

中天山白石泉镁铁-超镁铁质岩体 岩石学与矿物学研究

柴凤梅^{1,2} 张招崇¹ 毛景文¹ 董连慧³ 张作衡⁴ 叶会寿⁴ 吴 华⁵ 莫新华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. 新疆大学 资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 5. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局 第六地质大队, 新疆 哈密 839000)

摘 要: 白石泉地区镁铁-超镁铁质岩体处于塔里木板块前缘活动带与中天山地块接合部位, 是中天山地块华力西中期岩浆活动的产物。主要岩石类型有辉石橄榄岩(斜方辉石橄榄岩、斜长二辉橄榄岩)、橄榄辉石岩、橄长岩、辉长岩及角闪辉长岩等, 主要造岩矿物为橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、角闪石、斜长石及黑云母。橄榄石均为贵橄榄石, 其 F_o 值(78~85)位于含铜镍硫化物矿橄榄石的 F_o 值范围之内。辉石主要有顽火辉石、古铜辉石、紫苏辉石、透辉石等, 斜长石的环带构造较为发育, 角闪石的 FeO 含量随着岩浆的演化逐渐增加。它们与造山带环境中的东疆型镁铁-超镁铁杂岩中的造岩矿物具有相同的特征。这些特征表明了白石泉地区的镁铁-超镁铁质岩体的原始岩浆为高镁的拉斑玄武质岩浆。

关键词: 白石泉 镁铁-超镁铁质杂岩体 造岩矿物 成岩作用 构造环境

中图分类号: P588.12⁺4; P588.12⁺5; P574.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2006)01-0001-12

Petrography and mineralogy of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang

CHAI Feng-mei^{1,2}, ZHANG Zhao-chong¹, MAO Jing-wen¹, DONG Lian-hui³, ZHANG Zuo-heng⁴, YE Hui-shou⁴, WU Hua⁵ and MO Xin-hua⁵

- (1. State Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Resource and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, China; 4. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 5. No.6 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Hami 839000, China)

Abstract: The Baishiquan mafic-ultramafic intrusions associated with magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits are located in central Tianshan block of northern Xinjiang. They are Late Permian mafic-ultramafic rocks which intruded into the Mid-Proterozoic sequences comprising schists, gneisses and marbles. They display ellipse and irregular forms in plan, and are basin-shaped in the cross section. The Baishiquan intrusions are composed of pyroxene peridotite, olivine pyroxenite, troctolite, hornblendite, gabbro, hornblende-gabbro and diorite. Peridotite and pyroxenite are main rock types hosting Cu-Ni-PGE ores. The rock-forming minerals are composed of the assemblage of olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, hornblende, plagioclase and biotite. Olivine is normally surrounded by orthopyroxene, clinopyroxene and plagioclase oikocrystals with F_o being 80~85, which over-

收稿日期: 2005-06-14; 修订日期: 2005-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40402012, 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)

作者简介: 柴凤梅(1971-), 女, 讲师, 在职博士, 从事岩石学与矿床学的教学与研究, E-mail: jjscfm@sohu.com

lap minerals of the magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits. Pyroxene is dominated by bronzite, endiopsid and small amounts of hypersthene and diopside. Plagioclase is usually characterized by rhythmic and reverse zones, consisting of *An* ranging from 50 to 70. Hornblende was formed at the last stage and enclosed olivine, pyroxene and plagioclase. According to these characteristics, the primary magma of such mafic-ultramafic intrusions must have been mantle-derived tholeiitic magma.

Key words: Baishiquan; mafic-ultramafic intrusions; rock-forming mineral; diagenism; tectonic environment

白石泉镁铁-超镁铁质杂岩体是 2002 年新疆哈密地质六大队在进行矿产普查工作时在中天山地块内发现的一个含铜镍硫化物矿化的岩体,是天山地区继东天山后发现的又一个含铜镍硫化物矿床的镁铁-超镁铁侵入岩体。现有的研究只限于该岩体的地质特征、物化探异常等方面,而有关镁铁-超镁铁质岩体的岩石学及矿物学方面的研究尚属空白。本文就其岩石类型及矿物化学特征这一基础问题加以研究探讨,指出该区的镁铁-超镁铁质岩体的母岩浆性质及成岩条件,旨在为中天山成矿带寻找铜镍矿床提供新的依据,并为进一步研究该铜镍硫化物矿床的成矿机制奠定重要基础。

东南约 170 km 处,构造上位于塔里木板块前缘活动带与中天山地块接合部位,沙泉子深大断裂东南侧的中天山地块内(图 1)。现已发现 20 个大小不等的小岩体,主要位于东经 94°55′~95°01′、北纬 41°55′~41°59′之间,地表出露面积不大,最大的岩体为 0.8 km²。岩体地表出露形态较为复杂,其中部出露较为完整的闪长岩,呈长轴近北东-南西向的近似椭圆状,超基性岩体多呈脉状产于闪长岩中部及边部(图 2)。这些岩体受控于沙泉子深大断裂及其次级断裂,多呈条带状和分散状小透镜体分布于断裂两侧,总体展布方向与区域构造线方向一致。岩体侵入于中元古代星星峡组和卡瓦布拉克组的片岩、片麻岩、麻粒岩和大理岩中,与围岩接触界线清楚,局部可见有围岩捕虏体。该杂岩体的锆石 SHRIMP 年龄为 280~290 Ma 年(吴华等,2005),属华力西中期岩浆活动的产物,与东天山的黄山和黄山东以及阿尔泰

1 地质概况

白石泉镁铁-超镁铁质杂岩体位于新疆哈密市

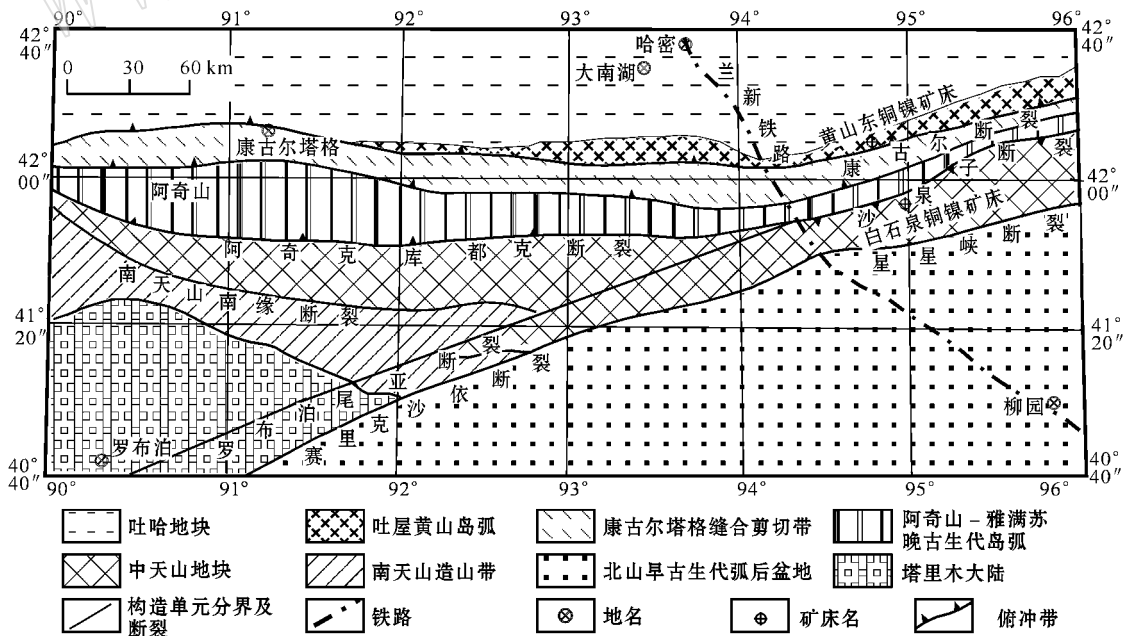


图 1 新疆中天山大地构造单元简图

[据李锦轶等(2002),毛景文等(2002),顾连兴等(2003)修改]

