Cpx/L})$ 分别为轻、重稀土元素在单斜辉石和熔体之间的分配系数)轻稀土元素更富集于熔体相 ($Ce/Yb)_N$ 值随着岩石结晶程度增强有增大的趋势。橄辉长岩和角闪辉长岩中单斜辉石的稀土总量和 $(Ce/Yb)_N$ 值总体上都较(异剥)橄长岩和橄长单辉辉石岩中单斜辉石的值高,反映其结晶程度较后者高。橄长岩作为岩浆演化的中间相,却具有最高的稀土总量,最低的 $(Ce/Yb)_N$ 比值和 δEu 值,这可能是斜长石早于单斜辉石结晶的原因,因为稀土元素在斜长石和熔

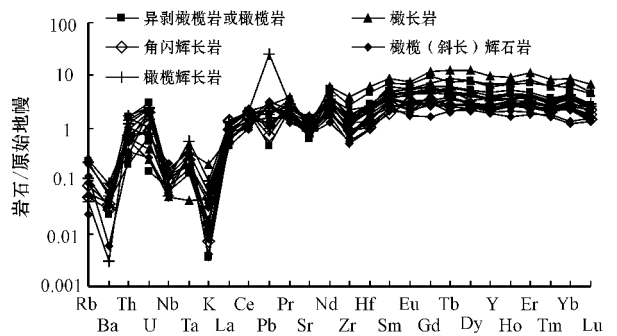


图 5 单斜辉石稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和原始地幔标准化蛛网图(b, 据 Sun & McDonough, 1989)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements patterns of clinoproxenes (b, after Sun & McDonough, 1989)

体之间的分配系数,除了 $Eu > 1$ 以外,其他元素均小于 1,并且 $K_{DLREE}^{Pl/L} > K_{DHREE}^{Pl/L} (K_{DLREE}^{Pl/L}, K_{DHREE}^{Pl/L})$ 分别为轻、重稀土元素在斜长石和熔体之间的分配系数)。岩相学观察也证实橄长岩中部分斜长石结晶早于单斜辉石。

5.2.2 辉石结晶温度

侵入岩体造岩矿物结晶温度的计算方法,主要是在相平衡的原理上,结合大量高温高压熔融实验数据推导出来的,而实际地质过程远远较实验模拟过程复杂,因此目前尚未有一个合适且准确的方法

来计算矿物的结晶温度。马鸿文(1985)在前人研究基础上,提出了修正的单斜辉石与温度的关系式: $t_1(^\circ C) = 1097.135 + 33.133 X_{Ca}^{Cpx} - 0.764 (X_{Ca}^{Cpx})^2 + 11Al_2O_3$ 。其中 $X_{Ca}^{Cpx} = Ca / (Ca + Mg + Fe^{2+})$ 。通过计算得到坡北岩体单斜辉石的结晶温度介于 $1142 \sim 1164^\circ C$ (表 3)。Thompson(1974)采用天然富橄辉石碱性玄武岩岩粉合成了高压普通辉石,给出了 Al 含量与温度之间的关系式: $t_2(^\circ C) = 1056.8986 + 902.7978(Al)$,利用此公式可以估算出坡北岩体单斜辉石的结晶温度为 $1141 \sim 1221^\circ C$ (表 3)。上述两

