

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2016-11-22

东天山似斑状角闪辉长岩类与铁钛氧化物矿床的关系

石 煜, 王玉往, 王京彬

北京矿产地质研究院, 北京 100012

SHI Yu, WANG Yuwang, WANG Jingbin

Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China

SHI Yu, WANG Yuwang, WANG Jingbin. Relationship between amphibole-porphyritic gabbroic rocks and Fe-Ti oxide ore deposits of the East Tianshan. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(6): 080-097

Abstract: Amphibole-porphyritic gabbroic rocks characterized by poikilitic amphibole is a part of the mafic-ultramafic complexes, East Tianshan, and some of them host the Fe-Ti oxide ore in this district. In order to better understand the genesis relationship between the gabbroic rocks and the Fe-Ti oxide deposits of the East Tianshan, this study used EMPA to analyze the chemical composition of silicate minerals, including plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene and poikilitic amphibole of the amphibole-porphyritic gabbroic rocks, and discussed the physico-chemical parameter of their parental magma. The results show that amphibole-porphyritic gabbroic rocks formed in middle-lower crust, within a depth of 8.9 to 15.7 km, a temperature higher than 914 °C. The oxygen fugacity of amphibole-porphyritic gabbroic rocks of the East Tianshan varies from NNO-0.37 to NNO+1.15, and show similar ranges with the Hongge layered gabbroic intrusion, which hosts the largest Fe-Ti oxide ore in Panxi district. The enrichment of Fe-Ti oxide in amphibole-porphyritic gabbroic rocks of the East Tianshan benefited from high oxygen fugacity, however, the formation and scale of Fe-Ti oxide ore deposits associated with amphibole-porphyritic gabbroic rocks is strongly controlled by the evolution degree of their parental magma. The least differentiated Erhongwa amphibole-porphyritic gabbroic intrusion hosts no Fe-Ti oxide ore. The parental magma of the Niumaoquan and Xiangshanxi amphibole-porphyritic gabbroic intrusion becomes more and more differentiated, and the elevated evolution degree contributed to one small scale and one large scale Fe-Ti oxide ore deposit in this district.

Key words: East Tianshan; mafic-ultramafic intrusions; amphibole-porphyritic gabbroic rocks; Fe-Ti oxide ore; amphibole

摘要:似斑状角闪辉长岩类是东天山镁铁-超镁铁杂岩的一部分,以含有嵌晶角闪石为特征,其中部分岩体的似斑状角闪辉长岩赋存铁钛氧化物矿床。为探讨东天山似斑状角闪辉长岩类和铁钛氧化物矿床形成的内在成因关系,本次研究对二红洼、牛毛泉和香山西似斑状角闪辉长岩类的斜长石、单斜辉石、斜方辉石以及嵌晶角闪石进行了系统的电子探针成分分析,并对其形成物理化学条件进行了探讨。结果表明,东天山似斑状角闪辉长岩类的母岩浆氧逸度变化范围为NNO-0.37~NNO+1.15,和攀西地区最大的红格岩体的氧逸度一致,侵入于中下地壳,深度介于8.9~15.7 km,结晶温度大于914 °C。东天山似斑状角闪辉长岩中铁钛氧化物矿床的富集得益于母岩浆的高氧逸度,但铁钛氧化物矿床的形成和规模则受控于各个岩体的岩浆演化程度。二红洼、牛毛泉和香山西的岩浆的演化程度系统增高,演化程度最低的二红洼岩体并未形成铁钛氧化物矿床,而分异演化程度逐渐增高的牛毛泉和香山西似斑状角闪辉长岩类则分别形成了本区一个小型的和一个大型的铁钛氧化物矿床。

关键词:东天山;镁铁-超镁铁岩;似斑状角闪辉长岩类;铁钛氧化物矿床;角闪石

中图分类号:P588.124;P618.3;P618.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2017)06-0080-18

收稿日期:2016-01-16;修回日期:2016-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41372102)

作者简介:石 煜(1986—),男,博士研究生,主要从事矿床学研究。E-mail:orounaxiong@sina.com

0 引言

东天山地区发育为数众多的二叠纪镁铁-超镁铁岩体,锆石 U-Pb 年龄介于 300~269 Ma^[1-13]。该类杂岩体具有相似的岩石组合、岩石地球化学以及同位素地球化学特征^[8-20],形成于造山作用过程的后碰撞伸展阶段^[6-8,21-23],其主体形成了为数众多的铜镍硫化物矿床,如黄山东、黄山、土墩和葫芦等岩体^[1-20],仅有部分岩体形成了铁钛氧化物矿床,如香山西和牛毛泉岩体^[11-13,24-28],其中香山西岩体以其独特的复合成矿作用而得到了广泛的关注和研究。东天山二叠纪镁铁-超镁铁岩体通常为多期杂岩体,由不同期次的辉长岩类和辉橄岩类先后侵入形成,其铜镍硫化物的成矿作用主体与辉橄岩类和橄辉岩类等超镁铁岩的侵入有着密切关系,其成矿特征和同样产于后碰撞造山环境铜镍硫化物矿床(夏日哈木)相似^[29];其铁钛氧化物的富集则受控于辉长岩类,尤其是富含嵌晶角闪石的似斑状角闪辉长岩类,如香山西、牛毛泉、二红洼、黄山东和白石泉^[11,24-25]。

前人对香山西、牛毛泉和二红洼岩体的岩体特征、岩石学、岩石地球化学以及同位素地球化学做了深入研究^[11-13,24-28,30],认为铁钛成矿作用是东天山二叠纪幔源岩浆作用的一部分,钛铁氧化物和铜镍硫化物成矿作用是岩浆不同程度分异演化的产物^[11-13,25]。因此,东天山似斑状角闪辉长岩的铁钛氧化物成矿作用是探讨该类岩体铜镍硫化物和铁钛氧化物复合成矿作用的纽带。前人对本区部分似斑状角闪辉长岩类样品的嵌晶角闪石、长石和辉石等硅酸盐造岩矿物的成分做过零散的测试和报道^[17,31],缺少对同类岩石硅酸盐造岩矿物成分的系统比较,不仅限制了对其形成过程的岩浆物理化学条件的探讨,也不利于探索铁钛氧化物富集机制和岩浆物理化学条件之间的关系,阻碍了对本区铁钛氧化物矿床成矿作用特征标志的研究。

岩浆温度、压力和氧逸度等物理化学条件及其变化是控制矿物相结晶组合的关键,对成矿物质的富集和贫化有着重要控制作用。二红洼、牛毛泉和香山西岩体是东天山似斑状辉长岩类的典型代表,在矿物组合、矿物成分以及成矿物质富集程度等方面具有显著差异,对其系统造岩矿物学特征的研究有助于成矿物质的富集机制及其控制条件的探讨。角闪石的成分受温度、压力、氧逸度和熔体总成分的

控制,可以反映岩浆分离结晶过程中物理化学条件的改变^[32-35]。嵌晶状角闪石是东天山角闪辉长岩类最为特征的造岩矿物,其形成明显晚于橄榄石、辉石和长石等常见硅酸盐造岩矿物,是岩浆固结-近固结条件下的产物,其成为探讨该类岩石形成的物理化学条件提供了良好的素材。本次研究应用电子探针对东天山地区香山西、牛毛泉和二红洼 3 个岩体中的角闪辉长岩类进行系统的矿物学对比,用以探讨角闪辉长岩类形成的物理化学条件及其差异,以及其与铁钛氧化物成矿作用之间的关系。

1 区域地质背景

天山造山带是中亚造山带的一部分,形成时代在早二叠世^[36]或者早三叠世^[37-38],是微陆块合并以及岛弧增生过程的产物^[39]。造山带中的蛇绿岩带,区域性断裂以及高程度变质岩石将其划分为南天山、中天山和北天山 3 个次级造山单元^[38]。南天山仅存于西南部,传统上将中天山和北天山的东部称为东天山(图 1)。

区内主干断裂主要为东西向展布,次为北东东向。从北到南依次为骆驼圈子断裂、梧桐窝子—头苏泉断裂、康古尔塔格—黄山深断裂、苦水断裂、阿齐克库都克—沙泉子断裂等,以压扭性逆断层为主,具有长期活动特点,多数构成了东天山地区不同大地构造单元的分界线(图 1)。东天山晚古生代造山带夹于吐哈地块与中天山地块之间,依据古生代地层系统及重要断裂的分布,东天山可分为北、中、南 3 条地层-构造带^[21-22]。北带位于康古尔塔格—黄山断裂以北的吐哈盆地南缘,主要出露从奥陶系到石炭系岛弧火山岩及海相凝灰岩和砂岩,发育斑岩型和火山热液型铜矿床^[40-41]。中带为康古尔剪切带,夹于康古尔塔格—黄山断裂和苦水断裂之间,主要为复理石建造(下石炭统干墩组)和拉斑玄武岩-硅质岩-泥质岩等深水相组合(中石炭统梧桐窝子组),发育大量的岩浆铜镍硫化物矿床和韧性剪切带型金矿。南带位于苦水断裂与阿奇克库都克—沙泉子大断裂之间,该区缺乏奥陶系—泥盆系,下石炭统以玄武岩和中酸性火山碎屑岩、熔岩为主^[42],发育热液型金矿和夕卡岩型铜多金属矿床。阿奇克库都克断裂以南为具有前寒武基底的中天山地块,主要发育大型沉积变质型铁矿和与岩浆活动有关的铁铜矿,以及层控型铅锌矿床^[22]。

东天山地区二叠纪幔源岩浆作用强烈,大量的镁

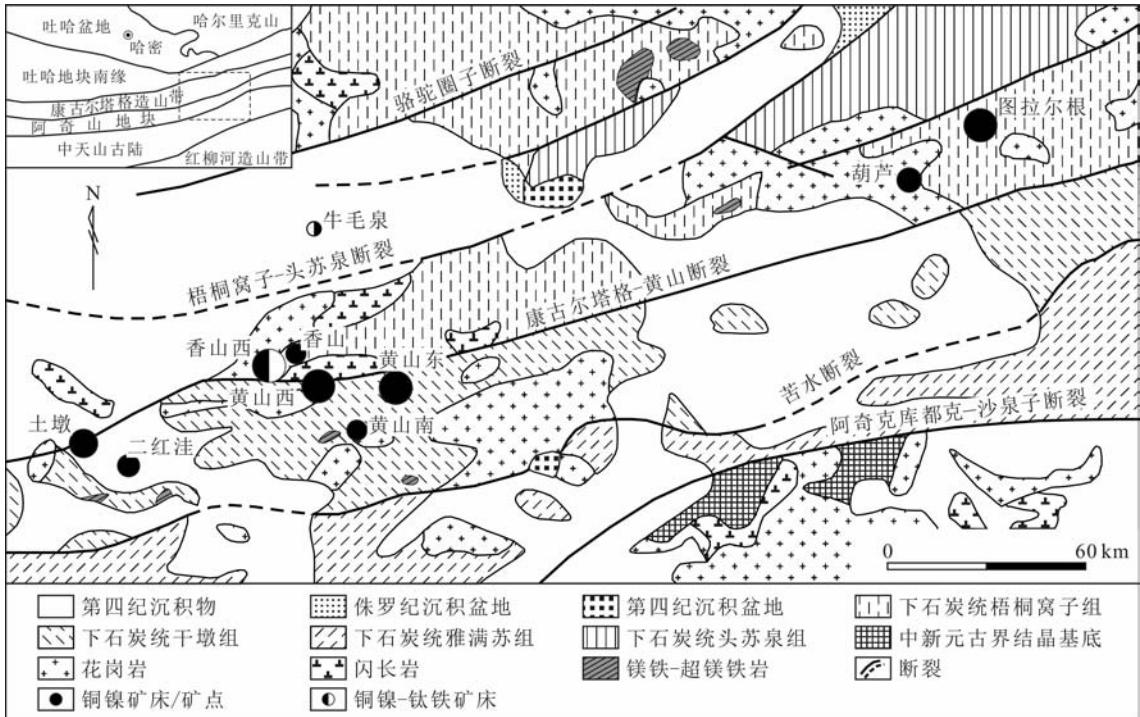


图 1 新疆黄山铜镍矿带地质图
(据文献[28]修编)

Fig. 1 Simplified geological map of the Huangshan Ni-Cu metallogenic belt, Xinjiang

铁-超镁铁岩体侵入于北天山觉罗塔格构造岩浆带和大南湖—头苏泉岛弧带, 以及中天山地轴。区内二叠纪幔源岩浆岩主体形成了为数众多的铜镍硫化物矿床, 如觉罗塔格构造岩带中的黄山、黄山东、黄山南、香山、土墩、葫芦和图拉尔根等, 以及中天山地轴上的白石泉和天宇; 部分岩体形成了独立的钒钛磁铁矿, 如北天山哈尔里克山的牛毛泉; 少量岩体形成了铁钛氧化物和铜镍硫化物的复合型矿床, 如香山西。

