

东天山二叠纪镁铁-超镁铁质成矿岩体造岩矿物特征及其成因意义

冯延清¹, 钱壮志^{1,2}, 徐刚¹, 段俊¹, 陈炳龙¹, 孙涛³, 姜超⁴, 任萌¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091; 4. 陕西省核工业地质调查院, 陕西 西安 710100)

摘要: 东天山造山带与镁铁-超镁铁质岩体有关的铜镍硫化物矿床数量多, 分布集中, 是我国重要的铜镍成矿带之一。成矿岩体多以小岩体群形式产出, 由西向东分布有白鑫滩、黄山和图拉尔根3个岩体群, 大型矿床主要赋存在黄山岩体群内。本文对3个岩体群内成矿岩体的主要造岩矿物进行了系统的对比研究。成矿岩体的主要造岩矿物为贵橄榄石、古铜辉石、单斜辉石、斜长石和角闪石以及少量的铬尖晶石和金云母。橄榄石Al温度计计算结果表明, 黄山岩体群内成矿岩体的母岩浆结晶温度介于1143~1257℃之间, 略低于白鑫滩和图拉尔根岩体群(1283~1301℃)。单斜辉石压力计算表明成矿岩体的结晶压力相似, 介于0.31~0.33 GPa之间。成矿岩体中均富含含水矿物, 且单斜辉石结晶早于斜长石, 指示成矿岩体的原始岩浆形成于富水环境。成矿岩体的单斜辉石具有较高的Al/Ti值, 铬尖晶石和橄榄石具有与岛弧火山岩相似的矿物学特征, 结合区域构造演化, 认为东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体的原始岩浆是被消减板片交代过的地幔部分熔融的产物。矿物学特征对比显示了黄山岩体群内成矿岩体更富斜方辉石和中性斜长石, 且具有较低的铬尖晶石Cr[#]值和橄榄石Ca含量。结合前人研究成果和相关地球化学数据, 认为相对高的混染程度导致了黄山岩体群的母岩浆富SiO₂和Al₂O₃, 同时降低了岩浆的结晶温度。

关键词: 矿物学; 镁铁-超镁铁质岩体; 铜镍硫化物矿床; 岩浆演化; 地壳混染; 东天山

中图分类号: P588.12⁺5; P57

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)04-0519-16

Rock-forming mineral features of Permian mineralized mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains and their implications for intrusion generation

FENG Yan-qing¹, QIAN Zhuang-zhi^{1,2}, XU Gang¹, DUAN Jun¹, CHEN Bing-long¹,
SUN Tao³, JIANG Chao⁴ and REN Meng¹

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. MLR Key Laboratory of Genesis and Exploration of Magmatic Ore Deposits, Xi'an 710054, China; 3. School of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China; 4. Shaanxi Nuclear Industry Geology Surveying Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: East Tianshan, one of the important ore concentration belt in China, is characterized by a large number of mafic-ultramafic intrusions with magmatic Cu-Ni sulfide mineralization in a concentrated area. These small mafic-ultramafic intrusions are distributed in three groups, i. e., Baixintan, Huangshan, and Tulaergen, from west to east. The large-sized deposits mainly occur in the Huangshan intrusion group. The rocks mainly

收稿日期: 2017-01-12; 接受日期: 2017-03-17

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212011085061); 国家自然科学基金面上基金(41372101); 国家自然科学基金青年基金(41402070); 长安大学中央高校专项基金(CHD310827171007)

作者简介: 冯延清(1991-), 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: fyyq8@chd.edu.cn; 通讯作者: 钱壮志(1959-), 教授, 主要从事矿床学与区域成矿方面的科研和教学工作, E-mail: zyxyqz8@chd.edu.cn。

consist of olivine, bronzite, clinopyroxene, hornblende and plagioclase together with a small amount of Cr-spinel and phlogopite. Systematic and comparative studies of the mineralogy of rocks from ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan were conducted in this paper. The estimated crystallization temperatures based on Cr-spinel and olivine pair from Huangshan intrusion group were from 1 143 to 1 257°C, which are slightly lower than those from Baixintan and Tulaergen groups (1 283 ~ 1 301°C). The estimated pressures show similar widths of 0.31 ~ 0.33 GPa calculated by clinopyroxene geobarometer for all the three intrusion groups. The characteristics of hydrous minerals and the fact of earlier crystallization of clinopyroxene than plagioclase indicate that the primitive magmas of the intrusions in East Tianshan were substantially hydrous. The clinopyroxenes in sulfide-bearing intrusive rocks have higher Al/Ti ratio, and the compositions of Cr-spinel and olivine crystals are within or close to the field of island arc volcanic basalts. Based on the regional tectonic evolution, the authors hold that the primitive magmas of sulfide-bearing mafic intrusions in East Tianshan were generated by partial melting of a metasomatic mantle, which was modified by slab-derived fluids associated with the previous subduction events. Mineral comparisons indicate that the ore-hosting intrusions in the Huangshan group have more orthopyroxene and andesine as well as lower Cr[#] of Cr-spinel and Ca content in olivine. The new data obtained from this study, together with previous results, indicate that the higher SiO₂ and Al₂O₃ content in the parental magma of Huangshan intrusions group might have resulted from higher degree of crustal contamination, which also reduced the crystallization temperature of the magma.

Key words: mineralogy; mafic-ultramafic intrusion; Cu-Ni sulfide deposit; magmatic evolution; crustal contamination; East Tianshan Mountains

Fund support: China Geological Survey(1212011085061); National Science Foundation of China(41372101); National Natural Science Foundation of China for Youths (41402070); Basic Scientific Research of Central Colleges, Chang'an University(CHD310827171007)

东天山造山带是我国重要的岩浆铜镍硫化物矿床成矿带之一(秦克章等, 2012; Su *et al.*, 2013a; 王玉往等, 2013; Sun *et al.*, 2015; 钱壮志等, 2015), 成矿岩体多以小岩体群形式产出, 由西向东分布有白鑫滩、黄山和图拉尔根 3 个岩体。前人对该区二叠纪镁铁-超镁铁质成矿岩体和矿床进行了较为系统的地质学、年代学和地球化学等方面的研究, 取得了丰富成果(韩宝福等, 2004; 钱壮志等, 2009; Qin *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2011, 2013a; Sun *et al.*, 2013a, 2013b; Mao *et al.*, 2014a, 2014b, 2016)。已有研究表明, 该地区成矿岩体的母岩浆在上升过程中经历了结晶分异和地壳物质混染后达到硫饱和, 进而发生硫化物熔离, 但对地壳混染的方式和程度有不同的解释(Sun *et al.*, 2013a, 2013b; Deng *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2015; Mao *et al.*, 2016)。此外, 前人针对这些典型岩体的形成背景提出了多种地球动力学模型, 包括后碰撞伸展环境(韩宝福等, 2004; Zhang Z C *et al.*, 2009a; Song *et al.*, 2011; Zhang M *et al.*, 2011)、二叠纪地幔柱环境

(Zhou *et al.*, 2004; Mao *et al.*, 2008; Pirajno *et al.*, 2008)以及地幔柱与造山带叠置环境(Qin *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2011, 2012a, 2013a; Tang *et al.*, 2013)。然而, 前人对东天山地区与铜镍硫化物矿床相关的镁铁-超镁铁质岩体矿物学方面的研究相对薄弱, 对不同岩体的主要造岩矿物特征对比、成因意义仍需探讨。

岩浆铜镍硫化物矿床形成的关键是由于物理化学条件的改变导致岩浆中的硫化物饱和并发生熔离, 且亲铜元素从硅酸盐岩浆中分配进入这些硫化物熔体(Naldrett *et al.*, 2004)。众所周知, 火成岩中造岩矿物的结构和成分记录了岩浆演化过程及其相关的物理化学条件(温度、压力、氧逸度、物质成分变化等, 张招崇等, 2005)。因此, 东天山不同成矿岩体矿物学特征的异同及其变化的原因就成为区域上矿床研究和勘查评价的重要科学问题。本文拟采用电子探针技术对研究区内成矿岩体的主要造岩矿物进行对比研究, 阐释不同岩体矿物学特征的差异及结晶的温压条件, 探讨其对源区特征及混染程度的指示意义, 以期对东天山二叠纪镁铁-超镁铁质成矿岩体的成岩成矿研究提供新资料。

1 成矿岩体地质特征

新疆东天山与铜镍硫化物有关的镁铁-超镁铁质岩体大都形成于早二叠世(韩宝福等, 2004; Zhou *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2010; 三金柱等, 2010; 孙涛等, 2010; Qin *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011; 冯宏业等, 2014; Mao *et al.*, 2016), 常以小岩体群的形式产出, 由西向东分布有白鑫滩、黄山(黄山东、黄山南、香山)、图拉尔根(圪塔山口、葫芦)

3个主要岩体群,大型矿床主要赋存在在黄山岩体群内(图1)。成矿岩体侵入的地层主要为泥盆系头苏泉组变质中基性海相火山岩、石炭系梧桐窝子组和干墩组浅变质海相火山-次火山岩系,其中干墩组主要分布在黄山矿集区。成矿岩体规模一般较小,出露面积为 $n \times 10^{-2} \sim n \text{ km}^2$,平面形态主要受构造作用控制,多为透镜状或脉状,剖面上多为漏斗状或岩盆状(倪志耀等,1992;顾连兴等,1994;焦建刚等,2012;秦克章等,2012)。典型岩体的年龄、规模、形态、岩相等基本特征见表1。

