

东疆二叠纪镁铁-超镁铁岩体中辉石的成分特征及其对成岩和 Ni-Cu 成矿的指示*

薛胜超^{1,2} 秦克章^{1**} 唐冬梅¹ 毛亚晶¹ 姚卓森^{1,2}

XUE ShengChao^{1,2}, QIN KeZhang^{1**}, TANG DongMei¹, MAO YaJing¹ and YAO ZhuoSen^{1,2}

1. 中国科学院矿产资源研究重点实验室,中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

2. 中国科学院大学,北京 100049

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2014-07-21 收稿, 2015-02-18 改回.

Xue SC, Qin KZ, Tang DM, Mao YJ and Yao ZS. 2015. Compositional characteristics of pyroxenes from Permian mafic-ultramafic complexes in Eastern Xinjiang, and their implications for petrogenesis and Ni-Cu mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8):2175–2192

Abstract Early Permian mafic-ultramafic complexes in Eastern Xinjiang are mainly distributed in the Jueluotage belt, Central Tianshan massif and Beishan area. The orthopyroxene in these complexes is mostly bronzite and minor hypersthene, and the clinopyroxene is composed of diopside, endiopside and augite. Systematic mineral mapping shows higher Fo and Ni contents of olivine in Beishan than that of Jueluotage belt and Central Tianshan. Fo in the range of 78 ~ 86 and Ni contents less than 1800×10^{-6} in olivine are more favorable for Ni-Cu sulfide mineralization. The values of En in orthopyroxene and Wo in clinopyroxene also show north-southward increasing and relatively small range value contributes to ore-formation. The Al^{IV}/Al^{VI} of clinopyroxene suggests that the pressure is relatively low during fractional crystallization in Beishan, resulting in weaker mineralization than Jueluotage belt and Central Tianshan. The Jueluotage belt, Central Tianshan and Beishan show characteristics of non-alkaline parent magma series, and crystallized from tholeiitic magma. The parental magma of Pobei and Xiangshanzhong are characterized by enrichments in LREE, and depletion in Nb, Ta, Zr and Hf. These features suggest that a depleted mantle metasomatized by subducted slab-derived fluid or melt. The Al_Z vs. Ti of clinopyroxene implies stronger metasomatism caused by subduction in Jueluotage belt and Central Tianshan. The occurrence of Ti high-anomaly in clinopyroxene of Beishan mafic-ultramafic complexes and mineral temperature calculations show higher magma temperatures in Beishan, which implies that the magmatism has a close relationship with Tarim Permian mantle plume.

Key words Mafic-ultramafic complexes; Orthopyroxene; Clinopyroxene; Parental magma; Ni-Cu sulfide mineralization; Eastern Xinjiang

摘要 新疆东部早二叠世镁铁-超镁铁岩体主要分布在天山东段觉罗塔格构造带、中天山地块和北山地区,与这类岩体相关的 Ni-Cu 矿床主要产出在觉罗塔格带和中天山地区,北山目前并未发现典型 Ni-Cu 矿床。这些岩体中的斜方辉石主要为古铜辉石,少量为紫苏辉石;单斜辉石属透辉石、次透辉石或普通辉石。矿物成分系统变化显示橄榄石 Fo 值北山最高,觉罗塔格带到中天山逐次降低的特点,橄榄石 Fo 值在 78 ~ 86 和 Ni 含量低于 1800×10^{-6} 范围内更有利于 Cu-Ni 成矿;斜方辉石 En 端元和单斜辉石 Wo 端元极差值也显示北山最高、觉罗塔格带和中天山较低的规律,且相对小的极差值更有利于成矿。单斜辉石 Al^{IV}/Al^{VI} 比值结果显示北山岩体在矿物结晶过程中压力较低,硫溶解度较大,可能是其矿化程度弱于觉罗塔格带和中天山的一个重要因素。觉罗塔格带、中天山和北山镁铁-超镁铁质岩体的母岩浆为非碱性系列、大陆拉斑玄武质岩浆。根据北山和觉罗塔格带岩体单斜辉石微量元素成分估算的母岩浆具有 LREE 富集以及 Nb、Ta、Zr、Hf 负异常的特征,指示出两者源区为受

* 本文受国家自然科学基金重点项目(41030424)和新疆有色集团东天山铜镍矿床预测评价研究项目联合资助。

第一作者简介:薛胜超,男,1987年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: csuxsc@163.com

** 通讯作者:秦克章,男,1964年生,研究员,从事造山带成矿作用研究,E-mail: kzzq@mail.iggcas.ac.cn

俯冲板片交代的地幔,且坡北源区俯冲交代程度更低。觉罗塔格带和中天山单斜辉石 Al_2 vs. Ti 显示裂谷堆晶趋势向弧堆晶趋势演化,而北山单斜辉石 Al_2 vs. Ti 则显示明显的裂谷堆晶趋势,这说明俯冲交代作用在觉罗塔格带和中天山地区表现的更为强烈。北山镁铁-超镁铁岩体中发现单斜辉石 Ti 的高异常及矿物温压计算结果显示,表明北山地区具有比觉罗塔格带和中天山更高的岩浆温度,这可能与塔里木二叠纪地幔柱的活动有关。

关键词 镁铁-超镁铁岩体;斜方辉石;单斜辉石;母岩浆特征;Cu-Ni 成矿;东疆

中图法分类号 P578.954

1 引言

辉石是镁铁-超镁铁岩中最常见的造岩矿物之一,其成分特征记录了岩浆演化的物理化学条件等重要信息 (Kushiro, 1960; Le Bas, 1962; Campbell and Borley, 1974; 邱家骧和廖群安, 1987, 1996; Streck, 2008),同时辉石的种属和化学成分与构造背景紧密相关 (Nisbet and Pearce, 1977; Loucks, 1990; Seyler and Bonatti, 1994; Su *et al.*, 2012a)。辉石在绝大多数镁铁-超镁铁岩相中广泛发育,根据 Naldrett (1999) 资料,全球范围内大多数重要的铜镍矿床几乎全赋存于含斜方辉石的岩体中,如加拿大的 Sudbury, 俄罗斯的 Noril'sk, 中国的金川、红旗岭等矿床。因此,辉石的化学成分对镁铁-超镁铁岩的岩浆性质、与之相关的岩浆 Ni-Cu 硫化物矿床的成因研究具有重要的指示意义。

辉石族矿物的基本化学式为: $AB[Si_2O_6]$, 其中 $A = Ca, Na, Mg, Fe^{2+}, Li$; $B = Mg, Fe^{2+}, Al, Fe^{3+}, Cr, Mn$ 。在辉石结构中,其硅氧四面体共 2 个角顶相连成单链,链间形成两种空隙:一种空隙为无畸变的八面体空隙 (M1),另一种空隙是畸变的八面体或六面体空隙 (M2)。辉石族矿物按晶系可分为斜方辉石亚族和单斜辉石亚族,两大亚族均具有多个类质同象系列及矿物变种。

单斜辉石与熔体的 Fe-Mg 平衡常数 ($X_{\text{cpx}}^{\text{Fe}}/X_{\text{cpx}}^{\text{Mg}})/(X_{\text{liq}}^{\text{Fe}}/X_{\text{liq}}^{\text{Mg}})$ ($= 0.29$, Thompson, 1974; $0.2 \sim 0.4$ 之间, Irving and Frey, 1984; Liotard *et al.*, 1988; Kinzler, 1997) 被广泛应用于岩浆的分离结晶过程和地质温度-压力计。相对于其它镁铁-超镁铁岩中的矿物,单斜辉石所赋含的微量元素很高,尤其是在黑云母、角闪石和斜长石等矿物没有出现的情况下,这种特征表现得尤为明显。在无水尖晶石橄榄岩地幔中,强不相容元素优先进入单斜辉石,尽管高场强元素 (Zr 和 Ti) 与重稀土元素 (Dy, Er 和 Yb) 在斜方辉石中表现出中等的相容性 (McDonough *et al.*, 1992; Rampone *et al.*, 1991), 这些元素在单斜辉石-斜方辉石矿物对中的分配系数总是高于在斜方辉石个体中。基于这些认识,单斜辉石被认为是微量元素的主要载体,可用于解释岩浆过程中的岩石成因。

单斜辉石中 Al 的含量与压力的大小关系较为密切 (Kushiro, 1960; Thompson, 1974), 同时单斜辉石中 Al^{IV} 的含量取决于岩浆中 Si 的饱和度 (Campbell and Borley, 1974; Vuorinen *et al.*, 2005)。岩浆 Cu-Ni 硫化物矿床中 S 的溶解度与压力 (Wendlandt, 1982; Li and Agee, 1996; Mavrogenes

and O'Neill, 1999; Li and Ripley, 2005) 和 SiO_2 的浓度 (对应 Fe^{2+} 的含量; Haughton *et al.*, 1974; Naldrett and von Gruenewaldt, 1989) 密切相关,因此辉石可以作为压力和 Si 饱和度的一个指示剂。Verhoogen (1962) 通过研究火成岩中 Ti 得出辉石中 Ti 含量与温度有关,并且辉石的 Ti 含量与全岩 Ti 含量无直接关系。

东疆发育有大量的早二叠世的镁铁-超镁铁岩体,主要分布在北山地区、中天山地块和觉罗塔格构造带 (图 1)。这些岩体中发现有多个岩浆 Cu-Ni 硫化物矿床: 黄山东、黄山、香山、葫芦、图拉尔根、天宇等矿床,并且东疆相关岩体成岩成矿作用的研究已经取得了长足的进步 (秦克章等, 2002, 2006, 2007; Zhou *et al.*, 2004; 姜常义等, 2006, 2012; Chai *et al.*, 2008; Mao *et al.*, 2008; 苏本勋等, 2009, 2010, 2012; Qin *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2011, 2012, 2013; Sun *et al.*, 2013; 夏明哲等, 2013; Xia *et al.*, 2013), 已有的大量工作基础为寻找适用于东疆地区成矿的评价标志提供了可能。前人对于东疆地区的镁铁-超镁铁岩体产出提出了多种地球动力学模型,包括与俯冲相关的 Alaskan 型岩体 (Xiao *et al.*, 2004, 2010; Han *et al.*, 2010), 后碰撞演化的产物 (柴凤梅等, 2006; 袁峰等, 2010; 邓宇峰等, 2012; Zhang *et al.*, 2011), 二叠纪地幔柱背景 (Zhou *et al.*, 2004; Mao *et al.*, 2008; Pirajno *et al.*, 2008), 最新研究提出早二叠世地幔柱与造山带叠置的背景 (Qin *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2012c; Tang *et al.*, 2013)。这些争议的存在需要更多地将对北山地区、中天山地块和觉罗塔格构造带进行对比研究,以期获得更加明晰的证据和认识。

镁铁-超镁铁含矿岩体中橄榄石不仅是主要的造岩矿物,并且 Fo 值 ($100 \times Mg/(Mg + Fe)$) 和 Ni 含量蕴含丰富的成岩成矿信息 (Li *et al.*, 2003, 2004, 2007; 李士彬等, 2008)。目前该区域岩体中橄榄石的研究已较为深入 (孙赫等, 2010; 邓宇峰, 2011; Su *et al.*, 2012b; Sun *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2014), 但是对不同构造带主要造岩矿物辉石的种属、成分特征、区域变化及成因意义的研究仍相对薄弱,东疆二叠纪岩体母岩浆成分的厘定还缺乏相应的矿物学证据; 矿物岩石化学成分之间的关系、内在控制因素及成因含义尚不明确。针对上述问题,通过系统的辉石矿物学研究,寻找觉罗塔格构造带、中天山地块和北山地区镁铁-超镁铁岩体成矿的内在规律,阐释辉石矿物成分变化与成矿的关系,为母岩浆特征提供新的证据,进一步认识东疆二叠纪镁铁-超镁铁岩体的动力学背景和含矿性评价标志。

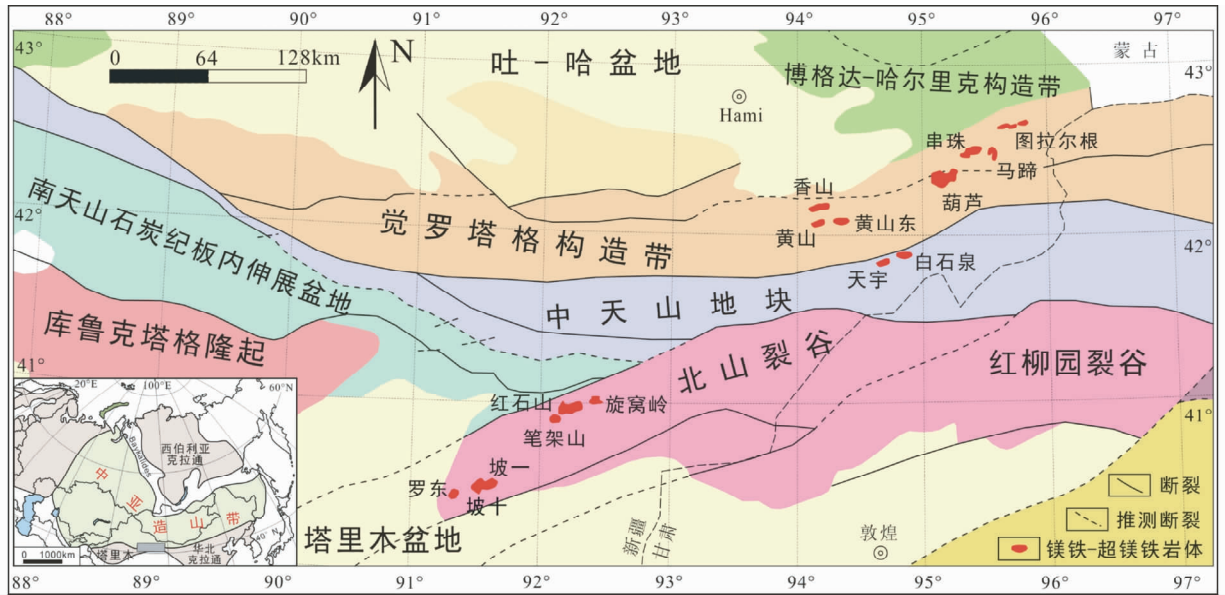
图1 新疆地区大地构造位置及镁铁-超镁铁岩体分布图(据 Su *et al.*, 2012c 修改)Fig. 1 Geologic map of Eastern Xinjiang and distribution of mafic-ultramafic complexes (modified after Su *et al.*, 2012c)