Fig. 1 Distribution of tectonic units in Central Tianshan (modified from Li Jinyi *et al.*, 2002; Mao Jingwen *et al.*, 2002; Gu Lianxing *et al.*, 2003)

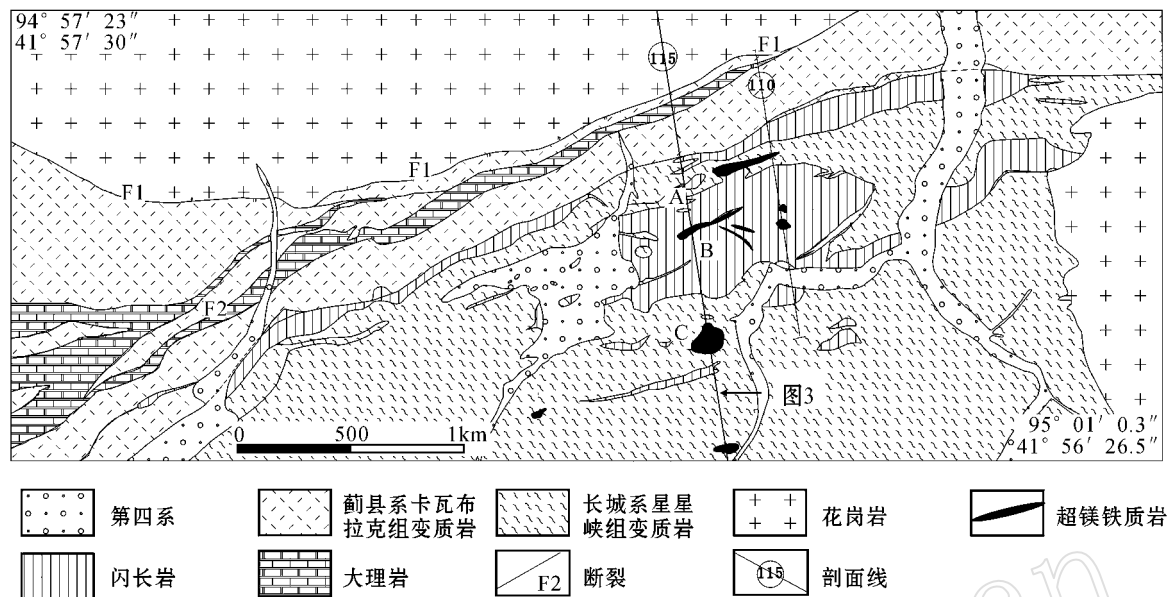
图 2 新疆白石泉镁铁-超镁铁岩体地质图^①

Fig. 2 Geological sketch map of Baishiquan mafic-ultramafic rocks in Central Tianshan

造山带南缘的喀拉通克含铜镍矿岩体的成岩时代一致。

2 岩石学基本特征

白石泉镁铁-超镁铁质杂岩体岩相复杂,根据各岩相的穿插关系可划分为 2 个侵入阶段 7 个岩相带。第 1 侵入阶段为白石泉岩体出露的主体部分,约占总面积的 90%,包括闪长岩相、辉长岩相、辉长苏长岩相,且三者之间没有明显的界线。其中,闪长岩相呈近似椭圆状产出,与围岩有明显的侵入接触关系,边部围岩伴有硅化、绿泥石化、角岩化,岩石类型有石英闪长岩、斑状闪长岩及辉长闪长岩,辉长岩相分布面积不大,仅分布于岩体南部的局部地段,主要有角闪辉长岩及蚀变辉长岩,辉长苏长岩相主要出露于岩体的东南部及中部,以地表球状风化为主要特征,辉长苏长岩和细晶黑云母苏长岩为主要岩石类型。

第 2 侵入阶段与第 1 侵入阶段界线明显,主要出露于岩体的南、北部,东部也有少量分布,地表形态多呈水滴状及脉状。根据岩性及空间分布可分为角闪石岩相、橄长岩相、橄长岩相及辉石岩相。其中角闪石岩相呈椭圆状分布于岩体的南接触带附近,

主要由含长角闪石岩组成,橄长岩相分布于主体闪长岩的中部,是铜镍矿体的主岩体,主要岩石类型为单辉橄长岩、斜长二辉橄长岩,橄长岩相分布较少,仅见于岩体北部的探槽中,辉石岩相分布于岩体南北两侧的辉长岩中及辉长岩与闪长岩的接触部位,岩石类型有斜长角闪单辉橄辉岩、斜长单辉辉石岩,是铜镍矿主要赋存的岩石类型。地表出露规模较大的超镁铁岩体面积约有 0.018 km²(图 3C 段),由北至南依次为橄长岩相(长约 110 m)、橄长岩相(宽约 39 m)、辉石岩相(宽 14 m),在辉石岩中分布有铜镍硫化物矿物,构成 IV 号铜镍矿体,橄长岩相及橄长岩相具有铜镍矿化^①。

白石泉镁铁-超镁铁质杂岩体的岩石中常见有自形-半自形中-细粒结构、嵌晶结构、反应边结构及辉长结构,具典型的镁铁-超镁铁质深成岩结构特征。其主要岩石类型的特征如下:

橄长岩:岩石呈灰黑色,半自形中粒粒状结构、包橄结构,块状构造,主要由橄长石(30%~40%)、斜长石(45%~50%)及少量辉石、角闪石、黑云母和不透明金属矿物等填隙矿物组成。其中橄长石多呈半自形短柱状及椭圆粒状,大小约 1.5~2.5 mm,裂理较为发育,其边缘及裂理常发生蛇纹石化蚀变,并有铁质析出。斜长石晶体较为粗大,约 1~5 mm,个

① 新疆地矿局第六地质大队,新疆哈密市白石泉铜镍矿点 2004 年预查报告。

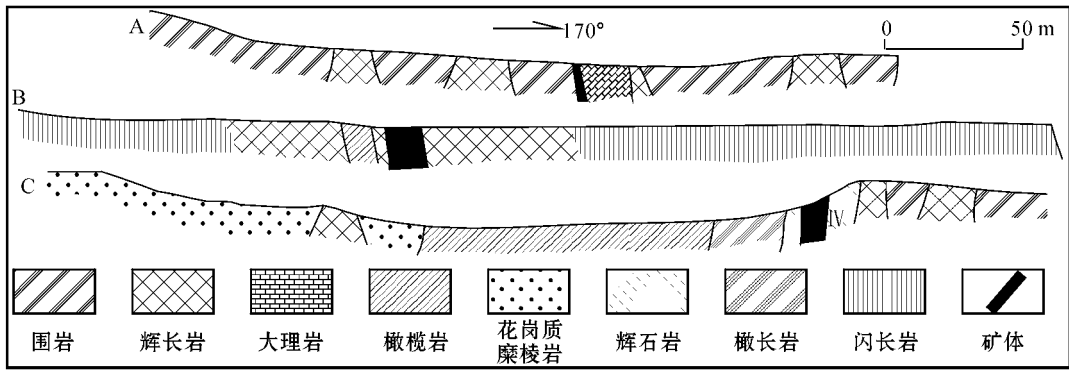


图 3 新疆白石泉镁铁-超镁铁岩体剖面图

Fig. 3 Geological section of Baishiquan mafic-ultramafic intrusion

别 $< 1 \text{ mm}$, 自形程度较高, 多以包裹橄榄石存在, 且与橄榄石接触处有一薄层闪石化次变边, 沿橄榄石颗粒四周放射状裂纹较为发育, 具橄长岩典型结构。填隙矿物总量约 $10\% \sim 25\%$ 。