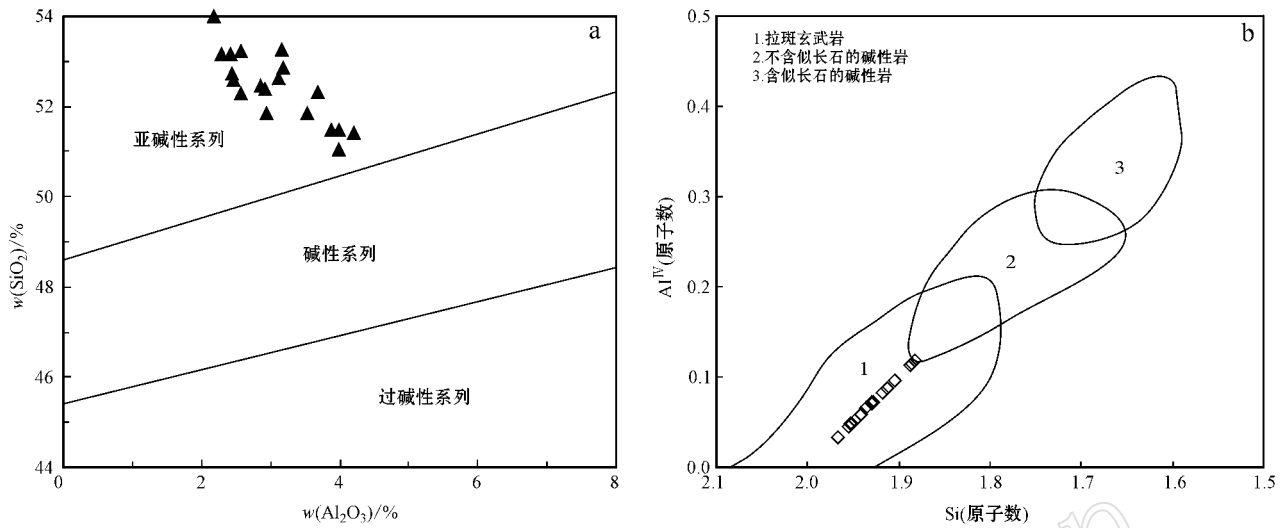


图 6 单斜辉石的 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (a, 据张旗, 1992) 和 $\text{Al}^{\text{IV}} - \text{Si}$ 关系图 (b, 据 Kushiro, 1960)

Fig. 6 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram (a, after Zhang Qi, 1992) and $\text{Al}^{\text{IV}} - \text{Si}$ diagram (b, after Kushiro, 1960) of clinopyroxenes

表 3 单斜辉石的结晶温度 $^{\circ}\text{C}$

Table 3 Crystallization temperatures of clinopyroxenes

岩石名称	样品编号	t_1	t_2
橄榄岩	py-1-2-6	1 214	1 157
	py-1-2-4	1 201	1 163
异剥	ps-5-1-2	1 196	1 160
橄榄岩	ps-5-1-4	1 208	1 160
	ps-7-1-1	1 153	1 149
橄榄斜长 单辉辉石岩	ps-7-1-3	1 179	1 153
	ps-7-1-4	1 181	1 160
	ps-7-1-6	1 145	1 142
橄榄单辉 辉石岩	py-3-1-3	1 152	1 146
	py-3-1-4	1 168	1 155
	py-3-1-6	1 179	1 155
橄长岩	ps-2-3-4	1 221	1 164
	ps-2-3-3	1 213	1 161
橄榄辉长岩	py-4-1-9	1 172	1 156
	py-4-1-6	1 159	1 152
	py-4-1-2	1 154	1 150
角闪 辉长岩	py-5-1-6	1 173	1 157
	py-5-1-3	1 141	1 144
	py-5-1-1	1 157	1 150

种方法计算出来的温度值非常接近,同高怀忠 (1992) 估算的单斜辉石结晶温度值 (983~1 288 $^{\circ}\text{C}$) 也比较吻合,总的来讲,代表了单斜辉石的结晶温度范围。

5.2.3 地壳混染作用

按照鲍文反应序列,单斜辉石按镁辉石→镁钙辉石的顺序结晶,即 Mg 最先进入结晶相,然后是 Ca 和 Al ,最后是 Na 和 K (Bowen, 1928) 随着矿物结晶