表1 新疆东部二叠纪主要镁铁-超镁铁岩体的规模、形态、岩相等基本特征表

Table 1 Features of mafic-ultramafic complexes in Beishan, Central Tianshan and Eastern Tianshan

地区	矿区	面积 (km ²)	形状	岩相	含矿岩相
觉罗塔格带	黄山	1.71	彗星状	辉长闪长岩,角闪辉长苏长岩相,角闪二辉橄榄岩,二辉橄榄岩,角闪二辉岩	苏长岩,辉橄岩,二辉橄榄岩,岩相接触带
	黄山东	2.8	透镜体菱形	角闪橄榄辉长岩,辉石角闪辉长岩,辉长闪长岩,辉长苏长岩,橄辉辉长苏长岩,辉石角闪橄榄岩	二辉橄榄岩,辉石岩,辉长岩,岩相接触带
	黄山南	4.22	透镜体	辉石角闪橄榄岩,橄橄岩,角闪辉石岩,二辉橄榄岩,角闪辉长岩,苏长岩	辉石角闪橄榄岩,橄橄岩,二辉橄榄岩
	香山	2.8	藕节状	角闪橄榄岩,橄橄岩,苏长岩,辉石岩,角闪辉长岩	苏长岩,辉长岩-辉石岩接触带
	葫芦	0.75	葫芦状	橄橄岩,辉石岩,辉橄岩,辉长岩	辉石岩,辉橄岩
	图拉尔根	0.003	透镜,脉状	角闪橄榄岩,辉石橄橄岩,橄橄辉石岩,角闪橄橄岩,辉长岩	角闪橄橄岩
中天山	天宇	0.055	岩脉	橄橄岩,辉橄岩,橄橄岩,辉石岩,辉长岩	橄橄岩,辉橄岩,橄橄岩
	白石泉	2.8	不规则状	辉橄岩,橄橄岩,辉石岩,角闪辉长岩,苏长岩	辉橄岩,橄橄岩,辉长岩
	红石山	4.7	梭状	辉长岩,橄橄辉长岩,辉橄岩,橄长岩,纯橄岩	
	旋窝岭	5	不规则状	辉长岩,橄橄辉长岩,橄长岩,橄橄岩	
	笔架山	13	岩墙状	辉长岩,橄橄辉长岩,辉橄岩,橄长岩,纯橄岩	
北山	坡一	6.72	水滴状	纯橄橄,单辉橄橄岩,橄橄辉石岩,橄长岩,辉石岩相,橄橄苏长岩,橄橄辉长岩,辉长岩	单辉橄橄岩,橄橄辉石岩,橄长岩
	坡十	2.5	不规则椭圆状	单辉橄橄岩,橄橄岩,辉石岩,二辉橄橄岩,纯橄岩,橄橄辉长苏长岩	单辉橄橄岩
	罗东	2.4	眼球状	辉长岩,橄橄辉长岩,辉橄岩,纯橄岩,辉石岩	

2 新疆二叠纪镁铁-超镁铁岩的基本地质特征

新疆东部是我国重要的铜镍硫化物矿床成矿区带(秦克章等, 2002; Qin *et al.*, 2003; 孙赫等, 2007),在天山东段觉

罗塔格构造带发育有一系列镁铁-超镁铁质岩体而受到地质学者的关注(顾连兴等, 1994; Xu *et al.*, 2003; 秦克章等, 2006, 2007; Qin *et al.*, 2011)。该区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。此岩带东西延伸长约 270km,南北宽达 20~35km,从西到东有:土墩、二红洼、香山、黄山南、

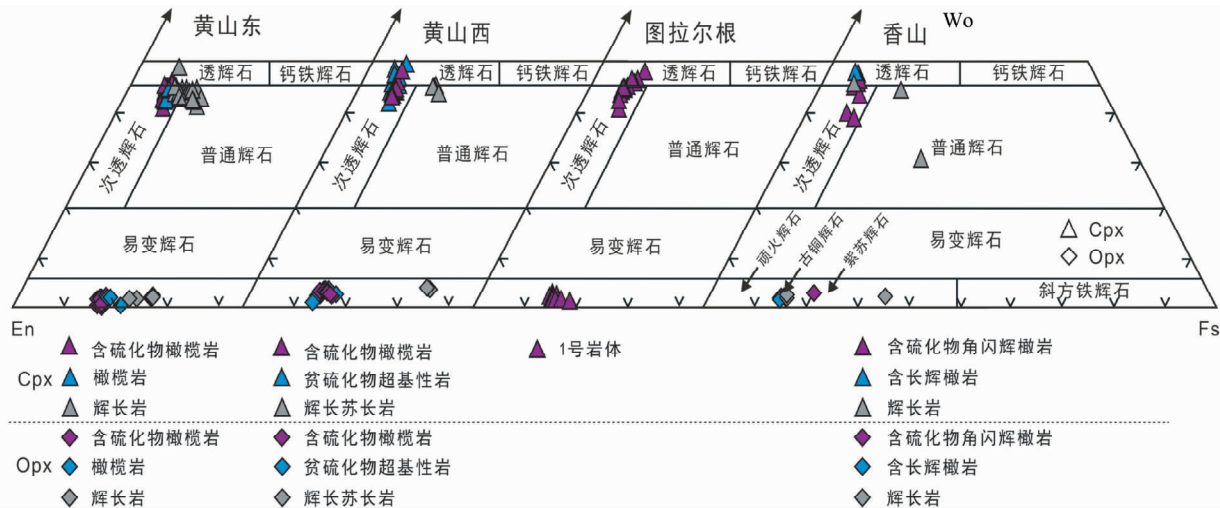


图2 觉罗塔格带典型镁铁-超镁铁岩体中单斜辉石和斜方辉石的分类图解(底图据 Morimoto, 1988)

顽火辉石端元 $En = 100 \times Mg / (Mg + Fe)$; 斜方铁辉石端元 $Fs = 100 \times Fe / (Mg + Fe)$; 硅灰石端元 $Wo = Ca / (Ca + Mg + Fe)$; 其中 $Fe = Mn + Fe^{2+} + Fe^{3+}$

Fig. 2 Diagram of classification for clinopyroxene and orthopyroxene in Jueluotage belt (after Morimoto, 1988)

黄山、黄山东以及镜儿泉地区的黑石梁、葫芦、串珠、马蹄、图拉尔根、咸水泉等十多个岩体。香山、黄山、黄山东、黄山南、葫芦、图拉尔根等岩体伴随着工业铜镍矿体,其它岩体也有不同程度的铜镍矿化。岩石组合多以(角闪辉石)橄辉岩-(角闪)辉石岩-(苏长岩)-(辉长岩)为主。岩体的规模、形态、岩相等基本特征见表1。

中天山地块挟持于沙泉子大断裂和卡瓦布拉克大断裂之间,出露的地层由老到新可分为中元古界星星峡群和卡瓦布拉克群,古生代西大山组、雅满苏组和底坎尔组等。区内断裂构造较为简单,岩浆活动频繁,岩性较为复杂。出露的含矿岩体包括天宇和白石泉岩体,前人对这些岩体的研究表明其与觉罗塔格带具有成矿时代上的一致性(毛启贵等, 2006; 李金祥等, 2007; 唐冬梅等, 2009; Qin *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2012c)。岩石组合以辉长岩-辉石岩-橄辉岩-辉橄岩为主,含矿岩相主要为橄辉岩-辉橄岩-(辉长岩)。

新疆北山晚古生代裂谷带位于塔里木板块东北缘,区内出露古老的结晶基底为古元古界北山群、中元古界长城系白湖群和杨吉布拉克群、蓟县系爱尔基干群(肖渊甫等, 2000; 姜常义等, 2006)。北山镁铁-超镁铁岩体主要集中在两个带:笔架山岩带(包括旋窝岭、笔架山和红石山等)和坡北岩带(包括坡一、坡十和罗东等),岩石组合均以辉长岩-橄辉岩-辉橄岩-(橄辉岩)-辉橄岩-纯橄岩为主。

3 样品及分析方法

样品采自坡一岩体钻孔 ZK23-2、ZK23-3(岩石类型为不同矿化程度的(斜长)橄辉岩)、地表的橄辉岩和橄辉单辉岩及坡三岩体的橄辉单辉岩。对样品进行 0.05mm 光薄

片磨制。根据显微岩相学观察,辉石在辉橄岩中一般呈他形包裹橄辉石,颗粒新鲜或弱蚀变;而在辉长岩、橄辉岩和橄辉单辉岩中则呈自形-半自形板状,粒径多集中在 0.5 ~ 5mm 之间,通常呈粒状镶嵌于斜长石颗粒之间或呈堆晶相。本次研究选择不同产状且蚀变程度小的辉石颗粒进行分析测试。

辉石主量元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成,分析仪器为日本 JEOL 公司生产的 JXA8100 电子探针,其工作电压为 15kV,电流 20nA,束斑大小为 3 μ m,测试结果见表 2。单斜辉石微量元素利用中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 LA-ICP-MS 测试完成,工作原理和数据处理过程详见 Liu *et al.* (2008)。激光剥蚀系统是配备有 Agilent 7500a 激光器的 GeoLas 2005,激光剥蚀半径为 44 μ m,激光脉冲为 8Hz,检测限小于 46×10^{-6} ,测试结果见表 3。

4 东疆二叠纪镁铁-超镁铁岩体辉石的成分特征

东疆二叠纪镁铁-超镁铁岩体中辉石和橄辉石的数据来自对前人数据的总结和本次研究,辉石数据分别列于表 4 和表 5,橄辉石数据列于表 6。觉罗塔格构造带二叠纪岩体中,辉石作为贯通矿物在各岩相中均可见,不同岩相中斜方辉石和单斜辉石比例不同。斜方辉石主要为古铜辉石,其次为紫苏辉石(图 2), SiO_2 含量范围为 52.3% ~ 57.8%, FeO 8.6% ~ 21.3%, MgO 21.4% ~ 32.2%, En 为 62.4 ~ 86.2(表 4);单斜辉石主要为透辉石、次透辉石和普通辉石(图 2), SiO_2 含量范围为 47.5% ~ 55.2%, MgO 12.9% ~ 18.5%, CaO 18.9%

表 2 坡北岩带坡一岩体辉石主要氧化物百分含量 (wt%) 及晶体化学系数和端员组分

Table 2 Major oxide composition of pyroxene (wt%) and crystal chemical coefficients and end member components in Poyi intrusion of Pobei belt

样品号	2-142	2-539.2	2-712.6	2-779.6	3-599.8	3-752.5	3-935.6	PS-4-1	PYO-4	PYO-10	PYG-1	PYG-4	2-167-16	2-253.5	2-633.7	3-450.6	PYO-10	PYC-15	
岩性	辉橄岩	辉橄岩	辉橄岩	辉橄岩	辉橄岩	辉橄岩	辉橄岩	橄榄单辉岩	橄榄辉长岩	橄榄辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉橄岩	辉橄岩	辉橄岩	辉橄岩	橄榄辉长岩	橄榄辉石岩	
SiO ₂	53.4	52.0	52.8	52.8	53.4	52.3	52.5	52.2	52.0	52.7	50.2	51.9	56.9	58.3	57.8	57.1	55.5	56.0	
TiO ₂	0.95	1.28	0.81	0.81	0.81	0.86	0.84	0.63	0.70	0.67	0.81	0.89	0.35	0.14	0.04	0.13	0.25	0.23	
Al ₂ O ₃	2.93	3.59	3.29	3.31	2.97	3.74	4.03	2.35	3.58	2.57	7.19	2.42	1.56	0.91	1.86	1.26	1.38	1.50	
Cr ₂ O ₃	1.12	1.14	1.13	1.23	1.05	1.29	1.44	0.16	0.46	0.13	0.03	0.02	0.94	0.45	0.23	0.41	0.04	0.31	
FeO	2.51	2.69	2.50	2.87	2.64	2.48	2.03	6.18	5.67	5.87	6.60	8.26	6.91	7.52	7.55	6.51	12.34	9.21	
MnO	0.08	0.02	0.10	0.08	0.11	0.07	0.07	0.17	0.14	0.18	0.12	0.19	0.17	0.12	0.20	0.18	0.27	0.23	
MgO	16.4	15.5	16.4	16.3	16.8	15.5	15.8	16.9	16.0	16.6	12.5	14.3	32.4	33.0	32.9	34.1	30.2	31.5	
CaO	22.3	22.6	22.1	21.2	22.4	22.8	23.1	20.7	21.7	21.5	21.6	21.4	1.14	0.22	0.19	0.70	0.93	1.30	
Na ₂ O	0.49	0.52	0.62	0.63	0.49	0.71	0.52	0.31	0.35	0.33	0.49	0.26	0.13	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	
K ₂ O	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	
Total	100.3	99.4	99.7	99.3	100.8	99.9	100.5	99.6	100.5	100.5	99.5	99.7	100.6	100.6	100.8	100.6	100.9	100.3	
以 6 个氧原子为单位计算阳离子																			
Si	1.93	1.91	1.92	1.93	1.93	1.91	1.90	1.92	1.90	1.92	1.86	1.93	1.96	1.66	1.31	1.96	1.95	1.96	
Ti	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	
Al ^{IV}	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.07	0.07	0.08	0.10	0.08	0.14	0.07	0.04	0.34	0.69	0.04	0.05	0.04	
Al ^{VI}	0.06	0.09	0.08	0.07	0.07	0.09	0.10	0.03	0.05	0.04	0.16	0.04	0.03	0.45	0.86	0.01	0.01	0.02	
Cr	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	
Fe	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.06	0.19	0.17	0.18	0.21	0.26	0.20	0.10	0.04	0.19	0.36	0.27	
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	
Mg	0.89	0.85	0.89	0.89	0.90	0.84	0.85	0.93	0.87	0.90	0.70	0.80	1.67	0.99	0.26	1.75	1.58	1.64	
Ca	0.86	0.89	0.86	0.83	0.86	0.89	0.90	0.82	0.85	0.94	0.86	0.85	0.04	0.01	0.00	0.03	0.03	0.05	
Na	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.72	1.46	0.00	0.00	0.00	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	
Wo	47.3	48.8	47.1	46.0	46.8	49.2	49.5	42.2	44.9	43.8	52.3	44.8	2.24	0.59	1.67	1.32	1.76	2.49	
En	48.6	46.7	48.7	49.2	48.9	46.6	47.1	48.0	46.0	46.9	36.8	41.7	87.3	91.4	86.6	89.1	79.9	83.8	
Fs	21.9	4.53	4.16	4.84	4.30	4.18	3.40	9.83	9.15	9.31	10.9	13.5	10.5	8.03	11.8	9.54	18.3	13.8	