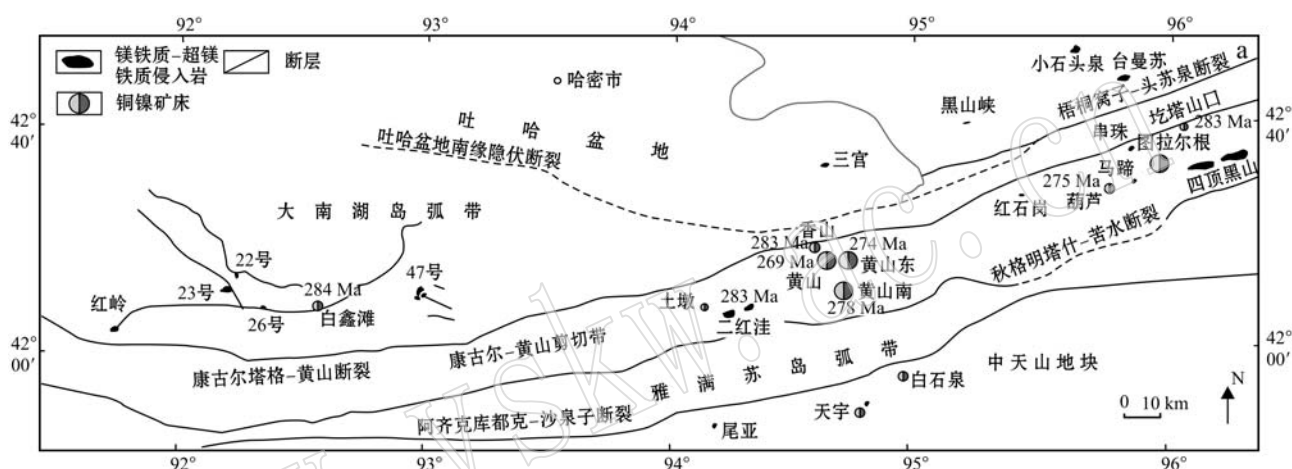


图 1 新疆东天山镁铁-超镁铁质岩体分布简图[据秦克章等(2007)修改]

Fig. 1 Geological map of East Tianshan Mountains and distribution of mafic-ultramafic intrusions (modified after Qin Kezhang *et al.*, 2007)

表 1 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体基本特征

Table 1 Features of ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains

岩体	年龄/Ma	矿床规模	产状	岩相	赋矿岩相	资料来源
挖塔山口 2号岩体	282.6 ± 2	小型	透镜状	辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、辉长岩、 角闪辉长岩	辉石橄榄岩、 橄榄辉石岩	冯宏业等(2014)
图拉尔根 1号岩体	300.5 ± 3	大型	透镜状	角闪橄榄岩、角闪橄榄辉石岩、角 闪辉石橄榄岩、角闪辉长岩	角闪橄榄岩	三金柱等(2010); 焦健刚等(2012)
葫芦	274.5 ± 4	中型	不规则葫芦形	橄榄岩、辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、 角闪辉石岩、角闪辉长岩、辉长闪 长岩、闪长岩	橄榄辉石岩、 角闪辉石岩	孙涛等(2010); Tang 等(2015)
黄山	269 ± 2	大型	似镰刀状	角闪橄榄岩、二辉橄榄岩、橄榄二 辉岩、含长辉石岩、辉长苏长岩、苏 长岩、闪长岩	橄榄辉石岩、 辉长苏长岩	Zhang 等(2011); Zhou 等(2004)
黄山东	274 ± 3	大型	菱形透镜状	辉石角闪橄榄岩、角闪二辉橄榄 岩、橄榄辉长岩、辉长苏长岩、角闪 辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩	二辉橄榄岩、 辉长苏长岩	韩宝福等(2004); Sun 等(2013a)
黄山南	278 ± 2	中型	透镜状	橄榄岩、二辉橄榄岩、橄榄二辉岩、 辉长苏长岩、角闪辉长岩、闪长岩	橄榄岩、二辉橄榄 岩、橄榄二辉岩	Mao 等(2016); Zhao 等(2015)
香山	279.6 ± 1	中型	藕节状	二辉橄榄岩、单辉橄榄岩、角闪辉 橄岩、辉石岩、橄榄辉长苏长岩、辉 长岩、辉长闪长岩	单辉橄榄岩、辉 石岩、辉长岩	Han 等(2010); 姜超等(2015)
白鑫滩	286.4 ± 2	中型	似葫芦形	辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、橄榄辉 长岩、角闪辉长岩	辉石橄榄岩、 橄榄辉石岩	王亚磊等(2015, 2016)

与铜镍硫化物有关的镁铁-超镁铁质岩体的主要岩石类型有闪长岩、辉长岩、橄榄辉长岩、苏长岩、辉石岩、橄榄辉石岩、辉石橄榄岩和橄榄岩等。相对而言,黄山矿集区的岩体分异程度更高,均发育有闪长岩或者辉长闪长岩。硫化物矿体常赋存在岩体中下部位的超镁铁质岩相中,主要为辉石橄榄岩、二辉橄榄岩和橄榄辉石岩。部分矿床的苏长岩也为赋矿岩相,例如黄山、黄山东岩体。成矿岩体蚀变强烈,普遍发生蛇纹石化、滑石化、纤闪石化、绿泥石化和碳酸盐化,且常受到差异风化的影响在地表呈负地形。

2 样品选择及分析方法

本文在大量收集前人研究资料的基础上,选取不同成矿岩体的不同岩性样品进行探针片磨制,分析矿物类型、蚀变程度和结晶顺序。针对3个岩体

群中矿物学研究程度低的典型岩体(圪塔山口、香山、黄山南和白鑫滩岩体),选择自形好且蚀变弱的矿物颗粒进行分析测试。样品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完成,测试仪器为JXI-8100型电子探针,测试条件为:加速电压15 kV,电流80 nA,检测限为0.01%。

3 矿物晶体化学特征及对比

3.1 尖晶石

新疆东天山与铜镍硫化物有关的镁铁-超镁铁质岩体中尖晶石的产出形态分为两种:①自形包裹在橄榄石中,少数包裹在斜方辉石和角闪石中(图2a);②自形独立产出。本文选择超镁铁质岩中包裹在橄榄石内的尖晶石进行研究,电子探针分析数据见表2。

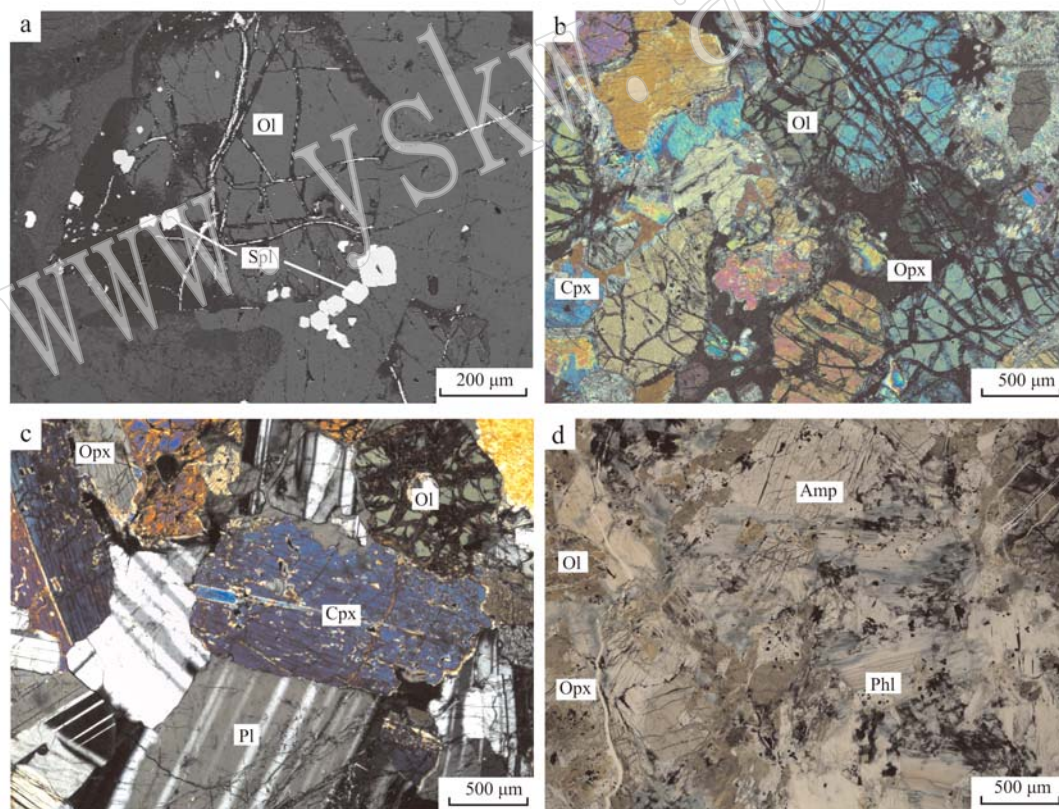


图2 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体显微镜下照片

Fig. 2 Photomicrographs of the rocks from ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains

a—白鑫滩岩体辉石橄榄岩中包裹在橄榄石和斜方辉石内的铬尖晶石; b—黄山岩体二辉橄榄岩中的橄榄石; c—黄山东岩体橄榄辉长岩中的单斜辉石和斜长石; d—圪塔山口岩体橄榄辉石岩中的角闪石和金云母; Spl—尖晶石; Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石; Cpx—单斜辉石;

Amp—角闪石; Pl—斜长石; Phl—金云母

a—Cr-spinel inclusions in olivine and orthopyroxene in lherzolite from Baixintan intrusion; b—olivine crystals in lherzolite from Huangshan intrusion; c—clinopyroxene and plagioclase crystals in olivine gabbro from Huangshandong intrusion; d—amphibole and phlogopite in olivine pyroxenite from Getashankou intrusion; Spl—spinel; Ol—olivine; Opx—orthopyroxene; Cpx—clinopyroxene; Amp—amphibole; Pl—plagioclase; Phl—phlogopite