2 三个岩体地质特征

二红洼岩体由南北两个岩体组成(图 2a), 其形成受两期岩浆作用控制, 其中第 1 期岩浆作用形成了含长辉橄榄岩和橄榄辉长岩, 该期岩浆作用的产物主体分布于北岩体中-西部以及南岩体东部; 第 2 期岩浆作用形成了辉长岩类, 主体包括角闪苏长辉长岩、钛-铁苏长辉长岩和淡色辉长岩, 其中淡色辉长岩为南岩体的主体, 角闪苏长辉长岩侵入于北岩体中含长辉橄榄岩和橄榄辉长岩中, 铁钛氧化物苏长辉长岩侵入于南岩体的橄榄辉长岩中^[25,30]。

牛毛泉基性杂岩体位于新疆哈尔里克晚古生代岛弧东段, 侵入华力西中期钾质花岗岩中。第四系

冲积物将牛毛泉岩体分成了东段、中段和西段(图 2b)。橄榄辉长岩和辉长岩为牛毛泉岩体的主体, 常见于整个岩体中, 其中橄榄辉长岩含有星点状硫化物和铁钛氧化物^[24-25]。辉长苏长岩含有浸染状铁钛氧化物, 岩石中常见粒度达 2~3 cm 的嵌晶角闪石, 为牛毛泉钛铁氧化物矿床的控矿岩相。

香山西镁铁-超镁铁岩体总体由两期岩浆作用形成。第一期形成了岩石中主体的似斑状角闪辉长岩和细粒辉长岩, 其中似斑状角闪辉长岩手标本可见粒度介于 2~3 cm 的嵌晶角闪石, 该期岩浆作用控制了香山西铁钛氧化物矿床的产出。第二期岩浆作用形成了辉橄榄岩和橄榄辉长岩类(图 2c), 该期岩浆作用控制了铜镍硫化物矿床的产出^[25-27]。

3 似斑状角闪辉长岩类

东天山似斑状角闪辉长岩类总体包含似斑状角闪辉长岩和似斑状角闪辉长苏长岩两类, 手标本可见粒度介于 1~3 cm 的嵌晶角闪石(图 3a, b)。似斑状角闪辉长岩常见于香山西、香山中、香山东以及黄山东岩体, 而似斑状角闪辉长苏长岩主要出现在牛毛泉和二红洼岩体。

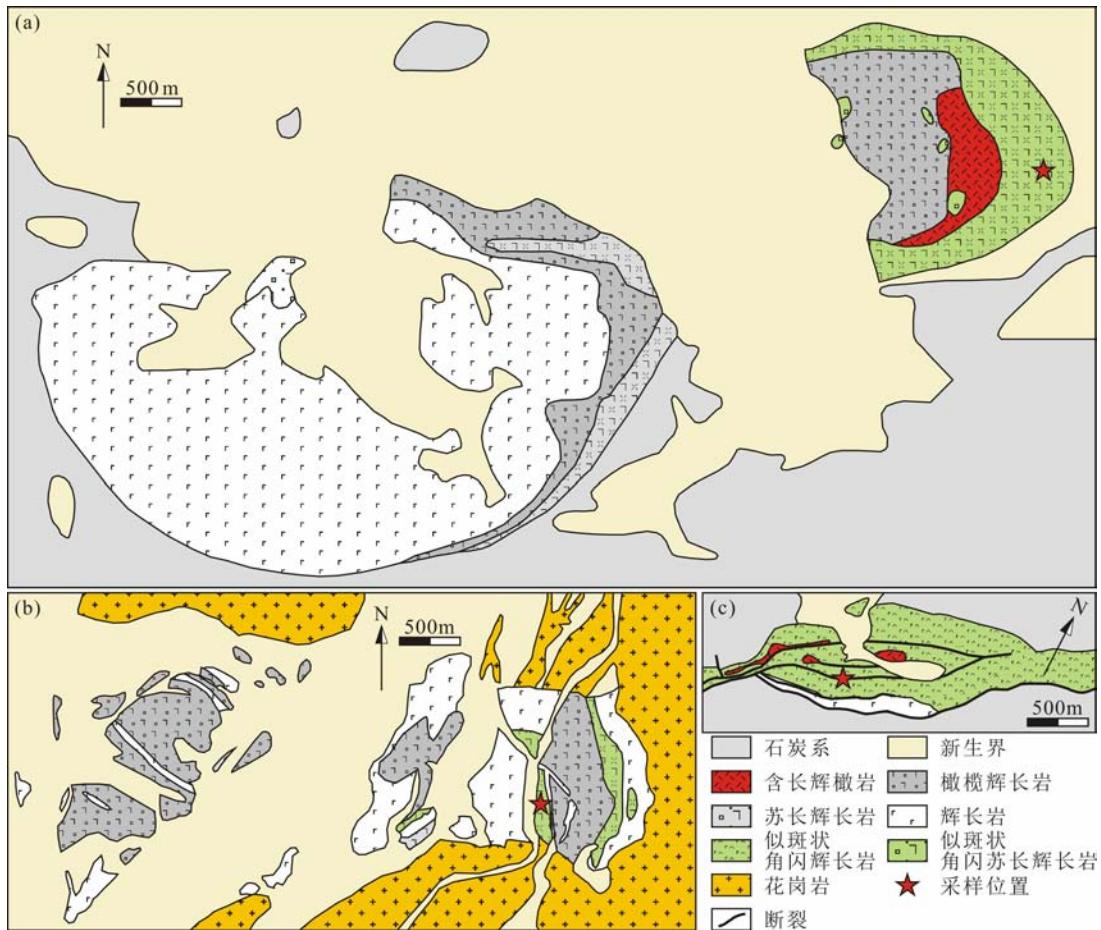


图 2 二红洼、牛毛泉和香山西镁铁-超镁铁岩地质简图

(图 a 据文献[25]修编;图 b 据文献[24]修编;图 c 据文献[27]修编)

Fig. 2 Sketch geological maps of the Erhongwa, Niumaoquan and Xiangshanxi mafic-ultramafic intrusions

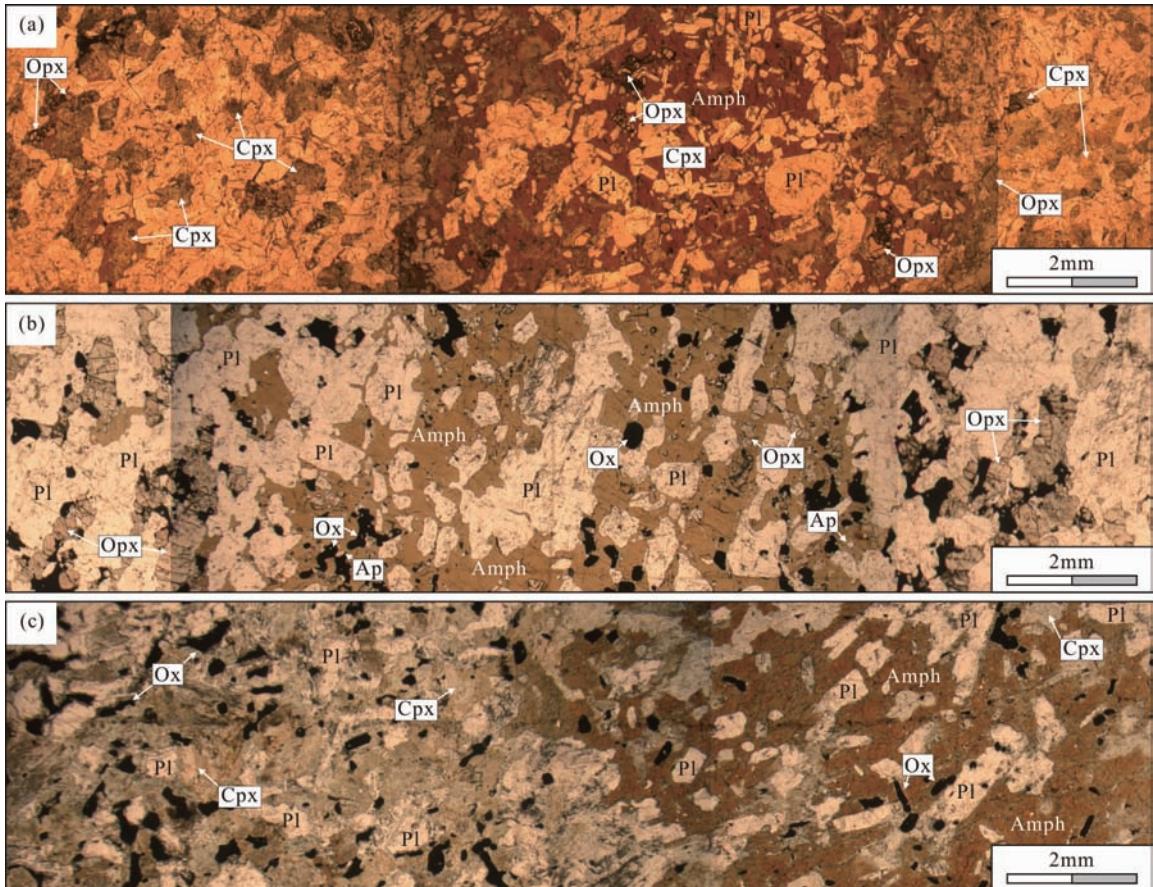


图 3 东天山香山西(a)和牛毛泉(b)似斑状角闪辉长岩类野外样品照片

Fig. 3 Photos of amphibole-porphyric gabbroic rocks of Xiangshanxi (a) and Niumaoquan (b) from the East Tianshan

似斑状角闪辉长岩类通常包含似斑状角闪辉长苏长岩(如图 4a,b)和角闪辉长岩(如图 4c),两者都含有大量的斜长石、单斜辉石以及粒度可达 1~3 cm 的嵌晶角闪石(如图 4),而似斑状角闪辉长苏长岩中则含有大量的斜方辉石(如图 4a,b)。嵌晶角闪石在单偏光镜下具有均一干涉色,在正交光下

显示一致的消光特征。嵌晶角闪石将辉长岩类分成两个部分,嵌晶角闪石内外在硅酸盐矿物组合、矿物的相对比例以及矿物颗粒大小等方面有着显著的差异。嵌晶角闪石内通常含有高比例的斜长石,二红洼和牛毛泉似斑状角闪石中约 85%以上的硅酸盐造岩矿物为斜长石,仅含有少量的单斜辉石和斜方



a—二红洼似斑状角闪辉长苏长岩;b—牛毛泉似斑状角闪辉长苏长岩;c—香山西似斑状角闪辉长岩。Pl—斜长石;Cpx—单斜辉石;Opx—斜方辉石;Amph—角闪石;Ox—铁钛氧化物;Ap—磷灰石。

图 4 东天山似斑状角闪辉长岩类单偏光照片

Fig. 4 Microphotographs of amphibole-porphyric gabbroic rocks of the East Tianshan under plane-polarized light

辉石(如图 4a,b),而香山西嵌晶角闪石中的硅酸盐造岩矿物几乎全部为斜长石(如图 4c);嵌晶角闪石外则含有大量的单斜辉石、斜方辉石以及铁钛氧化物。嵌晶角闪石内外硅酸盐的矿物形态也有系统差别,如嵌晶角闪石中的斜长石不仅粒度较小,同时其长宽比通常介于 2~5,嵌晶角闪石外的斜长石粒度显著较大,且其长宽比通常小于 2(如图 4)。单斜辉石和斜方辉石在嵌晶角闪石内粒度较小,通常小于 100 μm ,且具有不同程度的“磨圆”特征(如图 4)。似斑状角闪辉长岩类的矿物的结晶顺序为斜长石→辉石→铁钛氧化物→嵌晶角闪石。

4 测试方法及结果

本次研究对香山西、二红洼和牛毛泉主要的角闪辉长岩类进行系统采样,选取新鲜的样品对嵌晶角闪石、斜方辉石、单斜辉石以及斜长石进行电子探针成分分析。样品分析在中国科学院地质与地球物

理研究所电子探针与扫描电镜实验室完成。测试仪器为日本岛津公司生产的 JEOL JXA-8100 电子探针,氧化物测试条件:加速电压 15 kV,电流 20 nA,束斑直径为 5 μm ,检测限为 0.01%。

二红洼、牛毛泉和香山西斜长石电子探针成分见表 1。香山西角闪辉长岩斜长石成分为 $\text{Ab}_{38\sim52}\text{An}_{47\sim62}\text{Or}_{0\sim3}$,平均成分为 $\text{Ab}_{43}\text{An}_{56}\text{Or}_1$,An 值主体集中在 55~60(如图 5),主体为拉长石,部分为中长石。牛毛泉角闪辉长苏长岩长石成分为 $\text{Ab}_{28\sim38}\text{An}_{62\sim72}\text{Or}_{0\sim1}$,平均成分为 $\text{Ab}_{30}\text{An}_{69}\text{Or}_0$,斜长石 An 值主体集中在 67~72(如图 5),培长石和拉长石各自约占 50%。二红洼角闪辉长苏长岩斜长石成分为 $\text{Ab}_{18\sim29}\text{An}_{70\sim81}\text{Or}_{0\sim1}$,平均成分为 $\text{Ab}_{22}\text{An}_{77}\text{Or}_0$,An 值峰值在 77~78,主体成分为培长石,仅有一个样品为拉长石(如图 5)。香山西、牛毛泉和二红洼嵌晶角闪石内外的斜长石成分并没有显著的系统差异,在 An 值变化范围和 An 峰值两方面几乎相同(如图 5)。