表 3 北山坡北坡三岩体橄榄单辉岩中单斜辉石微量元素含量 ($\times 10^{-6}$)Table 3 Trace element abundance of clinopyroxene in olivine clinopyroxenite of Posan intrusion in Beishan ($\times 10^{-6}$)

元素	PS4-1 橄榄单辉岩												平均值	D _{epx/melt}	坡北母岩浆
Sr	19.8	19.4	21.1	20.3	20.2	19.6	21.8	20.6	20.2	20.7	22.1	20.6	0.1283	158	
Y	17.2	16.7	16.4	16.3	16.1	15.5	15.3	15.1	15.5	16.9	16.4	16.1	0.467	34.3	
Nb	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01	0.04	0.02	0.0077	2.13	
Zr	14.0	14.4	14.7	14.5	14.6	13.9	13.0	12.0	13.4	14.6	15.3	14.0	0.1234	117	
Hf	0.72	0.67	0.57	0.51	0.52	0.56	0.66	0.58	0.65	0.60	0.64	0.61	0.256	2.34	
Pb	0.23	0.14	0.16	0.22	0.56	0.09	0.21	0.21	0.49	0.12	0.42	0.26	0.072	3.72	
Th	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.014	2.03	
U	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.0127	0.57	
La	0.67	0.79	0.81	0.73	0.67	0.66	0.60	0.65	0.70	0.77	0.71	0.71	0.0536	14.1	
Ce	3.16	3.05	2.92	3.03	2.99	3.03	2.98	2.81	2.92	3.32	3.19	3.04	0.0858	33.8	
Nd	4.24	4.57	4.05	4.30	4.29	4.00	4.29	3.52	4.40	4.01	4.77	4.22	0.1873	22.2	
Sm	1.90	2.30	1.89	1.62	1.89	2.19	1.72	1.86	2.24	2.18	2.17	1.99	0.291	6.88	
Eu	0.72	0.53	0.58	0.58	0.68	0.63	0.57	0.70	0.59	0.67	0.74	0.64	0.3281	1.92	
Gd	3.01	2.56	2.51	2.71	3.04	2.80	2.40	2.53	2.65	3.18	2.53	2.72	0.3668	7.35	
Dy	3.35	3.11	3.12	3.15	2.90	2.99	3.03	2.87	3.04	3.06	3.39	3.09	0.442	7.03	
Er	2.01	1.92	2.18	1.93	1.93	1.85	1.87	1.85	1.74	1.86	1.83	1.91	0.387	4.89	
Yb	1.50	1.38	1.48	1.37	1.32	1.29	1.24	1.27	1.43	1.48	1.44	1.38	0.43	3.22	
Lu	0.20	0.21	0.23	0.25	0.16	0.19	0.21	0.18	0.17	0.20	0.22	0.20	0.433	0.47	

表4 东疆二叠纪典型镁铁-超镁铁岩体中的斜方辉石成分特征

Table 4 Major elements content from orthopyroxene of typical mafic-ultramafic rocks in Eastern Xinjiang

地区	岩体	SiO ₂ (wt%)	Al ₂ O ₃ (wt%)	FeO (wt%)	MgO (wt%)	En	数据来源
觉罗塔格带	黄山东	52.60 ~ 56.80	0.43 ~ 2.88	10.10 ~ 16.10	25 ~ 31.20	71.20 ~ 83.11	邓宇峰, 2011
	黄山	52.30 ~ 57.80	1.13 ~ 3.28	8.59 ~ 21.20	21.4 ~ 32.20	62.44 ~ 86.16	邓宇峰, 2011
	图拉尔根	53.25 ~ 57.10	0.34 ~ 2.42	9.09 ~ 12.03	30.07 ~ 31.65	81.07 ~ 84.55	秦克章等, 2007; 孙赫, 2009
	香山	53.10 ~ 56.50	0.96 ~ 2.70	8.76 ~ 21.30	22.9 ~ 32.20	64.37 ~ 84.99	夏明哲, 2009; 肖庆华, 2010
中天山	白石泉	53.27 ~ 55.62	0.36 ~ 2.10	10.31 ~ 28.10	15.69 ~ 31.58	70.25 ~ 82.71	柴凤梅等, 2006; 李金祥等, 2007
	天宇	53.03 ~ 58.76	0.01 ~ 0.06	9.09 ~ 12.61	22.2 ~ 29.87	70.59 ~ 83.35	唐冬梅, 2009
北山	旋涡岭	51.40 ~ 56.66	0.27 ~ 3.44	3.89 ~ 20.72	16.07 ~ 31.76	64.68 ~ 85.28	苏本勋等, 2010; 夏昭德等, 2013
	笔架山	53.42 ~ 54.34	0.66 ~ 1.28	10.93 ~ 17.11	26.52 ~ 29.46	72.44 ~ 79.81	夏昭德, 2012; Su, 2014
	坡北	53.77 ~ 60.30	0.24 ~ 2.6	6.48 ~ 14.73	27.18 ~ 33.85	74.76 ~ 93.30	郭娜欣等, 2012; 苏本勋等, 2012; 本次研究
	罗东	54.66 ~ 57.97	0.16 ~ 3.59	6 ~ 21.04	20.24 ~ 31.47	61.85 ~ 86.88	凌锦兰, 2011; Su, 2014

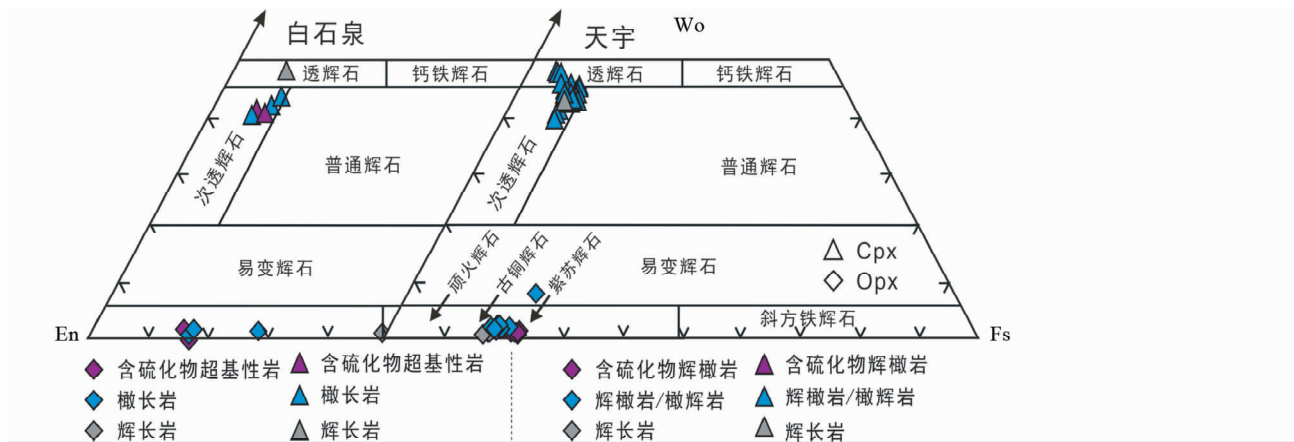


图3 中天山典型镁铁-超镁铁岩体中单斜辉石和斜方辉石的分类图解(底图据 Morimoto, 1988)

Fig. 3 Diagram of classification for clinopyroxene and orthopyroxene in Central Tianshan (after Morimoto, 1988)

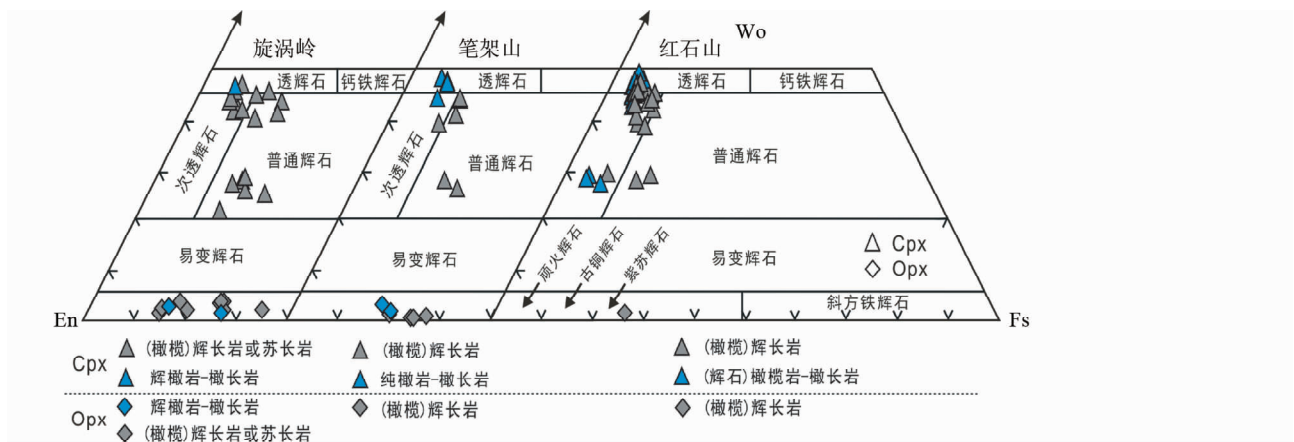


图4 北山红石山岩带典型镁铁-超镁铁岩体中单斜辉石和斜方辉石的分类图解(底图据 Morimoto, 1988)

Fig. 4 Diagram of classification for clinopyroxene and orthopyroxene in Hongshishan belt of Beishan (after Morimoto, 1988)

~ 22.7%, Al₂O₃ 1.1% ~ 5.6%, FeO 3.5% ~ 14.6%, TiO₂ 0.1% ~ 1.4%, Wo 30.2 ~ 49.9 (表5)。觉罗塔格带二叠纪岩体中橄榄石 Fo 的范围在 70.7 ~ 85.8 之间, Ni 含量范围为 230 × 10⁻⁶ ~ 2730 × 10⁻⁶ (Su et al., 2012b)。

中天山同期镁铁-超镁铁岩体中辉石产出特征与觉罗塔格带类似。斜方辉石主要为古铜辉石, 少量紫苏辉石 (图3), SiO₂ 含量范围为 53.03% ~ 58.76%, FeO 9.09% ~ 28.10%, MgO 15.69% ~ 31.58%, En 为 70.25 ~ 83.35 (表

表 5 东疆二叠纪典型镁铁-超镁铁岩体中的单斜辉石成分特征

Table 5 Major elements content from clinopyroxene of typical mafic-ultramafic rocks in Eastern Xinjiang

地区	岩体	SiO ₂ (wt%)	TiO ₂ (wt%)	Al ₂ O ₃ (wt%)	FeO(wt%)	MgO(wt%)	CaO(wt%)	Wo	数据来源
觉罗塔格带	黄山东	49.5~54.6	0.1~1.4	1.12~4.6	4.37~9.4	13.5~16.7	19.7~25	41.7~49.9	邓宇峰,2011
	黄山	50.3~55.2	0.1~1.0	1.29~4.5	3.53~10.0	13.5~17.6	20.2~23.4	41.6~49.7	邓宇峰,2011;Mao et al., 2014
	香山	50.1~54.5	0.27~1.1	1.82~5.6	3.56~14.6	12.9~18.5	18.9~23.6	30.2~48.0	夏明哲,2009;肖庆华,2010
中天山	图拉尔根	47.46~52.5	0.51~1.4	2.35~5.4	4.32~5.9	14.13~17.6	19.06~22.7	40.5~48.3	孙赫,2009
	白石泉	50.37~53.5	0.12~1.47	1.23~5.03	4.91~7.27	15.46~17.92	19.15~21.63	40.9~49.2	柴凤梅等,2006
	天宇	48.21~54.11	0.08~1.44	0.38~5.87	3.29~6.84	14.3~17.58	18.88~23.88	39.5~48.2	唐冬梅,2009
	旋涡岭	50.9~55.0	0.13~1.2	1.56~4.4	3.89~12.5	13.6~22.2	10.4~22.7	21.3~47.2	苏本勋等,2010;夏昭德等,2013
	笔架山	50.0~52.2	0.44~1.3	1.8~5.8	4.1~11.4	14.9~17.8	11.7~23.7	26.6~48.8	夏昭德,2012;Su,2014
北山	红石山	50.5~56.1	0~1.96	1.5~6.5	3.2~9.8	15.2~22.3	11.8~23.7	27.3~49.4	苏本勋等,2009;卢荣辉,2010
	城北	49.7~54.6	0.13~1.5	1.6~4.6	1.9~9.6	11.8~19.0	17.0~24.4	34.4~51.3	郭娜欣等,2012;苏本勋等,2012;本次研究
	罗东	50.3~55.6	0~1.4	0.7~5.9	2.8~9.6	14.8~22.2	9.0~22.6	19.5~49.7	凌锦兰,2011;Su,2014