表 2 研究区铬尖晶石电子探针数据结果

$w_B/\%$

Table 2 Electron microprobe analyses of Cr-spinel in the study area											
岩体	样号	岩性	<i>n</i>	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Total
白鑫滩	BXT-1	辉石橄榄岩	2		0.69	17.88	31.12	40.41	0.60	7.96	98.66
	BXT-2	辉石橄榄岩	1	0.06	0.47	16.65	32.06	40.49	0.55	7.60	97.87
	BXT-3	辉石橄榄岩	3	0.01	0.40	16.72	29.90	43.90	0.39	7.19	98.51
	BXT-4	辉石橄榄岩	2	0.04	0.39	20.04	33.24	35.04	0.48	8.59	97.82
	BXT-5	辉石橄榄岩	1	0.04	0.34	5.65	27.02	61.20	0.68	2.71	97.64
	BXT-6	辉石橄榄岩	3		0.52	6.47	28.71	57.43	0.61	4.39	98.13
	BXT-7	辉石橄榄岩	2	0.04	0.44	16.56	31.28	42.84	0.45	7.02	98.63
	BXT-8	辉石橄榄岩	2	0.04	0.39	13.49	26.31	52.00	0.47	5.66	98.35
香山	XS-1	角闪辉橄岩	1	0.01	2.03	17.54	30.30	42.85	1.38	3.19	97.30
	XS-2	角闪辉橄岩	2	0.01	1.75	17.01	29.71	44.31	1.22	3.63	97.64
	XS-3	角闪辉橄岩	1	0.04	1.56	18.97	31.46	41.50	0.91	4.44	98.88
	XS-4	角闪辉橄岩	2	0.08	0.27	25.20	30.70	33.59	0.29	7.78	97.91
	XS-5	角闪辉橄岩	2		1.19	19.31	26.92	46.26	0.89	3.05	97.62

n 为所测次数,下表同。

Barnes 和 Roeder(2001)将铬尖晶石成分划分为 Cr-Al 趋势和 Fe-Ti 趋势两大类,其中 Cr-Al 趋势以 $Cr/(Cr + Al)$ 值变化范围较大而 $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ 值较小为特征,并且二者具有正相关性。Fe-Ti 趋势具有 Fe^{3+} 和 $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ 增大的趋势,并具有较高的 TiO₂ 含量。整体上看,研究区内包裹在橄榄石中的尖晶石成分大体上与 Cr-Al 趋势相同, TiO₂ 含量较低(0.09%~3.30%),但具有较高的 $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ 值,推测铬尖晶石和橄榄石之间发生了 Mg-Fe 交换,导致铬尖晶石 Fe 含量升高(Fabries *et al.*, 1979; Lehmann *et al.*, 1983; 李建平等, 1995; Xiao *et al.*, 2016)。由于橄榄石中 Cr 和 Al 的含量较低,因此包裹在橄榄石中的尖晶石的 Cr-Al 交换可忽略不计(李建平等, 1995)。Barnes 和 Roeder(2001)研究认为与 MORB 和岛弧玄武岩有关的铬尖晶石成分多为 Cr-Al 趋势,而与溢流玄武岩有关的铬尖晶石成分多为 Fe-Ti 趋势。在 Fe^{3+} -Cr-Al 图解中,样品点也大都落在岛弧玄武岩的范围内或外围,明显不同于溢流玄武岩相关的镁铁-超镁铁质侵入岩(图 3a)。由于本次研究的尖晶石 Cr-Al 交换可忽略不计,故 $Cr^{\#}[Cr/(Cr + Al)]$ 变化不大,因此 $Cr^{\#}$ 可以用来指示温度和母岩浆的特征,高的 $Cr^{\#}$ 指示高的温度(Zhang *et al.*, 2006)。图 3b 中,黄山岩体群内成矿岩体中的尖晶石大部分落在 $Al > Cr$ 的范围内, $Cr/(Cr + Al)$ 值小于白鑫滩和图拉尔根岩体群,表明该区域内成矿岩体的母岩浆基性程度和形成温度低于其它两个岩体群。

3.2 橄榄石

研究区内成矿岩体的橄榄石呈半自形或浑圆状,多以堆晶形式产出(图 2b)。显微镜下观察表明橄榄石与其它主要造岩矿物呈包含关系和穿插关系,表明橄榄石结晶早于辉石、角闪石和斜长石。本文选择不含硫化物的岩石样品中的橄榄石进行研究,电子探针数据见表 3。

成矿岩体中的橄榄石 Fo 值多介于 77~87 之间,属于富镁的贵橄榄岩。橄榄石 Ni 含量变化范围较大,大多数介于 $200 \times 10^{-6} \sim 2\,500 \times 10^{-6}$ 之间。Fo-Ni 图解中橄榄石 Ni 含量随着 Fo 值的下降而快速降低(图 4a),表明在橄榄石的结晶过程中伴随着硫化物熔离。Su 等(2012b)研究认为橄榄石 Fo 值介于 77~86 且 Ni 含量小于 0.22% 时更有利于成矿,该范围与研究区内成矿岩体橄榄石 Fo 值和 Ni 含量一致。

研究区内成矿岩体中的橄榄石 Ca 含量较低,除少数图拉尔根样品外,绝大多数橄榄石 Ca 含量小于 $1\,000 \times 10^{-6}$,明显低于科马提岩、苦橄岩、洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩(Zhang *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2012),但与岛弧玄武岩和与之有关的镁铁-超镁铁质岩体相似(张招崇等, 2008; Zhang *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2012)。实验研究表明 Ca 在橄榄石中的分配系数与熔体中的 SiO₂ 含量呈负相关,与 CaO 和 FeO 呈正相关。此外,橄榄石 Ca 含量也与岩浆演化有关,早期结晶的橄榄石低 Ca,后期高 Ca,与 Fo 值呈负相关关系。选取不同岩体最高 Fo 值的橄榄石 Ca 含量进行对比,结果显示黄山岩体群橄榄石 Ca

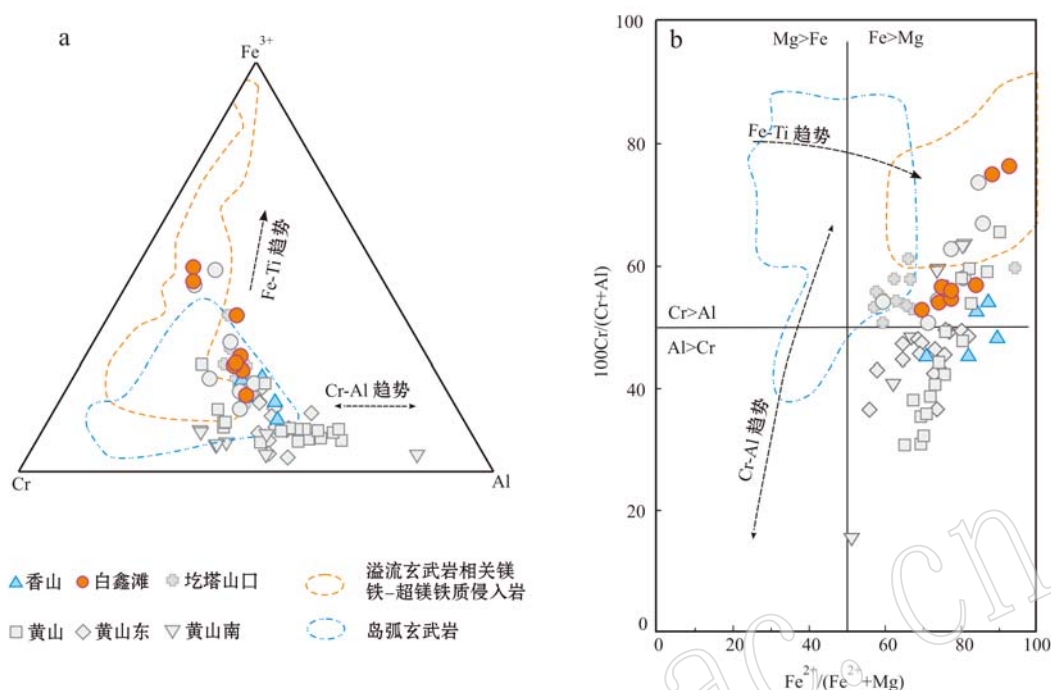


图 3 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体尖晶石的 Fe^{3+} -Cr-Al 图解(a)和 $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ - $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ 图解(b)(底图据 Barnes 和 Roeder, 2001)

Fig. 3 Fe^{3+} -Cr-Al ternary plot (a) and $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ - $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ diagram (b) for Cr-spinel from ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains(after Barnes and Roeder, 2001)

灰色样品点数据引自 Mao 等(2014a, 2014b, 2016)

Gray symbols are from Mao *et al.* (2014a, 2014b, 2016)

含量明显低于白鑫滩和图拉尔根岩体群。假定最高 Fo 值的橄榄石为岩浆最初结晶的产物,那么不同岩体橄榄石 Ca 含量的区别可能是母岩浆 SiO_2 含量不同导致的。

3.3 辉石

研究区内成矿岩体中均可见斜方辉石和单斜辉石,但二者在不同岩体中的比例不同。从表 1 可知,黄山岩体群的岩体普遍存在二辉橄榄岩和苏长岩,而图拉尔根和白鑫滩岩体群少见。斜方辉石和单斜辉石的电子探针数据分别见表 4、表 5。

由西向东,3 个岩体群的斜方辉石成分分别为 $\text{Wo}_{1.53\sim 2.28} \text{En}_{76.87\sim 84.70} \text{Fs}_{13.02\sim 21.20}$ 、 $\text{Wo}_{1.57\sim 3.74} \text{En}_{67.06\sim 85.36} \text{Fs}_{11.67\sim 29.95}$ 和 $\text{Wo}_{1.15\sim 2.72} \text{En}_{77.32\sim 87.73} \text{Fs}_{8.41\sim 20.12}$,黄山岩体群内的成矿岩体斜方辉石多为古铜辉石,含有少量紫苏辉石;单斜辉石主要为顽透辉石和透辉石。图拉尔根和白鑫滩岩体群内的成矿岩体斜方辉石均为古铜辉石,单斜辉石主要为顽透辉石(图 5)。不同岩体超镁铁质岩石中的单斜辉石 $\text{Mg}^\#$ 值近似(~ 86),但黄山岩体群内的成矿岩体中单斜辉石 SiO_2 含量($51.3\% \sim 54.2\%$)略高于其它

岩体群($49.2\% \sim 51.8\%$)。

3.4 斜长石

斜长石普遍存在于各种岩性中,常呈半自形-自形或半自形-它形板柱状,镜下观察表明绝大多数斜长石结晶晚于单斜辉石(图 2c)。电子探针数据见表 6。

研究区内成矿岩体岩石中的斜长石多为基性斜长石,主要为倍长石和拉长石,图拉尔根和圪塔山口岩体还存在少量钙长石。中性斜长石主要出现在黄山岩体群的成矿岩体中,以中长石为主(图 6)。整体上看,成矿岩体中超镁铁质岩相既有基性斜长石(主要是倍长石和拉长石),又有中性斜长石(主要为中长石),而镁铁质岩相又可见倍长石,表明斜长石的 An 大小和岩石基性程度之间并无相关性。