表1 二红洼、牛毛泉和香山西似斑状角闪辉长岩类斜长石主要氧化物成分

Table 1 Major oxides of plagioclase of amphibole-porphyric gabbroic rocks from Erhongwa, Niumaoquan and Xiangshanxi

测试点	w _B /%						阳离子数						An	Ab	Or
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Al	Ca	Na	K	Total			
E13-15-1	48.8	32.3	16.0	2.50	0.03	99.6	2.24	1.75	0.78	0.22	0.00	4.99	77.7	22.2	0.2
E13-15-2	48.9	32.1	15.9	2.43	0.08	99.4	2.25	1.74	0.78	0.22	0.00	4.99	77.9	21.7	0.5
E13-15-3	48.7	32.6	16.3	2.17	0.18	99.9	2.23	1.76	0.80	0.19	0.01	4.99	79.7	19.3	1.0
E13-15-4	49.9	31.8	15.0	2.84	0.02	99.6	2.28	1.71	0.74	0.25	0.00	4.98	74.6	25.4	0.1
E13-15-5	49.7	31.6	15.2	2.87	0.02	99.3	2.28	1.71	0.75	0.26	0.00	5.00	74.4	25.5	0.1
E13-15-6	48.7	31.9	15.7	2.40	0.08	98.7	2.25	1.74	0.78	0.22	0.00	4.99	77.9	21.6	0.5
E13-15-7	47.9	32.7	16.6	2.07	0.07	99.3	2.21	1.78	0.82	0.18	0.00	4.99	81.2	18.4	0.4
E13-15-8	49.4	31.9	15.4	2.50	0.00	99.3	2.27	1.73	0.76	0.23	0.00	4.99	76.9	22.8	0.2
E13-15-9	48.3	32.5	16.4	2.26	0.07	99.5	2.22	1.76	0.81	0.20	0.00	4.99	79.6	20.0	0.4
E13-15-10	49.3	32.2	15.7	2.55	0.04	99.7	2.26	1.74	0.77	0.23	0.00	5.00	77.1	22.7	0.2
E13-15-11	49.4	32.1	15.6	2.49	0.07	99.6	2.26	1.74	0.76	0.22	0.00	4.98	77.1	22.4	0.4
E13-15-12	48.9	31.9	15.7	2.49	0.04	99.0	2.26	1.74	0.77	0.22	0.00	4.99	77.4	22.4	0.2
E13-15-13	51.1	30.8	14.1	3.29	0.15	99.5	2.33	1.66	0.69	0.29	0.01	4.98	69.7	29.4	0.9
E13-15-14	48.2	32.3	15.9	2.39	0.04	98.8	2.23	1.76	0.79	0.21	0.00	4.99	78.4	21.4	0.3
E13-15-15	49.1	31.7	15.3	2.55	0.12	98.7	2.27	1.73	0.76	0.23	0.01	5.00	76.3	23.0	0.7
E13-15-16	48.5	32.0	15.9	2.43	0.03	98.8	2.24	1.75	0.79	0.22	0.00	5.00	78.2	21.7	0.2
E13-15-17	48.2	32.5	16.2	2.20	0.10	99.2	2.22	1.77	0.80	0.19	0.01	4.99	80.1	19.4	0.5
E13-15-18	48.4	32.1	15.9	2.53	0.01	98.9	2.24	1.75	0.78	0.23	0.00	5.00	77.5	22.4	0.1
E13-15-19	47.4	32.7	16.5	2.08	0.05	98.7	2.20	1.79	0.82	0.19	0.00	5.00	81.1	18.6	0.3
E13-15-20	48.8	32.2	15.8	2.70	0.17	99.6	2.25	1.74	0.78	0.22	0.01	5.00	77.4	22.0	0.6
E13-15-21	49.8	31.0	14.7	3.00	0.10	98.6	2.30	1.69	0.73	0.27	0.01	5.00	72.5	26.8	0.7
E13-15-22	47.9	32.4	16.0	2.30	0.10	98.7	2.22	1.77	0.80	0.20	0.00	4.99	79.4	20.1	0.5
N30-5-1	51.5	30.3	13.7	3.55	0.11	99.2	2.36	1.63	0.67	0.31	0.01	4.98	67.7	31.6	0.7
N30-5-2	50.8	30.9	14.4	3.20	0.10	99.3	2.33	1.66	0.71	0.29	0.00	4.99	70.9	28.7	0.4
N30-5-3	50.8	30.7	14.3	3.25	0.07	99.2	2.33	1.66	0.70	0.29	0.00	4.98	70.6	29.0	0.4
N30-5-4	51.7	30.1	13.6	3.58	0.08	99.1	2.37	1.63	0.67	0.32	0.00	4.99	67.5	32.0	0.5
N30-5-5	50.8	30.7	14.6	3.46	0.00	99.6	2.33	1.65	0.72	0.28	0.00	4.98	71.6	27.9	0.5
N30-5-6	51.3	30.4	13.7	3.52	0.10	99.1	2.35	1.64	0.67	0.31	0.01	4.98	67.9	31.6	0.6
N30-5-7	51.0	30.2	13.9	3.45	0.07	98.7	2.35	1.64	0.69	0.31	0.00	4.99	68.8	30.8	0.4
N30-5-8	51.2	30.8	13.9	3.45	0.08	99.5	2.34	1.66	0.68	0.31	0.00	4.99	68.8	30.8	0.5
N30-5-9	51.0	30.6	13.9	3.44	0.09	99.1	2.34	1.66	0.68	0.31	0.01	5.00	68.7	30.8	0.5
N30-5-10	50.7	31.0	14.5	3.13	0.06	99.4	2.32	1.67	0.71	0.28	0.00	4.98	71.7	28.0	0.4
N30-5-11	51.4	30.8	13.7	3.40	0.05	99.4	2.35	1.66	0.67	0.30	0.00	4.98	68.8	30.9	0.3
N30-5-12	50.6	31.0	14.3	3.25	0.06	99.3	2.32	1.67	0.70	0.29	0.00	4.98	70.7	29.0	0.4
N30-5-13	50.5	30.7	14.4	3.23	0.08	99.0	2.32	1.67	0.71	0.29	0.00	4.99	70.8	28.7	0.5
N30-5-14	51.9	30.3	13.7	3.56	0.07	99.6	2.36	1.63	0.67	0.31	0.00	4.97	67.9	31.7	0.4
N30-5-15	50.8	30.6	14.2	3.28	0.07	99.0	2.33	1.66	0.70	0.29	0.00	4.98	70.3	29.4	0.4
N30-5-16	49.9	30.9	14.6	3.15	0.07	98.7	2.30	1.68	0.73	0.28	0.00	4.99	71.7	27.9	0.4
N30-5-17	50.6	30.9	14.3	3.20	0.10	99.1	2.32	1.67	0.70	0.29	0.00	4.98	70.9	28.7	0.4
N30-5-18	50.8	30.6	14.4	3.20	0.10	99.0	2.33	1.65	0.71	0.29	0.00	4.98	71.0	28.6	0.4
N30-5-19	52.8	29.3	12.5	4.19	0.09	98.9	2.42	1.58	0.61	0.37	0.01	4.99	61.9	37.6	0.5
N30-5-20	51.5	30.7	13.9	3.48	0.09	99.7	2.35	1.65	0.68	0.31	0.01	5.00	68.4	31.0	0.5
N30-5-21	51.2	30.6	14.0	3.47	0.05	99.4	2.34	1.65	0.69	0.31	0.00	4.99	68.9	30.9	0.3
N30-5-22	50.8	30.8	14.2	3.20	0.06	99.1	2.33	1.67	0.70	0.28	0.00	4.98	70.8	28.9	0.3
N30-5-23	50.4	30.8	14.1	3.40	0.07	98.8	2.32	1.67	0.70	0.30	0.00	4.99	69.4	30.3	0.4
N30-5-24	50.5	30.7	14.2	3.29	0.07	98.8	2.32	1.67	0.70	0.29	0.00	4.98	70.2	29.4	0.4
N30-5-25	51.6	30.2	13.5	3.65	0.06	99.1	2.36	1.63	0.67	0.32	0.00	4.98	67.0	32.6	0.3
N30-5-26	51.3	30.4	13.6	3.46	0.07	98.9	2.35	1.64	0.67	0.31	0.00	4.97	68.2	31.4	0.4

(续表 1)

测试点	$w_B/\%$						阳离子数						An	Ab	Or
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Al	Ca	Na	K	Total			
N30-5-27	51.7	30.3	13.6	3.80	0.10	99.4	2.36	1.63	0.67	0.33	0.00	4.99	66.5	33.1	0.4
N30-5-28	51.4	30.8	14.0	3.48	0.06	99.8	2.34	1.65	0.69	0.31	0.00	4.99	68.8	30.8	0.4
N30-5-29	51.0	30.7	14.0	3.55	0.06	99.4	2.33	1.66	0.69	0.31	0.00	4.99	68.3	31.3	0.4
X18-3-1	56.9	27.3	9.7	5.86	0.10	99.8	2.56	1.44	0.47	0.51	0.01	4.99	47.4	52.0	0.6
X18-3-2	54.8	28.8	11.5	4.86	0.09	100.1	2.47	1.53	0.56	0.42	0.01	4.99	56.4	43.1	0.5
X18-3-3	54.7	28.7	11.6	4.83	0.10	100.0	2.47	1.52	0.56	0.42	0.01	4.98	56.7	42.7	0.6
X18-3-4	54.3	28.5	11.5	5.35	0.00	54.3	2.47	1.52	0.56	0.43	0.00	4.98	56.5	43.2	0.3
X18-3-5	55.2	28.0	10.4	5.29	0.08	99.0	2.51	1.49	0.51	0.47	0.00	4.98	51.9	47.6	0.5
X18-3-6	53.8	28.9	11.6	4.71	0.07	99.1	2.45	1.55	0.57	0.42	0.00	4.99	57.4	42.2	0.4
X18-3-7	54.5	28.6	11.2	4.93	0.18	99.4	2.47	1.53	0.55	0.43	0.01	4.99	55.2	43.8	1.1
X18-3-8	54.3	29.3	11.9	4.64	0.09	100.3	2.45	1.55	0.58	0.40	0.01	4.99	58.4	41.1	0.5
X18-3-9	56.8	26.7	10.1	5.50	0.51	99.6	2.57	1.42	0.49	0.44	0.03	4.95	50.4	46.2	3.4
X18-3-10	55.3	28.0	10.7	5.16	0.23	99.4	2.50	1.49	0.52	0.45	0.01	4.97	52.8	45.9	1.3
X18-3-11	54.6	28.3	11.3	5.05	0.13	99.4	2.48	1.51	0.55	0.44	0.01	4.99	54.9	44.3	0.8
X18-3-12	54.4	29.1	11.9	4.59	0.24	100.3	2.45	1.54	0.57	0.40	0.01	4.97	58.1	40.5	1.4
X18-3-13	53.9	29.3	12.1	4.39	0.24	100.0	2.44	1.56	0.59	0.38	0.01	4.98	59.6	38.9	1.4
X18-3-14	53.8	29.1	12.1	4.44	0.20	99.7	2.44	1.56	0.59	0.39	0.01	4.99	59.3	39.5	1.2
X18-3-15	54.3	28.6	11.3	4.83	0.24	99.3	2.47	1.53	0.55	0.42	0.01	4.98	55.5	43.1	1.4
X18-3-16	53.8	29.2	12.0	4.49	0.25	99.8	2.44	1.56	0.59	0.39	0.01	4.99	58.9	39.7	1.5
X18-3-17	53.7	29.1	12.1	4.50	0.17	99.6	2.44	1.56	0.59	0.40	0.01	5.00	59.2	39.8	1.0
X18-3-18	55.8	27.8	10.4	5.36	0.12	99.4	2.52	1.48	0.50	0.47	0.01	4.98	51.4	47.9	0.7
X18-3-19	53.8	29.0	12.0	4.60	0.10	99.5	2.44	1.55	0.59	0.40	0.01	4.99	58.8	40.6	0.6
X18-3-20	55.1	28.6	11.4	4.96	0.15	100.3	2.48	1.51	0.55	0.43	0.01	4.98	55.4	43.7	0.9
X18-3-21	54.0	28.8	11.7	4.75	0.09	99.4	2.45	1.54	0.57	0.42	0.01	4.99	57.4	42.1	0.5
X18-3-22	53.4	29.4	12.3	4.37	0.14	99.7	2.43	1.57	0.60	0.38	0.01	4.99	60.3	38.9	0.8
X18-3-23	54.1	28.8	11.5	4.99	0.06	99.5	2.46	1.54	0.56	0.44	0.00	5.00	55.8	43.9	0.3
X18-3-24	52.9	29.8	12.7	4.27	0.12	99.8	2.40	1.59	0.62	0.38	0.01	5.00	61.7	37.6	0.7
N30-5-17	50.6	30.9	14.3	3.20	0.10	99.1	2.32	1.67	0.70	0.29	0.00	4.98	70.9	28.7	0.4

注:E13-15-1 到 E13-15-10 为二红洼嵌晶角闪石外的斜长石,E13-15-11 到 E13-15-22 为二红洼嵌晶角闪石内的斜长石;N30-5-1 到 N30-5-18 为牛毛泉嵌晶角闪石外的斜长石,N30-5-19 到 N30-5-29 为牛毛泉嵌晶角闪石内的斜长石;X18-3-1 到 X18-3-11 为香山西嵌晶角闪石外的斜长石,X18-3-12 到 X18-3-24 为香山西嵌晶角闪石内的斜长石。