4);单斜辉石主要为透辉石和次透辉石(图3),SiO₂含量范围为48.2%~54.1%,MgO 14.3%~17.6%,CaO 18.9%~23.9%,Al₂O₃ 0.4%~5.9%,FeO 3.3%~6.8%,TiO₂ 0.08%~1.44%,Wo 39.5~48.2(表5)。中天山镁铁-超镁铁岩体中橄榄石 Fo 值在76.8~85.4之间,Ni含量范围为23×10⁻⁶~1964×10⁻⁶(Su et al., 2012b)。

北山镁铁-超镁铁岩体中单斜辉石在除纯橄岩之外的岩相中均为主要造岩矿物,而斜方辉石仅在橄榄二辉岩和苏长岩中常见。斜方辉石主要为古铜辉石,其次为顽火辉石和紫苏辉石(图4、图5),SiO₂含量范围为51.40%~60.30%,FeO 3.89%~21.04%,MgO 16.07%~33.85%,En为61.85~93.30(表4)。单斜辉石主要为透辉石、次透辉石和普通辉石,少量易变辉石(图4,5),SiO₂含量范围为49.7%~55.6%,MgO 11.8%~22.3%,CaO 9.0%~24.4%,Al₂O₃ 0.7%~6.5%,FeO 1.9%~12.5%,TiO₂ 0~1.96%,Wo 19.5~51.3(表5)。北山镁铁-超镁铁岩体中橄榄石 Fo 的范围在73.4~90.6之间,Ni含量范围为375×10⁻⁶~4045×10⁻⁶。

因此,觉罗塔格带-中天山-北山镁铁-超镁铁岩体中斜方辉石主要为古铜辉石,见少量紫苏辉石,仅北山纯橄岩中含少量顽火辉石;单斜辉石主要为透辉石、次透辉石和普通辉石。

5 辉石成分的区域变化

觉罗塔格带-中天山-北山镁铁-超镁铁岩体中斜方辉石 En 由北向南分别主要集中在80~85(极差值5)、77~83(极差值6)和75~84(极差值9)之间,En端元总体显示由北向南缓慢减小的趋势(图6)。单斜辉石表现出高Ca(Wo值>35)和低Ca(Wo值<35)两个区间,其中高Ca区间单斜辉石的Wo端元总体显示北山相对较高,觉罗塔格带和中天山相对较低的特点(图7),与橄榄石Fo变化趋势相同(图8),单斜辉石Wo端元由北向南主要集中在41~48(极差值7)、41~47(极差值6)和37~50(极差值13)之间。

橄榄石的Fo值和Ni含量蕴含丰富的成岩成矿信息,如果母岩浆中MgO及Ni含量高,那么结晶的橄榄石中Fo值及Ni含量也相对较高;其次硫化物熔离和岩浆结晶分异也会影响橄榄石化学成分。硫不饱和条件下,岩浆结晶分异过程中橄榄石中Ni含量随着Fo值的减小而降低;在硫饱和条件下,由于Ni在硫化物中的分配系数远远大于其在橄榄石中的分配系数,硫化物熔离作用造成岩浆中Ni含量明显亏损,从而结晶出来的橄榄石中也将亏损Ni(Barnes, 1986; Li et al., 2000, 2003)。觉罗塔格带镁铁-超镁铁岩体中橄榄石Fo的范围集中在79.9~85.8之间,Ni含量集中在240×10⁻⁶~1797×10⁻⁶之间;中天山Fo值集中在78~82.2之间,Ni为200×10⁻⁶~1260×10⁻⁶;北山Fo值集中在83~90之间,Ni为976×10⁻⁶~3640×10⁻⁶(苏本勋等, 2009, 2010, 2012; Xia et al., 2013)。

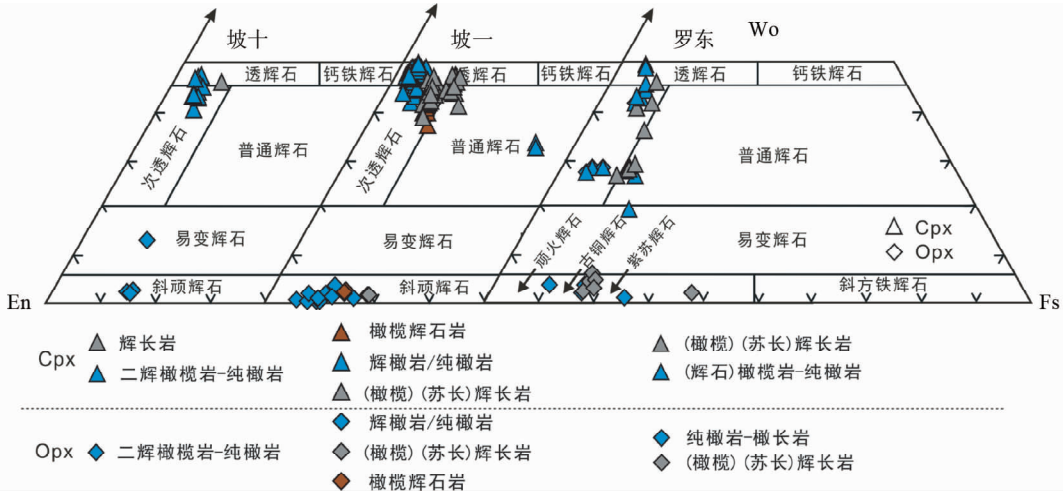


图5 北山坡北岩带典型镁铁-超镁铁岩体中单斜辉石和斜方辉石的分类图解(底图据 Morimoto, 1988)
 Fig.5 Diagram of classification for clinopyroxene and orthopyroxene in Pobei belt of Beishan (after Morimoto, 1988)

表6 东疆二叠纪典型镁铁-超镁铁岩体中的橄榄石成分特征

Table 6 Major elements content from olivine of typical mafic-ultramafic rocks in Eastern Xinjiang

地区	岩体	MgO (wt%)	FeO (wt%)	Ni (×10 ⁻⁶)	Fo	数据来源
觉罗塔格带	黄山东	33.7~43.0	15.9~27.7	502~2695	68.5~82.8	邓宇峰,2011
	黄山	34.0~45.4	13.1~25.1	230~1329	70.7~85.8	邓宇峰,2011;Mao et al., 2014
	香山	33.8~46.3	13.5~27.9	243~1681	82.5~85.9	夏明哲,2009;肖庆华,2010
	图拉尔根	35.6~45.7	13.4~24.4	267~1831	73.0~85.9	孙赫,2009
中天山	白石泉	40.0~45.3	14.3~19.8	691~1964	78.5~85.0	柴凤梅等,2006
	天宇	38.8~44.2	13.6~21.3	20.0~2300	76.8~85.4	唐冬梅,2009
北山	旋涡岭	42.2~45.9	15.2~19.4	746~1791	79.7~84.5	苏本勋等,2010
	笔架山	33.9~44.4	16.3~30.5	165~2593	68.7~83.1	Su,2014
	红石山	36.0~48.2	10.7~26.7	204~2695	70.5~89.4	苏本勋等,2009
	坡北	41.1~50.1	9.34~20.6	402~3778	78.0~90.5	苏本勋等,2012;本次研究
	罗东	42.0~47.4	12.0~18.5	990~3182	80.3~87.5	Su,2014

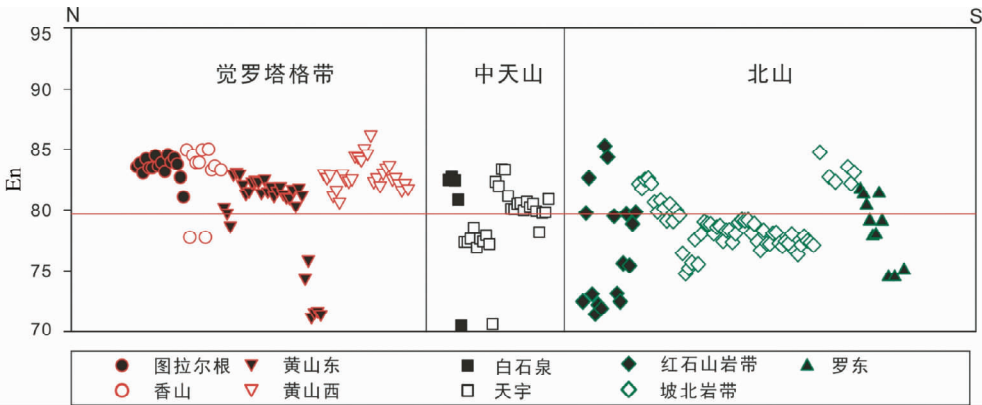


图6 觉罗塔格带、中天山和北山地区镁铁-超镁铁岩体的斜方辉石 En 值对比(数据见表4)
 Fig.6 En variations of orthopyroxene from Jueltage belt, Central Tianshan and Beishan complexes (data in Table 4)

觉罗塔格带-中天山-北山橄榄石的 Fo 值总体显示北山最高的特点,觉罗塔格带和中天山逐次降低。橄榄石 Fo 值在 78~86 之间和 Ni 低于 1800 × 10⁻⁶ 时更有利于成矿;斜方

辉石 En 端元和单斜辉石 Wo 端元极差值均北山相对较高,觉罗塔格带和中天山较低的特征,且相对小的 En 和 Wo 的极差值更有利于成矿。

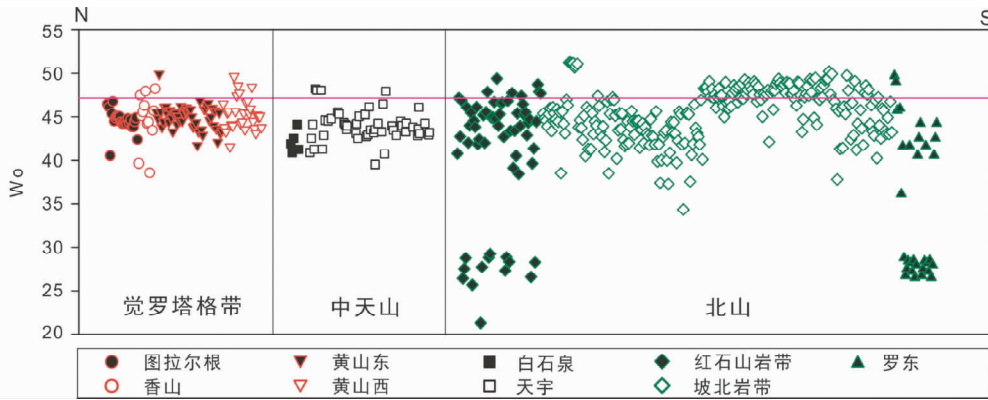


图7 觉罗塔格带、中天山和北山地区镁铁-超镁铁岩体的单斜辉石 W_o 值对比(数据见表5)

Fig.7 W_o variations of clinopyroxene from Jueluotage belt, Central Tianshan and Beishan complexes (data in Table 5)

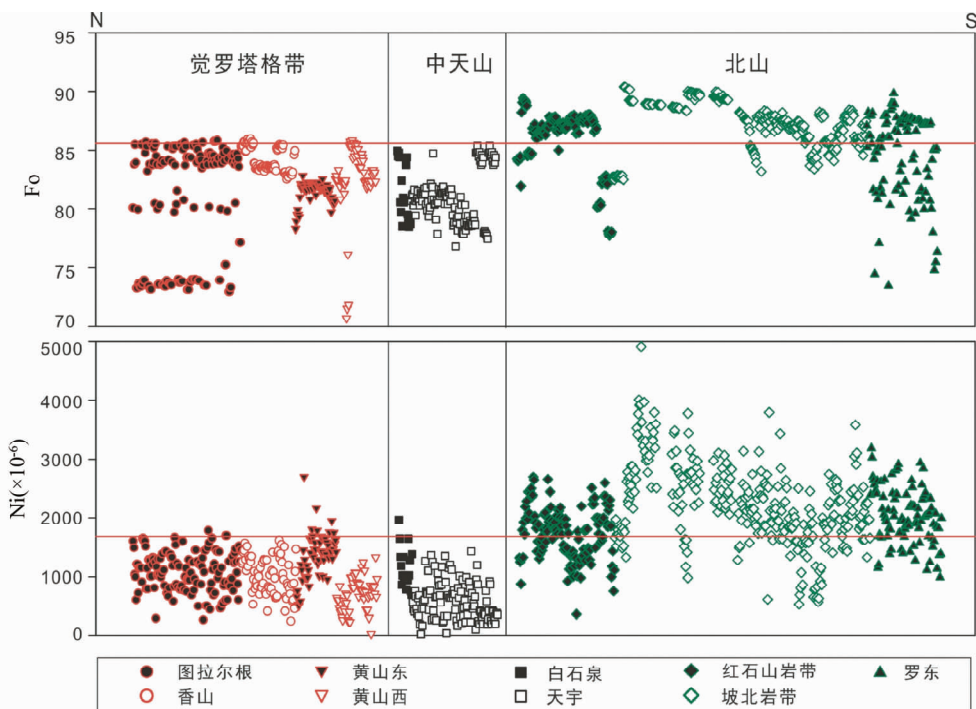


图8 觉罗塔格带、中天山和北山地区镁铁-超镁铁岩体的橄榄石 F_o 值及 Ni 含量对比

Fig.8 Compositional variations of olivine from Jueluotage belt, Central Tianshan and Beishan complexes