辉石橄长岩: 岩石呈黑色, 半自形粒状结构、包橄结构、反应边结构, 块状构造。主要由橄榄石、辉石、角闪石及少量黑云母、斜长石组成。根据其中的辉石种属及含量可以进一步分为斜方辉石橄长岩与斜长二辉橄长岩。斜方辉石橄长岩主要由橄榄石 ($50\% \sim 55\%$)、斜方辉石 ($35\% \sim 40\%$) 及少量的角闪石、单斜辉石、黑云母、斜长石和不透明金属矿物组成。橄榄石多呈半自形粒状, 大小约 $0.2 \sim 1 \text{ mm}$, 裂理较为发育, 其边缘及裂理常发生蛇纹石化蚀变, 并有铁质析出而成网状结构, 蚀变较强者优先保留其外形而呈其假象, 可见少数包裹自形的尖晶石晶体。斜方辉石均以包裹橄榄石存在, 且与橄榄石接触处裂纹较为发育。角闪石、单斜辉石、黑云母、斜长石含量约 8% , 均呈他形充填于橄榄石与辉石颗粒之间。不透明金属矿物 (磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿等) 约 2% , 常沿主矿物的裂隙、解理面及颗粒间分布。斜长二辉橄长岩中的橄榄石含量 $50\% \sim 55\%$, 单斜辉石 $15\% \sim 20\%$, 斜方辉石占 10% 左右, 斜长石约 15% , 角闪石、黑云母及金属矿物含量较少。橄榄石多呈半自形粒状或浑圆状, 大小约 $1 \sim 2 \text{ mm}$, 裂理较为发育, 其边缘及裂理常发生蛇纹石化蚀变, 多数具有斜方辉石反应边。单斜辉石多呈他形晶, 粒度较大者常包裹橄榄石、斜方辉石及斜长石, 且多已发生纤闪石化及绿泥石化蚀变。斜方辉石均以包裹浑圆粒状的橄榄石存在。斜长石多呈他形充填于橄榄石颗粒之间, 也可见包裹辉石及被辉

石包裹, 表明斜长石结晶早于辉石开始, 而晚于辉石结晶结束。角闪石含量约 8% , 呈棕色他形, 多以包裹橄榄石、辉石而存在。黑云母均呈他形充填于橄榄石与辉石颗粒之间。

橄长辉石岩: 岩石呈黑色, 半自形粒状结构、包橄结构, 块状构造。主要由橄榄石 ($20\% \sim 30\%$)、辉石 ($35\% \sim 55\%$) 组成, 并含少量角闪石 (5%) 及金属矿物。其中辉石多呈半自形柱状, 且多已蚀变为纤闪石, 偶见中部有辉石残留。橄榄石呈他形粒状, 大小 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$, 其边缘可见有绿泥石及蛇纹石化蚀变, 且多被纤闪石化辉石包裹。角闪石极少, 呈他形填隙状分布。薄片可见较多的金属矿物, 约 5% 。该类型岩石为白石泉岩体中主要的含矿岩石。

角闪石岩: 岩石呈黑色, 半自形细粒粒状结构及嵌晶结构, 块状构造。主要由斜长石 ($15\% \sim 20\%$)、角闪石 ($70\% \sim 75\%$) 及少量的辉石、金属矿物组成。其中角闪石呈半自形-他形粒状及自形的六边形, 大小约为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 。斜长石含量约 15% , 粒度较小, 多为 $0.05 \sim 0.2 \text{ mm}$, 均呈熔蚀浑圆港湾状包裹于角闪石中, 均为钙长石, 且较为新鲜; 个别颗粒较大者则充填于角闪石之间, 且均发生绢云母化蚀变, 主要为拉长石。斜方辉石与单斜辉石含量约 5% , 均被角闪石所包裹。

角闪辉长岩: 岩石呈灰绿黑色, 半自形粒状结构、聚晶结构及嵌晶结构, 块状构造。主要由斜长石 ($40\% \sim 50\%$)、辉石 (30%)、角闪石、棕色黑云母、磷灰石、榍石及不透明金属矿物组成。其中辉石主要为透辉石, 多呈短柱状、长柱状及规则的八边形, 其表面常见角闪石小片。角闪石主要呈他形, 包裹辉石、斜长石及不透明金属矿物, 少量较为自形。斜长

石主要为中、拉长石,多为自形的板状晶体,且环带结构较为发育。在含橄榄石的岩石中角闪石含量较高,达 45% 以上,粒度较小,约 0.1 mm,并可见角闪石聚集在一起而呈聚晶结构,辉石主要为斜方辉石,多与橄榄石同时被角闪石包裹。

3 矿物化学特征

白石泉镁铁-超镁铁岩体主要由橄榄石、辉石、角闪石、斜长石等矿物组成。用于主量元素成分测试的样品,均选较为新鲜的没有蚀变的晶体以及蚀变残留晶体。所有造岩矿物主要元素成分的测定均在中国地质科学院矿床研究所 JXA-8800R 型电子探针上完成,测试加速电压 20 kV,束电流 20 nA,束斑直径 5 μm。

3.1 橄榄石成分特征

橄榄石主要赋存于辉石橄榄岩、橄榄辉石岩及

橄长岩中。在不同的岩石中,其产出状态不完全相同。在橄榄岩中多呈半自形粒状或浑圆粒状堆积晶产出;在辉石岩中多呈反应残余包含于辉石中;在橄长岩中的自形程度明显低于斜长石,且被斜长石大晶体包裹。晶体大小 0.5~3 mm,多数在 1~2 mm 之间,裂理较为发育,有些已遭受蛇纹石化蚀变。蛇纹石及析出的铁质常沿其边缘及裂隙分布而构成网脉状,甚至完全被蛇纹石交代而仅保留其假象。若铁质沿其解理面和裂理面分布,则橄榄石表面可见黑色的细线。

根据电子探针分析结果及计算的端员分子(表 1)可以看出,其 F_o 介于 78~85 之间,均属贵橄榄石。其成分在同一样品的中心与边缘变化不大,但随着岩石类型的不同而稍有差异,橄榄石含量较高的岩石中 F_o 高达 85,基性程度相对较低的岩石中 F_o 降为 78,具有与铜镍矿床中典型橄榄石相同的成分特征(师占义,1994),并且与东疆型造山带环境的

表 1 白石泉镁铁-超镁铁质岩中橄榄石电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Composition of olivine from Baishiquan mafic-ultramafic rocks, Central Tianshan

岩石名称	斜方辉石橄榄岩				斜长二辉橄榄岩			橄长岩	橄长岩			角闪橄榄辉石岩		橄榄辉石岩
	橄长岩	中心→边缘			橄长岩	中心→边缘			中心→边缘			橄长岩	橄长岩	
样品	Ba0-3-2	Ba4-1-1c	Ba4-1-1m	Ba4-1-1s	Ba8-4-1	Ba8-4-6c	Ba8-4-6s	Ba6-2-4	Ba8-11-2c	Ba8-11-2m	Ba8-11-2s	Ba9-1-1c	Ba9-1-1s	Ba8-1
SiO ₂	39.560	39.650	39.480	39.850	39.130	38.940	38.760	39.580	39.110	39.070	39.370	39.840	39.980	39.260
TiO ₂	0.000	0.000	0.010	0.010	0.010	0.000	0.010	0.030	0.010	0.030	0.030	0.030	0.010	0.010
Al ₂ O ₃	0.020	0.010	0.000	0.000	0.010	0.000	0.010	0.030	0.000	0.020	0.010	0.240	0.000	0.000
FeO	14.310	15.020	14.620	15.040	17.970	18.360	19.320	16.500	18.310	18.180	18.140	15.320	14.680	19.830
MnO	0.170	0.170	0.200	0.140	0.200	0.210	0.290	0.180	0.270	0.230	0.210	0.190	0.200	0.230
MgO	44.850	45.410	45.300	45.140	42.470	42.300	42.210	42.860	42.140	42.470	42.190	43.790	44.110	40.270
CaO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.030	0.000	0.000
Na ₂ O	0.000	0.020	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.010	0.010	0.010	0.060	0.010	0.000
K ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
NiO	0.250	0.210	0.170	0.150	0.130	0.110	0.130	0.170	0.120	0.100	0.120	0.120	0.210	0.120
TOTAL	99.160	100.490	99.780	100.340	99.930	99.930	100.730	99.360	99.980	100.110	100.090	99.620	99.200	99.730
以 4 个氧为基准计算的阳离子数														
Si	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Al	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.007	0.000	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.303	0.317	0.310	0.316	0.384	0.394	0.417	0.349	0.392	0.389	0.385	0.322	0.307	0.423
Mn	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004	0.005	0.006	0.004	0.006	0.005	0.005	0.004	0.004	0.005
Mg	1.691	1.707	1.710	1.689	1.619	1.619	1.623	1.614	1.607	1.621	1.598	1.638	1.645	1.529
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Na	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.005	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002
Cations	3.004	3.033	3.027	3.011	3.010	3.020	3.049	2.972	3.007	3.019	2.991	2.978	2.960	2.959
Fa	15.196	15.662	15.347	15.761	19.171	19.573	20.441	17.779	19.610	19.353	19.415	16.429	15.727	21.670
Fo	84.804	84.338	84.653	84.239	80.829	80.427	79.559	82.221	80.390	80.647	80.585	83.571	84.273	78.330
种属	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石	贵橄榄石