分异作用,可以造成岩浆中 Si 、 Na 、 K 的富集和 Mg 、 Ca 、 Al 的亏损。单斜辉石化学成分显示 (表 1, 图 3), 从 (异剥) 橄岩和橄榄单辉辉石岩到橄榄辉长岩和角闪辉长岩, MgO 、 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 含量降低,符合岩浆演化过程。而与岩浆正常结晶演化相比 (异剥) 橄岩和橄榄单辉辉石岩的 SiO_2 、 Na_2O 含量有所增大,角闪辉长岩和橄榄辉长岩的 CaO 含量略有富集。因此,岩浆演化过程中可能存在着地壳物质混染或岩浆混合作用。李华芹等 (2006, 2009), 姜常义等 (2006) 通过测试分析坡北岩体的 Sr 、 Nd 、 Pb 、 Os 同位素及微量元素特征,认为岩体源自于亏损型地幔,并受到围岩的同化混染。颀炜等 (2011) 根据 Sr 、 Nd 同位素进一步定量模拟,计算得到坡北岩体遭受了元古代变质岩 3%~10% 的混染。综上所述,作者初步认为单斜辉石化学成分较大变化可能是地壳混染的结果。地壳物质的加入可以显著改变岩浆的成分,混染的结果取决于该区域的围岩性质 (苏本勋等, 2009)。研究区围岩地层的主要岩性为大理岩和黑云母石英片岩,其中大理岩可能为角闪辉长岩和橄榄辉长岩提供了部分 Ca 元素,而黑云母石英片岩则为 (异剥) 橄岩和橄榄单辉辉石岩贡献了 Si 、 Al 、 Na 等。

Wendland (1982) 研究表明,硫化物饱和状态下的硫含量 (SCSS) 与 FeO 呈正相关关系。Lightfoot & Hawkesworth (1997), Ripley 等 (2003) 指出围岩 Si 的加入,可以降低岩浆中硫的溶解度, Noril'sk 矿

床 Nadezhdinsky 矿化层的形成与富含 SiO_2 的地层有关,与富含硫的围岩无关。张招崇等(2003)进一步证实喀拉通克矿床硫化物不混溶作用的发生与地壳富硅物质的混染有关。坡北岩体(异剥)橄辉岩和橄辉单辉辉石岩具较低的 FeO 含量,同时黑云母石英片岩等富 Si 物质的加入,均有利于促使硫的溶解度降低并达到饱和,这可能也是(异剥)橄辉岩和橄辉单辉辉石岩中赋矿的主要原因。

5.3 构造环境判别

Nisbet & Pearce(1977)研究认为单斜辉石的 TiO_2 、 MnO 、 Na_2O 含量或 F_1 、 F_2 参数可以很好地判断源岩形成的构造环境,在其提出的 F_1 - F_2 构造环境判别图中(图 7)单斜辉石的成分主要投影在岛弧玄武岩和洋底玄武岩(VAB+OFB)区。一般来说,与弧有关的玄武岩中单斜辉石的 Al/Ti 值高于与裂谷有关的玄武岩中单斜辉石的 Al/Ti 值(Loucks, 1990)根据单斜辉石中进入四面体位置的 Al^{IV} 占全铝的百分比($\text{Al}_Z\%$)与 TiO_2 之间的关系(图 8)可以看出,样品显示出与弧有关的趋势。Xiao 等(2008)指出北山地区在中奥陶纪-二叠纪为俯冲增生造山环境,坡北岩体锆石 U-Pb 年龄为 $274 \pm 4 \text{ Ma}$ (姜常义等,2006),因此其形成可能与岛弧俯冲环境有关。

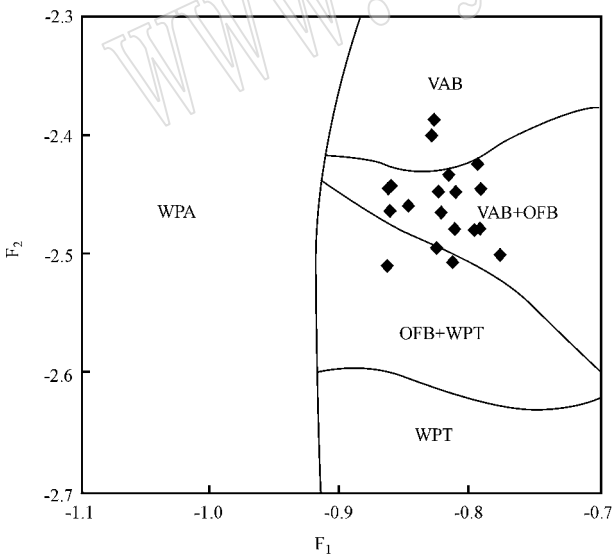


图 7 单斜辉石的 F_1 - F_2 图解(据 Nisbet & Pearce, 1977)