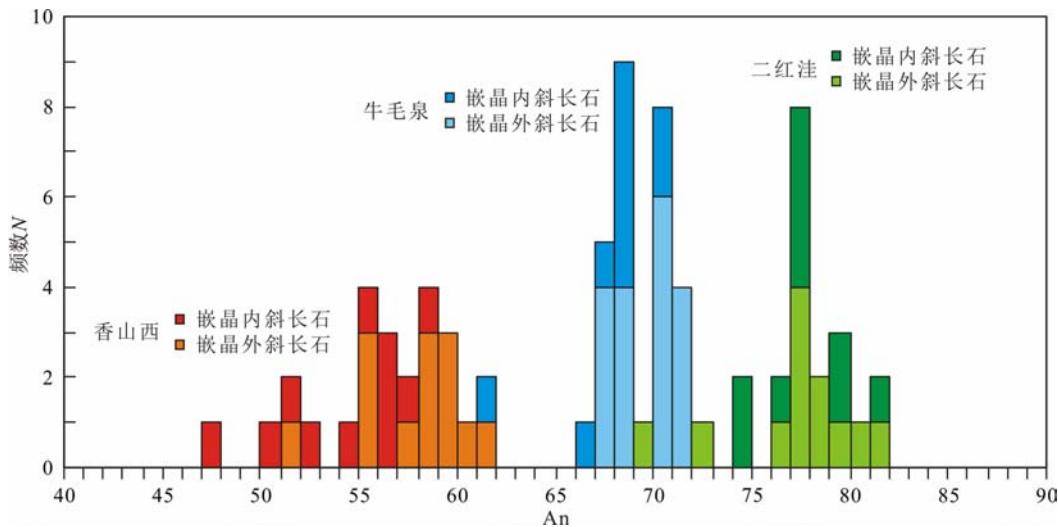


图 5 东天山似斑状角闪辉长岩类斜长石 An 直方图

Fig. 5 Histogram of An of plagioclase of amphibole-porphyritic gabbroic rocks from the East Tianshan

二红洼、牛毛泉和香山西斜方辉石和单斜辉石电子探针成分见表2。香山西似斑状角闪辉长岩中的辉石主体为普通辉石,少量为斜方辉石(如图6a),普通辉石成分为 $\text{Wo}_{27\sim28}\text{En}_{54\sim56}\text{Fs}_{16\sim18}$, $\text{Mg}^{\#}$ 变化范围为75.1~78.4;斜方辉石为紫苏辉石,成分为 $\text{Wo}_2\text{En}_{64}\text{Fs}_{34}$ 。牛毛泉似斑状角闪辉长苏长岩的辉石存在斜方辉石和单斜辉石,斜方辉石全部为紫苏辉石(如图6a),斜方辉石成分为 $\text{Wo}_{2\sim5}\text{En}_{65\sim67}\text{Fs}_{29\sim32}$;单斜辉石成分为 $\text{Wo}_{42\sim45}\text{En}_{40\sim41}\text{Fs}_{13\sim16}$,主

体属于透辉石,部分为普通辉石(如图6a), $\text{Mg}^{\#}$ 变化范围介于73.3~76。二红洼似斑状角闪辉长苏长岩的辉石存在斜方辉石和单斜辉石(如图6a),斜方辉石成分为 $\text{Wo}_{2\sim4}\text{En}_{70\sim74}\text{Fs}_{23\sim28}$,主体为古铜辉石,少量为紫苏辉石,相应的 $\text{Mg}^{\#}=72.0\sim76.3$;单斜辉石成分为 $\text{Wo}_{40\sim46}\text{En}_{43\sim46}\text{Fs}_{8\sim13}$,主体属于透辉石,部分为普通辉石, $\text{Mg}^{\#}$ 变化范围介于73.3~76.0。同一个似斑状角闪辉长岩类样品中,嵌晶角闪石内外辉石成分并没有显著的差异。

表2 二红洼、牛毛泉和香山西似斑状角闪辉长岩类辉石主要氧化物成分

Table 2 Major oxides of pyroxene of amphibole-porphyric gabbroic rocks from Erhongwa, Niumaoquan and Xiangshanxi

测试点	类型	$w_{\text{B}}/\%$										阳离子数			
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Total	Si	IV Al	VI Al
E13-15-1	Cpx	51.6	0.71	4.48	0.99	5.08	0.18	15.80	21.10	0.49	0.00	100.4	1.88	0.12	0.08
E13-15-2	Opx	54.0	0.44	2.29	0.04	15.00	0.35	27.10	1.20	0.01	0.00	100.4	1.94	0.06	0.03
E13-15-3	Cpx	51.0	0.98	4.14	0.90	4.74	0.20	14.90	22.10	0.55	0.01	99.5	1.88	0.12	0.06
E13-15-4	Opx	54.3	0.34	1.82	0.02	16.00	0.32	25.90	1.66	0.03	0.00	100.4	1.96	0.04	0.03
E13-15-5	Opx	54.1	0.40	2.17	0.01	14.90	0.32	26.60	1.90	0.06	0.00	100.5	1.94	0.06	0.03
E13-15-6	Cpx	51.6	0.59	4.30	1.01	4.91	0.11	15.80	20.70	0.49	0.00	99.5	1.90	0.10	0.08
E13-15-7	Cpx	51.4	0.90	3.65	0.69	5.94	0.19	15.90	20.80	0.39	0.00	99.9	1.89	0.11	0.05
E13-15-8	Cpx	52.4	0.55	2.56	0.14	7.66	0.23	15.10	21.10	0.40	0.01	100.2	1.94	0.06	0.05
E13-15-9	Cpx	52.5	0.65	2.73	0.05	7.91	0.22	16.30	19.50	0.29	0.00	100.2	1.93	0.07	0.05
E13-15-10	Opx	53.9	0.52	2.02	0.01	15.00	0.34	26.60	1.77	0.02	0.01	100.2	1.94	0.06	0.03
E13-15-11	Cpx	51.6	0.59	3.78	0.76	5.98	0.16	15.80	20.50	0.36	0.00	99.5	1.90	0.10	0.07
E13-15-12	Opx	53.7	0.50	2.42	0.00	15.20	0.34	26.80	1.17	0.02	0.02	100.2	1.93	0.07	0.04
E13-15-13	Cpx	51.5	1.05	3.54	0.57	5.74	0.15	15.70	21.30	0.47	0.00	100.0	1.89	0.11	0.05
E13-15-14	Cpx	52.4	0.68	2.84	0.09	6.62	0.20	15.30	21.50	0.35	0.01	100.0	1.93	0.07	0.05
E13-15-15	Opx	53.8	0.30	1.89	0.04	17.40	0.39	25.20	1.21	0.00	0.00	100.2	1.95	0.05	0.04
E13-15-16	Opx	54.3	0.26	1.70	0.04	16.10	0.36	25.80	1.65	0.04	0.00	100.3	1.96	0.04	0.03

测试点	阳离子数										Wo	En	Fs	Ac	$\text{Mg}^{\#}$
	Ti	Cr	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total					
E13-15-1	0.02	0.03	0.01	0.14	0.01	0.86	0.83	0.03	0.00	4.01	44.0	45.7	8.5	1.9	81.3
E13-15-2	0.01	0.00	0.01	0.44	0.01	1.45	0.05	0.00	0.00	4.00	2.4	74.0	23.6	0.1	71.7
E13-15-3	0.03	0.03	0.02	0.13	0.01	0.82	0.88	0.04	0.00	4.02	46.4	43.4	8.1	2.1	81.5
E13-15-4	0.01	0.00	0.00	0.48	0.01	1.39	0.06	0.00	0.00	3.98	3.3	71.3	25.3	0.1	69.4
E13-15-5	0.01	0.00	0.01	0.44	0.01	1.42	0.07	0.00	0.00	3.99	3.7	72.7	23.4	0.2	71.4
E13-15-6	0.02	0.03	0.00	0.15	0.00	0.87	0.82	0.03	0.00	4.00	43.6	46.3	8.3	1.9	81.8
E13-15-7	0.02	0.02	0.02	0.16	0.01	0.87	0.82	0.03	0.00	4.00	43.0	45.7	9.9	1.5	78.9
E13-15-8	0.02	0.00	0.02	0.22	0.01	0.83	0.84	0.03	0.00	4.02	43.1	42.8	12.6	1.5	73.4
E13-15-9	0.02	0.00	0.00	0.24	0.01	0.89	0.77	0.02	0.00	4.00	39.8	46.2	13.0	1.1	74.3
E13-15-10	0.01	0.00	0.01	0.44	0.01	1.43	0.07	0.00	0.00	4.00	3.5	72.9	23.6	0.1	71.3
E13-15-11	0.02	0.02	0.00	0.18	0.00	0.87	0.81	0.03	0.00	4.00	42.9	45.8	10.0	1.4	78.7
E13-15-12	0.01	0.00	0.01	0.45	0.01	1.44	0.05	0.00	0.00	4.01	2.3	73.6	24.0	0.1	71.2
E13-15-13	0.03	0.02	0.02	0.15	0.00	0.86	0.84	0.03	0.00	4.00	43.9	44.9	9.4	1.7	79.3
E13-15-14	0.02	0.00	0.00	0.20	0.01	0.84	0.85	0.02	0.00	3.99	44.1	43.7	10.9	1.3	76.4
E13-15-15	0.01	0.00	0.00	0.53	0.01	1.36	0.05	0.00	0.00	4.00	2.4	69.9	27.7	0.0	67.0
E13-15-16	0.01	0.00	0.00	0.49	0.01	1.39	0.06	0.00	0.00	3.99	3.3	71.2	25.4	0.1	69.2

(续表 2)

测试点	类型	$w_B/\%$										阳离子数			
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	V Al	VI Al
N30-5-1	Opx	52.6	0.45	1.22	0.01	19.10	0.78	24.10	1.33	0.01	0.00	99.6	1.95	0.05	0.00
N30-5-2	Cpx	50.8	0.67	2.44	0.01	8.10	0.41	14.10	22.00	0.27	0.01	98.8	1.92	0.08	0.03
N30-5-3	Opx	52.3	0.34	1.23	0.00	19.30	0.84	23.80	1.24	0.00	0.00	99.1	1.95	0.05	0.00
N30-5-4	Opx	52.7	0.33	1.21	0.01	19.20	0.87	23.60	1.34	0.03	0.00	99.3	1.96	0.04	0.01
N30-5-5	Cpx	50.6	0.58	2.32	0.01	8.63	0.48	14.00	21.60	0.29	0.00	98.5	1.92	0.08	0.03
N30-5-6	Opx	52.8	0.23	0.91	0.00	19.80	0.90	23.90	1.14	0.00	0.00	99.7	1.96	0.01	0.00
N30-5-7	Opx	52.4	0.29	1.10	0.03	19.40	0.84	23.60	1.36	0.01	0.01	99.0	1.96	0.04	0.00
N30-5-8	Cpx	51.4	0.58	2.26	0.02	8.02	0.37	14.20	21.80	0.28	0.01	98.9	1.93	0.07	0.03
N30-5-9	Opx	52.5	0.31	1.19	0.00	19.60	0.87	23.70	1.07	0.02	0.00	99.3	1.95	0.05	0.01
N30-5-10	Opx	52.9	0.34	1.42	0.01	19.10	0.82	23.30	1.63	0.06	0.01	99.6	1.96	0.04	0.02
N30-5-11	Opx	52.6	0.23	0.98	0.02	19.30	0.90	24.20	0.83	0.00	0.02	99.1	1.96	0.04	0.00
N30-5-12	Opx	52.8	0.31	1.28	0.02	19.30	0.73	23.90	1.13	0.00	0.00	99.5	1.96	0.04	0.01
N30-5-13	Opx	52.4	0.43	1.61	0.00	17.80	0.76	23.50	2.35	0.16	0.03	99.0	1.95	0.05	0.02
N30-5-14	Opx	53.4	0.28	1.11	0.02	19.50	0.82	23.90	1.02	0.00	0.01	100.1	1.97	0.03	0.01
N30-5-15	Opx	53.2	0.28	1.08	0.01	19.20	0.80	23.70	1.24	0.00	0.00	99.5	1.97	0.03	0.01
N30-5-16	Opx	53.3	0.30	1.08	0.02	19.70	0.83	23.80	0.95	0.00	0.01	100.0	1.97	0.03	0.01