分析测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室,分析者:余静,样号中 c 为中心, m 为边缘, s 为过渡带。

镁铁-超镁铁质杂岩中的橄榄石特征(顾连兴等, 1994)一致,但是较地幔橄榄岩中橄榄石的 F_o 值 (90.8, Dick and Bullen, 1984) 低。

3.2 辉石成分特征

斜方辉石与单斜辉石均出现于白石泉岩体中,不同类型的岩石具有不同的辉石种属、含量及产出状态。

3.2.1 斜方辉石

斜方辉石几乎分布于各类岩石中。在橄榄岩中主要呈半自形板柱状或为橄榄石的反应边产出,其周围常有较大的磁铁矿颗粒分布;在辉石岩中可见斜方辉石包裹斜长石,也可见斜长石包裹斜方辉石,

表明斜方辉石与斜长石有一段处于平衡结晶的阶段,并可见其包裹橄榄石与单斜辉石。主要发生滑石化、透闪石化蚀变,表面常见有榍石细小颗粒定向排列。

其成分及计算的阳离子数和端员成分列于表 2 及图 4 中。可以看出,不同类型的岩石中的 MgO 与 Al_2O_3 成分变化较大,但是 Ca 的含量变化不大。在橄榄岩及橄长岩中的顽火辉石分子(E_n)主要介于 81~84 之间,属古铜辉石;在角闪石岩中斜方辉石的 FeO 含量明显高于橄榄岩中的含量, MgO 的含量则较低,其 $F_s=28$, E_n 降低为 70;角闪辉长岩中的斜方辉石的 F_s 最高达 50, $E_n=48.5$,属铁辉石。表明

表 2 白石泉镁铁-超镁铁质岩中辉石电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Composition of pyroxene from Baishiquan mafic-ultramafic rocks, Central Tianshan

岩石名称	斜方辉石橄榄岩		斜长二辉橄榄岩				橄长岩			含长角闪石岩		含橄角闪辉长岩	橄辉辉石岩	角闪辉长岩
	Bs0-3-2	Bs8-4-6	Bs8-4-3c	Bs6-2-2	Bs6-2-1	Bs8-11-1	Bs8-11-11	Bs7-4-2	Bs7-4-21	Bs8-10	Bs8-1	Bs1-4-1		
SiO ₂	55.180	55.620	50.690	54.670	53.500	50.370	54.130	52.380	53.270	53.820	51.660	54.120		
TiO ₂	0.250	0.010	1.300	0.190	0.950	1.470	0.280	0.120	0.030	0.040	0.950	0.010		
Al ₂ O ₃	0.720	0.750	4.970	1.500	1.230	5.030	2.100	2.010	1.750	0.360	4.350	0.280		
FeO	10.310	11.490	5.080	11.250	4.910	6.150	11.310	7.270	17.780	28.100	5.920	6.170		
Cr ₂ O ₃	0.140	0.030	0.250	0.020	0.190	0.260	0.030	0.000	0.010	0.010	0.170	0.000		
MnO	0.080	0.220	0.030	0.070	0.040	0.110	0.220	0.080	0.130	0.720	0.150	0.060		
NiO	0.000	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
MgO	31.360	31.220	16.970	31.580	17.920	15.460	30.110	15.580	25.230	15.690	16.290	14.550		
CaO	1.230	0.110	19.890	0.580	19.890	19.470	1.090	21.630	0.990	0.650	19.150	24.250		
Na ₂ O	0.030	0.000	0.620	0.030	0.480	0.660	0.050	0.110	0.000	0.030	0.590	0.150		
K ₂ O	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000		
Total	99.310	99.490	99.800	99.890	99.110	98.980	99.330	99.180	99.190	99.430	99.230	99.590		
TSi	1.951	1.968	1.847	1.921	1.965	1.865	1.922	1.947	1.955	2.099	1.902	2.011		
TAL	0.030	0.031	0.153	0.062	0.035	0.135	0.078	0.053	0.045	0.000	0.098	0.000		
TFe ³⁺	0.019	0.000	0.000	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
M1Al	0.000	0.000	0.060	0.000	0.018	0.084	0.010	0.035	0.030	0.017	0.090	0.012		
M1Ti	0.007	0.000	0.036	0.005	0.026	0.041	0.007	0.003	0.001	0.001	0.026	0.000		
M1Fe ³⁺	0.035	0.030	0.058	0.070	0.000	0.008	0.055	0.019	0.013	0.000	0.000	0.000		
M1Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.079	0.000	0.070	0.000	0.181		
M1Cr	0.004	0.001	0.007	0.001	0.006	0.008	0.001	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000		
M1Mg	0.955	0.968	0.839	0.924	0.950	0.853	0.926	0.863	0.956	0.912	0.878	0.806		
M1Ni	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
M2Mg	0.698	0.679	0.083	0.730	0.031	0.000	0.668	0.000	0.424	0.000	0.016	0.000		
M2Fe ²⁺	0.251	0.310	0.096	0.244	0.151	0.177	0.281	0.128	0.533	0.847	0.182	0.010		
M2Mn	0.002	0.007	0.001	0.002	0.001	0.003	0.007	0.003	0.004	0.024	0.005	0.002		
M2Ca	0.047	0.004	0.776	0.022	0.783	0.772	0.041	0.862	0.039	0.027	0.755	0.966		
M2Na	0.002	0.000	0.044	0.002	0.034	0.047	0.003	0.008	0.000	0.002	0.042	0.011		
Wo	2.322	0.209	41.882	1.087	40.852	42.448	2.097	44.102	1.977	1.445	41.134	49.131		
En	82.368	82.440	49.719	82.352	51.211	46.897	80.588	44.199	70.103	48.531	48.686	41.016		
Fs	15.310	17.351	8.399	16.561	7.937	10.655	17.316	11.699	27.920	50.024	10.180	9.853		
种属	古铜辉石	古铜辉石	顽透辉石	古铜辉石	顽透辉石	普通辉石	古铜辉石	普通辉石	紫苏辉石	铁紫苏辉石	普通辉石	透辉石		

分析测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室,分析者:余静。

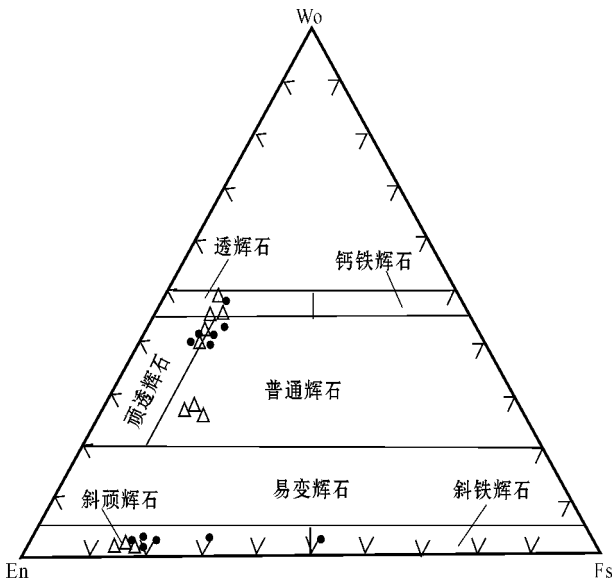


图 4 白石泉镁铁-超镁铁质杂岩辉石的
Wo-En-Fs 图解(据 Morimoto, 1988)