3.5 角闪石和金云母

角闪石在所有岩石类型中的含量变化不大。镜下观察表明角闪石以褐色角闪石为主,也可见淡绿色角闪石,呈它形-半自形长柱状或粒状(图 2d),发生不同程度的绿泥石化、纤闪石化。部分角闪石以填隙物的形式存在,充填于其它矿物粒间。金云母为淡棕色片状(图 2d),普遍存在于东天山成矿岩体

表 3 研究区橄榄石电子探针数据结果

$w_B/\%$

Table 3 Electron microprobe analyses of olivine from the study area												
岩体	样号	岩性	<i>n</i>	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Total
白鑫滩	BXT-1	辉石橄榄岩	5	40.00	0.02	0.03	15.37	0.26	44.00	0.10	0.21	99.98
	BXT-2	辉石橄榄岩	7	38.96	0.03	0.08	14.59	0.25	44.95	0.12	0.26	99.24
	BXT-3	辉石橄榄岩	2	39.23	0.03	0.09	16.90	0.31	43.90	0.13	0.18	100.77
	BXT-4	辉石橄榄岩	3	39.58	0.01		16.25	0.28	42.99	0.06	0.20	99.38
	BXT-5	辉石橄榄岩	2	40.33		0.06	14.60	0.23	44.97	0.11	0.22	100.52
	BXT-6	橄榄苏长岩	2	40.11	0.02	0.03	15.38	0.22	44.16	0.13	0.13	100.18
	BXT-7	辉石橄榄岩	1	39.97	0.08	0.03	15.42	0.29	42.18	0.17	0.16	98.31
	BXT-8	辉石橄榄岩	8	40.42	0.07	0.03	15.07	0.25	43.01	0.13	0.20	99.17
	BXT-9	辉石橄榄岩	3	40.72	0.01	0.03	14.07	0.23	44.20	0.12	0.24	99.61
	BXT-10	橄榄苏长岩	5	40.06	0.02	0.03	16.21	0.26	43.76	0.09	0.15	100.58
	BXT-11	辉石橄榄岩	3	40.00	0.02	0.03	16.37	0.25	43.40	0.11	0.22	100.39
	BXT-12	辉石橄榄岩	9	39.74	0.02	0.04	16.51	0.27	43.14	0.11	0.20	100.02
	BXT-13	橄榄苏长岩	2	39.54			17.97	0.26	41.04	0.11	0.19	99.11
	BXT-14	橄榄苏长岩	2	39.34	0.01	0.01	19.84	0.32	40.29	0.07	0.23	100.10
	BXT-15	橄榄苏长岩	5	39.13	0.03	0.08	15.12	0.29	44.64	0.12	0.15	99.57
香山	XS-1	角闪辉橄岩	9	40.25	0.02	0.03	15.31	0.24	42.80	0.06	0.13	98.85
	XS-2	单辉橄岩	8	40.47	0.02	0.06	16.14	0.26	42.37	0.04	0.21	99.57
	XS-3	二辉橄岩	9	40.15	0.02	0.02	16.35	0.27	42.10	0.03	0.21	99.15
	XS-4	单辉橄岩	9	40.50	0.02	0.05	15.85	0.25	42.72	0.05	0.12	99.57
	XS-5	橄榄辉长岩	6	38.93	0.05	0.36	22.10	0.34	37.29	0.07	0.06	99.19
	XS-8	角闪橄岩	8	40.05	0.02	0.02	16.00	0.26	43.53	0.07	0.16	100.11
	XS-9	角闪辉橄岩	8	39.69	0.02	0.02	14.96	0.23	44.87	0.05	0.17	100.01
黄山南	HSN-2	橄榄辉长岩	6	39.76			17.20	0.27	42.62	0.01	0.11	99.97
	HSN-3	橄榄辉长岩	8	39.67	0.03		17.11	0.25	42.78	0.01	0.12	99.97
	HSN-4	橄榄辉长岩	8	39.98	0.01	0.03	16.70	0.25	43.41	0.01	0.09	100.48
	HSN-5	橄榄辉长岩	9	39.66	0.01		18.78	0.29	41.40	0.01	0.13	100.28
	HSN-6	橄榄辉长岩	5	39.66	0.02		18.93	0.30	41.62	0.01	0.13	100.67
	HSN-7	橄榄辉长岩	9	39.70	0.05		18.94	0.24	41.51	0.01	0.10	100.55
圪塔山口	GT-1	辉石橄榄岩	2	39.01	0.01	0.08	17.69	0.32	40.25	0.07	0.08	97.87
	GT-2	辉石橄榄岩	3	40.19	0.05	0.11	14.2	0.24	44.25	0.13	0.22	99.72
	GT-3	辉石橄榄岩	1	40.38	0.07	0.16	14.68	0.27	43.62	0.12	0.16	99.55
	GT-4	辉石橄榄岩	2	39.55	0.05	0.06	15.46	0.24	42.48	0.12	0.16	98.17

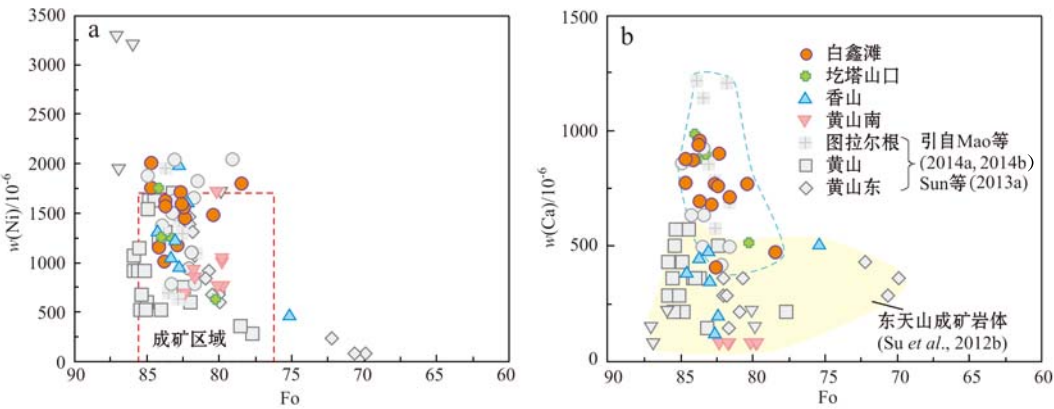


图 4 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体橄榄石石的 Ni- Fo 图解(a)和 Ni- Fo 图解(b)

Fig. 4 Ni versus Fo (a) and Ca versus Fo (b) diagrams for olivine from ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains

表 4 研究区斜方辉石电子探针数据结果

$w_B/\%$

Table 4 Major element compositions of orthopyroxene in the study area

岩体	样号	岩性	<i>n</i>	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total
白鑫滩	BXT-1	辉石橄榄岩	5	55.58	0.24	1.52	0.22	10.53	0.29	30.02	0.98	99.38
	BXT-2	辉石橄榄岩	2	55.97	0.26	1.04	0.16	10.37	0.28	30.33	1.06	99.47
	BXT-3	辉石橄榄岩	1	56.69	0.21	1.61	0.22	10.25	0.38	30.90	1.01	100.23
	BXT-4	辉石橄榄岩	1	55.52	0.09	1.31	0.16	12.42	0.33	28.38	1.00	99.19
	BXT-6	辉石橄榄岩	1	56.72	0.09	0.91	0.19	10.31	0.24	30.86	0.97	100.29
	BXT-7	辉石橄榄岩	1	55.91	0.13	1.33	0.15	10.83	0.27	30.09	0.79	99.49
	BXT-8	辉石橄榄岩	1	54.67	0.46	1.77	0.30	10.75	0.38	30.98	1.16	100.47
香山	XS-1	二辉橄榄岩	3	55.49	0.00	1.42	0.35	8.92	0.21	31.81	0.85	99.05
	XS-6	橄榄辉长岩	2	55.02	0.49	1.84	0.35	9.54	0.23	30.90	1.24	99.61
	XS-7	橄榄辉长岩	2	56.53	0.20	1.68	0.28	9.67	0.17	31.09	1.03	100.65
黄山南	HSN-1	橄榄辉长岩	2	53.92	0.35	2.67	0.09	14.21	0.30	26.23	1.75	99.52
	HSN-3	橄榄辉长岩	3	54.63	0.23	3.66	0.16	9.93	0.24	29.41	1.86	100.12
	HSN-5	橄榄辉长岩	1	55.58	0.03	2.87		12.01	0.26	29.42	0.81	100.98
	HSN-8	辉长苏长岩	1	54.08	0.25	1.73	0.14	16.48	0.30	25.94	1.05	99.97
	HSN-9	辉长苏长岩	2	54.00	0.26	1.72	0.17	16.00	0.31	24.75	2.89	100.10
	HSN-10	辉长苏长岩	2	53.51	0.30	1.70	0.28	17.91	0.36	24.1	1.86	100.02
圪塔山口	GT-1	辉石橄榄岩	2	54.72	0.57	2.33	0.31	10.41	0.25	29.91	1.28	99.78
	GT-2	辉石橄榄岩	3	56.25	0.33	0.88	0.15	9.80	0.24	30.12	1.15	98.92
	GT-3	辉石橄榄岩	1	56.24	0.28	0.91	0.17	10.1	0.21	30.14	1.10	99.11
	GT-4	辉石橄榄岩	2	54.63	0.52	2.34	0.37	10.32	0.26	29.38	1.13	98.95
	GT-5	橄榄辉石岩	2	56.36	0.21	1.27	0.28	9.89	0.27	29.91	1.01	99.20