测试点	阳离子数										Wo	En	Fs	Ac	Mg [#]
	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total					
N30-5-1	0.01	0.00	0.04	0.55	0.02	1.33	0.05	0.00	0.00	4.00	2.6	66.6	30.7	0.0	63.9
N30-5-2	0.02	0.00	0.06	0.20	0.01	0.80	0.89	0.02	0.00	4.03	45.1	40.4	13.6	1.0	70.9
N30-5-3	0.01	0.00	0.04	0.56	0.03	1.32	0.05	0.00	0.00	4.01	2.5	66.2	31.4	0.0	63.3
N30-5-4	0.01	0.00	0.02	0.57	0.03	1.31	0.05	0.00	0.00	4.00	2.7	65.9	31.3	0.1	63.2
N30-5-5	0.02	0.00	0.06	0.21	0.02	0.79	0.88	0.02	0.00	4.03	44.4	40.0	14.6	1.1	69.4
N30-5-6	0.01	0.00	0.04	0.57	0.03	1.32	0.05	0.00	0.00	3.99	2.3	65.8	32.0	0.0	62.8
N30-5-7	0.01	0.00	0.04	0.57	0.03	1.31	0.05	0.00	0.00	4.01	2.7	65.7	31.5	0.1	63.0
N30-5-8	0.02	0.00	0.03	0.22	0.01	0.80	0.88	0.02	0.00	4.01	44.9	40.6	13.4	1.0	71.3
N30-5-9	0.01	0.00	0.04	0.57	0.03	1.32	0.04	0.00	0.00	4.02	2.1	66.0	31.8	0.1	62.9
N30-5-10	0.01	0.00	0.01	0.58	0.03	1.29	0.06	0.00	0.00	4.00	3.3	65.3	31.2	0.2	63.1
N30-5-11	0.01	0.00	0.04	0.55	0.03	1.34	0.03	0.00	0.00	4.00	1.7	67.1	31.2	0.0	63.7
N30-5-12	0.01	0.00	0.02	0.58	0.02	1.32	0.05	0.00	0.00	4.01	2.3	66.5	31.3	0.0	63.4
N30-5-13	0.01	0.00	0.04	0.51	0.02	1.30	0.09	0.01	0.00	4.00	4.7	65.7	29.0	0.6	64.9
N30-5-14	0.01	0.00	0.01	0.59	0.03	1.31	0.04	0.00	0.00	4.00	2.0	66.4	31.6	0.0	63.2
N30-5-15	0.01	0.00	0.00	0.59	0.03	1.31	0.05	0.00	0.00	4.00	2.5	66.2	31.3	0.0	63.3
N30-5-16	0.01	0.00	0.01	0.60	0.03	1.31	0.04	0.00	0.00	4.01	1.9	66.2	31.9	0.0	62.8

测试点	类型	$w_B/\%$										阳离子数			
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	V Al	VI Al
N30-5-17	Opx	53.3	0.29	1.17	0.00	19.20	0.84	23.80	1.05	0.00	0.00	99.7	1.97	0.03	0.02
N30-5-18	Opx	53.2	0.35	1.18	0.00	19.40	0.77	23.90	1.10	0.01	0.00	99.9	1.96	0.04	0.01
N30-5-19	Cpx	51.7	0.49	2.14	0.03	8.27	0.43	14.30	21.90	0.27	0.02	99.6	1.94	0.06	0.03
N30-5-20	Opx	52.9	0.32	1.14	0.00	19.10	0.80	23.90	1.29	0.00	0.00	99.5	1.96	0.04	0.01
N30-5-21	Opx	52.7	0.36	1.17	0.03	20.00	0.86	23.40	1.20	0.01	0.00	99.7	1.95	0.05	0.01
N30-5-22	Cpx	50.7	0.66	2.44	0.00	8.30	0.37	14.00	21.60	0.31	0.00	98.4	1.92	0.08	0.03
N30-5-23	Opx	52.2	0.37	1.40	0.00	19.30	0.83	23.30	1.50	0.07	0.03	99.0	1.95	0.05	0.01

(续表 2)

测试点	类型	$w_B/\%$										阳离子数			
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	IV Al	VI Al
N30-5-24	Cpx	51.6	0.55	2.09	0.00	9.47	0.45	14.60	20.50	0.24	0.00	99.5	1.94	0.06	0.03
N30-5-25	Opx	52.6	0.35	1.19	0.00	19.60	0.89	23.50	1.22	0.02	0.00	99.4	1.96	0.04	0.01
N30-5-26	Cpx	51.5	0.54	2.13	0.05	8.38	0.41	14.30	21.60	0.32	0.02	99.3	1.93	0.07	0.03
X18-3-1	Cpx	54.2	0.82	1.89	0.05	11.60	0.25	15.30	13.20	0.16	0.08	97.6	2.03	0.00	0.08
X18-3-2	Cpx	54.2	0.17	1.36	0.00	11.60	0.17	16.80	12.70	0.18	0.04	97.2	2.04	0.00	0.06
X18-3-3	Cpx	50.9	0.93	2.91	0.32	11.50	0.52	13.90	19.00	0.40	0.00	100.4	1.91	0.09	0.03
X18-3-4	Opx	53.2	0.20	0.96	0.01	21.30	0.53	23.00	1.01	0.00	0.01	100.2	1.97	0.03	0.01

测试点	阳离子数									Wo	En	Fs	Ac	Mg [#]	
	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K						
N30-5-17	0.01	0.00	0.00	0.59	0.03	1.31	0.04	0.00	0.00	4.00	2.1	66.5	31.4	0.0	63.4
N30-5-18	0.01	0.00	0.01	0.59	0.02	1.31	0.04	0.00	0.00	3.99	2.2	66.4	31.4	0.0	63.3
N30-5-19	0.01	0.00	0.04	0.22	0.01	0.80	0.88	0.02	0.00	4.01	44.6	40.7	13.8	1.0	70.8
N30-5-20	0.01	0.00	0.02	0.57	0.03	1.32	0.05	0.00	0.00	4.01	2.6	66.5	31.0	0.0	63.7
N30-5-21	0.01	0.00	0.03	0.59	0.03	1.30	0.05	0.00	0.00	4.02	2.4	65.1	32.5	0.0	62.1
N30-5-22	0.02	0.00	0.05	0.21	0.01	0.79	0.88	0.02	0.00	4.01	44.7	40.3	13.9	1.2	70.3
N30-5-23	0.01	0.00	0.04	0.57	0.03	1.29	0.06	0.00	0.00	4.01	3.0	65.1	31.6	0.2	62.8
N30-5-24	0.02	0.00	0.03	0.26	0.01	0.81	0.83	0.02	0.00	4.01	42.0	41.4	15.8	0.9	68.3
N30-5-25	0.01	0.00	0.03	0.58	0.03	1.30	0.05	0.00	0.00	4.01	2.5	65.4	32.1	0.1	62.7
N30-5-26	0.02	0.00	0.04	0.22	0.01	0.80	0.87	0.02	0.00	4.01	44.1	40.7	14.0	1.2	70.5
X18-3-1	0.02	0.00	0.00	0.37	0.01	0.85	0.53	0.01	0.00	3.90	29.9	48.0	21.4	0.7	64.9
X18-3-2	0.00	0.00	0.00	0.37	0.01	0.94	0.51	0.01	0.00	3.94	27.8	51.1	20.4	0.7	67.0
X18-3-3	0.03	0.01	0.04	0.32	0.02	0.78	0.76	0.03	0.00	4.02	39.3	40.0	19.3	1.5	62.9
X18-3-4	0.01	0.00	0.01	0.65	0.02	1.27	0.04	0.00	0.00	4.01	2.0	64.0	34.0	0.0	60.2

注:Mg[#]=Mg/(Mg+Fe)×100;E13-15-1到E13-15-9为二红洼嵌晶角闪石外的辉石,E13-15-10到E13-15-16为二红洼嵌晶角闪石内的辉石;N30-5-1到N30-5-13为牛毛泉嵌晶角闪石外的辉石,N30-5-14到N30-5-26为牛毛泉嵌晶角闪石内的辉石;X18-3-1到X18-3-2为香山西嵌晶角闪石外的辉石,X18-3-3到X18-3-4为香山西嵌晶角闪石内的辉石。

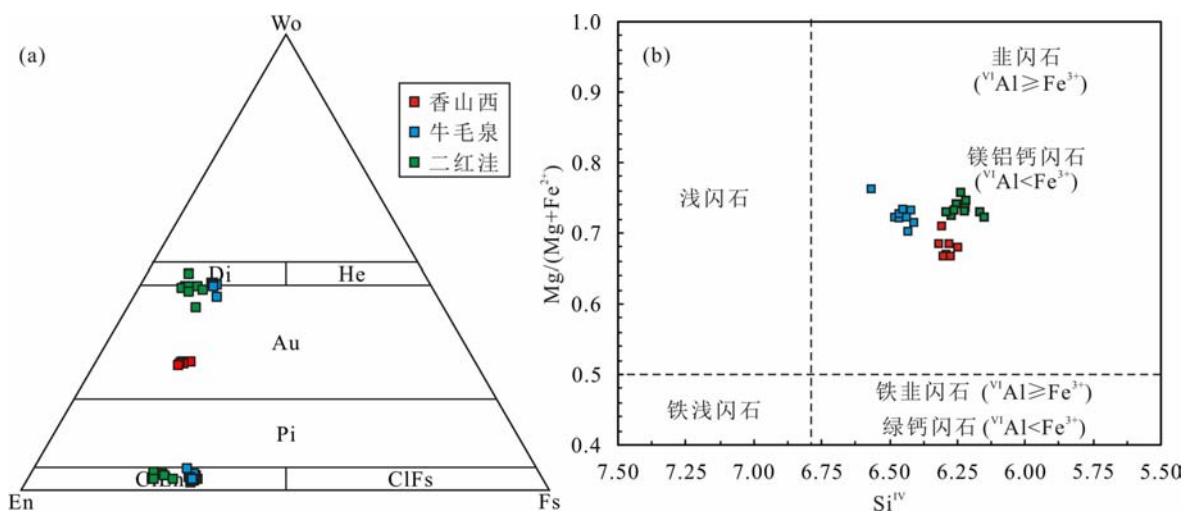


图 6 东天山似斑状角闪长岩(a)和角闪石(b)分类与命名图解

(图 a 据文献[43]修编;图 b 据文献[44]修编)

Fig. 6 Classification diagrams of the pyroxene (a) and amphibole (b) of amphibole-porphyric gabbroic rocks from the East Tianshan

二红洼、牛毛泉和香山西似斑状角闪辉长岩类嵌晶角闪石电子探针成分见表3。根据角闪石化学分子式,二红洼、牛毛泉和香山西的嵌晶角闪石均具有 C_{Ab} 大于1.5和 $(\text{Na}+\text{K})_{\text{A}}$ 大于0.5的特征,属于钙角闪石,其中二红洼嵌晶角闪石 $C_{\text{Ab}}=1.75\sim1.81$, $(\text{Na}+\text{K})_{\text{A}}=0.56\sim0.65$;牛毛泉嵌晶角闪石 $C_{\text{Ab}}=1.72\sim1.81$, $(\text{Na}+\text{K})_{\text{A}}=0.51\sim0.59$;香山西嵌晶角闪石 $C_{\text{Ab}}=1.74\sim1.77$, $(\text{Na}+\text{K})_{\text{A}}=0.51\sim0.67$ 。按钙角闪石的进一步分类命名原则,二红洼、牛毛泉和香山西的嵌晶角闪石具有Ti小于0.5,以及 Al^{VI} 小于 Fe^{3+} 的特征(如图6b),在 $\text{Si}^{VI}\text{-Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 图解上落在了镁铝钙闪石范围内^[43]。香山西嵌晶角闪石 $Mg^{\#}$ 最低,变化范围为60.9~62.8;二

红洼嵌晶角闪石 $Mg^{\#}$ 最高,变化范围为65.9~68.0,峰值出现在66.0~67.0。牛毛泉嵌晶角闪石 $Mg^{\#}$ 介于63.6~68.3,峰值介于66.0~67.0。

5 讨论

5.1 似斑状角闪辉长岩造岩矿物系统

东天山似斑状角闪辉长岩类的岩石演化程度具有显著差异,其中二红洼、牛毛泉和香山西似斑状角闪辉长岩类的斜长石An值同单斜辉石、斜方辉石以及嵌晶角闪石 $Mg^{\#}$ 有着系统的正相关关系(如图7),表明母岩浆的演化程度依次升高。二红洼角闪辉长苏长岩的演化程度系统最低,其斜长石主要为培长石,

表3 二红洼、牛毛泉和香山西似斑状角闪辉长岩类嵌晶角闪石主要氧化物组成

Table 3 Major oxides of poikilitic hornblende of amphibole-porphyric gabbroic rocks from Erhongwa, Niumaoquan and Xiangshanxi