Fig. 7 F_1 - F_2 diagram of clinopyroxenes (after Nisbet & Pearce, 1977)

WPT—板内拉斑玄武岩; WPA—板内碱性玄武岩;
VAB—岛弧玄武岩; OFB—洋底玄武岩

WPT—intraplate tholeiitic basalt; WPA—intraplate alkali basalt;
VAB—volcanic arc basalt; OFB—ocean floor basalt

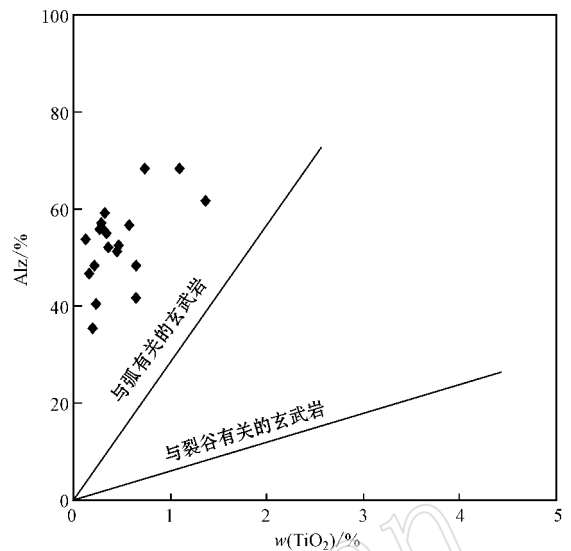


图 8 单斜辉石 Al_Z - TiO_2 图(据 Loucks, 1990)

Fig. 8 Al_Z - TiO_2 diagram of clinopyroxenes
(after Loucks, 1990)

此外,岩体岩石地球化学特征表现出大离子亲石元素相对富集和高场强元素相对亏损,具明显的 Nb、Ta 负异常,在 MnO - TiO_2 - P_2O_5 和 Th-Hf-Ta 判别图解上也显示岩体具岛弧火山岩岩浆的特点(颜炜等,2011)。总之,单斜辉石的化学成分结合区域构造演化和岩石地球化学特征,都证实岩体形成于岛弧环境。

6 结论

(1) 单斜辉石总体上表现为低 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 特征,岩体母岩浆为亚碱性拉斑玄武岩,其构造背景为岛弧环境。

(2) 单斜辉石的 ΣREE 和 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 值表明从(异剥)橄辉岩和橄辉单辉辉石岩到橄辉辉长岩和角闪辉长岩,岩浆结晶程度增强。随着岩浆演化, $\text{Mg}^\#$ 降低, FeO 含量略有增大,具有从富镁向富铁的演化趋势。

(3) 单斜辉石的 CaO 、 SiO_2 、 Na_2O 等氧化物组分随着岩浆演化,不遵循鲍文反应序列,结合前人研究成果,作者初步认为岩浆结晶分异过程中,存在着地壳物质混染作用,其中大理岩主要为角闪辉长岩和橄辉辉长岩提供了部分 Ca 元素,而黑云母石英片岩则为(异剥)橄辉岩和橄辉单辉辉石岩贡献了 Si、Al、Na 等。(异剥)橄辉岩和橄辉单辉辉石岩具较低的

FeO 含量,此外,黑云母石英片岩等富 Si 物质的加入,是促使硫饱和并发生熔离的重要因素。

(4) 单斜辉石的结晶温度范围在 1 141 ~ 1 221℃ 左右。

致谢 野外工作得到新疆地矿局第六地质大队王恒工程师的大力支持,中国地质大学莫亚龙博士、曹晓峰博士在野外和室内给予了不少帮助;电子探针测试得到长安大学刘民武老师的帮助;匿名评审老师悉心审稿,提出了许多宝贵意见。在此一并感谢。