表 5 研究区单斜辉石电子探针数据结果

$w_B/\%$

Table 5 Electron microprobe analyses of clinopyroxene in the study area

岩体	样号	岩性	<i>n</i>	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total
白鑫滩	BXT-3	辉石橄榄岩	3	51.58	0.50	3.12	0.93	4.77	0.13	16.51	21.02	98.56
	BXT-4	辉石橄榄岩	1	51.81	0.56	3.01	0.96	5.11	0.11	15.74	20.71	98.01
	BXT-9	橄榄辉长岩	2	51.32	0.71	3.70	1.18	5.59	0.18	15.45	20.91	99.04
	BXT-10	橄榄辉长岩	3	51.78	0.57	3.61	1.02	4.91	0.21	16.72	20.94	99.76
香山	XS-1	角闪辉橄榄岩	4	53.81	0.44	2.46	0.72	4.50	0.13	17.91	18.08	98.05
	XS-2	单辉橄榄岩	3	52.20	0.7	3.17	0.42	4.82	0.13	15.18	21.54	98.16
	XS-3	二辉橄榄岩	4	53.01	0.43	2.60	0.32	4.47	0.17	15.72	22.32	99.04
	XS-4	单辉橄榄岩	3	52.62	0.51	3.23	0.34	5.50	0.15	16.55	19.64	98.54
	XS-5	橄榄辉长岩	1	51.33	1.01	3.33	0.43	6.13	0.20	14.21	22.02	98.66
黄山南	HSN-1	橄榄辉长岩	2	52.31	0.46	4.27	0.41	6.36	0.19	17.92	16.71	98.63
	HSN-3	橄榄辉长岩	3	52.20	0.73	2.47	0.32	7.38	0.18	14.84	20.83	98.95
	HSN-8	辉长苏长岩	1	52.04	0.58	2.37	0.22	8.66	0.18	14.26	20.44	98.75
圪塔山口	GT-1	辉石橄榄岩	6	51.01	0.73	3.86	1.04	5.15	0.12	16.13	20.8	98.84
	GT-3	辉石橄榄岩	5	53.31	0.4	2.31	0.58	5.00	0.19	17.41	20.61	99.81
	GT-4	辉石橄榄岩	2	51.10	0.77	3.81	0.97	5.09	0.13	15.92	21.04	98.83
	GT-5	橄榄辉石岩	3	52.84	0.47	2.49	0.76	4.77	0.15	17.31	21.13	99.92

的超镁铁质岩石中,含量较少。

综上所述,东天山造山带镁铁-超镁铁质成矿岩体的主要造岩矿物为贵橄榄石、古铜辉石、单斜辉石、角闪石和斜长石,含有少量的铬尖晶石和金云母,不同岩体群主要造岩矿物的含量和化学成分之间的变化总结见表 7。

4 讨论

4.1 造岩矿物结晶条件估算

岩浆结晶的温度压力条件对于认识成岩作用及其过程具有重要意义。目前,大部分矿物的结晶温

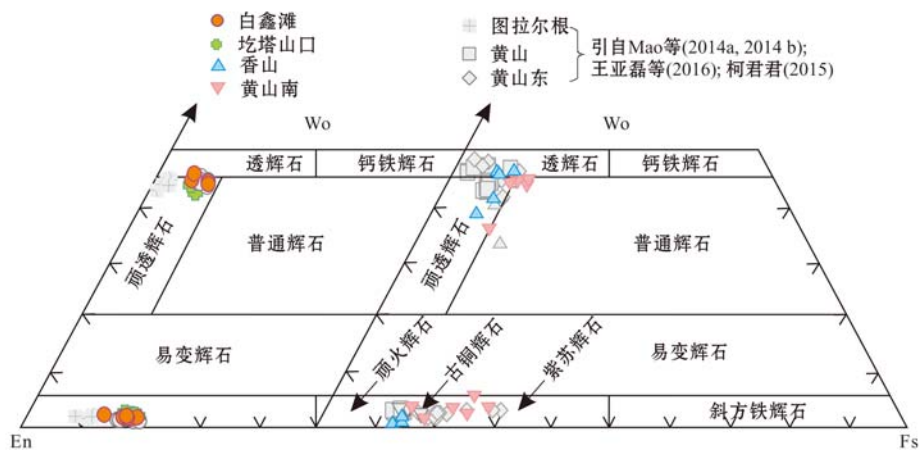


图 5 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体辉石判别图解

Fig. 5 En - Wo - Fs triangular diagram for pyroxene classification of ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains

表 6 研究区斜长石电子探针数据结果 w_B/%

Table 6 Electron microprobe analyses of plagioclase in the study area

岩体	样号	岩性	n	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An
白鑫滩	BXT-1	辉石橄榄岩	2	52.44	29.61	0.44	0.06	13.12	4.21	0.12	100.00	62.8
	BXT-2	辉石橄榄岩	1	51.48	31.13	0.38	0.08	7.98	8.81	0.02	99.88	33.3
	BXT-3	辉石橄榄岩	1	50.12	31.00	0.56	0.04	15.03	3.22	0.07	100.04	71.7
	BXT-4	辉石橄榄岩	1	51.22	30.30	0.46	0.07	14.37	3.45	0.07	99.94	69.5
	BXT-5	辉石橄榄岩	2	52.34	29.70	0.43	0.09	13.58	3.79	0.10	100.03	66.1
	BXT-6	辉石橄榄岩	2	50.00	31.02	0.52	0.03	15.21	3.04	0.04	99.86	73.3
	BXT-7	辉石橄榄岩	1	51.20	30.40	0.48	0.01	14.32	3.49	0.04	99.94	69.2
	BXT-8	辉石橄榄岩	1	50.02	31.08	0.69	0.32	14.94	2.85	0.02	99.92	74.3
	BXT-9	橄榄辉长岩	5	50.21	30.94	0.59	0.03	15.44	2.85	0.06	100.12	74.6
香山	XS-1	二辉橄榄岩	2	49.94	31.21	0.20	0.02	14.97	2.86	0.08	99.28	74.0
	XS-2	二辉橄榄岩	1	61.42	23.74	0.05		6.46	8.47	0.01	100.15	29.7
	XS-6	橄榄辉长岩	3	48.93	31.63	0.26	0.07	15.92	2.49	0.02	99.32	77.8
	XS-10	角闪辉长岩	3	47.74	32.22	0.46	0.01	16.81	2.02	0.03	99.29	81.9
	XS-11	辉长岩	6	53.21	29.31	0.39	0.02	12.87	4.10	0.11	100.01	63.2
	XS-12	辉长岩	4	50.32	30.94	0.34		14.95	3.06	0.07	99.68	72.8
	XS-13	辉长岩	3	55.09	28.82	0.35	0.01	11.72	4.60	0.08	100.67	58.2
黄山南	HSN-1	橄榄辉长岩	6	53.73	28.31	0.13		11.84	4.76	0.05	98.82	57.6
	HSN-3	橄榄辉长岩	2	51.44	29.78	0.07		13.51	3.83	0.01	98.64	66.0
	HSN-5	橄榄辉长岩	2	52.13	29.69	0.19		13.32	3.99	0.10	99.42	64.5
	HSN-8	辉长苏长岩	11	54.32	28.02	0.16		11.33	4.71	0.46	99.00	55.6
	HSN-9	辉长苏长岩	5	55.94	26.98	0.14		10.04	5.35	0.59	99.04	49.2
	HSN-10	辉长苏长岩	7	55.65	27.32	0.18		10.40	5.31	0.50	99.36	50.5
	HSN-11	橄榄辉长岩	6	53.71	28.26	0.13		11.75	4.76	0.05	98.66	57.6

度计是在无水的实验系统下得到的,且通常需要假设条件并设定一系列参数,因而在使用不同的设置时往往出现很大的偏差。Wan 等(2013)基于橄榄石和铬尖晶石间的 Al 平衡交换提出了橄榄石尖晶石 Al 温度计。由于该温度计不受熔体成分、熔体中水含量以及橄榄石结晶分异或堆晶的影响 (Coogan *et al.*, 2014; Xu and Liu, 2016; 张柳毅等, 2016), 所以更适用于侵入岩矿物的结晶温度计算。镜下鉴定表明橄榄石和尖晶石是最先结晶的矿物, 因此二者的结晶温度可以用来指示岩浆温度的下限和固相

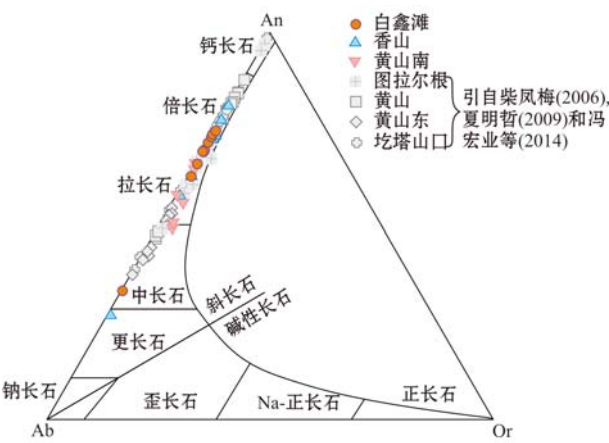


图 6 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体斜长石判别图解
Fig. 6 An - Ab - Or triangular diagram for plagioclase classification of ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains

开始晶出的温度上限。Coogan 等(2014) 针对该地质温度计中 Al 的配分系数可能受到系统 SiO₂ 含量影响的问题对公式进行了改进,新的计算公式如下:
$$T(K) = 10\,000/[0.575 + 0.884 Cr^\# - 0.897 \ln(k_d)](k_d = Al_2O_3^{橄} / Al_2O_3^{尖})$$

由于引用数据没有成对的单矿物分析数据,因此采用岩石的晶体化学平均值参与计算。详细的计算条件和注意事项见 Xu 和 Liu(2016)。计算结果表明,白鑫滩和圪塔山口岩体橄榄石和尖晶石的结晶温度为1 283~1 301℃,而黄山岩体群内典型岩体的结晶温度低于前者,在1 143~1 257℃之间(表 8)。前人对东天山镁铁-超镁铁质岩体进行的 MEITS 模拟与矿物平衡计算表明这些岩体的母岩浆初始演化的温度介于1 245~1 320℃之间(Zhang *et al.*, 2011;

表 7 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体矿物成分特征

Table 7 Mineralogical characteristics of the ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains

岩体群	岩体	铬尖晶石平均 Cr [#]	橄榄石 Ca 含量/10 ⁻⁶	斜方辉石 En	单斜辉石 Mg [#]	超基性岩中斜长石 An
图拉尔根	圪塔山口	50.2~60.8(55.7)	500~929	79.4~81.3	85.4~87.7	39.0~99.8
	图拉尔根		585~1250	86.7~89.7	84.7~86.2	68.9~98.7
黄山	黄山	30.6~65.5(45.1)	143~571	83.5~85.9	86.3~87.6	47.6~83.4
	黄山东	36.4~49.4(45.1)	143~429	67.1~81.2	74.9~87.5	
	黄山南	14.8~63.2(51.3)	71~214	68.2~81.1	74.7~83.4	
	香山	45.0~54.0(49.6)	214~500	83.4~85.1	84.3~87.6	29.7~74.0
白鑫滩	白鑫滩	52.7~76.3(60.0)	407~953	76.9~84.7	83.2~86.1	33.3~74.3

表 8 矿物温压计算结果

Table 8 Crystallization temperatures and pressure estimates for olivines and pyroxenes

岩体	白鑫滩	圪塔山口	香山	黄山	黄山东	黄山南
平均结晶温度/℃	1 295	1 283	1 143	1 124	1 257	1 221
平均结晶压力/GPa	0.32	0.32	0.31	0.31	0.33	—

Sun *et al.*, 2013a, 2013b; 王亚磊等, 2015; Mao *et al.*, 2016),与本次研究计算结果一致,因此这一温度计的计算结果是可信的。

目前对低压相样品的压力计算主要有 2 种方法,Kohler 和 Brey(1990)根据 Ca 在共生的橄榄石和单斜辉石之间的平衡分配建立了橄榄石-单斜辉石 Ca 交换反应的的压力计,但由于在引用文献中无法确定矿物的共生关系而无法使用。Nimis 和 Ulmer(1998)结合 100 多套新的实验数据,根据单斜辉石中的原子配位关系建立了适合单斜辉石结晶时压力的压力计,适用范围较广,因此本文选择该压力计估算辉石结晶压力,估算结果(表 8)表明东天山岩带内与铜镍硫化物有关的镁铁-超镁铁质岩体辉石的结

晶压力相似,介于 0.31~0.33 GPa 之间。

Ballhaus 等(1991)基于尖晶石-橄榄石平衡得出了适用于高压环境下的岩浆氧逸度计算公式,但不适合本文使用。Barnes 等(2013)研究表明硫化物熔体和橄榄石饱和的硅酸盐熔体之间的交换系数 $K_D [(X_{NiS}/X_{FeS})_{硫化物}/(X_{NiO}/X_{FeO})_{橄榄石}]$ 与硫化物熔体中的 Ni + Cu 含量和氧逸度(f_{O_2})之间存在一个非常重要的非线性方程,我们用该公式来计算东天山成矿岩体岩浆硫化物系统的氧化状态。选取白鑫滩矿床中 3 个含有浸染状硫化物的辉石橄榄岩样品估算硫化物熔离时的氧逸度(橄榄石组分和硫化物 Ni + Cu 含量另文发表),结果示于图 7 中。计算表明白鑫滩矿床的氧逸度介于 QFM + 1~QFM + 1.5 之

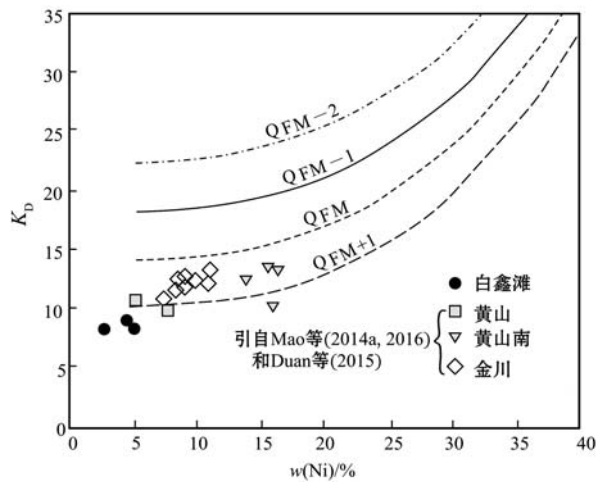


图7 东天山典型 Cu-Ni 硫化物矿床氧逸度

Fig. 7 Oxygen fugacity of the Cu-Ni sulfide deposits in East Tianshan Mountains

计算方法参考 Barnes 等(2013), 用橄榄石组分和硫化物中的 Ni 含量进行计算

The base of the plot are from Barnes *et al.* (2013), determined using olivine compositions and Ni contents in bulk sulfide

间, 高于黄山、黄山南矿床和金川矿床(Mao *et al.*, 2014a, 2016; Duan *et al.*, 2015)。东天山镁铁-超镁铁质岩体的岩浆通常在结晶分异过程中发生硫化物熔离(Sun *et al.*, 2013a, 2013b; Mao *et al.*, 2014a, 2016), 因此岩浆结晶分异和硫化物系统具有相似的氧化状态。白鑫滩岩体中铬尖晶石的 Fe^{3+} 含量大于黄山和黄山南岩体, 也表明前者岩浆结晶时的氧逸度大于后者。图拉尔根岩体群的成矿岩体因未有相关数据发表而未列入计算, 有待下一步继续研究。

4.2 岩浆源区性质

实验岩石学表明含水和无水的玄武质岩浆具有不同的演化轨迹。Niu 等(2002)、Barsdell 和 Berry (1990)分别总结了 N-MORB(干)和岛弧(湿)拉斑玄武质熔体的分异演化路径, 认为单斜辉石和斜长石的结晶顺序由岩浆中的含水量控制, 即贫水岩浆中斜长石结晶早于单斜辉石, 而富水岩浆中单斜辉石结晶早于斜长石。镜下鉴定表明研究区内成矿岩体的单斜辉石结晶早于斜长石, 未见橄长岩等指示无水环境的岩石类型, 表明岩浆形成于富水环境。Langmuir 等(1993)研究表明在高压条件下无水的玄武质岩浆中辉石可能会提前结晶, 但这需要大于 0.8 GPa 的压力环境, 远高于成矿岩体的结晶压力

(~0.3 GPa)。此外, 研究区内岩体中常见角闪石和金云母, 也说明幔源岩浆形成于多水的环境(如岛弧玄武质岩浆)。

前人研究表明, 无水环境下单斜辉石类质同像置换方式为 $^{\text{VI}}\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Si}_2 \rightleftharpoons ^{\text{VI}}\text{Ti}^{\text{IV}}\text{Al}_2$, 而在富水环境下为 $^{\text{VI}}\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Si} \rightleftharpoons ^{\text{VI}}\text{Fe}^{3+} + ^{\text{IV}}\text{Al}$ (Loucks, 1990; Vuorinen *et al.*, 2005)。因此, 单斜辉石 Al/Ti 比值可以用来识别造山带中俯冲板片交代作用。Loucks(1990)通过镁铁-超镁铁质岩石中单斜辉石的 Alz(占据单斜辉石四面体位置的 Al^{IV})与 Ti(占据单斜辉石八面体位置的 Ti)的图解, 得出弧相关的堆晶岩 Alz/Ti 比值明显高于与裂谷相关的拉斑玄武岩的结论。将研究区内成矿岩体中的单斜辉石样品点投入图 8 中, 呈现出与弧相关堆晶岩相似的演化趋势, 不同于新疆北山镁铁-超镁铁质岩体(Su *et al.*, 2013b)。此外, 铬尖晶石图解和橄榄石 Ca 含量也表明东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体与岛弧玄武岩和与之有关的侵入岩相似。氧逸度图解显示白鑫滩岩体全部样品以及黄山、黄山南岩体部分样品落在 QFM + 1 的下方(图 7), 位于与岛弧环境有关的交代地幔的氧逸度范围内(QFM + 1 ~ QFM + 2, Ballhaus *et al.*, 1991)。鉴于东天山造山带的俯冲碰撞事件结束于晚石炭世(顾连兴等, 1994; 李锦铁等, 2006; 李建忠等, 2010), 因此, 我们认为研究区内成矿岩体的原始岩浆是被消减板片交代过的地幔部分熔融的产物。

4.3 矿物学特征对地壳混染程度的约束

地壳物质的混染对岩浆演化过程中硫饱和具有重要意义(Naldrett, 2004; Ripley and Li, 2013)。前人通过测试分析东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体的 Sr、Nd、Hf、O 同位素以及微量元素特征(Su *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011; 焦健刚等, 2012; Sun *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2015; Mao *et al.*, 2016), 认为岩体均源自于亏损地幔, 并且经历了地壳物质的混染, 从而导致岩浆中硫的溶解度降低并达到硫化物饱和(Zhang *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2013a, 2013b; Tang *et al.*, 2015; 王亚磊等, 2015; Mao *et al.*, 2016)。成矿岩体中斜方辉石的大量出现指示岩浆体系 SiO_2 过饱和, 可能是富硅的地壳物质混染所致(Zhang *et al.*, 2009a, 2009b)。此外, 研究区内岩体斜长石 An 的大小和岩石基性程度之间不协调, 例如在超基性岩相可见中长石, 也表明岩浆演化过程中存在地壳物质的混染。

黄山岩体群内成矿岩体普遍发育橄榄苏长岩、

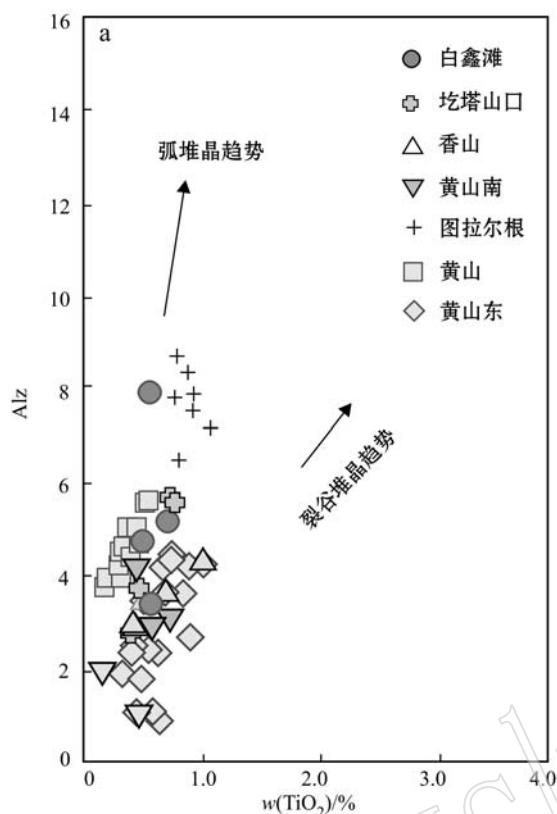


图8 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体单斜辉石
Alz - TiO₂ 相关图解(据 Loucks, 1990)