6 讨论

6.1 新疆镁铁-超镁铁质岩体的母岩浆性质

前人的研究表明单斜辉石的主量元素成分可以很好地反映母岩浆特征 (Le Bas, 1962; 邱家骧和廖群安, 1987, 1996; Seyler and Bonatti, 1994)。本次研究的电子探针结果及对前人数据的总结表明,觉罗塔格带、中天山和北山镁铁-超镁铁质岩体中单斜辉石和斜方辉石总体上具有低 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Na_2O 和 K_2O 的特点,综合 SiO_2 - Na_2O - TiO_2 三角图解 (邱家骧和廖群安, 1996),表明觉罗塔格带、中天山和北山

镁铁-超镁铁质岩体的母岩浆均为大陆拉斑玄武质岩浆 (图9)。

单斜辉石中 Al^IV 的含量取决于岩浆中硅的饱和度:岩浆中 Si 强烈不饱和 (对比岩浆 Si 的浓度),造成单斜辉石在结晶时,四面体位置的 Si 不足, Al^IV 进入四面体充填 Si 不足引起的空缺,而由四面体位置 Al^IV 对 Si 替代所导致的电荷不平衡,则需由 Al^VI 、 Fe^{3+} 和 Ti^{4+} 进入到八面体位置上来达到平衡 (Kushiro, 1960; Campbell and Borley, 1974; Vuorinen *et al.*, 2005; 寇彩化等, 2011)。觉罗塔格带-中天山-北山镁铁-超镁铁岩体的单斜辉石均为正岩浆期结晶的辉石,单斜辉石中 Al^IV 的含量呈现出中天山较高,觉罗塔格带其次,而

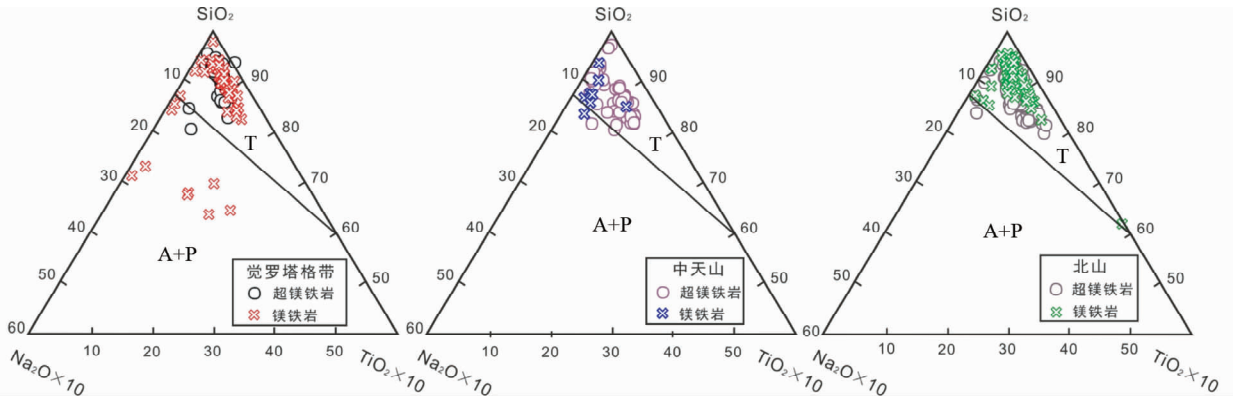


图9 东疆镁铁-超镁铁岩体单斜辉石 SiO₂-Na₂O-TiO₂ 关系图(据邱家骧和廖群安, 1996)

T-拉斑玄武岩系列; A-碱性系列; P-过碱性系列

Fig. 9 SiO₂-Na₂O-TiO₂ diagram of clinopyroxene (after Qiu and Liao, 1996)

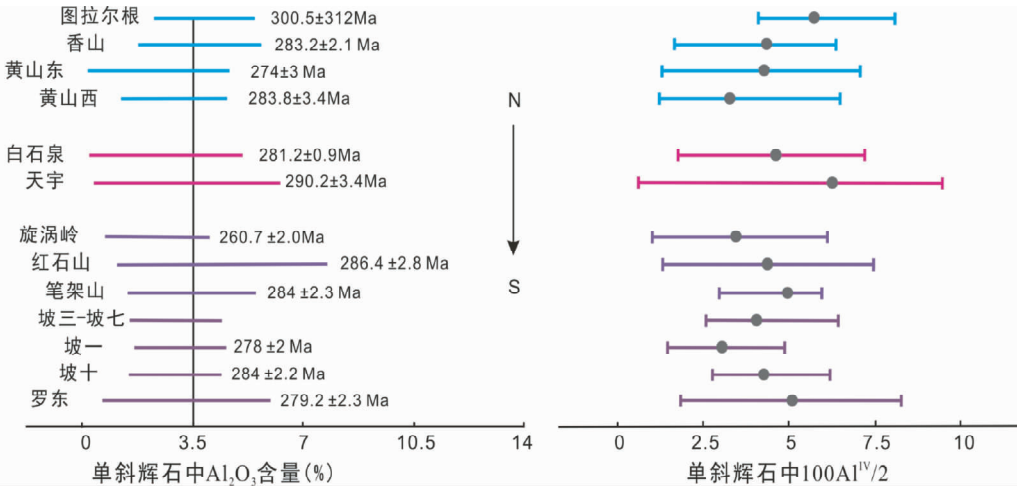


图10 东疆镁铁-超镁铁岩体中单斜辉石 Al₂O₃ 含量及 Al^{IV} 含量对比图解

Fig. 10 Comparison of Al₂O₃ and Al^{IV} in clinopyroxenes from mafic-ultramafic complexes in Eastern Xinjiang

北山最低的特点(图10),反应硅饱和度的差异。这种差异说明产出觉罗塔格带、中天山和北山镁铁-超镁铁岩体的地幔源区或岩浆演化历史可能有所不同,从而造成了三者岩石学、矿物学和地球化学等方面不同程度的差异。

6.2 辉石对岩浆体系硫饱和的指示

硫化物饱和时硫的溶解度(sulfur content at sulfide saturation, SCSS)随压力的降低而迅速增大已经被大量实验所证实(Wendlandt, 1982; Li and Agee, 1996; Mavrogenes and O'Neill, 1999; Li and Ripley, 2005)。Mavrogenes and O'Neill (1999) 通过实验研究得出在 0 ~ 100kb、1400 ~ 1800℃ 的范围内 SCSS 随压力变化了三个数量级,但随着温度只变化了一个数量级,表明压力相对于温度对 SCSS 的影响更为明显。

单斜辉石中 Al 的含量与压力的大小关系较为密切。

Kushiro(1960)与 Thompson(1974)研究表明,玄武质岩浆在高压结晶时,Al 易于以 Al^{VI} 成呈钙契尔马克分子(Ca₂Tsch, CaAl₂SiO₆)的形式进入单斜辉石中,故高压结晶的辉石富铝,Al^{VI}高;在低压结晶时,Al 易于以 Al^{IV} 代替 Si 进入斜长石,因而低压结晶的辉石贫铝,Al^{IV}高(邱家骧和廖群安, 1987)。单斜辉石 Al^{IV}/Al^{VI} 的结果显示北山地区具有比觉罗塔格带和中天山更高的 Al^{IV}/Al^{VI} 比值(图11),表明北山镁铁-超镁铁岩体在矿物结晶过程中压力较低,这与北山在二叠纪时期具有裂谷特征相吻合(徐学义等, 2009; Su et al., 2011, 2013)。较低的压力使得硫溶解度较大,硫相对难以达到饱和,造成硫化物不能大规模熔离,是北山镁铁-超镁铁岩体矿化程度较觉罗塔格带和中天山弱的一个重要因素。

6.3 辉石与俯冲交代作用

Loucks(1990)通过镁铁-超镁铁岩中辉石的 Al₂(占据单

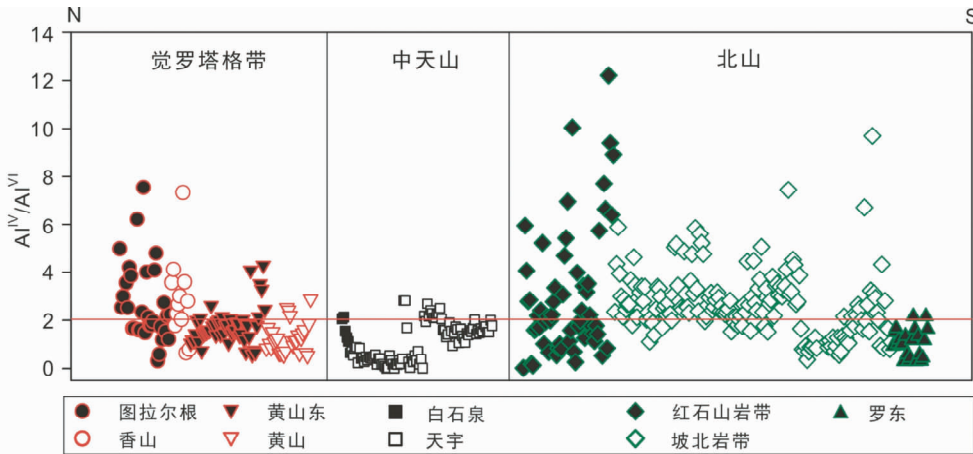


图 11 觉罗塔格带、中天山和北山地区镁铁-超镁铁岩体中的单斜辉石 Al^{IV}/Al^{VI} 比值对比

Fig. 11 Comparison of Al^{IV}/Al^{VI} in clinopyroxenes from mafic-ultramafic complexes in Eastern Xinjiang

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的 Alz/Ti 比值明显高于与裂谷相关的拉斑玄武岩。因此单斜辉石 Alz/Ti 比值可以用来识别新疆东部造山带中俯冲板片交代作用对于镁铁-超镁铁岩形成的影响程度。

觉罗塔格构造带单斜辉石与典型阿拉斯加型岩体具有相似的演化趋势, 介于裂谷堆晶趋势和弧堆晶趋势之间, 单斜辉石 Alz 和 Ti 的成分均在塔里木超镁铁岩范围内 (图 12a, a'); 中天山单斜辉石与觉罗塔格带特征相似, Alz vs. Ti 也显示裂谷堆晶趋势向弧堆晶趋势演化 (图 12b, b'); 北山红石山岩带北岩带单斜辉石显示明显的裂谷堆晶趋势, 且 Alz 和 Ti 的成分覆盖塔里木超镁铁岩的整体范围 (图 12c, c')。觉罗塔格带-中天山-北山的岩体中单斜辉石 Alz vs. Ti 的趋势特征表现出俯冲交代作用在觉罗塔格带和中天山地区表现的更为强烈。北山地区 Ti 含量表现出比觉罗塔格带和中天山更大的数据范围, 且部分坡北数据 (橄榄岩中单斜辉石) 显示高 Ti 异常, 其原因可能为: (1) 由于地壳中 Ti 的平均含量为 6400×10^{-6} , 上地幔中 Ti 的平均含量为 2500×10^{-6} , 硅铝 (镁) 质地壳的不均匀混染, 造成部分样品的高 Ti 异常; (2) Verhoogen (1962) 研究认为辉石中的 Ti 含量与全岩的 Ti 含量无直接关系, 辉石结晶时的温度越高, 则其所含 Ti 含量越高; 硅酸盐四面体位置 Al^{IV} 对 Si 的置换越多, 辉石中 Ti 含量越高, 即浅部岩浆房的岩浆 Si 相对不饱和, 且结晶环境氧逸度相对较低 (在低氧逸度条件下岩浆首先结晶出相对富镁的硅酸盐矿物, 导致残留岩浆相对富铁和钛 (Irvine and Baragar, 1971), 使得岩浆中 Fe^{3+} 含量较低, 主要由 Ti^{4+} 进入八面体位置来平衡 Al^{IV} 替代四面体位置的 Si 而引起的电价缺失。因此, 壳源物质的不均匀混染并不能影响单斜辉石中 Ti 的含量, 浅部岩浆房的高温度和低氧逸度才是主要的控制因素。

前人对觉罗塔格带镁铁-超镁铁岩体进行的 MELTS 模拟与矿物平衡计算出这些岩体的母岩浆初始和演化温度在

1100 ~ 1500°C 之间 (Zhou *et al.*, 2004; 柴凤梅等, 2006; 孙赫, 2009; 唐冬梅等, 2009)。柴凤梅等 (2006) 根据橄榄石和辉石的主量元素含量计算得出, 中天山白石泉岩体的橄榄石结晶温度为 $1295.45 \pm 26^\circ C$, 辉石的结晶温度为 1097 ~ 1113°C, 且都为正常岩浆期结晶的矿物。Su (2014) 使用单个单斜辉石温度计 (Nimis and Taylor, 2000) 计算出北山红石山镁铁-超镁铁岩体中含单斜辉石纯橄岩的温度为 1350 ~ 1450°C。上述结果显示, 北山母岩浆温度和硅酸盐结晶温度要高于觉罗塔格带和中天山地区, 这种高温岩体的形成可能与区域上大规模的二叠纪火山岩存在及岩浆活动有密切的关系。