References

- Ao S J, Xiao W J, Han C M, *et al.* 2010. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: Implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaid [J]. *Gondwana Research*, 18 : 466 ~ 478.
- Bowen N L. 1928. *The Evolution of The Igneous Rocks* [M]. Princeton University Press, 332.
- Chai Fengmei, Zhang Zhaocong, Mao Jingwen, *et al.* 2006. Petrography and mineralogy of Baishiquan Cu, Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25 (1): 1 ~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1992. *An introduction to the rock-forming minerals* [J]. New York: Longman Scientific & Technical, 143 ~ 154.
- Gao Huaizhong. 1992. Geological characteristics of No. 1 basic-ultrabasic intrusive body and its ore potentiality, Pobei, Xinjiang [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 17(1): 391 ~ 401 (in Chinese with English abstract).
- Grove T L and Bence A E. 1979. Crystallization kinetics in a multiply saturated basalt magma: An experimental study of Luna 24 ferrobasal [J]. *Proc. Lunar Planet Sci. Conf.*, 10 : 439 ~ 478.
- Gu Lianxing, Zhu Jianlin, Guo Jichun, *et al.* 1994. The east Xinjiang-type mafic-ultramafic complexes in orogenic environments [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 339 ~ 356 (in Chinese with English abstract).
- Guo Wei, Li Ming, Shuai Qin, *et al.* 2006. Accurate determination of rare earth elements in clinopyroxenes by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 24 : 100 ~ 103 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Cheng Songlin, Ye Shufeng, *et al.* 2006. Litho-geochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body, at Beishan region, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 115 ~ 126 (in Chinese with English abstract).
- Kushiro I. 1960. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks [J]. *American Journal of Science*, 258 : 518 ~ 551.
- Le Bas M J. 1962. The rock of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage [J]. *American Journal of Science*, 260 : 267 ~ 288.
- Li Huaqin, Chen Fuwen, Mei Yuping, *et al.* 2006. Isotopic ages of No. 1 intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 463 ~ 469 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaqin, Mei Yuping, Qu Wenjun, *et al.* 2009. SHRIMP zircon U-Pb and Re-Os dating of No. 10 intrusive body and associated ores in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 633 ~ 642 (in Chinese with English abstract).
- Lightfoot P C and Hawkesworth C J. 1997. Flood basalts and magmatic Ni, Cu and PGE sulphide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Trap) and West Greenland sequences [A]. Mahoney J J and Coffin M F. *Large Igneous Province* [C]. Washington D C: American Geophysical Union, 357 ~ 380.
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, *et al.* 1984. *Element Geochemistry* [M]. Beijing: Scientific Press (in Chinese).
- Loucks R R. 1990. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene [J]. *Geology*, 8 : 346 ~ 349.
- Ma Hongwen. 1985. Introduction of the improved clinopyroxene thermobarometer [J]. *Geological Science and Technology Information*, 4(2): 82 ~ 84 (in Chinese).
- Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, *et al.* 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32 (4): 184 ~ 203.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of Pyroxenes [J]. *Mineralogy and Petrology*, 39 : 55 ~ 76.
- Ni Zhiyao. 1994. Chemical composition of pyroxenes from the Huangshandong mafic-ultramafic complex in Hami, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(1): 55 ~ 63 (in Chinese with English abstract).
- Nisbet E G and Pearce J A. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149 ~ 160.
- Qin K Z, Su B X, Sakya P A, *et al.* 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim basin (NW China): constraints on a ca. 280 Ma mantle plume [J]. *American Journal of Science*, 311(3): 237 ~ 260.
- Qiu Jiexiang and Liao Qun'an. 1996. Petrogenesis and Cpx mineral chemistry of Cenozoic basalts from Zhejiang and Fujian of eastern China [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 17 : 16 ~ 23 (in Chinese).
- Ripley E M, Lightfoot P C, Li C S, *et al.* 2003. Sulfur isotopic studies