Fig. 4 Wo-En-Fs diagram of pyroxene from Baishiquan mafic-ultramafic rocks (from Morimoto, 1988)

岩浆演化从早期到晚期,其成分由富 Mg 向富 Fe 方向演化。 Al_2O_3 的含量介于 0.36%~2.1% 之间,较地幔橄榄岩中斜方辉石 Al_2O_3 的含量(2.1%~5.0%)低(Dick and Natland, 1996)。

3.2.2 单斜辉石

单斜辉石多出现于辉石岩与辉长岩中,主要呈短柱状,且晶体大小不一,常具有角闪石的反应边或在颗粒表面有细粒角闪石分布;少数以他形填隙状或粗大嵌晶状出现于橄榄岩中。主要发生次闪石化和绿泥石化蚀变。

其化学成分及端员分子数列于表 2。由表 2 可以看出,不同类型的岩石中 Al_2O_3 的含量变化较大,但其他的化学成分变化不大,而且在同一晶体中化学成分也较为均匀。在橄榄岩、辉石岩与橄长岩中 Al_2O_3 的含量较高,主要介于 4.35%~5.03% 之间;在角闪石岩中主要介于 0.96%~2.01% 之间;在辉长岩中则最低,为 0.28%。单斜辉石中 Al 的含量与压力的大小关系较为密切, Kushiro (1960) 与 Thompson (1974) 研究表明,玄武岩岩浆在高压结晶时, Al 易于以 Al^{VI} 成 Ca-Tsch 进入单斜辉石中,故高压结晶的辉石富铝, Al^{VI} 高;在低压结晶时, Al 易于以 Al^{IV} 代替 Si 进入斜长石,因而低压结晶的辉石贫铝, Al^{IV} 高(邱家骧等, 1987)。白石泉岩体中单斜辉石特征表明,橄榄岩、辉石岩的结晶压力高于角闪石

岩及辉长岩,暗示了它们是不同的深度结晶的产物。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、顽透辉石和普通辉石区,其特征与东疆型造山带环境的镁铁-超镁铁质杂岩中的辉石特征(顾连兴等, 1994)一致。

3.3 斜长石

斜长石出现于各类岩石中,仅含量有所差别。在橄榄岩中可见其包裹橄榄石,也可见橄榄石包裹斜长石,表明其早于橄榄石开始结晶,而晚于橄榄石结晶结束,橄长岩中长石晶体较为粗大,多包裹浑圆状的橄榄石;在角闪石岩中则呈熔蚀港湾状散布其中,辉长岩中多呈自形-半自形与辉石形成辉长结构,并可见其环带现象。

斜长石的化学成分及端员分子数列于表 3。由此可以看出, CaO 、 Al_2O_3 与 SiO_2 呈良好的负相关, CaO 与 Al_2O_3 为良好的正相关,与岩浆结晶分异的演化规律一致。其中,角闪石岩中的斜长石呈细小熔蚀状包裹于其中,属钙长石($An = 95.7$),为岩体中含钙最高者,而且 SiO_2 含量较低,表明该长石可能系岩浆早期堆晶产物,结晶时间较短,岩浆富铝并含丰富的水(董传万等, 1997)。橄长岩及橄长岩中主要为拉长石,在辉长岩中则主要为培长石,表明斜长石的 An 高低与岩石基性程度之间的相关性不是绝对的,辉长岩中的斜长石具有明显的环带特征,既有 An 由核部向边缘先减少后增加再减少的韵律环带特征,也有 An 由中心向边缘增加的反环带特征。研究表明,斜长石环带构造是岩浆结晶过程中温度、压力及成分变化的结果(吴平霄等, 1997)。Sakugama (1983) 和郑祥身(1995)研究认为,正环带表明母岩浆来自于单一的岩浆体系,反环带则表明母岩浆可能发生了混合作用;目前对于斜长石韵律环带的形成看法不一(吴平霄等, 1998)。由此可见,白石泉岩体中斜长石复杂的成分环带表明了岩浆结晶过程中温压条件以及岩浆成分变化的复杂性,岩体形成过程中可能有多次岩浆注入。

3.4 角闪石

角闪石主要赋存于角闪石岩和角闪辉长岩中,在橄榄岩及辉石岩中含量较少。其中粒度较小者在镜下多呈无色或淡绿色的他形或半自形填隙于橄榄石、辉石及斜长石之间;晶体较大者则呈棕色,且多色性明显,常以包裹橄榄石、辉石存在;在角闪辉长岩中发育有角闪石的聚晶结构,并可见其辉石的假象。其电子探针数据列于表 4。由表 4 可以看出,由

表 3 白石泉镁铁-超镁铁质岩中斜长石电子探针分析结果

 $\omega_B/\%$

Table 3 Composition of plagioclase from Baishiquan mafic-ultramafic rocks, Central Tianshan

序号	样品	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
1	Bs8-4-2c	斜长二辉橄辉岩 中心→边缘	55.34	0.07	27.16	0.48	0.03	2.13	9.16	5.58	0.01	99.96
2	Bs8-4-2m		55.02	0.21	27.57	0.06	0.02	0.30	10.86	4.98	0.02	99.04
3	Bs8-4-2s		55.32	0.09	28.24	0.10	0.01	0.00	10.29	5.57	0.02	99.64
4	Bs7-4-1	含长角闪石岩岩	45.85	0.00	34.04	0.06	0.00	0.00	18.64	0.45	0.01	99.05
5	Bs6-2-3	橄长岩	52.08	0.06	30.25	0.02	0.01	0.00	13.81	2.94	0.01	99.18
6	Bs0-1-2c	辉长岩 中心→边缘	50.38	0.02	31.70	0.04	0.00	0.00	15.44	2.20	0.01	99.79
7	Bs0-1-2m		51.25	0.00	30.01	0.16	0.02	0.17	14.54	2.88	0.03	99.06
8	Bs0-1-2s		51.18	0.01	31.43	0.00	0.00	0.00	14.78	2.36	0.00	99.76
9	Bs0-1-2w		51.98	0.01	29.74	0.10	0.03	0.01	12.85	4.45	0.01	99.18
10	Bs1-4-1	角闪辉长岩	56.27	0.00	27.73	0.00	0.00	0.00	9.07	6.21	0.04	99.32

以 8 个氧为基准计算的阳离子数

序号	Si	Al	Ti	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Ab	An	Or	种属
1	2.492	1.440	0.002	0.018	0.001	0.143	0.442	0.487	0.001	52.4	47.50	0.10	中长石
2	2.500	1.475	0.007	0.002	0.001	0.020	0.529	0.439	0.001	45.3	54.60	0.10	拉长石
3	2.497	1.501	0.003	0.004	0.000	0.000	0.498	0.487	0.001	49.4	50.50	0.10	拉长石
4	2.128	1.861	0.000	0.002	0.000	0.000	0.927	0.041	0.001	4.2	95.70	0.10	钙长石
5	2.375	1.625	0.002	0.001	0.000	0.000	0.675	0.260	0.001	27.8	72.10	0.10	培长石
6	2.296	1.701	0.001	0.002	0.000	0.000	0.754	0.194	0.001	20.4	79.50	0.10	培长石
7	2.351	1.622	0.000	0.006	0.001	0.012	0.715	0.256	0.002	26.3	73.50	0.20	培长石
8	2.325	1.682	0.000	0.000	0.000	0.000	0.719	0.208	0.000	22.4	77.60	0.00	培长石
9	2.379	1.603	0.000	0.004	0.001	0.001	0.630	0.395	0.001	38.50	61.40	0.10	拉长石
10	2.538	1.473	0.000	0.000	0.000	0.000	0.438	0.543	0.002	55.20	44.60	0.20	中长石