6.4 母岩浆微量元素特征

前人研究已证明大部分微量元素对橄榄石为不相容性元素, 少量的橄榄石结晶对残余熔体微量元素含量影响很小 (Mckenzie and O'Nions, 1991; Stimac and Hickmott, 1994)。因此可以认为橄榄单辉岩的微量元素主要受单斜辉石控制, 故早期结晶的橄榄单辉岩中单斜辉石反演母岩浆微量元素可以有较好的效果。

根据单斜辉石/熔体分配系数公式:

$$D_{Cpx} = C_{Cpx}^i / C_L^i$$

(其中 C_{Cpx}^i 为单斜辉石中微量元素 i 的浓度, C_L^i 为母岩微量元素 i 浓度的比值)

坡北岩带中坡三岩体橄榄单辉岩表现为等粒结构, 辉石主要为单斜辉石, 斜方辉石的含量 5% ~ 10%, 橄榄石含量小于 5%。单斜辉石颗粒晶形较好, 粒度约 1000 ~ 1500 μm , 呈现出正堆晶相的特点, 而辉橄岩相样品中单斜辉石则主要为它形的填隙相, 同时橄榄单辉岩中单斜辉石的 $Mg^{\#}$ 值高于其它所有含单斜辉石的岩相, 表现出早期结晶的特点。Tang *et al.* (2013) 也证实其所选取的橄榄单辉岩样品为觉罗塔格带香山中岩体早期结晶的岩相。坡北镁铁-超镁铁岩体中橄榄

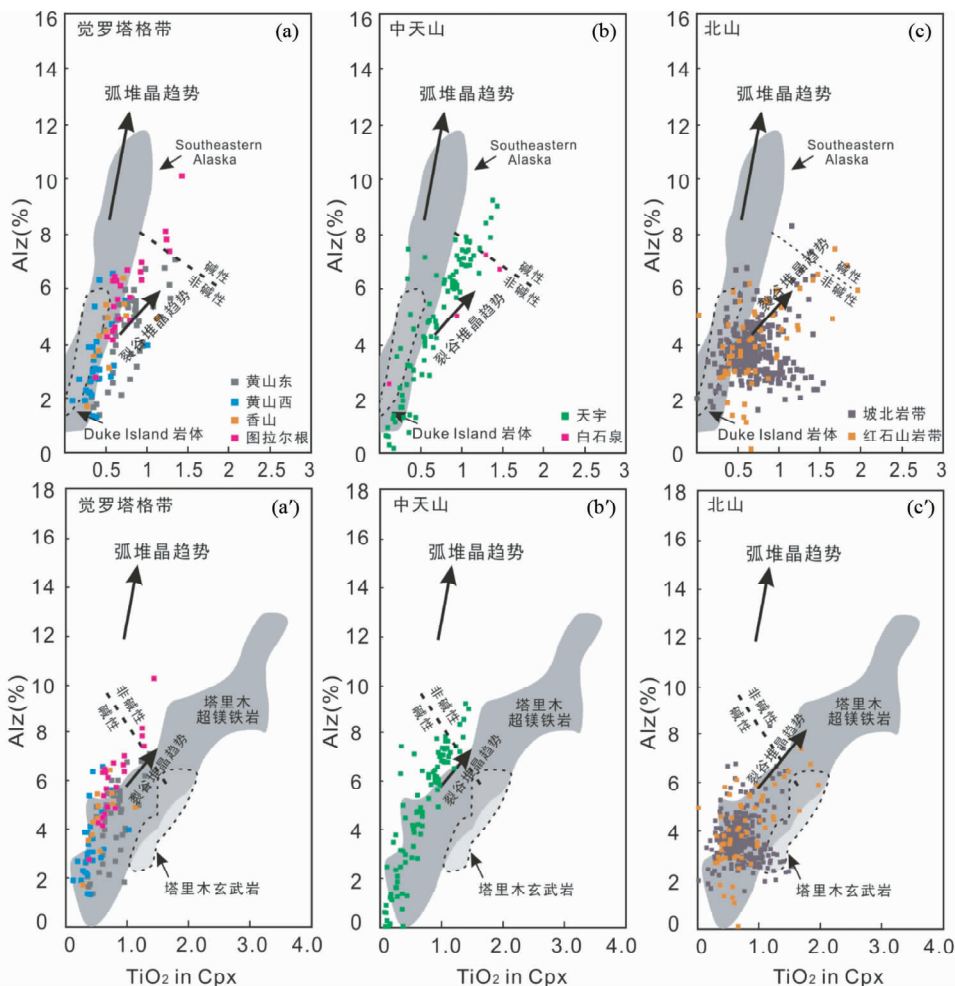


图 12 觉罗塔格带(a, a')、中天山(b, b')和北山(c, c')镁铁-超镁铁岩体中的单斜辉石 Alz (Al 四面体位置的百分含量 $(100 \times \text{Al}^{\text{IV}})/2$) 相关图解

Alaskan 型岩体 Southeastern Alaska 数据引自 Himmelberg and Loney (1995), Duke Island 数据引自 Thakurta *et al.* (2008); 塔里木超基性岩引自杨树锋等(2007)、姜常义等(2004)、厉子龙等(2008)和 Li *et al.* (2012); 塔里木玄武岩引自厉子龙等(2008). 弧堆晶和裂谷堆晶岩趋势及碱性-非碱性界线据 Le Bas (1962) 和 Loucks (1990)

Fig. 12 Clinopyroxene compositions from mafic-ultramafic complexes in Jueluotage belt (a, a'), Mid Tianshan (b, b') and Beishan (c, c')

The discrimination diagrams are after Le Bas (1962) where Alz refers to the percentage of Al in the tetrahedral sites $(100 \times \text{Al}^{\text{IV}})/2$

石 Fo 的最高值明显高于觉罗塔格带和中天山同时代岩体(图 8), 部分 Fo 值甚至高达地幔橄榄岩中橄榄石范围 ($\text{Fo} > 90$), 这说明坡北原始岩浆在上升侵位过程中并未经明显的硅酸盐结晶过程, 橄榄石的结晶分异对残余岩浆中微量元素含量影响较小, 因此通过早期结晶的单斜辉石可以估算其结晶时岩浆的微量元素成分特征。

通过北山坡三岩体较早结晶的橄榄单辉岩中单斜辉石的微量元素含量, 反演得出单斜辉石结晶时熔体的微量元素具有 HREE 相对较为平坦, LREE 相对 HREE 富集, LILE 正异常, HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf) 负异常的特征, 表现出岛弧岩浆的性质, 与东疆觉罗塔格构造带内香山中岩体的稀土元素和微量元素配分模式极为相似。但微量元素含量总体较香山

中略低(图 13), 稀土元素分异程度低于香山中岩体, Nb 和 Zr, Hf 的负异常更明显。上述特征揭示形成坡北岩体的熔体可能经历了较低程度的地壳混染, 地幔源区的部分熔融程度更高, 或者源区经历了较低程度的俯冲板片/流体改造作用。与同时代产出的北山柳园玄武岩、塔里木玄武岩和苦橄岩相比 (Tian *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011; Yuan *et al.*, 2012), 北山坡北和觉罗塔格带香山中熔体的微量元素含量及标准化分配模式与柳园玄武岩相近, 微量元素含量低于塔里木玄武岩, 且 LILE 和 HFSE 含量与塔里木苦橄岩相近, 结合北山岩体部分单斜辉石为高温、低氧逸度的产物, 用地壳混染和源区的俯冲改造作用很难解释。Xu *et al.* (2014) 通过早二叠世塔里木大火成岩省成因的研究提出“地幔柱孵化

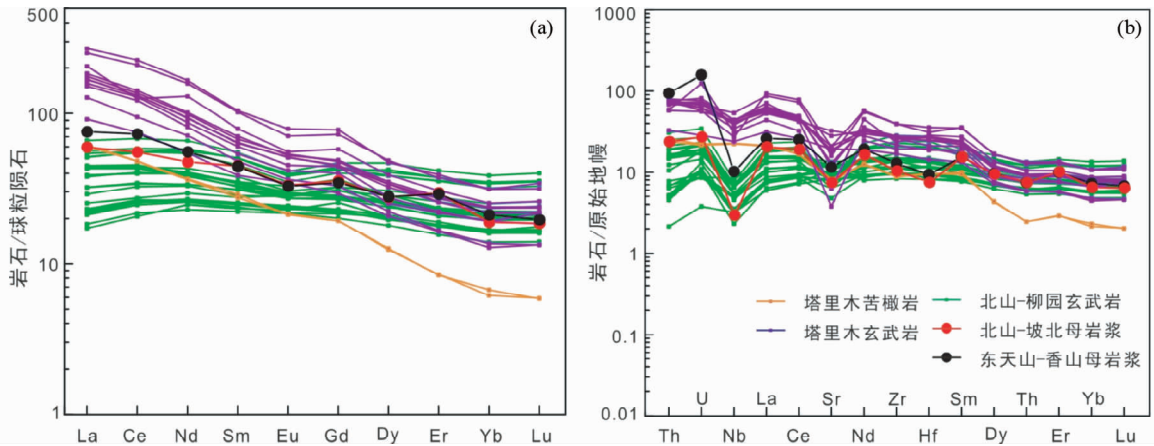


图 13 北山坡三岩体、觉罗塔格带香山岩体母岩浆和同时代塔里木苦橄岩、玄武岩及北山柳园玄武岩稀土 (a) 和微量元素 (b) 配分图解对比 (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

香山单斜辉石数据引自 Tang *et al.* (2013), 北山柳园玄武岩数据引自 Zhang *et al.* (2011), 塔里木苦橄岩数据引自 Tian *et al.* (2010), 塔里木玄武岩数据引自 Yuan *et al.* (2012). 单斜辉石/熔体配分系数 $D_c^{px}/melt$ 引自 Hart and Dunn (1993), Hauri *et al.* (1994)

Fig. 13 A comparison of chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of the parental magma of Xiangshan and Posan, and coeval basalts in the Tarim and Liu yuan (normalized values are from Sun and McDonough, 1989)

模式”, 经减压熔融产出的玄武质熔体形成 ~280Ma 镁铁-超镁铁质侵入体和岩墙群, 因此塔里木东北缘北山岩体很可能经历了高温、高部分熔融程度的地幔柱活动的影响。

多数学者认为觉罗塔格带和北山在晚石炭世-早二叠世早期为碰撞造山期, 二叠纪时期已处于造山后伸展环境, 该时期的镁铁-超镁铁岩体即为伸展背景下的产物 (顾连兴等, 1994; 秦克章等, 2002; 孙赫等, 2007; 李建忠等, 2010; Qin *et al.*, 2003, 2011; Han *et al.*, 2006)。在之前的南天山洋和准噶尔洋的俯冲过程中, 俯冲带地区的地幔一直在经历俯冲板片的改造作用, 但坡北的源区交代程度最低、部分熔融程度高于觉罗塔格构造带内岩体。觉罗塔格带和中天山受俯冲板片交代和改造的范围更广和程度更高, 因此部分熔融产生的岩浆显示的岛弧岩浆的特征和性质更为明显。随后天山东段进入造山后伸展阶段以及 ~280Ma 地幔柱的强烈活动使得该区大量幔源岩浆上侵 (Qin *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2014), 形成大量二叠世的镁铁-超镁铁岩体。综上所述, 觉罗塔格带、中天山和北山镁铁-超镁铁岩的亏损地幔源区经历了不同程度的与俯冲作用有关的改造作用。这些地区的岩浆活动均为造山后伸展作用与地幔柱叠加的结果, 而北山地区的岩浆活动可能受地幔柱的影响更为明显, 造成了不同构造带内岩石-矿物-地球化学-成矿作用不同的镁铁-超镁铁岩体。

7 结论

新疆早二叠世的镁铁-超镁铁岩体中斜方辉石 En 端元和单斜辉石 Wo 端元极差值显示北山最高、觉罗塔格带和中

天山较低的规律, 且相对小的 En 和 Wo 的极差值更有利于成矿。橄榄石的 Fo 总体也显示北山最高、觉罗塔格带到中天山逐次降低的特点, 橄榄石 Fo 介于 78 ~ 86 之间和 Ni 低于 1800×10^{-6} 的范围内更有利于成矿。

北山镁铁-超镁铁质岩体在矿物结晶过程中压力较低, 是其矿化程度弱于觉罗塔格带和中天山一个重要因素; 觉罗塔格带、中天山和北山岩体的母岩浆为非碱性系列、大陆拉斑玄武质岩浆, 三者硅饱和度的差异说明产出这些地区镁铁-超镁铁岩体的地幔源区特征可能存在差异。

母岩浆和辉石特征指示出坡北地幔源区受俯冲交代程度最弱, 在觉罗塔格带和中天山地区表现的更为强烈。同时北山地区具有比觉罗塔格带和中天山更高的岩浆结晶温度, 这些可能与新疆地区大规模的二叠纪地幔柱活动有关。

致谢 研究工作中, 与美国 Indiana University 李楚思研究员和中国科学院地质与地球物理研究所李光明副研究员进行了多次讨论, 并给予了建议; 野外工作中承蒙新疆地矿局第六地质大队邓刚总工程师、王恒副总工程师、新疆有色地勘局 704 队三金柱总工程师和多位技术人员的大力支持与帮助; 匿名审稿专家和苏本勋副研究员悉心审稿并提出了宝贵意见和建议。在此一并致以衷心感谢!