测试点号	$w_{\text{B}}/\%$										不同配位阳离子数		
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Total	$\text{Si}_{\text{T}*}$	Alt	Alc
E13-15-1	42.7	3.28	11.7	11.9	0.14	13.2	11.3	1.70	0.57	96.5	6.35	1.65	0.39
E13-15-2	41.9	4.13	12.2	11.6	0.16	12.8	11.4	1.99	0.54	96.7	6.22	1.78	0.35
E13-15-3	41.0	4.28	12.2	11.6	0.15	12.6	11.2	1.95	0.51	95.5	6.17	1.83	0.34
E13-15-4	42.2	4.23	12.2	11.1	0.10	13.3	11.2	1.97	0.51	96.8	6.23	1.77	0.35
E13-15-5	42.1	4.51	12.1	11.4	0.14	13.1	11.1	2.06	0.53	97.0	6.22	1.78	0.33
E13-15-6	41.1	4.14	12.3	11.7	0.17	13.0	11.2	2.06	0.49	96.2	6.15	1.85	0.31
E13-15-7	42.1	3.99	11.9	11.4	0.11	13.1	11.3	2.07	0.56	96.5	6.25	1.75	0.34
E13-15-8	41.8	4.21	12.0	11.7	0.14	12.9	11.2	2.00	0.51	96.5	6.22	1.78	0.33
E13-15-9	42.1	3.51	12.3	11.7	0.13	12.9	11.3	1.89	0.60	96.4	6.26	1.74	0.41
E13-15-10	42.1	3.44	11.9	11.9	0.17	13.2	11.3	1.95	0.52	96.5	6.27	1.73	0.36
E13-15-11	42.0	3.40	11.8	11.8	0.16	13.1	11.2	1.92	0.52	95.9	6.29	1.71	0.36
N30-5-1	42.8	3.06	10.2	12.6	0.27	12.9	11.1	1.60	0.29	94.8	6.48	1.52	0.30
N30-5-2	43.0	2.86	10.7	12.3	0.30	13.5	11.2	1.75	0.31	95.9	6.42	1.58	0.32
N30-5-3	43.2	3.21	10.6	12.3	0.28	13.2	11.2	1.77	0.33	96.1	6.45	1.55	0.31
N30-5-4	43.4	3.24	10.7	12.6	0.27	13.2	11.2	1.84	0.32	96.8	6.44	1.56	0.30
N30-5-5	43.3	3.27	10.7	13.2	0.26	13.0	11.1	1.94	0.27	97.0	6.43	1.57	0.30
N30-5-6	43.4	3.36	10.8	12.8	0.28	13.3	11.2	1.99	0.28	97.4	6.41	1.59	0.28
N30-5-7	43.6	3.13	10.4	12.8	0.27	13.4	11.1	1.80	0.30	96.8	6.46	1.54	0.29
N30-5-8	43.2	2.91	10.8	12.1	0.30	13.7	11.3	1.79	0.34	96.4	6.42	1.58	0.31
N30-5-9	44.1	2.41	10.1	11.7	0.28	14.2	10.9	1.58	0.28	95.6	6.56	1.44	0.35
N30-5-10	43.4	2.96	10.5	12.5	0.32	13.5	11.1	1.78	0.29	96.4	6.46	1.54	0.30
X18-3-1	42.3	4.44	11.5	12.7	0.21	12.1	11.0	1.87	0.57	96.7	6.31	1.69	0.32
X18-3-2	41.9	4.44	11.5	13.0	0.16	12.1	10.9	2.42	0.56	97.0	6.25	1.75	0.26
X18-3-3	42.3	4.04	11.3	13.4	0.16	12.2	11.0	2.40	0.56	97.4	6.29	1.71	0.27
X18-3-4	42.3	4.02	11.4	13.7	0.21	12.3	11.0	2.26	0.65	97.8	6.27	1.73	0.27
X18-3-5	42.1	4.41	11.5	13.1	0.17	12.0	10.9	2.20	0.58	97.0	6.28	1.72	0.30
X18-3-6	42.1	4.05	11.3	13.7	0.18	11.9	11.0	2.11	0.64	97.0	6.30	1.70	0.28
X18-3-7	42.4	4.21	11.2	13.4	0.18	12.1	11.1	1.98	0.69	97.3	6.32	1.68	0.28

(续表 3)

测试点号	不同配位阳离子数												
	Fe _C ³⁺	Tic	Mg _C	Fe _C ²⁺	Mn _C	Fe _B ²⁺	Mn _B	Ca _B	Na _B	Ca _A	Na _A	K _A	Total
E13-15-1	0.44	0.37	2.91	0.89	0.00	0.15	0.02	1.80	0.03	0.00	0.45	0.11	15.56
E13-15-2	0.41	0.46	2.84	0.94	0.00	0.09	0.02	1.81	0.08	0.00	0.49	0.10	15.59
E13-15-3	0.40	0.48	2.82	0.95	0.00	0.10	0.02	1.81	0.07	0.00	0.50	0.10	15.59
E13-15-4	0.43	0.47	2.93	0.82	0.00	0.13	0.01	1.77	0.09	0.00	0.47	0.10	15.57
E13-15-5	0.43	0.50	2.87	0.86	0.00	0.11	0.02	1.75	0.12	0.00	0.47	0.10	15.56
E13-15-6	0.35	0.47	2.90	0.97	0.00	0.14	0.02	1.79	0.04	0.00	0.55	0.09	15.63
E13-15-7	0.39	0.45	2.90	0.93	0.00	0.10	0.01	1.79	0.09	0.00	0.51	0.11	15.62
E13-15-8	0.41	0.47	2.86	0.93	0.00	0.12	0.02	1.78	0.08	0.00	0.50	0.10	15.60
E13-15-9	0.40	0.39	2.86	0.93	0.00	0.12	0.02	1.81	0.06	0.00	0.48	0.11	15.59
E13-15-10	0.37	0.38	2.93	0.96	0.00	0.15	0.02	1.80	0.03	0.00	0.53	0.10	15.63
E13-15-11	0.38	0.38	2.93	0.94	0.00	0.15	0.02	1.79	0.04	0.00	0.52	0.10	15.61
N30-5-1	0.47	0.35	2.91	0.97	0.00	0.16	0.03	1.81	0.00	0.00	0.47	0.06	15.53
N30-5-2	0.41	0.32	3.01	0.94	0.00	0.19	0.04	1.77	0.00	0.02	0.51	0.06	15.59
N30-5-3	0.45	0.36	2.94	0.94	0.00	0.15	0.04	1.79	0.03	0.00	0.49	0.06	15.56
N30-5-4	0.43	0.36	2.92	0.98	0.00	0.15	0.03	1.79	0.03	0.00	0.50	0.06	15.55
N30-5-5	0.42	0.37	2.87	1.05	0.00	0.17	0.03	1.76	0.03	0.00	0.53	0.05	15.58
N30-5-6	0.41	0.37	2.92	1.01	0.00	0.16	0.04	1.78	0.03	0.00	0.54	0.05	15.59
N30-5-7	0.44	0.35	2.97	0.96	0.00	0.19	0.03	1.76	0.01	0.00	0.51	0.06	15.57
N30-5-8	0.40	0.33	3.04	0.93	0.00	0.18	0.04	1.78	0.00	0.02	0.52	0.06	15.61
N30-5-9	0.47	0.27	3.16	0.75	0.00	0.24	0.04	1.72	0.00	0.02	0.46	0.05	15.53
N30-5-10	0.43	0.33	3.00	0.94	0.00	0.19	0.04	1.77	0.00	0.00	0.51	0.06	15.57
X18-3-1	0.49	0.50	2.68	1.02	0.00	0.08	0.03	1.75	0.14	0.00	0.41	0.11	15.53
X18-3-2	0.35	0.50	2.69	1.19	0.00	0.08	0.02	1.74	0.16	0.00	0.54	0.11	15.64
X18-3-3	0.33	0.45	2.71	1.24	0.00	0.10	0.02	1.75	0.13	0.00	0.56	0.11	15.67
X18-3-4	0.33	0.45	2.71	1.24	0.00	0.12	0.03	1.75	0.10	0.00	0.54	0.12	15.66
X18-3-5	0.41	0.50	2.66	1.14	0.00	0.08	0.02	1.74	0.16	0.00	0.48	0.11	15.60
X18-3-6	0.38	0.46	2.65	1.23	0.00	0.10	0.02	1.76	0.11	0.00	0.50	0.12	15.61
X18-3-7	0.42	0.47	2.68	1.15	0.00	0.09	0.02	1.77	0.12	0.00	0.45	0.13	15.58

注:E13-15-1 到 E13-15-11 依次为二红洼嵌晶角闪石边部-核部-边部成分;N30-5-1 到 N30-5-10 依次为牛毛泉嵌晶角闪石边部-核部-边部成分;X18-3-1 到 X18-3-7 依次为香山西嵌晶角闪石边部-核部成分。

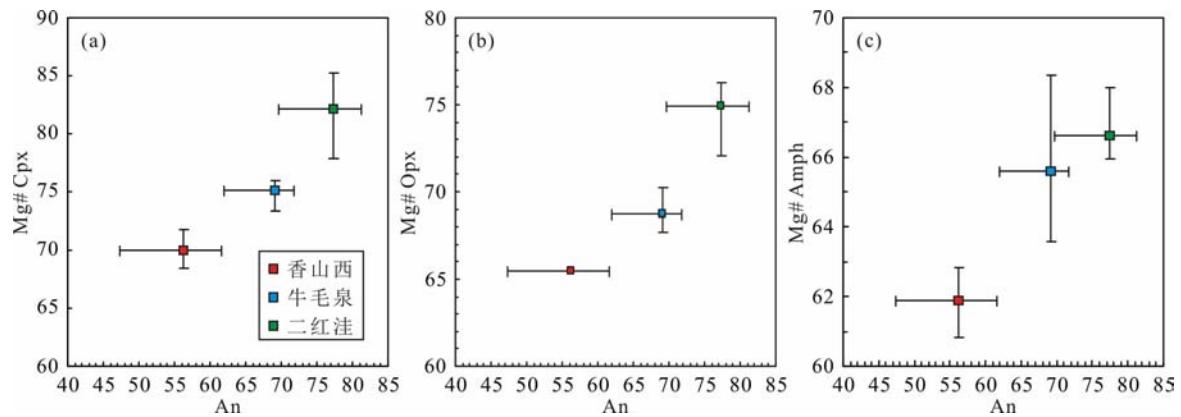


图 7 东天山三个角闪辉长岩类 $\text{Mg}^{\#}$ Cpx - An(a), $\text{Mg}^{\#}$ Opx - An(b) 和 $\text{Mg}^{\#}$ Amph - An(c) 二元图解
Fig. 7 Binary diagrams of $\text{Mg}^{\#}$ Cpx vs. An(a), $\text{Mg}^{\#}$ Opx vs. An(b), and $\text{Mg}^{\#}$ Amph vs. An(c) of amphibole-porphyric gabbroic rocks from the East Tianshan

斜方辉石主要为古铜辉石,同时单斜辉石和嵌晶角闪石具有最高的 Mg[#](图 7a)。香山西角闪辉长岩的演化程度系统最高,其斜长石主要为拉长石,斜方辉石为紫苏辉石,同时单斜辉石和嵌晶角闪石 Mg[#]系统最低(图 7b)。牛毛泉角闪辉长苏长岩的斜长石、斜方辉石、单斜辉石和嵌晶角闪石成分则介于前两者之间(图 7c)。三个岩体的嵌晶角闪石全部为镁铝钙闪石,同其他地区报道的玄武岩以及辉长岩中嵌晶角闪石成分一致^[45-46]。

5.2 角闪石结晶的物理化学条件

香山西、二红洼和牛毛泉的嵌晶状角闪石在光学显微镜下显示均一干涉色,表明该类嵌晶角闪石是岩浆结晶的产物,而不是后期热液蚀变的产物^[45]。香山西、二红洼和牛毛泉角闪辉长岩类嵌晶角闪石总体成分一致,其 Al₂O₃ 含量介于 10.2%~12.3%, Si/(Si+Ti+Al)=0.70~0.75, 结合钙质角闪石的 Al₂O₃-TiO₂ 分类图解(图 8a)可知,3 个岩体嵌晶角闪石具有幔源岩浆角闪石的特征(如图 8a 所示);其 Al/Si 比值为 0.28~0.35, Mg/(Fe³⁺+Fe²⁺+^VAl) 比值为 1.17~2.72, 具有中-基性岩浆角闪石的特征(Al/Si=0.10~0.67, Mg/(Fe³⁺+Fe²⁺+^VAl)=1.33~1.69), 在 Al/Si-Mg/(Fe³⁺+Fe²⁺+^VAl) 图解上, 投影在中-基性岩浆角闪石区域,而非区域变质作用产物(如图 8b 所示)。

前人研究表明,角闪石结晶时的温度压力等物理化学条件同角闪石成分有着密切关系,如随着压力的升高,钙质角闪石的 Si 含量降低,Al^T、^VAl 和 Na₂O 含量则升高;^VAl 与 Ti 呈正相关关系,与温度、压力及氧逸度有关,角闪石中^VAl 和 Ti 含量随温度的升高而增加,而^VAl 含量随温度的变

化不明显^[32-34]。

基于基性-超基性岩中的岩浆成因角闪石的 Si^{*} 同角闪石结晶温度之间的密切关系,前人提出了角闪石 Si^{*} 温度计^[33-34]。香山西、牛毛泉和二红洼嵌晶角闪石结晶于幔源基性岩浆(如图 8a,b),应用角闪石 Si^{*} 温度计对 3 个岩体角闪石结晶温度进行计算,计算得出香山西角闪辉长岩角闪石结晶温度介于 935~950 °C, 平均值为 941 °C; 二红洼角闪苏长辉长岩角闪石结晶温度介于 940~977 °C, 平均值为 960 °C; 牛毛泉角闪苏长辉长岩角闪石结晶温度介于 894~924 °C, 平均值为 914 °C。

鉴于角闪石 Al^T 与其压力之间的密切的关系,前人给出了岩浆角闪石 Al^T 和结晶压力的经验公式^[33-34]。二红洼嵌晶角闪石的结晶压力介于 348~416 MPa, 平均值为 385 MPa, 对应的侵位深度在 13.1~15.7 km, 平均为 14.5 km。牛毛泉嵌晶角闪石的结晶压力介于 236~279 MPa, 平均值为 265 MPa, 对应的侵位深度在 8.9~10.5 km, 平均约为 10.0 km。香山西似斑状角闪辉长岩结晶压力 314~343 MPa, 平均值为 330 MPa, 就位压力在 11.8~12.9 km, 平均值为 12.5 km。