分析测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室,分析者 余静。

橄辉岩相→橄长岩相→角闪石岩→角闪辉长岩相,角闪石中 Fe 含量明显递增, MgO 的含量逐渐减少,即角闪石的 Fe 含量随着岩石基性程度的降低而增加,与斜方辉石的成分变化趋势一致;各类型岩石中角闪石的 CaO 含量较高,均大于 10%,在不同类型的岩石中其成分变化不大。因无 H₂O 含量,采用 O

=23 计算阳离子数。经计算,角闪石主要属钙质角闪石类的韭闪石和普通角闪石。根据陈光远(1985)的角闪石成因图解(图略),岩体中的角闪石既有位于岩浆成因区样品(如 Bs4-1-2、Bs8-11-1、Bs7-4-2),也有位于接触交代成因区样品(Bs1-4-2、Bs8-10),说明角闪石既有岩浆结晶的,也有次生交代成因的。

表 4 白石泉镁铁-超镁铁质岩中角闪石电子探针分析结果

 $\omega_B/\%$

Table 4 Composition of hornblende from Baishiquan mafic-ultramafic rocks, Central Tianshan

序号	样品	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
2	Bs4-1-2	斜方辉石橄辉岩	46.77	0.28	10.13	5.96	0.09	0.09	18.63	11.30	2.45	0.10
1	Bs8-11-1	橄长岩	42.42	4.88	11.85	8.25	0.10	0.01	15.07	11.06	3.39	0.70
3	Bs7-4-2	含长角闪石岩	45.18	0.00	12.52	9.24	0.05	0.05	15.39	11.74	1.06	0.77
4	Bs1-4-2	角闪辉长岩	45.09	1.88	10.00	11.50	0.00	0.06	12.74	11.88	1.60	0.96
5	Bs8-10-1	含橄角闪辉长岩	44.30	1.61	10.15	18.25	0.04	0.21	9.12	10.96	1.13	0.88

以 23 个氧为基准计算的阳离子数

序号	TSi	TAl	CAI	CCr	CFE ³⁺	CTi	CMg	CFE ²⁺	CMn	BCa	BNa	ANa	AK	Si/(Si+Fe+Al)	种属
2	6.62	1.38	0.31	0.01	0.71	0.03	3.93	0.00	0.011	1.714	0.29	0.39	0.02	0.794	普通角闪石
1	6.16	1.84	0.19	0.011	0.05	0.53	3.26	0.96	0.001	1.721	0.28	0.68	0.13	0.706	韭闪石
3	6.48	1.52	0.59	0.006	0.88	0.00	3.29	0.22	0.006	1.803	0.20	0.01	0.14	0.754	普通角闪石
4	6.74	1.26	0.50	0.00	0.00	0.21	2.84	1.44	0.008	1.903	0.10	0.37	0.18	0.774	韭闪石
5	6.66	1.35	0.45	0.005	0.50	0.18	2.04	1.79	0.03	1.764	0.24	0.09	0.17	0.771	普通角闪石

分析测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室,分析者 余静。

根据显微镜观察,有的角闪石晶体呈六边形、菱形,有的包围着辉石的残留体,有的呈辉石的假象,这些现象也说明岩体中既有原生角闪石也有次生角闪石,同时暗示了原生岩浆含水或后期有流体的参与的可能性(李凯明等,2002)。因此,白石泉岩体中的角闪石具多成因的特点。

4 讨论

4.1 岩浆来源及岩浆性质

研究表明,岩浆岩中的钙质角闪石的化学成分与岩浆来源之间有密切的关系(马润则等,1997,2001;肖渊甫等,1998)。姜常义等(1984)指出,随着温度和压力的增高,钙质角闪石的 Si 含量有规律地降低,角闪石的 $Si/(Si + Ti + Al)$ 值,在壳源区和幔源区之间出现间断,壳源角闪石的 $Si/(Si + Ti + Al)$ 值不低于 0.775,而幔源角闪石则不大于 0.765。白石泉岩体中大多数角闪石样品的 Al_2O_3 均大于 10%, $Si/(Si + Ti + Al) < 0.775$,应属幔源角闪石。在角闪石的 $Ti_2O - Al_2O_3$ 关系图上(图 5)均位于幔源区,表明岩浆应来源于上地幔。

Kushiro(1960)与 Le(1962)研究表明,单斜辉石的成分取决于母岩浆的成分与结晶环境,其 Si 和 Al 可以作为确定母岩浆类型的标型元素(孙传敏,

1994)。在单斜辉石的 $SiO_2 - Al_2O_3$ 图解中(图 6),所有的单斜辉石均位于亚碱性岩区,表明其母岩浆属于亚碱性系列;在 $Al^{IV} - Si$ 图上(图 7),所有样品均位于拉斑玄武岩区,表明母岩浆应属拉斑玄武岩岩浆。

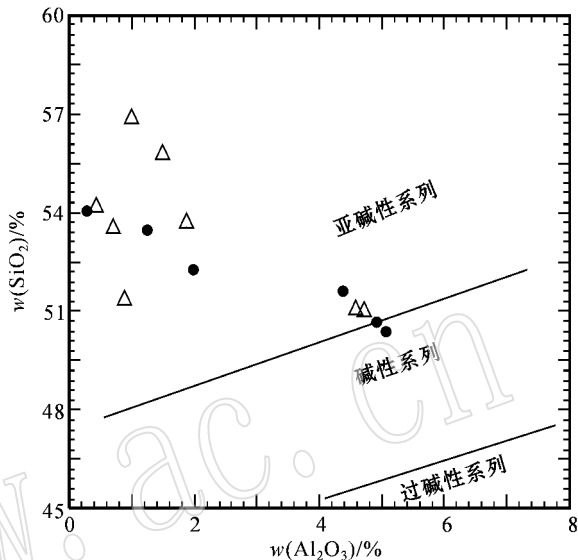


图 6 单斜辉石的 $SiO_2 - Al_2O_3$ 关系图(据张旗,1992)

Fig. 6 $SiO_2 - Al_2O_3$ plot of clinopyroxene (after Zhang Qi, 1992)

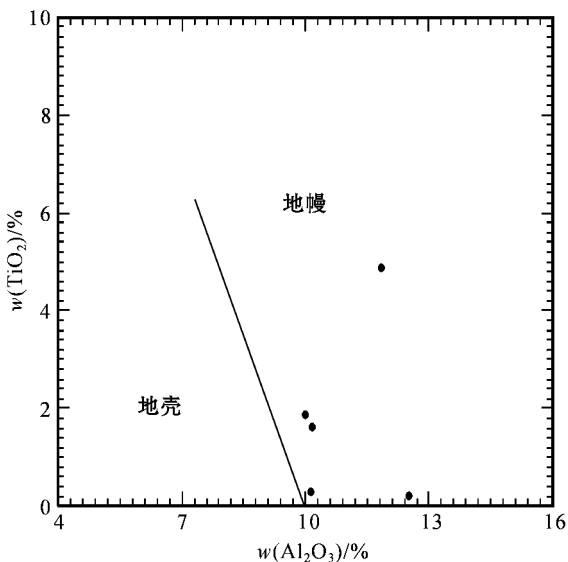


图 5 角闪石的 $TiO_2 - Al_2O_3$ 与岩浆来源关系图 (据姜常义等,1984)

Fig. 5 Relationship between $TiO_2 - Al_2O_3$ of amphibole and magma source (after Jiang Changyi et al., 1984)

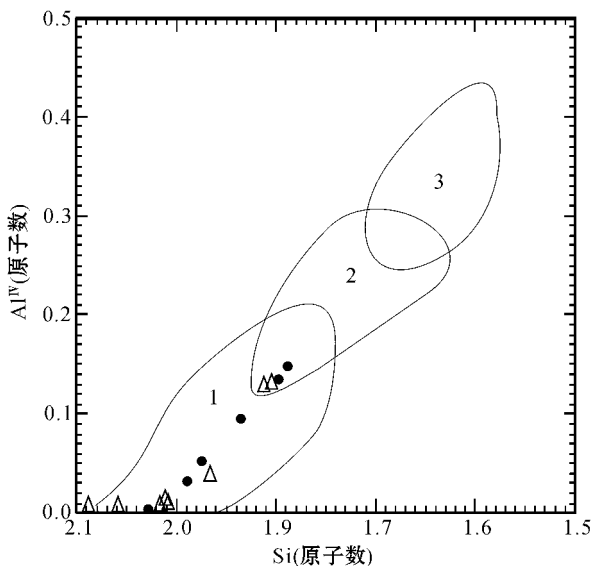


图 7 单斜辉石的 $Al^{IV} - Si$ 关系图 (据 Kushiro,1960;张儒瑗等,1983)