References

- Barnes SJ. 1986. The effect of trapped liquid crystallization on cumulus mineral compositions in layered intrusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 93(4): 524 - 531
- Campbell IH and Borley GD. 1974. The geochemistry of pyroxenes from

- the lower layered series of the Jimberlana intrusion, Western Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 47(4): 281 – 297
- Chai FM, Zhang ZC, Mao JW, Dong LH, Zhang ZH, Ye HS, Wu H and Mo XH. 2006. Petrography and mineralogy of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 1 – 12 (in Chinese with English abstract)
- Chai FM, Zhang ZC, Mao JW, Dong LH, Zhang ZH and Wu H. 2008. Geology, petrology and geochemistry of the Baishiquan Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang, NW China: Implications for tectonics and genesis of ores. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2 – 4): 218 – 235
- Deng YF. 2011. Geneses of the Huangshandong and Huangshanxi mafic-ultramafic intrusions and hosted Cu-Ni sulfide deposits, northern Tianshan, Xinjiang. Ph. D. Dissertation. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 1 – 177 (in Chinese)
- Deng YF, Song XY, Chen LM, Cheng SL, Zhang XL and Li J. 2011. Features of the mantle source of the Huangshanxi Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3640 – 3652 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Chu JL, Guo JC, Liao JJ, Yan ZF, Yang H and Wang JZ. 1994. The east Xinjiang-type mafic-ultramafic complexes in orogenic environments. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 339 – 356 (in Chinese)
- Guo NX, Jiang CY, Song YF, Xia MJ, Ling JL, Xia ZD and Wang BY. 2012. Petrogenesis of the olivine gabbro-norite in Pobei complex, Northeast Tarim Plate. *Geological Review*, 58(5): 873 – 886 (in Chinese with English abstract)
- Han CM, Xiao WJ, Zhao GC, Mao JW, Yang JM, Wang ZL, Yan Z and Mao QQ. 2006. Geological characteristics and genesis of the Tuwu porphyry copper deposit, Hami, Xinjiang, Central Asia. *Ore Geology Reviews*, 29(1): 77 – 94
- Han CM, Xiao WJ, Zhao GC, Ao SJ, Zhang J, Qu WJ and Du AD. 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. *Lithos*, 120(3 – 4): 547 – 562
- Hart SR and Dunn T. 1993. Experimental cpx/melt partitioning of 24 trace elements. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(1): 1 – 8
- Haughton DR, Roeder PL and Skinner BJ. 1974. Solubility of sulfur in mafic magmas. *Economic Geology*, 69(4): 451 – 467
- Hauri EH, Wagner TP and Grove TL. 1994. Experimental and natural partitioning of Th, U, Pb and other trace elements between garnet, clinopyroxene and basaltic melts. *Chemical Geology*, 117(1 – 4): 149 – 166
- Himmelberg GR and Loney RA. 1995. Characteristics and petrogenesis of Alaskan-type ultramafic-mafic intrusions, southeastern Alaska. USGS Professional Paper, 1564: 1 – 47
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523 – 548
- Irving AJ and Frey FA. 1984. Trace element abundances in megacrysts and their host basalts: Constraints on partition coefficients and megacryst genesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(6): 1201 – 1221
- Jiang CY, Zhang PB, Lu DR and Bai KY. 2004. Petrogenesis and magma source of the ultramafic rocks at Wajilitag region, western Tarim Plate in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1433 – 1444 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Cheng SL, Ye SF, Xia MZ, Jiang HB and Dai YC. 2006. Litho-geochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body, at Beishan region, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 115 – 126 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Guo NX, Xia MZ, Ling JL, Guo FF, Deng XQ, Jiang HB and Fan YZ. 2012. Petrogenesis of the Poyi mafic-ultramafic layered intrusion, NE Tarim Plate. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2209 – 2223 (in Chinese with English abstract)
- Kinzler RJ. 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition; Application to mid-ocean ridge basalt petrogenesis. *Journal of Geophysical Research*, 102(B1): 853 – 874
- Kou CH, Zhang ZC, Liao BL, Li HB and Hou T. 2011. Mineralogy of clinopyroxene in Jianchuan picritic porphyry of western Yunnan Province and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 449 – 462 (in Chinese with English abstract)
- Kushiro I. 1960. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks. *American Journal of Science*, 258(8): 548 – 554
- Le Bas MJ. 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260(4): 267 – 288
- Li CS, Lightfoot PC, Amelin Y and Naldrett AJ. 2000. Contrasting petrological and geochemical relationships in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada: Implications for ore genesis. *Economic Geology*, 95(4): 771 – 799
- Li CS, Ripley EM and Naldrett AJ. 2003. Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia: Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits. *Economic Geology*, 98(1): 69 – 86
- Li CS, Xu ZH, de Waal SA, Ripley EM and Maier WD. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 39(2): 159 – 172
- Li CS and Ripley EM. 2005. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits. *Mineralium Deposita*, 40(2): 218 – 230
- Li CS, Naldrett AJ and Ripley EM. 2007. Controls on the Fo and Ni contents of olivine in sulfide-bearing mafic/ultramafic intrusions: Principles, modeling, and examples from Voisey's Bay. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 177 – 183
- Li J and Agee CB. 1996. Geochemistry of mantle-core differentiation at high pressure. *Nature*, 381(6584): 686 – 689
- Li JX, Qin KZ, Xu XW, Sun H, Cheng SL, Wu H and Mo XH. 2007. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complex in East Tianshan, Xinjiang: Constraints on ore genesis and tectonic setting. *Mineral Deposits*, 26(1): 43 – 57 (in Chinese with English abstract)
- Li JZ, Wu XZ, Qi XF, Zheng M and Zhang QC. 2010. Distribution and tectonic setting of Upper Paleozoic volcanic rock in northern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 195 – 206 (in Chinese with English abstract)
- Li SB, Hu RZ, Song XY, Chen LM and Shen NP. 2008. Sulfide separation control in Ni content of olivine in bearing-ore intrusion of magma deposit: An example from Jinchuan intrusion. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(2): 146 – 152 (in Chinese with English abstract)
- Li YQ, Li ZL, Chen HL, Yang SF and Yu X. 2012. Mineral characteristics and metallogenesis of the Wajilitag layered mafic-ultramafic intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposit in the Tarim large igneous province, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 161 – 174
- Li ZL, Yang SF, Chen HL, Langmuir CH, Yu X, Lin XB and Li YQ. 2008. Geochronology and geochemistry of Taxinan basalts from the Tarim basin: Evidence for Permian plume magmatism. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 959 – 970 (in Chinese with English abstract)
- Ling JL. 2011. Geochemical character and petrogenesis of Luodong mafic-ultramafic layered intrusion in Beishan area, Xinjiang, P. R. China. Master Degree Thesis. Xi'an: Chang'an University, 1 – 59 (in Chinese with English summary)
- Liotard JM, Briot D and Boivin P. 1988. Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali-basalts from Massif Central (France). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(1): 81 – 90
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH.

2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43
- Loucks RR. 1990. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene. *Geology*, 18(4): 346-349
- Lu RH. 2010. Geochemical characters and petrogenesis of Hongshishan mafic-ultramafic layered intrusion in Beishan district, Xinjiang. Master Degree Thesis. Xi'an: Chang'an University, 1-64 (in Chinese with English summary)
- Mao JW, Pirajno F, Zhang ZH, Chai FM, Wu H, Chen SP, Cheng LS, Yang JM and Zhang CQ. 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2-4): 184-203
- Mao QG, Xiao WJ, Han CM, Sun M, Yuan C, Tan Z, Li JL, Yong Y and Zhang JE. 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang Province: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 153-162 (in Chinese with English abstract)
- Mao YJ, Qin KZ, Li CS, Xue SC and Ripley EM. 2014. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China. *Lithos*, 200-201: 111-125
- Mavrogenes JA and O'Neill HSC. 1999. The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7-8): 1173-1180
- McDonough WF, Stosch HG and Ware NG. 1992. Distribution of titanium and the rare earth elements between peridotitic minerals. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2-3): 321-328
- McKenzie D and O'Nions RK. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32(5): 1021-1091
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39(1): 55-76
- Naldrett AJ and Von Gruenewaldt G. 1989. Association of platinum-group elements with chromitite in layered intrusions and ophiolite complexes. *Economic Geology*, 84(1): 180-187
- Naldrett AJ. 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*, 34(3): 227-240
- Nimis P and Taylor WR. 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(5): 541-554
- Nisbet EG and Pearce JA. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149-160
- Pirajno F, Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Chai FM. 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2-4): 165-183
- Qin KZ, Fang TH, Wang SL, Zhu BQ, Feng YM, Yu HF and Xiu QY. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains, NW-China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 302-308 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Zhang LC, Xiao WJ, Xu XW, Yan Z and Mao JW. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, northwestern China. In: Mao JW, Goldfarb RJ, Seltmann R, Wand D, Xiao WJ and Hart W (eds.). *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. London: Natural History Museum, 227-249
- Qin KZ, Xu XW, Liang GH, Fang TH, Ding KS, San JZ, Zhang LC, Hui WD, Peng XM, Wu H, Cheng SL, Xu YX, Sun H, Miu Y, Mo XH, Cai XP, Kang F, Zhang BL and Xiao QH. 2006. Advance in research on metallogenetic regularity, target selection and location prognosis for large-scale Cu, Ni and Au deposits at eastern Tianshan. *Mineral Deposits*, 25(Suppl. 2): 301-304 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Ding KS, Xu YX, Sun H, Xu XW, Tang DM and Mao Q. 2007. Ore potential of protholiths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 26(1): 1-14 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Su BX, Sakyi PA, Tang DM, Li XH, Sun H, Xiao QH and Liu PP. 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. 280Ma mantle plume. *American Journal of Science*, 311(3): 237-260
- Qiu JX and Liao QA. 1987. The main characteristics and genetic information of clinopyroxene megacrysts in Cenozoic basalt of eastern China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 6(1): 56-63 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JX and Liao QA. 1996. Petrogenesis and Cpx mineral chemistry of Cenozoic basalts from Zhejiang and Fujian of eastern China. *Volcanology and Mineral Resources*, 17(S): 16-25 (in Chinese with English abstract)
- Rampono E, Bottazzi P and Ottolini L. 1991. Complementary Ti and Zr anomalies in orthopyroxene and clinopyroxene from mantle peridotites. *Nature*, 354(6354): 518-521
- Seyler M and Bonatti E. 1994. Na, Al^{IV} and Al^{VI} in clinopyroxenes of subcontinental and suboceanic ridge peridotites: A clue to different melting processes in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 122(3-4): 281-289
- Stimac J and Hickmott D. 1994. Trace-element partition coefficients for ilmenite, orthopyroxene and pyrrhotite in rhyolite determined by micro-PIXE analysis. *Chemical Geology*, 117(1-4): 313-330
- Streck MJ. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 595-622
- Su BX, Qin KZ, Sun H, Tang DM, Xiao QH and Cao MJ. 2009. Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang: Implications for assimilation and fractional crystallization. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 873-887 (in Chinese with English abstract)
- Su BX, Qin KZ, Sun H and Wang H. 2010. Geochronological, petrological, mineralogical and geochemical studies of the Xuanwoling mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3283-3294 (in Chinese with English abstract)
- Su BX, Qin KZ, Tang DM, Deng G, Xiao QH, Sun H, Lu HF and Dai YC. 2011. Petrological features and implications for mineralization of the Poshi mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3627-3639 (in Chinese with English abstract)
- Su BX, Qin KZ, Sakyi PA, Malaviarachchi SPK, Liu PP, Tang DM, Xiao QH, Sun H, Ma YG and Mao Q. 2012a. Occurrence of an Alaskan-type complex in the Middle Tianshan Massif, Central Asian Orogenic Belt: Inferences from petrological and mineralogical studies. *International Geology Review*, 54(3): 249-269
- Su BX, Qin KZ, Sun H, Tang DM, Xiao QH, Liu PP and Sakyi PA. 2012b. Olivine compositional mapping of mafic-ultramafic complexes in eastern Xinjiang (NW China): Implications for Cu-Ni mineralization and tectonic dynamics. *Journal of Earth Science*, 23(1): 41-53
- Su BX, Qin KZ, Sun H, Tang DM, Sakyi PA, Chu ZY, Liu PP and Xiao QH. 2012c. Subduction-induced mantle heterogeneity beneath Eastern Tianshan and Beishan: Insights from Nd-Sr-Hf-O isotopic mapping of Late Paleozoic mafic-ultramafic complexes. *Lithos*, 134-135: 41-51
- Su BX, Qin KZ, Santosh M, Sun H and Tang DM. 2013. The Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan Terrane, NW