Fig. 8 Alz - TiO₂ diagram of clinopyroxenes from ore-hosting mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains(after Loucks, 1990)

苏长岩等富斜方辉石的岩相,而在其它两个岩体群内少见,表明前者的母岩浆更富硅。铬尖晶石 Cr[#]值、橄榄石 Ca 含量以及斜长石 An 也表明其母岩浆的基性程度较其它两个岩体群低。上述差异说明如果不是原始岩浆物质来源存在差别,就一定是岩浆经历了不同程度的混染作用。模拟结果显示研究区内成矿岩体原始岩浆 MgO 含量相近(~15%, Zhang *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2013a; Mao *et al.*, 2014b, 2016),表明其原始岩浆均为地幔相似熔融程度的产物,推断不同成矿岩体的原始岩浆具有相似的性质。因此,矿物学特征之间的差异可解释为黄山岩体群内成矿岩体的混染程度高于其它两个岩体群,导致岩浆相对富 SiO₂ 和 Al₂O₃。矿物温压计算显示了不同成矿岩体具有相似的结晶压力,但黄山岩体群内成矿岩体的母岩浆结晶温度相对较低。该结果也可用混染程度不同来解释。同位素模拟计算表明黄山东、黄山南岩体分别经历了~30%和~

20%的地壳混染(Sun *et al.*, 2013a; Mao *et al.*, 2016),远高于葫芦岩体(~10%, Tang *et al.*, 2015)、图拉尔根岩体(~5%, 焦健刚等, 2012)和白鑫滩岩体(~10%, 王亚磊等, 2016),也说明黄山岩体群内成矿岩体的混染程度高于其它两个岩体群。

5 结论

(1) 东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体的主要造岩矿物为贵橄榄石、古铜辉石、单斜辉石、斜长石和角闪石,并含有少量的铬尖晶石和金云母。

(2) 橄榄石-尖晶石温度计和单斜辉石压力计结果表明黄山岩体群内成矿岩体母岩浆的结晶温度(1 143~1 257℃)略低于白鑫滩和图拉尔根岩体群(1 283~1 301℃),但都具有相似的结晶压力(0.31~0.33 GPa)。

(3) 成矿岩体矿物组成、结晶顺序以及单斜辉石 Al/Ti 值均指示了幔源岩浆形成于富水的环境,结合铬尖晶石和橄榄石与岛弧火山岩相似的矿物学特征以及岩浆氧逸度的范围,表明东天山镁铁-超镁铁质成矿岩体的原始岩浆是被消减板片交代过的地幔部分熔融的产物。

(4) 成矿岩体矿物学特征表明幔源岩浆在上侵的过程中混染了富硅铝的地壳物质,且黄山岩体群的混染程度高于白鑫滩和图拉尔根岩体群。

致谢 在野外工作期间,得到新疆有色地勘局三金柱副总工、704 队陈寿波总工和郭海兵总经理、地质六大队邓刚总工、新疆地矿局第一区域地质调查大队李鑫工程师、亚克斯资源开发股份有限公司谢军辉工程师的大力支持和帮助;白开寅、刘民武、王柱命、何克老师在薄片鉴定及分析测试过程中给予指导和帮助;审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并致谢!

References

- Ballhaus C, Berry R F and Green D H. 1991. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 107(1): 27~40.
- Barnes S J and Roeder P L. 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks[J]. J. Petrology, 42(12): 2095~2111.

- 2 279~2 302.
- Barnes S J, Godel B, Güler D, *et al.* 2013. Sulfide-olivine Fe-Ni exchange and the origin of anomalously Ni rich magmatic sulfides[J]. *Economic Geology*, 108(8): 1 971~1 992.
- Barsdell M and Berry R F. 1990. Origin and evolution of primitive island arc ankaramites from western Epi, Vanuatu[J]. *Journal of Petrology*, 31(3): 747~777.
- Chai Fengmei. 2006. Comparison on Petrologic Geochemistry of Three Mafic-ultramafic Intrusions Associated with Ni-Cu Sulfide Deposits in Northern Xinjiang[D]. China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Coogan L A, Sanunders A D and Wilson R N. 2014. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces[J]. *Chemical Geology*, 368(4): 1~10.
- Deng Y F, Song X Y, Chen L M, *et al.* 2014. 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*, 56: 181~198.
- Duan J, Li C, Qian Z Z, *et al.* 2015. Multiple S isotopes, zircon Hf isotopes, whole-rock Sr-Nd isotopes, and spatial variations of PGE tenors in the Jinchuan Ni-Cu-PGE deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 51(4): 557~574.
- Fabriès J. 1979. Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(4): 329~336.
- Feng Hongye, Xu Yingxia, Qin Kezhang, *et al.* 2014. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Getashankou mafic-ultramafic intrusions, eastern Tianshan, and its implication for Ni-Cu mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1 558~1 574(in Chinese with English abstract).
- Gu Lianxing and Wang Jinzhu. 1994. The east Xinjiang-type mafic-ultramafic complexes in orogenic environments[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (4): 399~356(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in Kalatongke and Huangshan, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2 324~2 328(in Chinese with English abstract).
- Han C, Xiao W, Zhao G, *et al.* 2010. 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*, 120: 547~562.
- Jiang Chao, Qian Zhuangzhi, Yang Suhong, *et al.* 2015. Genesis of Xiangshan Cu-Ni sulfide and Ti-Fe oxide deposit in eastern Tianshan Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 34(5): 913~928(in Chinese with English abstract).
- Jiao Jiangang, Tang Zhongli, Qian Zhangzhi, *et al.* 2012. Genesis and metallogenic process of Tulargen large scale Cu-Ni sulfide deposit in eastern Tianshan area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3 772~3 786(in Chinese with English abstract).
- Ke Junjun. 2015. Research on Petrology and Mineralogy of Tulargen Ni-Cu Deposits, Eastern Xinjiang[D]. China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Kohler T P and Brey G P. 1990. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 54(9): 2 375~2 388.
- Langmuir C H, Klein E M and Plank T. 1993. Petrological systematics of mid-ocean ridge basalts: Constraints on melt generation beneath ocean ridges[J]. *Mantle flow and melt generation at mid-ocean ridges*: 183~280.
- Lehmann J. 1983. Diffusion between olivine and spinel: application to geothermometry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(1): 123~138.
- Li C, Thakurta J and Ripley E M. 2012. Low-Ca contents and kink-banded textures are not unique to mantle olivine: evidence from the Duke Island Complex, Alaska[J]. *Mineralogy and Petrology*, 104(3): 147~153.
- Li Jianping, Kornprost J and Provost A. 1995. Spinel As a Chemical Indicator During Partial Melting and Subsidiary Equilibration of Mantle Peridotite: Experimental Study and Application in Natural Rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 75~90(in Chinese with English abstract).
- Li Jianzhong, Wu Xiaozhi, Qi Xuefeng, *et al.* 2010. Distribution and tectonic setting of Upper Paleozoic volcanic rock in northern Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 95~206(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, *et al.* 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148~168(in Chinese with English abstract).
- Loucks R R. 1990. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene[J]. *Geology*, 18(4): 346~349.

- 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(2): 184~203.
- Mao Y J, Qin K Z, Li C, *et al.* 2014a. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China[J]. *Lithos*, 201(1): 111~125.
- Mao Y J, Qin K Z, Tang D M, *et al.* 2016. Crustal contamination and sulfide immiscibility history of the Permian Huangshannan magmatic Ni-Cu sulfide deposit, East Tianshan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129: 22~37.
- Mao Y J, Qin K Z, Li C, *et al.* 2014b. A modified genetic model for the Huangshandong magmatic sulfide deposit in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, western China[J]. *Mineralium Deposita*, 50(1): 65~82.
- Naldrett A J. 2004. An overview of Ni-Cu mineralization with conclusion guide in exploration[A]. *International Geological Correlation Programme. IGCP479 Short Course Notes[C]*, 154~164.
- Nimis P and Ulmer P. 1998. Clinopyroxenegeobarometry of magmatic rocks Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133(1): 122~135.
- Niu Y, Regelous M, Wendt I J, *et al.* 2002. Geochemistry of near-EPR seamounts: importance of source vs. process and the origin of enriched mantle component[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(3): 327~345.
- Pirajno F, Mao J W, Zhang Z C, *et al.* 2008. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tian Shan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2): 165~183.
- Qian Zhuangzhi, Duan Jun, Feng Yanqing, *et al.* 2015. Main metallogenic tectonic settings of magmatic Cu-Ni (PGE) sulfide deposits in China[J]. *Engineering Sciences*, 17(2): 19~28(in Chinese with English abstract).
- Qian Zhuangzhi, Sun Tao, Tang Zhongli, *et al.* 2009. Platinum-group elements geochemistry and its significances of the Huangshandong Ni-Cu sulfide deposit, East Tianshan, China[J]. *Geological Review*, 55(6): 873~884(in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Ding Kuishou, Xu Yingxia, *et al.* 2007. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Su B X, Sakyi 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.
- Qin Kezhang, Tang Dongmei, Su Benxun, *et al.* 2012. The tectonic setting, style, basic fracture, relative erosion deee, ore-bearing evaluation sign, potential analysis of mineralization of cu-ni-bearing permian mafic-ultramafic complexes, northern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 83~116(in Chinese with English abstract).
- Ripley E M and Li C. 2013. Sulfide saturation in mafic magmas: is external sulfur required for magmatic Ni-Cu-(PGE) ore genesis[J]. *Economic Geology*, 108: 45~58.
- San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Zhongli, *et al.* 2010. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargenlarge Cu-Ni district and its geological implications.[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3 027~3 035(in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Xie W, Deng Y F, *et al.* 2011. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China[J]. *Lithos*, 127(1): 128~143.
- Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, *et al.* 2011. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume[J]. *Gondwana Research*, 20: 516~531.
- Su B X, Qin K Z, Sun H, *et al.* 2012a. Subduction-induced mantle heterogeneity beneath Eastern Tianshan and Beishan: Insights from Nd-Sr-Hf-O isotopic mapping of Late Paleozoic mafic-ultramafic complexes[J]. *Lithos*, s134~135(2): 41~51.
- Su B X, Qin K Z, Sun H, *et al.* 2012b. Olivine compositional mapping of mafic-ultramafic complexes in Eastern Xinjiang(NW China): Implications for mineralization and tectonic dynamics[J]. *Journal of Earth Science*, 23(1): 41~53.
- Su B X, Qin K Z, Tang D M, *et al.* 2013a. Late Paleozoic mafic-ultramafic intrusions in southern Central Asian Orogenic Belt(NW China): insight into magmatic Ni-Cu sulfide mineralization in orogenic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 51(2): 57~73.