Fig. 7 Al^{IV} versus Si plot of clinopyroxene (after Kushiro,1960; Zhang Ruyuan et al., 1983)

1—拉斑玄武岩 2—不含似长石的碱性岩 3—含似长石的碱性岩

Li 等 (2004) 研究认为, 橄榄石的成分主要与母岩浆的 MgO/FeO 、 Ni 含量及岩浆的结晶分异等作用有关。由于 $Mg-Fe$ 在橄榄石-熔体之间的分配系数基本是一定值, 即 $K_D^{Ol-melt}$ 为 $0.3 \sim 0.33$ (Roeder *et al.*, 1970), 所以可以利用橄榄石-熔体平衡原理估算进入岩浆房中母岩浆的 MgO 含量。以岩体中橄榄石 MgO 含量最高的 $Fo = 85$, 推算与其共存熔体的 $MgO/FeO^T = 1.05$ (按质量百分比计算, FeO^T 为全铁, $K_D^{Ol-melt}$ 为 0.33)。白石泉岩体中大多数样品的 $MgO/FeO^T > 1.05$, 表明各岩石的成分均不能代表共存的熔体成分, 进入岩浆房的母岩浆中有过剩的橄榄石加入, 母岩浆是经过深部橄榄石结晶的演化岩浆。在 $MgO-Fo-FeO$ 图解 (图 8) 中, 该样品位于代表母岩浆成分曲线的下方, 也同样说明了岩浆中有过剩的橄榄石加入。该样品的 $FeO^T = 13.38\%$, 计算出与之平衡的熔体的 $MgO = 14.05\%$, 约有 71.2% 的橄榄石加入。根据 Le Bas (2000) 对高镁火成岩的分类, 白石泉侵入体的原始岩浆应为高镁玄武质岩浆。

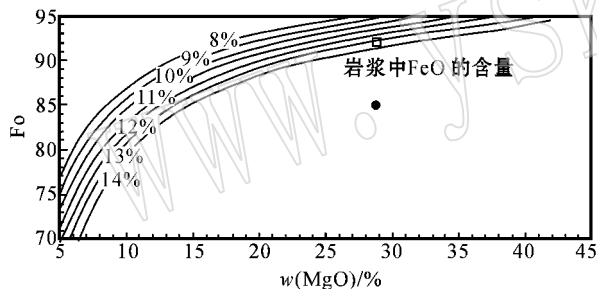


图 8 $MgO-Fo-FeO$ 图解 (据张招崇等, 2003)

Fig. 8 Diagram of $MgO-Fo-FeO$ (after

Zhang Zhaochong *et al.*, 2003)

曲线上数字代表 FeO 含量, \square 为原始岩浆 FeO

含量, \bullet 为橄榄石投影点

Numeral on the curve is FeO content of magma, \square is FeO

content of primitive magma in Baishiquan, \bullet is Fo

content of olivine

由上所述, 白石泉岩体的原始岩浆为高镁拉斑玄武质岩浆, 目前出露的岩体系原始岩浆在深部发生了橄榄石结晶分异作用后, 其橄榄石的堆积体与残余岩浆演化的混合体。

4.2 成岩温度

造岩矿物形成温度的确定是一项非常棘手的工作, 目前还没有一个合适且准确的方法来计算矿物

形成时的温压 (杨日红, 2002)。对矿物形成温度的研究均是基于相平衡的原理, 取得了大量的实验数据与结论, 得出了不同矿物温度的计算方法。

4.2.1 橄榄石的结晶温度

橄榄石是岩体中结晶最早的主要造岩矿物之一, 其结晶温度即是岩浆温度的下限, 又是固相开始结晶出温度的上限。КуТадни (1966, 转引自邱家骧, 1991) 研究表明, 玄武岩中 MgO 与橄榄石的结晶温度有关, 其关系式为: $t_{O} (^{\circ}C) = 1056.6 + 17.3 \times (MgO) \pm 26^{\circ}C$ 。据此计算得出的白石泉岩体橄榄石开始结晶温度为 $1295.45 \pm 26^{\circ}C$ 左右。

4.2.2 辉石的结晶温度

Brey 和 Kohler (1990) 在前人研究认为的斜方辉石中的 Ca 离子数可以作为温度指示计的基础上, 根据当时已有的可逆相平衡实验资料, 获得了斜方辉石的 Ca 溶解度温度计 (马鸿文, 2001)。通过该温度计计算获得斜方辉石的结晶温度范围在 $1058 \sim 1163^{\circ}C$ 之间。根据马鸿文 (1985) 修正的有关单斜辉石温度计算公式: $t (^{\circ}C) = 1097.135 + 33.133X_{Ca}^{Cpx} - 0.764(X_{Ca}^{Cpx})^2 + 11Al_2O_3$ 。对岩体中的单斜辉石计算结果为: 结晶温度介于 $1097 \sim 1113^{\circ}C$ 之间。因此, 由橄榄石到辉石其结晶温度降低, 而斜方辉石和单斜辉石的结晶温度接近, 表明它们基本上是同时结晶形成的。

上述研究表明, 白石泉岩体中的矿物化学特征具有拉斑玄武岩系列岩石中矿物共有的特征, 并且与东疆型造山带环境中的镁铁-超镁铁质岩中的矿物特征一致 (顾连兴等, 1994)。

5 结论

(1) 白石泉岩体主要由辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、橄长岩、角闪石岩、辉长岩等构成。

(2) 白石泉岩体的主造岩矿物为贵橄榄石、顽透辉石、普通辉石、古铜辉石及韭闪石、拉长石与培长石。它们具有拉斑玄武岩系列岩石中矿物共有的特征, 与东疆型造山带环境中的基性-超基性岩中的矿物特征相同。