根据前人提出的角闪石氧逸度计^[33-34], 计算得出香山西嵌晶角闪石氧逸度变化范围为 NNO-0.25 到 NNO-0.04, 对应绝对氧逸度值为 -11.4~-11.1; 二红洼嵌晶角闪石氧逸度变化范围为 NNO+0.04 到 NNO+0.47, 对应绝对氧逸度值为 -10.7~-10.4; 牛毛泉嵌晶角闪石氧逸度变化范围为 NNO+0.47 到 NNO+1.19, 对应绝对氧逸度值为 -11.2~-10.7。

5.3 嵌晶角闪石的成因

嵌晶角闪石是东天山似斑状角闪辉长岩类最为

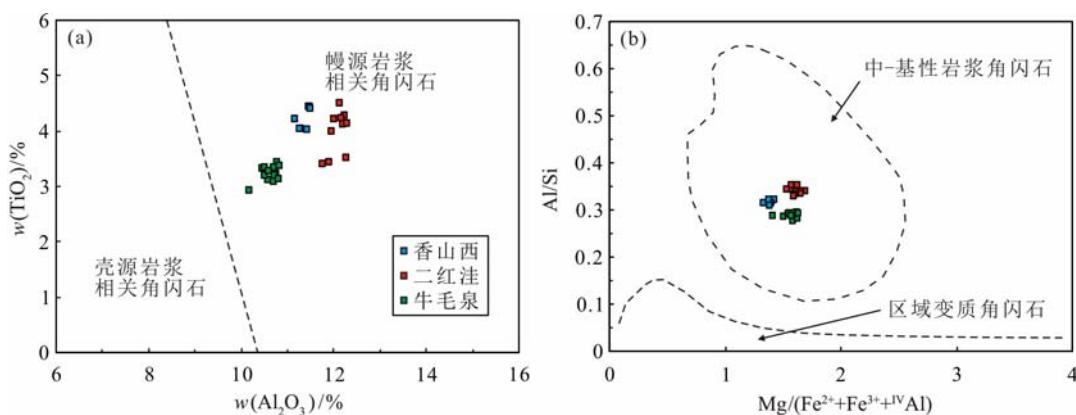


图 8 东天山嵌晶角闪石成因判别图解

(图 a 据文献[47]; 图 b 据文献[48])

Fig. 8 Distinguishing diagrams for the genesis of poikilitic amphibole of the East Tianshan

显著的特征,其可以出现在低演化的辉长苏长岩中,如二红洼和牛毛泉,也可以出现在高演化的辉长岩中,如香山西(图 7),其结晶和母岩浆的绝对演化程度关系不大。嵌晶角闪石的结晶温度略有差异,其中牛毛泉嵌晶角闪石结晶温度稍低,介于 894~924 °C,而二红洼和香山西嵌晶角闪石结晶温度较高,分别为 944~977 °C 和 935~950 °C,但结晶压力较为一致,其中牛毛泉、二红洼和香山西嵌晶角闪石的结晶压力分别介于 236~279 MPa、348~416 MPa 和 314~343 MPa,岩体形成于中下地壳。

角闪石的结晶和稳定性与母岩浆中 Na_2O 和 H_2O 含量有着密切关系^[49]。相平衡实验表明在 700 MPa 到近地表的压力范围内,角闪石可以和橄榄石作为液相线矿物结晶于水饱和的玄武质熔浆^[49-53]。岩浆系统中 Na_2O 含量在没有受到外来物质显著加入的情况下,一般仅受控于岩浆的演化程度,如二红洼岩体橄榄辉长岩、似斑状角闪辉长苏长岩、同淡色辉长岩以及含钛橄榄辉长苏长岩的 Na_2O 含量分别为 1.24%~1.72%、1.63%~1.92%、1.58%~3.27% 和 1.72%~3.22%^[25,30],相对演化程度依次升高。二红洼橄榄辉长岩、淡色辉长岩和含钛橄榄辉长苏长岩并不含嵌晶角闪石,因此 Na_2O 含量难以作为控制嵌晶角闪石形成的关键物理化学条件。嵌晶角闪石的形成和挥发分的相对聚集显示密切关系,如红格岩体上部辉长岩岩相带是残余熔体结晶固结的产物,含有嵌晶角闪石,而演化程度相对较低的中部岩相带辉长岩中并未形成嵌晶角闪石。红格岩体含有嵌晶角闪石的上部辉长岩岩相带含有大量挥发分物质,不仅形成了 3%~13% 的角闪石,同时形成了 5%~15% 的磷灰石^[45]。香山西似斑状角闪辉长岩中钛铁矿常常被榍石交代,被认为是晚期岩浆体系中流体交代的结果^[11]。

东天山似斑状角闪辉长岩类的嵌晶角闪石的矿物化学特征表明其为岩浆成因角闪石(图 7),其形成于斜长石、单斜辉石和斜方辉石之后,以嵌晶形式将硅酸盐造岩矿物包裹。同时,嵌晶角闪石的生长仅限制了其内部硅酸盐造岩矿物的颗粒大小,对嵌晶外硅酸盐造岩矿物的颗粒大小并未有影响,因此嵌晶角闪石的结晶结束于硅酸盐造岩矿物之前。鉴于似斑状角闪石的形成和岩浆体系挥发分饱和的密切关系,本文认为东天山似斑状角闪辉长岩类在就位结晶过程中发生过短暂的流体饱和过程。东天山镁铁-超镁铁杂岩体母岩浆的分异演化作用主体发

生于岩体之下的深部岩浆房,然后演化程度不同的母岩浆多期上侵、就位,形成东天山镁铁-超镁铁杂岩,如二红洼似斑状角闪辉长苏长岩的形成晚于含长辉橄榄岩和橄榄辉长岩^[30],香山西和黄山东的似斑状角闪辉长岩形成则早于同个岩体内的超镁铁岩^[14-15,25-27]。深部岩浆房的分异演化作用有助于挥发分在相对演化的辉长质母岩浆中富集。

5.4 似斑状角闪辉长岩类和 Fe-Ti 氧化物成矿的关系

香山西、二红洼和牛毛泉岩体同位素年代学研究表明 3 个岩体的形成时代为二叠纪,成岩年龄介于 289.7~279.6 Ma^[3,11-13,30],和同区的镁铁-超镁铁岩形成时代相近,各个岩体中各相岩石间具有相似的稀土配分模式和微量元素标准化模式,是同源岩浆不同演化程度的产物^[12,24-26,30],其中香山西和二红洼起源于受板片流体交代的亏损软流圈地幔^[11-13,25-26,30],而牛毛泉则起源于受板片流体交代的岩石圈地幔^[12,24]。香山西和二红洼的母岩浆起源于亏损地幔的高镁玄武质岩浆^[11,30],而牛毛泉岩体母岩浆在就位之前就发生了一定程度的分异演化^[24],形成的岩石系列具有与铜镍硫化物和铁钛氧化物成矿岩石的复合特征^[3,11-12,25-26]。前人认为牛毛泉和香山西铁钛氧化物的富集是岩体充分分异演化的结果^[11,24-27]。玄武质岩浆演化过程中氧逸度是控制铁钛氧化物晶出行为的关键因素,在较高的氧逸度条件下,铁钛氧化物可以达到液相线结晶^[54-55],同时有利于铁钛氧化物矿床的形成^[56]。前人认为香山西铁钛氧化物的富集是岩浆同化混染地壳组分后氧逸度升高的结果^[11],而牛毛泉岩体母岩浆始终保持在较低的状态^[24]。

香山西、牛毛泉和二红洼似斑状角闪辉长岩类的嵌晶角闪石结晶温度和结晶压力在误差范围内基本一致,表明温度和压力的差异对该类岩体铁钛成矿作用的影响较小。香山西、二红洼和牛毛泉似斑状角闪辉长岩类的嵌晶角闪石结晶氧逸度变化范围分别为 NNO-0.25~NNO-0.04、NNO+0.04~NNO+0.47 和 NNO+0.47~NNO+1.19,和攀西地区红格层状岩体角闪石结晶时的氧逸度变化范围(NNO-0.55~NNO+0.73^[45,57])一致,形成于高氧逸度岩浆环境,然而氧逸度相对最高和最低的牛毛泉岩体和香山西岩体均形成了铁钛氧化物矿床,而氧逸度介于两者之间的二红洼岩体却并未产出铁钛氧化物矿体,因此,高的氧逸度可能是铁钛氧化物

矿床形成的一个必要条件,而非充分条件。东天山似斑状角闪辉长岩类较高的岩浆氧逸度可能得益于岩浆源区的性质,岩浆系统的分异演化以及岩浆运移就位过程中对地壳物质的同化混染作用3个因素。东天山地区镁铁超镁铁岩类起源于受板片流体交代的变质地幔,而板片流体的加入有助于地幔源区氧逸度的升高。东天山辉长岩类的演化程度显著高于超镁铁岩类的演化程度,大量镁铁硅酸盐造岩矿物的分离结晶将使得残余熔浆系统中 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值和岩浆氧逸度的升高。本区镁铁超镁铁类在就位结晶过程中同化混染了大量壳源 $\text{Os}^{[7,18-20]}$,壳源物质的加入可能对岩浆氧逸度的升高也存在一定贡献。

东天山似斑状角闪辉长岩类常见于香山东、香山中、香山西、黄山东、牛毛泉、二红洼和白石泉岩体,其角闪石嵌晶全部为镁铝钙闪石^[17,31],其角闪石氧逸度计算结果表明该类型辉长岩结晶于较高的氧逸度条件下,其普遍富含铁钛氧化物,如白石泉和黄山东似斑状角闪辉长岩^[14,17],其中白石泉和黄山东似斑状角闪辉长岩 TiO_2 含量最高可达4.4%^[17]和6.1%(未发表数据)。长石是辉长岩中最主要的结晶相,其母岩浆的分异演化程度可以反映在斜长石An值^[58]。二红洼、牛毛泉和香山西似斑状角闪辉长岩中单斜辉石、斜方辉石和角闪石的 $\text{Mg}^{\#}$,以及斜长石An值系统降低,表明岩浆演化程度逐渐增高,其中演化程度最低的二红洼岩体仅仅发生了铁钛氧化物富集,而牛毛泉和香山西则分别形成了本区一个小型超贫钒钛磁铁矿矿床和大型钛铁矿矿床,表明铁钛氧化物的富集程度得益于母岩浆的演化程度。深部的分异演化过程对Fe、Ti、V等成矿物质的富集有着巨大贡献。斜长石由于不含Fe和Ti等成矿元素,与斜长石共生的辉石的Fe、Ti、V等成矿物质含量也较低,两者在母岩浆的分离结晶程度不仅使熔浆逐渐演化,同时也会使Fe、Ti、V等成矿物质在残余熔体中富集。前人认为攀西地区攀枝花、太和和红格等岩体的母岩浆来自深部岩浆房,深部岩浆房中强烈的结晶分异作用使残余熔浆富含P、Fe、Ti等成矿物质,高分异岩浆的侵入对攀西地区世界级铁钛氧化物矿床的形成有着重要作用^[57,59-64]。香山西铁钛氧化物矿床是觉罗塔格构造岩浆岩带中唯一的大型铁钛氧化物矿床,其斜长石An值和攀西地区的攀枝花、白马和太和岩体斜长石An值主体范围基本一致^[59-62],表明长石和辉石的分离结晶作用对大型矿床的形成起着至关重要的作用。

东天山似斑状角闪辉长岩的分异程度不仅与铁钛氧化物的富集程度和矿床的规模有密切关系,同时和铁钛氧化物中成矿物质的种类也有着密切关系。香山西大型铁钛氧化物矿床中钛铁矿是主要的矿石矿物,而牛毛泉铁钛氧化物矿床中的矿石矿物主要为磁铁矿。似斑状角闪辉长岩类嵌晶角闪石结晶具有相对快速的特点,形成于岩石固结之前,普遍具有高 TiO_2 的特征,二红洼、牛毛泉和香山西嵌晶角闪石 TiO_2 含量分别介于3.28%~4.51%,2.41%~3.36%,以及4.02%~4.44%,同时嵌晶角闪石在角闪辉长岩类中体积比较高,通常介于20%~30%,因此嵌晶角闪石在其结晶过程中对成矿物质 TiO_2 含量有着显著影响。嵌晶角闪石的大量结晶对残余熔体中成矿物质含量的影响有着两种可能。当辉长岩类的母岩浆分异演化程度低时,如二红洼和牛毛泉,母熔浆中 TiO_2 含量比较低,嵌晶角闪石的快速结晶将使得大量Ti进入角闪石晶格,而使残余熔浆中的 TiO_2 含量逐渐贫化;而当母岩浆演化程度足够高时,如香山西,成矿母岩浆的 TiO_2 可能超过嵌晶角闪石 TiO_2 含量,嵌晶角闪石的大量结晶不仅不会造成残余岩浆系统中 TiO_2 的降低,反而会使 TiO_2 含量在残余熔浆中不同程度地增加。