- Su B X, Qin K Z, Santosh M, *et al.* 2013b. The Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan Terrane, NW China: Alaskan-type intrusives or rift cumulates? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66(4): 175~187.
- Sun T, Qian Z Z, Deng Y F, *et al.* 2013a. PGE and isotope(Hf-Sr-Nd-Pb)constraints on the origin of the Huangshandong magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Central Asian orogenic belt, northwestern China [J]. *Economic Geology*, 108(8): 1 849~1 864.
- Sun T, Qian Z Z, Li C, *et al.* 2013b. 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*, 183(7): 185~199.
- Sun T, Wang D H, Qian Z Z, *et al.* 2015. A preliminary review of the metallogenic regularity of nickel deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 89(4): 1 375~1 397.
- Sun Tao, Qian Zhangzhi, Tang Zhongli, *et al.* 2010. Zircon U-Pb chronology, platinum group element geochemistry characteristics of Hulu Cu-Ni deposit, East Xinjiang, and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3 339~3 349(in Chinese with English abstract).
- Tang D M, Qin K Z, Su B X, *et al.* 2013. Magma source and tectonics of the Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: traced from geochemical and isotopic signatures[J]. *Lithos*, 170(6): 144~163.
- Tang D M, Qin K Z, Sun H, *et al.* 2015. Petrogenesis and mineralization of the Hulu Ni-Cu sulphide deposit in Xinjiang, NW China: constraints from Sr-Nd isotopic and PGE compositions[J]. *International Geology Review*, 56(6): 711~733.
- Vuorinen J H, Halenius U, Whitehouse M J, *et al.* 2005. Compositional variations (major and trace elements) of clinopyroxene and Ti-andradite from pyroxenite, ijolite and nepheline syenite, Alnö Island, Sweden[J]. *Lithos*, 81(1): 55~77.
- Wan Z, Coogan L A and Canil D. 2013. Experimental calibration of aluminum partitioning between olivine and spinel as a geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 93(7): 1 142~1 147.
- Wang Yalei, Zhang Zhaowei, You Minxin, *et al.* 2015. Chronological and geochemical characteristics of the Baixintan Ni-Cu deposit in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, and their implications for Ni-Cu mineralization[J]. *Geology in China*, 42(3): 452~467(in Chinese with English abstract with English abstract).
- Wang Yalei, Zhang Zhaowei, Zhang Jiangwei, *et al.* 2016. Mineralogy and Sr-Nd isotope characteristics of Baixintan Ni-Cu deposit in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, and mineralization process[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2 747~2 758(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Li Dedong, *et al.* 2013. Types, temporal-spatial distribution and metallogenic lineage of ore deposits related to mantle-derived magma in northern Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 32(2): 223~243(in Chinese with English abstract).
- Xia Mingzhe. 2009. The Mafic-ultramafic Intrusions in the Huangshan Region Eastern Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and Mineralization Implication[D]. Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Xiao Y, Teng F Z, Su B X, *et al.* 2016. Iron and magnesium isotopic constraints on the origin of chemical heterogeneity in podiform chromitite from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17: 940~953.
- Xu R and Liu Y. 2016. Al-in-olivine thermometry evidence for the mantle plume origin of the Emeishan large igneous province[J]. *Lithos*, 266: 362~366.
- Zhang Liuyi, Li Ni and Dejan P. 2016. The research status of olivine trace elements in-situ analysis and perspectives of its application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6): 1 877~1 890(in Chinese with English abstract).
- Zhang M, Li C, Fu P, *et al.* 2011. The Permian Huangshanxi Cu-Ni deposit in western China: intrusive-extrusive association, ore genesis, and exploration implications[J]. *Mineralium Deposita*, 46(2): 153~170.
- Zhang Zhaochong, Cai Jinghong, Yan Shengghao, *et al.* 2008. A discussion on the low-Ca olivine phenocrysts in Middle Devonian picritic lavas on the southern margin of the Altay Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(3): 171~176(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, *et al.* 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China[J]. *Journal of Petrology*, 47(10): 1 997~2 019.
- Zhang Z C, Mao J W, Cai J H, *et al.* 2008. Geochemistry of picrites and associated lavas of a Devonian island arc in the Northern Junggar terrane, Xinjiang (NW China): implications for petrogenesis, arc mantle sources and tectonic setting[J]. *Lithos*, 105(3~4): 379~395.
- Zhang Z C, Mao J W, Chai F M, *et al.* 2009a. Geochemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions, Northern Xinjiang, NW China: Implications for the genesis of the magmatic Ni-Cu sulfide deposit

- [J]. *Economic Geology*, 104(2): 185~203.
- Zhang Z C, Mao J W, Saunders A D, *et al.* 2009b. Petrogenetic modeling of three mafic-ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints[J]. *Lithos*, 113(3~4): 369~392.
- Zhang Zhaochong, Xiao Xuchang, Wang Jun, *et al.* 2005. Mineral chemistry of the Pulu Cenozoic volcanic rocks in the west Kunlun Mountains and its constraints on the magmatic processes[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 25(3): 237~248 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y, Xue C, Zhao X, *et al.* 2015. Magmatic Cu-Ni sulfide mineralization of the Huangshannan mafic-ultramafic intrusion, Eastern Tianshan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 155~172.
- Zhou M F, Leshner C M, Yang Z X, *et al.* 2004. 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*, 209(3): 233~257.
- ### 附中文参考文献
- 柴凤梅. 2006. 新疆北部三个与岩浆型 Ni-Cu 硫化物矿床有关的镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征对比研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 冯宏业, 许英霞, 秦克章, 等. 2014. 东天山圪塔山口镁铁-超镁铁质岩体地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其对 Ni-Cu 成矿的指示[J]. *岩石学报*, 30(6): 1558~1574.
- 顾连兴, 王金珠. 1994. 造山带环境中的东疆型镁铁-超镁铁杂岩[J]. *岩石学报*, (4): 399~356.
- 韩宝福, 季建清, 宋 彪, 等. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-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*, 49(22): 2324~2328.
- 姜 超, 钱壮志, 杨素红, 等. 2015. 东天山香山铜镍硫化物-钛铁氧化物矿床成因[J]. *矿床地质*, 34(5): 913~928.
- 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 2012. 东天山地区图拉尔根铜镍硫化物矿床成因及成矿过程[J]. *岩石学报*, 28(11): 3772~3786.
- 柯君君. 2015. 东疆图拉尔根铜镍矿的岩石矿物学研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 李建平, Kornprobst J, Provost A. 1995. 尖晶石在地幔橄榄岩部分熔融和亚固相平衡过程中的化学指示——实验研究及在自然岩石中的应用[J]. *地质学报*, (2): 75~90.
- 李锦铁, 何国琦, 徐 新, 等. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. *地质学报*, 80(1): 148~168.
- 李建忠, 吴晓智, 齐雪峰, 等. 2010. 新疆北部地区上古生界火山岩分布及其构造环境[J]. *岩石学报*, 26(1): 95~206.
- 倪志耀. 1992. 新疆哈密黄山东镁铁-超镁铁杂岩体成因探讨[J]. *西北地质*, 26(1): 9~16.
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 等. 2007. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. *矿床地质*, 26(1): 1~14.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 等. 2012. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. *西北地质*, 45(4): 83~116.
- 钱壮志, 段 俊, 冯延清, 等. 2015. 中国铜镍(铂族)岩浆硫化物矿床主要成矿构造背景[J]. *中国工程科学*, 17(2): 19~28.
- 钱壮志, 孙 涛, 汤中立, 等. 2009. 东天山黄山东铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其意义[J]. *地质论评*, 55(6): 873~884.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等. 2010. 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*, 26(10): 3027~3035.
- 孙 涛, 钱壮志, 汤中立, 等. 2010. 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*, 26(11): 3339~3349.
- 夏明哲. 2009. 新疆东天山黄山岩带镁铁-超镁铁质岩石成因及成矿作用[D]. 长安大学.
- 王亚磊, 张照伟, 尤敏鑫, 等. 2015. 东天山白鑫滩铜镍矿锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及对 Ni-Cu 找矿的启示[J]. *中国地质*, 42(3): 452~467.
- 王亚磊, 张照伟, 张江伟, 等. 2016. 新疆白鑫滩铜镍矿床矿物学、Sr-Nd 同位素特征及其成矿过程探讨[J]. *地质学报*, 90(10): 2747~2758.
- 王玉往, 王京彬, 李德东, 等. 2013. 新疆北部幔源岩浆矿床的类型、时空分布及成矿谱系[J]. *矿床地质*, 32(2): 223~243.
- 张柳毅, 李 霓, DEJAN P. 2016. 橄榄石微量元素原位分析的现状及及其应用[J]. *岩石学报*, 32(6): 1877~1890.
- 张招崇, 蔡劲宏, 闫升好, 等. 2008. 阿尔泰山南缘中泥盆统苦橄岩低钙橄榄石的成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(3): 171~176.
- 张招崇, 肖序常, 王 军, 等. 2005. 西昆仑普鲁新生代火山岩的矿物化学特征及其对岩浆演化过程的约束[J]. *矿物学报*, 25(3): 237~248.