(3) 白石泉岩体的原始岩浆属高镁拉斑玄武岩浆。目前出露的岩体系原始岩浆在深部发生了橄榄石结晶分异作用后, 橄榄石的堆积体与残余岩浆演化的混合体。

References

- Brey J D, Kohler T P. 1990. Geothermobarometry in four-phase iherzolute: II. new thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers[J]. *J. Petrol.*, 31: 1335~1378.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Hui'an. 1985. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy [M]. Sichuan: Chongqing Publishing House, 1~874 (in Chinese with English abstract).
- Dick H J B and Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86: 54~76.
- Dick H J B and Natland J H. 1996. Late stage melt evolution and transport in the shallow mantle beneath the East Pacific Rise: Deep Sea Drilling Project [J]. *Initial Reports*, 147: 103~134.
- Dong Chuanwan, Xu Xisheng, Chen Xiaoming, et al. 1997. Mineralogical record of crystallization processes of Pingtan hornblende gabbro, Fujian [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(3): 285~290 (in Chinese with English abstract).
- Gu Lianxing, Gou Xiaolin, Zhang Zunzhong, et al. 2003. Geochemistry and petrogenesis of a multi-zoned high Rb and F granite in eastern Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 585~600 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Jiang Changyi and An Sanyuan. 1984. Chemical compositions and petrology significance of calcium amphibole in the igneous rocks [J]. *Journal of Mineral and Petrology*, 4(3): 10~15 (in Chinese).
- 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.
- Le Bas M J. 2000. IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks [J]. *J. Petrol.*, 41: 1467~1470.
- Li C S, Xu Z H, De Waal S A, et al. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulphide deposit, western China: implications for ore genesis [J]. *Mineralium Deposita*, 39: 159~172.
- Li Jinyi, Wang Kezhao, Li Wenqian, et al. 2002. Tectonic evolution since the late Paleozoic and mineral prospecting in eastern Tianshan mountains, NW China [J]. *Xinjiang Geology*, 20(4): 296~301 (in Chinese with English abstract).
- Li Kaiming, Zhao Hailing and Deng Jinfu. 2002. Study on petrology, mineralogy and genesis of the amphibole in Pingshun Complex, Shanxi Province [J]. *Beijing Geology*, 14(4): 41~47 (in Chinese with English abstract).
- Ma Hongwen. 1985. A formula about modified geothermograph of clinopyroxene [J]. *Geological Science and Technology Information*, 4(2): 82~84 (in Chinese).
- Ma Hongwen. 2001. Introduction to Thermodynamics in Crystalline Petrology [M]. Higher education Publishing House, 1~297 (in Chinese).
- Ma Runze, Xiao Yuanfu, Wei Xiangui, et al. 1997. Research on the geochemical property and genesis of basic and ultrabasic rocks of Jinning period in the Micangshan area, Sichuan province [J]. *Journal of Mineral and Petrology*, 17 (supplement): 35~47 (in Chinese with English abstract).
- Ma Runze and Xiao Yuanfu. 2001. Study of rock-forming minerals in the basic-ultrabasic rocks of Jinning period from the Micangshan area [J]. *Journal of Chengdu university of technology*, 28(1): 34~39 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Yang Jianmin, Han Chunming, et al. 2002. Metallogenic systems of polymetallic copper and gold deposits and related metallogenic geodynamic model in eastern Tianshan, Xinjiang [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(4): 413~424 (in Chinese with English abstract).
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxenes [J]. *Mineralogical Magazine*, 52: 535~550.
- Qiu Jiexiang and Lin Jingqian. 1991. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 140~156 (in Chinese).
- Qiu Jiexiang and Liao Qunan. 1987. The Main characteristics and genetic information of clinopyroxene megacrysts in Cenozoic basalts of eastern China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 6(1): 56~63 (in Chinese with English abstract).
- Roeder P L and Emslie R F. 1970. Olivine-liquid equilibrium [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 29: 275~289.
- Sakuyama M. 1983. Petrology of arc volcanic rocks and their origin by mantle diapirs [J]. *Journal of Volcanology and Geothermology Research*, 18: 297~320.
- Shi Zhanyi. 1994. Typomorphic characteristics of olivines and their geologic implications in searching for major ore-bearing basic and ultrabasic intrusions in China [J]. *Northwest Geoscience*, 15(1): 11~16 (in Chinese with English abstract).
- Sun Chuanmin. 1994. Genetic mineralogy of pyroxenes from the Yanbian proterozoic ophiolites (Sichuan, China), and its geotectonic implications [J]. *Journal of Mineral and Petrology*, 14(3): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Thompson R N. 1974. Some high-pressure pyroxenes [J]. *Miner. Mag.*, 39: 768~787.
- Wu Hua, Li Huaqin, Mo Xihua, et al. 2005. Age of the Baishiquan mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 498~502 (in Chinese with English abstract).
- Wu Pingxiao, Wu Jinping, Li Caiwei, et al. 1998. Crystalline velocity equation and kinetics mechanism of plagioclase oscillatory zoning [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 388~394 (in Chinese with English abstract).
- Wu Pingxiao, Wu Jinping, Xiao Wending, et al. 1997. Genetic mechanism of plagioclase zoning [J]. *Geology-geochemistry*, 4(4): 40~

- 49 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Yuanfu, Ma Runze, Wei Xiangui *et al.* 1998. The characteristics and genesis of the basic intrusive complex in Chengjiang period, Mincangshan, Sichuan [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 25(4): 537~542 (in Chinese with English abstract).
- Yang Rihong, Dong Jianle, Li Cai, *et al.* 2002. Major characteristics and temperature - pressure conditions of the minerals in Cenozoic volcanic rocks in the northern Tibetan plateau [J]. *Geoscience*, 16(2): 154~158 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 1992. Mafic-ultramafic rocks and Wilson cycles [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 8(2): 168~176 (in Chinese).
- Zhang Ruyuan and Cong Bolin. 1983. The Geothermobarometry of Minerals [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~280 (in Chinese).
- Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2003. A method for identifying primary magma—examples from picrite and alkali basalts [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(2): 130~134 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiangshen. 1995. Petrography and mineralogy of the mesozoic - Cenozoic volcanic rocks from the central part of Livingston island, west Antarctica [J]. *Antarctic Research (Chinese edition)*, 7(1): 1~16 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- 马鸿文. 2001. 结晶岩热力学概论 [M]. 高等教育出版社, 1~297.
- 马润则, 肖渊甫, 魏显贵, 等. 1997. 四川米仓山地区晋宁期基性超基性岩地球化学性质及其成因研究 [J]. *矿物岩石*, 17(增刊): 35~47.
- 马润则, 肖渊甫. 2001. 米仓山地区晋宁期基性超基性侵入岩中造岩矿物研究 [J]. *成都理工学院学报*, 28(1): 34~39.
- 毛景文, 杨建民, 韩春明, 等. 2002. 东天山铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(4): 413~424.
- 邱家骧, 廖群安. 1987. 中国东部新生代玄武岩中单斜辉石巨晶的主要特征及成因信息 [J]. *岩石矿物学杂志*, 6(1): 56~63.
- 邱家骧, 林景任. 1991. 岩石化学 [M]. 北京: 地质出版社, 140~156.
- 师占义. 1994. 橄榄石标型特征及其找矿意义 [J]. *西北地质科学*, 15(1): 11~16.
- 孙传敏. 1994. 四川盐边元古代蛇绿岩中辉石的成因矿物学及其大地构造意义 [J]. *矿物岩石*, 14(3): 1~15.
- 吴华, 李华芹, 莫新华, 等. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义 [J]. *地质学报*, 79(4): 498~502.
- 吴平霄, 吴金平, 李才伟, 等. 1998. 斜长石韵律环带的结晶速率方及其动力学机制 [J]. *岩石学报*, 14(3): 388~394.
- 吴平霄, 吴金平, 肖文丁, 等. 1997. 斜长石环带的成因机制 [J]. *地质地球化学*, (4): 40~49.
- 肖渊甫, 马润则, 魏显贵, 等. 1998. 米仓山澄江期基性侵入杂岩特征及其成因探讨 [J]. *成都理工学院学报*, 25(4): 537~542.
- 杨日红, 董建乐, 李才, 等. 2002. 藏北新生代火山岩主要造岩矿物特征及温压条件 [J]. *现代地质*, 16(2): 154~158.
- 张旗. 1992. 镁铁-超镁铁岩与威尔逊旋回 [J]. *岩石学报*, 8(2): 168~176.
- 张儒瑗, 从柏林. 1983. 矿物温度计和矿物压力计 [M]. 北京: 地质出版社, 1~280.
- 张招崇, 王福生. 2003. 一种判别原始岩浆的方法——以苦橄岩和碱性玄武岩为例 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 33(2): 130~134.
- 郑祥身. 1995. 西南极利文斯顿岛中部-新生代火山岩的岩相学和矿物学特征 [J]. *南极研究(中文版)*, 7(1): 1~16.

附中文参考文献

- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1985. 成因矿物学与找矿矿物学 [M]. 重庆出版社, 1~874.
- 董传万, 徐夕生, 陈小明, 等. 1997. 福建平潭角闪辉长岩结晶过程的矿物学记录 [J]. *矿物学报*, 17(3): 285~290.
- 顾连兴, 苟晓琴, 张遵忠, 等. 2003. 东天山一个多相带高钼氟花岗岩的地球化学及成岩作用 [J]. *岩石学报*, 19(4): 585~600.
- 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.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学成分及其岩石学意义 [J]. *矿物岩石*, 4(3): 10~15.
- 李锦轶, 王克卓, 李文铅, 等. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查 [J]. *新疆地质*, 20(4): 296~301.
- 李凯明, 赵海玲, 邓晋福. 2002. 山西平顺岩体岩石学/矿物学特征及角闪石成因 [J]. *北京地质*, 14(4): 41~47.