6 结论

- (1) 东天山似斑状角闪辉长岩类嵌晶角闪石全部为岩浆成因角闪石,其成分为镁铝钙闪石。
- (2) 东天山角闪辉长岩类的侵位深度于中下地壳,其中香山西岩体的就位压力介于314~343 MPa,二红洼岩体的侵位压力介于348~416 MPa,牛毛泉岩体的侵位压力介于236~279 MPa。
- (3) 似斑状角闪辉长岩形成的温度较高,其中香山西角闪辉长岩的固结温度略低于941 °C,牛毛泉岩体的固结温度略低于914 °C,二红洼岩体的固结温度略低于960 °C。
- (4) 东天山似斑状角闪辉长岩类的母岩浆具有氧逸度较高的特征,有利于铁钛氧化物矿床的形成。
- (5) 东天山角闪辉长岩类的铁钛氧化物成矿作用同母岩浆的演化程度有着密切关系,其中香山西、牛毛泉和二红洼似斑状角闪辉长岩类的分异演化程度依次降低,其成矿作用的强度和规模也依次降低。

电子探针分析得到了中国科学院地质与地球物理研究所电子探针和扫描电镜实验室毛骞和马玉光研究员、张迪工程师的帮助和指导,同时审稿人对文章提出了宝贵意见和建议,在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] HAN C M, XIAO W J, Zhao G C, et al. SIMS U-Pb zircon dating and Re-Os isotopic analysis of the Hulu Cu-Ni deposit, eastern Tianshan, Central Asian Orogenic Belt, and its geological significance[J]. Journal of Geosciences, 2013, 58: 251-270.
- [2] 三金柱,秦克章,汤中立,等.东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石U-Pb定年及其地质意义[J].岩石学报,2010,26(10):3027-3035.
- [3] 李德东,王玉往,王京彬,等.新疆香山杂岩体的成岩与成矿时序[J].岩石学报,2012,28(7):2103-2112.
- [4] 孙涛,钱壮志,汤中立,等.新疆葫芦铜镍矿床锆石U-Pb年代学、铂族元素地球化学特征及其地质意义[J].岩石学报,2010,26(11):3339-3349.
- [5] 吴华,李华芹,莫新华,等.新疆哈密白石泉同镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义[J].地质学报,2005,79(4):498-502.
- [6] 韩宝福,季建清,宋彪,等.新疆喀拉通克和黄山东含同镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].科学通报,2004,49(22):2324-2328.
- [7] MAO J W, YANG J M, QU W D, et al. Re-Os age of Cu-Ni ores from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in the East Tianshan Mountains and its implication for geodynamic process[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 220-226.
- [8] ZHOU M F, LESHER C M, YANG Z, et al. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. Chemical Geology, 2004, 209(3/4): 233-257.
- [9] ZHAO Y, XUE C, ZHAO X, et al. Magmatic Cu-Ni sulfide mineralization of the Huangshannan mafic-ultramafic intrusion, Eastern Tianshan, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 105(1): 155-172.
- [10] WANG M, GUO X, MICHALAK P P, et al. Origin of the Tudun Cu-Ni sulfide deposit in the eastern Tianshan, NW China: constraints on the geochemistry of platinum group elements[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 445-454.
- [11] 肖庆华,秦克章,唐冬梅,等.新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物:矿相学、锆石U-Pb年代学及岩石地球化学证据[J].岩石学报,2010,26(2):503-522.
- [12] 李德东,王玉往,龙灵利,等.东天山过渡型矿化镁铁-超镁铁年代学和地球化学特征[J].地质论评,2012,58(6):1145-1160.
- [13] HAN C M, XIAO W J, ZHAO G C, et al. In-situ U-Pb, Hf and Re-Os isotopic analyses of the Xiangshan Ni-Cu-Co deposit in Eastern Tianshan(Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: constraints on the timing and genesis of the mineralization[J]. Lithos, 2010, 120(3/4): 547-562.
- [14] DENG Y F, SONG X Y, CHEN L M, et al. Geochemistry of the Huangshandong Ni-Cu deposit in northwestern China: implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in orogenic belts[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 56: 181-198.
- [15] 邓宇峰,宋谢炎,颉伟,等.新疆北天山黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体的岩石成因:主量元素、微量元素和Sr-Nd同位素证据[J].地质学报,2011,85(9):1435-1451.
- [16] 秦克章,丁奎首,许英霞,等.东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钻孔赋存状态及原岩含矿性研究[J].矿床地质,2007,26(1):1-14.
- [17] 柴凤梅,张招崇,毛景文,等.中天山白石泉镁铁-超镁铁质岩体岩石学和矿物学研究[J].岩石矿物学杂志,2006,25(1):1-12.
- [18] 胡克兵,姚书振,屈文俊,等.新疆东天山葫芦铜镍硫化物矿床Re-Os同位素物质来源示踪研究[J].岩石学报,2008,24(10):2359-2370.
- [19] TANG D M, QIN K Z, SUN H, et al. The role of crustal contamination in the formation of Ni-Cu sulfide deposits in Eastern Tianshan, Xinjiang, Northwest China: evidence from trace element geochemistry, Re-Os, Sr-Nd, zircon Hf-O, and sulfur isotopes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 49: 145-160.
- [20] 王玉往,王京彬,王莉娟,等.新疆北部镁铁-超镁铁质岩的PGE成矿问题[J].地学前缘,2010,17(1):137-152.
- [21] 王京彬,王玉往,何志军.东天山大地构造演化的成矿示踪[J].中国地质,2006,33(3):461-469.
- [22] 王京彬,徐新.新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J].地质学报,2006,80(1):23-31.
- [23] 李锦铁,宋彪,王克卓,等.东天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩:中亚地区陆壳垂向生长的地质记录[J].地球学报,2006,27(5):424-446.
- [24] WANG S, SUN F, QIAN Z Z, et al. Magmatic evolution and metal element enrichment during formation of the Ni-umaoquan magnetite ore deposit, Xinjiang, China[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 63: 64-75.
- [25] 王玉往,王京彬,王莉娟,等.CuNi-VTiFe复合型矿化镁铁-超镁铁杂岩体岩相学及岩石地球化学特征:以新疆北部为例[J].岩石学报,2010,26(2):401-412.
- [26] 王玉往,王京彬,王莉娟,等.新疆香山铜镍钛铁矿区两个镁铁-超镁铁岩系列及特征[J].岩石学报,2009,25(4):888-900.

- [27] 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等. 岩浆铜镍矿与钒钛磁铁矿的过渡类型: 新疆哈密香山西矿床[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 61-73.
- [28] 王玉往, 王京彬, 王莉娟. 东天山两类钒钛磁铁矿型矿床含矿岩石对比[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1425-1436.
- [29] 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 等. 东昆仑夏日哈木铜镍矿镁铁质-超镁铁质岩体岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 381-401.
- [30] SUN T, QIAN Z Z, LI C, et al. Petrogenesis and economic potential of the Erhongwa mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian orogenic belt, NW China: constraints from olivine chemistry, U-Pb age and Hf isotopes of zircons, and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes[J]. Lithos, 2013, 182/183: 185-199.
- [31] 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 等. 造山带环境中的东疆型镁铁-超镁铁杂岩[J]. 岩石学报, 1994, 10(4): 339-356.
- [32] HAMMARSTROM J M, ZEN E A. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer [J]. American Mineralogist, 1986, 71(11/12): 1297-1313.
- [33] RIDOLFI F, PUERINI M, RENZULLI A, et al. The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by texture, mineralogy and thermobarometry of the 2002 erupted products[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008, 176(1): 94-106.
- [34] RIDOLFI F, RENZULLI A, PUERINI M. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(1): 45-66.
- [35] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 555-647.
- [36] WANG B, FAURE M, SHU L, et al. Structural and geo-chronological study of high-pressure metamorphic rocks in the Kekesu Section (northwestern China): implications for the Late Paleozoic tectonics of the Southern Tianshan[J]. Journal of Geology, 2010, 118(1): 59-77.
- [37] XIAO W J, HAN C M, YUAN C, et al. 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, 2008, 32(2/3/4): 102-117.
- [38] XIAO W J, ZHANG L C, QIN K Z, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of Central Asia [J]. American Journal of Science, 2004, 304(4): 370-395.
- [39] JAHN B. The Central Asian orogenic belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 226(1): 73-100.
- [40] 陈华勇, 肖兵. 俯冲边界成矿作用研究进展及若干问题[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 13-22.
- [41] 肖兵, 陈华勇, 王云峰, 等. 东天山土屋—延东铜矿矿区晚志留世岩体的发现及构造意义[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 251-266.
- [42] 木合塔尔·扎日, 尼加提·阿布都逊, 吴兆宇. 觉罗塔格南缘石炭系火山岩地球化学特征及其对古亚洲洋南缘构造演化的指示意义[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 238-250.
- [43] LEAKE B E, WOOLLEY A R, ARPS C E S, et al. Nomenclature of Amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. The Canadian Mineralogist, 1997, 82(9/10): 1019-1037.
- [44] MORIMOTO N. Nomenclatures of pyroxenes[J]. Mineralogy and Petrology, 1988, 39(1): 55-76.
- [45] 栗燕, 宋谢炎, 陈列锰, 等. 四川红格层状侵入体中角闪石和金云母的矿物学特征及其成因意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(5): 1457-1471.
- [46] 周新民, 陈图华, 刘昌实, 等. 我国东南沿海碱性玄武质岩石中辉石和角闪石巨晶[J]. 矿物学报, 1982(1): 13-20.
- [47] 姜常义, 安三元. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. 矿物岩石, 1984(3): 1-9.
- [48] 薛君治, 白学让, 陈武. 成因矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1986: 114-121.
- [49] SISSON T W, GROVE T L. Experimental investigations of the role of H_2O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1993, 113(2): 143-166.
- [50] GROVE T L, ELKINS-TANTON L T, PARMAN S W, et al. Fractional crystallization and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2003, 145(5): 515-533.
- [51] PICHAVANT M, MACDONALD R. Crystallization of primitive basaltic magmas at crustal pressures and genesis of the calc-alkaline igneous suite: experimental evidence from St Vincent, Lesser Antilles arc[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2007, 154(5): 535-558.
- [52] BARCLAY J, CARMICHAEL I S E. A hornblende-bearing Basalt from Western Mexico: water-saturated phase relations constrain a pressure-temperature window of eruptability[J]. Journal of Petrology, 2004, 45(3): 485-506.
- [53] MOORE G, CARMICHAEL I S E. The hydrous phase equilibria (to 3 kbar) of an andesite and basaltic andesite from Western Mexico: constraints on the water content and conditions of phenocryst growth[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1998, 130(3): 304-319.
- [54] BERNDT J, LIEBSKE C, HOLTZ F, et al. A combined rapid-quench and H_2 -membrane setup for internally heated pressure vessels: description and application for water solu-

- bility in basaltic melts[J]. American Mineralogist, 2002, 87(11/12): 1717-1726.
- [55] BOTCHARNIKOV R E, ALMEEV R R, KOEPKE J, et al. Phase relations and liquid lines of descent in hydrous ferrobasalt: implications for the Skaergaard intrusion and Columbia River flood basalts[J]. Journal of Petrology, 2008, 49(9): 1687-1727.
- [56] PANG K N, ZHOU M F, LINDSLEY D, et al. Origin of Fe-Ti oxide ores in mafic intrusions: evidence from Panzhihua intrusion, SW China[J]. Journal of Petrology, 2008, 49(2): 295-313.
- [57] LUAN Y, SONG X Y, CHEN L M, et al. Key factors controlling the accumulation of the Fe-Ti oxides in the Hongge layered intrusion in the Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 518-538.
- [58] 钟宏, 胡瑞忠, 朱维光, 等. 层状岩体的成岩及成矿作用[J]. 地学前缘, 2007, 14(2): 159-172.
- [59] SHE Y W, YU S Y, SONG X Y, et al. The formation of P-rich Fe-Ti oxide ore layers in the Taihe layered intrusion, SW China: implications for magma-plumbing system process[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 539-559.
- [60] PANG K N, LI C, ZHOU M F, et al. Mineral compositional constraints on petrogenesis and oxide ore genesis of the late Permian Panzhihua layered gabbroic intrusion, SW China[J]. Lithos, 2009, 110(1/2/3/4): 199-214.
- [61] LIU P P, ZHOU M F, WANG C Y, et al. Open magma chamber processes in the formation of the Permian Baima mafic-ultramafic layered intrusion, SW China[J]. Lithos, 2014, 184-187: 194-208.
- [62] ZHANG X Q, SONG X Y, CHEN L M, et al. Fractional crystallization and the formation of thick Fe-Ti-V oxide layers in the Baima layered intrusion, SW China[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 49: 96-108.
- [63] SHE Y W, SONG X Y, HE H L, et al. Variations of trace element concentration of magnetite and ilmenite from the Taihe layered intrusion, Emeishan Large Igneous Province, SW China: implications for magmatic fractionation and origin of Fe-Ti-V oxide ore deposit[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 1117-1131.
- [64] SONG X Y, QI H W, HU R Z, et al. Formation of thick stratiform Fe-Ti oxide layers in layered intrusion and frequent replenishment of fractionated mafic magma: evidence from the Panzhihua intrusion, SW China[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2013, 14(3): 712-732.