- China; Alaskan-type intrusives or rift cumulates? *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 175 – 187
- Su BX. 2014. Mafic-ultramafic Intrusions in Beishan and Eastern Tianshan at Southern CAOB: Petrogenesis, Mineralization and Tectonic Implication. Berlin, Heidelberg: Springer, 1 – 211
- Sun H, Qin KZ, Xu XW, Li JX, Ding KS, Xu YX and San JZ. 2007. Petrological characteristics and copper-nickel ore-forming processes of Early Permian mafic-ultramafic intrusion belts in East Tianshan. *Mineral Deposits*, 26(1): 98 – 108 (in Chinese with English abstract)
- Sun H. 2009. Ore-forming mechanism in conduit system and ore-bearing property evaluation for mafic-ultramafic complex in Eastern Tianshan, Xinjiang. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1 – 262 (in Chinese with English summary)
- Sun H, Qin KZ, Tang DM, Xiao QH, Su BX and Lu HF. 2010. Olivine characteristics' implication for magmatic evolution and sulfide segregation of Luodong complex in Beishan area, Xinjiang. *Science & Technology Review*, 28(18): 21 – 26 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magma-tism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345
- Sun T, Qian ZZ, Deng YF, Li C, Song XY and Tang Q. 2013. 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. *Economic Geology*, 108(8): 1849 – 1864
- Tang DM. 2009. Geochemical tracing and enrichment regularity of platinum-group element (PGE) in nickel-copper sulfide deposits hosted in post-collision mafic-ultramafic intrusions, Eastern Tianshan. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 65 – 72 (in Chinese with English summary)
- Tang DM, Qin KZ, Sun H, Su BX, Xiao QH, Cheng SL and Li J. 2009. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: Constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 817 – 831 (in Chinese with English abstract)
- Tang DM, Qin KZ, Li CS, Qi L, Su BX and Qu WJ. 2011. Zircon dating, Hf-Sr-Nd-Os isotopes and PGE geochemistry of the Tianyu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China. *Lithos*, 126(1–2): 84 – 98
- Tang DM, Qin KZ, Sun H, Su BX and Xiao QH. 2012. 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 145 – 160
- Tang DM, Qin KZ, Su BX, Sakyi PA, Liu YS, Mao Q, Santosh M and Ma YG. 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. *Lithos*, 170 – 171: 144 – 163
- Thakurta J, Ripley EM and Li CS. 2008. Geochemical constraints on the origin of sulfide mineralization in the Duke Island Complex, southeastern Alaska. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Q07003. doi: 10.1029/2008GC001982
- Thompson RN. 1974. Primary basalts and magma genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 45(4): 317 – 341
- Tian W, Campbell IH, Allen CM, Guan P, Pan WQ, Chen MM, Yu HJ and Zhu WP. 2010. The Tarim picrate-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from Northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(3): 407 – 425
- Wendlandt RF. 1982. Sulfide saturation of basalt and andesite melts at high pressures and temperatures. *American Mineralogist*, 67: 877 – 885
- Verhoogen J. 1962. Distribution of titanium between silicates and oxides in igneous rocks. *American Journal of Science*, 260(3): 211 – 220
- Vuorinen JH, Hälenius U, Whitehouse MJ, Mansfeld J and Skelton ADL. 2005. Compositional variations (major and trace elements) of clinopyroxene and Ti-andradite from pyroxenite, ijolite and nepheline syenite, Alnö Island, Sweden. *Lithos*, 81(1–4): 55 – 77
- Xia MZ. 2009. The mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan Region Eastern Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and mineralization implication. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English summary)
- Xia MZ, Jiang CY, Li C and Xia ZD. 2013. Characteristics of a newly discovered Ni-Cu sulfide deposit hosted in the Poyi ultramafic intrusion, Tarim Craton, NW China. *Economic Geology*, 108(8): 1865 – 1878
- Xia MZ, Zhao XJ, Song YF, Guo NX, Xia ZD and Jiang CY. 2013. Geochemical characteristics of the platinum group elements from the Poshi intrusion, northeastern Tarim block and its mineralization. *Geology and Exploration*, 49(1): 1 – 8 (in Chinese with English abstract)
- Xia ZD. 2012. Petrogenesis of mafic-ultramafic intrusions in Bijiashan Belt, Beishan area, Xinjiang, P. R. China. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English summary)
- Xia ZD, Wang Y, Jiang CY, Ling JL, Xia MZ and Guo NX. 2013. Petrography and mineralogy of the Xuanwoling mafic-ultramafic layered intrusion in the Beishan region, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 486 – 497 (in Chinese with English abstract)
- Xiao QH. 2010. Origin of Xiangshanxi Cu-Ni-Ti-Fe composite deposit in Eastern Tianshan, NW China, and its implications. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1 – 191 (in Chinese)
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370 – 395
- Xiao WJ, Mao QG, Windley BF, Han CM, Qu JF, Zhang JE, Ao SJ, Guo QQ, Clevener NR, Lin SF, Shan YH and Li JL. 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage. *American Journal of Science*, 310(10): 1553 – 1594
- Xiao YF, Wang DY, Wu DC, Deng JH and He ZW. 2000. Geological Evolution of the Western Beishan Tectonic Belt of Xinjiang. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology; Urumqi: Xinjiang Publishing House of Science, Technology and Hygiene (in Chinese)
- Xu XW, Ma TL, Sun LQ and Cai XP. 2003. Characteristics and dynamic origin of the large-scale Jiaoluotage ductile compressional zone in the eastern Tianshan Mountains, China. *Journal of Structural Geology*, 25(11): 1901 – 1915
- Xu XY, He SP, Wang HL and Chen JL. 2009. Geological Background of Ore Deposit in the Eastern Tianshan-Beishan Area. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xu YG, Wei X, Luo ZY, Liu HQ and Cao J. 2014. The Early Permian Tarim Large Igneous Province: Main characteristics and a plume incubation model. *Lithos*, 204: 20 – 35
- Yang SF, Yu X, Chen HL, Li ZL, Wang QH and Luo JC. 2007. Geochemical characteristics and petrogenesis of Permian Xiaohaizi ultrabasic dyke in Bachu area, Tarim basin. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1087 – 1096 (in Chinese with English abstract)
- Yuan F, Zhou TF, Zhang DY, Fan Y, Liu S, Peng MX and Zhang JD. 2010. Source, evolution and tectonic setting of the basalts from the native copper mineralization area in eastern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 533 – 546 (in Chinese with English abstract)
- Yuan F, Zhou TF, Zhang DY, Jowitt SM, Keays RR, Liu S and Fan Y. 2012. Siderophile and chalcophile metal variations in basalts: Implications for the sulfide saturation history and Ni-Cu-PGE mineralization potential of the Tarim continental flood basalt

- province, Xinjiang Province, China. *Ore Geology Reviews*, 45: 5 – 15
- Zhang YY, Dostal J, Zhao ZH, Liu C and Guo ZJ. 2011. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of mafic and ultramafic rocks from Southern Beishan area, NW China: Implications for crust-mantle interaction. *Gondwana Research*, 20(4): 816 – 830
- Zhou MF, Leshner CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma 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. *Chemical Geology*, 209(3–4): 233 – 257
- ### 附中文参考文献
- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 董连慧, 张作衡, 叶会寿, 吴华, 莫新华. 2006. 中天山白石泉镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学研究. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 1 – 12
- 邓宇峰. 2011. 新疆北天山黄山东与黄山西镁铁-超镁铁岩体及 Cu-Ni 硫化物矿床成因. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1 – 177
- 邓宇峰, 宋谢炎, 陈列锰, 程松林, 张新利, 李军. 2011. 东天山黄山西含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体岩浆地幔源区特征研究. *岩石学报*, 27(12): 3640 – 3652
- 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 廖静娟, 严正富, 杨浩, 王金珠. 1994. 造山带环境中的东疆型镁铁-超镁铁杂岩. *岩石学报*, 10(4): 339 – 356
- 郭娜欣, 姜常义, 宋艳芳, 夏明哲, 凌锦兰, 夏昭德, 汪帮耀. 2012. 塔里木板块东北部坡北岩体内橄榄辉长苏长岩岩石成因. *地质论评*, 58(5): 873 – 886
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登荣, 白开寅. 2004. 新疆塔里木板块西部瓦吉里塔格地区二叠纪超镁铁岩的岩石成因与岩浆源区. *岩石学报*, 20(6): 1433 – 1444
- 姜常义, 程松林, 叶书锋, 夏明哲, 姜寒冰, 代玉财. 2006. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因. *岩石学报*, 22(1): 115 – 126
- 姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 凌锦兰, 郭芳放, 邓小芹, 姜寒冰, 范亚洲. 2012. 塔里木板块东北部坡-镁铁质-超镁铁质层状侵入体岩石成因. *岩石学报*, 28(7): 2209 – 2223
- 寇彩化, 张招崇, 廖宝丽, 李宏博, 侯通. 2011. 滇西剑川苦橄玢岩中单斜辉石的矿物学特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 449 – 462
- 李金祥, 秦克章, 徐兴旺, 孙赫, 程松林, 吴华, 莫新华. 2007. 新疆东天山白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因和构造背景的制约. *矿床地质*, 26(1): 43 – 57
- 李建忠, 吴晓智, 齐雪峰, 郑曼, 张庆春. 2010. 新疆北部地区上古生界火山岩分布及其构造环境. *岩石学报*, 26(1): 195 – 206
- 李士彬, 胡瑞忠, 宋谢炎, 陈烈猛, 沈能平. 2008. 硫化物熔离对岩浆硫化物含矿岩体中橄榄石 Ni 含量的影响——以金川岩体为例. *矿物岩石地球化学通报*, 27(2): 146 – 152
- 房子龙, 杨树锋, 陈汉林, Langmuir CH, 余星, 林秀彬, 励音骐. 2008. 塔西南玄武岩年代学和地球化学特征及其对二叠纪地幔柱岩浆演化的制约. *岩石学报*, 24(5): 959 – 970
- 凌锦兰. 2011. 新疆北山地区罗东镁铁质-超镁铁质层状岩体的地球化学特征与岩石成因. 硕士学位论文. 西安: 长安大学, 1 – 59
- 卢荣辉. 2010. 新疆北山地区红石山镁铁质-超镁铁质层状岩体的地球化学特征与岩石成因. 硕士学位论文. 西安: 长安大学, 1 – 64
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 闫臻, 李继亮, 雍朋, 张继恩. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约. *岩石学报*, 22(1): 153 – 162
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究. *新疆地质*, 20(4): 302 – 308
- 秦克章, 徐兴旺, 梁光河, 方同辉, 丁奎首, 三金柱, 张连昌, 惠卫东, 彭晓明, 吴华, 程松林, 许英霞, 孙赫, 缪宇, 莫新华, 蔡新平, 康峰, 张宝林, 肖庆华. 2006. 东天山东段大型铜、镍、金矿床成矿规律研究、靶区优选与隐伏矿定位预测的重要进展. *矿床地质*, 25(22): 301 – 304
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 孙赫, 徐兴旺, 唐冬梅, 毛骞. 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. *矿床地质*, 26(1): 1 – 14
- 邱家骧, 廖群安. 1987. 中国东部新生代玄武岩中单斜辉石巨晶的主要特征及成因信息. *岩石矿物学杂志*, 6(1): 56 – 63
- 邱家骧, 廖群安. 1996. 浙闽新生代玄武岩的岩石成因学与 Cpx 矿物化学. *火山地质与矿产*, 17(增刊): 16 – 25
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 唐冬梅, 肖庆华, 曹明坚. 2009. 新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征: 对同化混染和结晶分异过程的启示. *岩石学报*, 25(4): 873 – 887
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 王恒. 2010. 新疆北山地区旋窝岭镁铁-超镁铁岩体的年代学、岩石矿物学和地球化学研究. *岩石学报*, 26(11): 3283 – 3294
- 苏本勋, 秦克章, 唐冬梅, 邓刚, 肖庆华, 孙赫, 卢鸿飞, 代玉财. 2011. 新疆北山地区坡十镁铁-超镁铁岩体的岩石学特征及其对成矿作用的指示. *岩石学报*, 27(12): 3627 – 3639
- 孙赫, 秦克章, 徐兴旺, 李金祥, 丁奎首, 许英霞, 三金柱. 2007. 东天山镁铁质-超镁铁质岩带岩石特征及铜镍成矿作用. *矿床地质*, 26(1): 98 – 108
- 孙赫. 2009. 东天山镁铁-超镁铁岩铜镍硫化物矿床通道式成矿机制与岩体含矿性评价研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1 – 262
- 孙赫, 秦克章, 唐冬梅, 肖庆华, 苏本勋, 卢鸿飞. 2010. 新疆北山罗东岩体橄榄石特征对岩浆演化和硫化物熔离的指示. *科技导报*, 28(18): 21 – 26
- 唐冬梅. 2009. 东天山后碰撞镁铁-超镁铁岩镍铜硫化物矿床 PGE 地球化学示踪与富集规律研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1 – 191
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 苏本勋, 肖庆华, 程松林, 李军. 2009. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约. *岩石学报*, 25(4): 817 – 831
- 夏明哲. 2009. 新疆东天山黄山东带镁铁-超镁铁质岩体成因及成矿作用. 博士学位论文. 西安: 长安大学
- 夏明哲, 赵献军, 宋艳芳, 郭娜欣, 夏昭德, 姜常义. 2013. 塔里木板块东北部坡十侵入体铂族元素地球化学特征及成矿作用. 地

质与勘探, 49(1): 1-8

- 夏昭德. 2012. 新疆北山地区笔架山岩带镁铁-超镁铁质岩体岩石成因研究. 博士学位论文. 西安: 长安大学
- 夏昭德, 王垚, 姜常义, 凌锦兰, 夏明哲, 郭娜欣. 2013. 新疆北山地区漩涡岭镁铁质-超镁铁质层状岩体岩石学与矿物学研究. 地质学报, 87(4): 486-497
- 肖庆华. 2010. 新疆东天山香山西铜镍-钛铁复合型矿床成因研究及意义. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1-191
- 肖渊甫, 王道永, 吴德超, 邓江红, 何政伟. 2000. 新疆北山构造带

西段地质演化. 成都: 四川科学技术出版社; 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 113-139

- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 陈隽璐. 2009. 东天山-北山地区成矿地质背景图. 北京: 地质出版社
- 杨树锋, 余星, 陈汉林, 厉子龙, 王清华, 罗俊成. 2007. 塔里木盆地巴楚小海子二叠纪超基性脉岩的地球化学特征及其成因探讨. 岩石学报, 23(5): 1087-1096
- 袁峰, 周涛发, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 东天山自然铜矿化带玄武岩的起源、演化及成岩构造背景. 岩石学报, 26(2): 533-546