- of continental flood in the Noril'sk region: Implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67(15): 2 805—2 817.
- Su Benxun, Qin Kezhang, Sun He *et al.* 2009. Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang: Implications for assimilation and fractional crystallization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 873~887(in Chinese with English abstract).
- Su Benxun, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2010. Geochronological, petrological, mineralogical and geochemical studies of the Xuanwolung mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3 283~3 294(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin*[C]. Geological Society London: Special Publication, 42: 313~345.
- Sun Yan, Xiao Yuanfu, Wang Daoyong, *et al.* 2009. The characteristics and the metallogenic future of the Pobei mafic-ultramafic complex in the Beishan area, Xinjiang, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 36(4): 402~408(in Chinese with English abstract).
- Thompson R N. 1974. Some high-pressure pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 39: 768~787.
- Wendlandt R F. 1982. Sulfur saturation of basalt and andesite melts at high pressures and temperatures[J]. *Amer. Mineral*, 67: 877~885.
- Xiao Peixi, Wang Xing'an, Wang Yuxi, *et al.* 2004. Bijiashan 1:250 000 Regional Geological Survey (Revision), K46C004002 [M]. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources(in Chinese).
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 102~117.
- Xie Wei, Song Xieyan, Nie Xiaoyong, *et al.* 2011. Features of the mantle source and tectonic setting of the Poshi Ni-Cu sulfide-bearing intrusion, Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 189~200(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 1992. Mafic-ultramafic rocks and Wilson cycles[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 8(2): 168~176(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bolin, *et al.* 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 217~224(in Chinese with English abstract).
- ## 附中文参考文献
- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 等. 2006. 中天山白石泉镁铁超镁铁质岩体岩石学与矿物学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 1~12.
- 高怀忠. 1992. 新疆坡北基性超基性岩带 I 号岩体地质特征及其含矿性研究[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 17(1): 391~401.
- 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 等. 1994. 造山带环境中的东疆型镁铁超镁铁杂岩[J]. *岩石学报*, 10(4): 339~356.
- 郭伟, 李明, 帅琴, 等. 2006. 电感耦合等离子体质谱准确测定单斜辉石中稀土元素[J]. *中国稀土学报*, 24: 100~103.
- 姜常义, 程松林, 叶书锋, 等. 2006. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩与岩石成因[J]. *岩石学报*, 22(1): 115~126.
- 李华芹, 陈富文, 梅玉萍, 等. 2006. 新疆坡北基性-超基性岩带 I 号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 25(4): 463~469.
- 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 等. 2009. 新疆坡北基性-超基性岩带 10 号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *矿床地质*, 28(5): 633~642.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. *元素地球化学* [M]. 北京: 科学出版社.
- 马鸿文. 1985. 介绍改进的单斜辉石地质温度计公式[J]. *地质科技情报*, 4(2): 82~84.
- 倪志耀. 1994. 黄山东超镁铁杂岩中的辉石化学成分研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 13(1): 55~65.
- 邱家骥, 廖群安. 1996. 浙闽新生代玄武岩的岩石成因学与 Cpx 矿物化学[J]. *火山地质与矿产*, 17: 16~25.
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 2009. 新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征: 对同化混染和结晶分异过程的启示[J]. *岩石学报*, 25(4): 873~887.
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 2010. 新疆北山地区旋窝岭镁铁-超镁铁岩体的年代学、岩石矿物学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 26(11): 3 283~3 294.
- 孙燕, 肖渊甫, 王道永, 等. 2009. 新疆北山坡北基性超基性杂岩特征及成矿远景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(4): 402~408.
- 校培喜, 王兴安, 王育习, 等. 2004. 笔架山幅 1:25 万区域地质调查(修测) K46C004002 [M]. 西安地质矿产研究所.
- 颜炜, 宋谢炎, 聂晓勇, 等. 2011. 新疆坡十铜镍硫化物含矿岩体岩浆源区特征及构造背景探讨[J]. *地学前缘*, 18(3): 189~200.
- 张旗. 1992. 镁铁超镁铁岩与威尔逊旋回[J]. *岩石学报*, 8(2): 168~176.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(3): 217~224.