

东昆仑石头坑德镁铁-超镁铁质岩体矿物学 特征及成矿潜力分析

周伟¹, 汪帮耀^{1,2}, 夏明哲^{1,2}, 夏昭德^{1,2}, 姜常义^{1,2}, 董俊³, 谢恩顺³

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054; 3. 四川省地质矿产勘查开发局一〇八地质队, 四川成都 611230)

摘要: 位于东昆仑造山带之昆中内部之石头坑德镁铁-超镁铁质岩体, 分别由辉长岩相、辉石岩相和橄榄岩相的多种岩石类型组成。野外地质资料表明各岩相间的先后侵位顺序为辉长岩相→辉石岩相→橄榄岩相。本次研究表明石头坑德岩体尖晶石 Ni 的平均含量为 258×10^{-6} ; 橄榄石 Fo=81~86, 为贵橄榄石, Ni 含量 $471 \times 10^{-6} \sim 2279 \times 10^{-6}$, 平均为 1153×10^{-6} ; 斜方辉石的 En=80.35~83.89, 平均 82.51。根据 Mg-Fe 在结晶相橄榄石和熔体之间的分配系数, 利用 Fo 值最高的橄榄石, 得到其原生岩浆 MgO=10.5%, 属高镁玄武质岩浆。该岩体由上地幔橄榄岩 11.2%~14.0% 的部分熔融作用形成的。通过对石头坑德岩体的部分熔融程度、原生岩浆、构造标志、岩石组合、直接矿化标志及矿物组合、橄榄石 Ni 含量及 Fo 的研究表明, 石头坑德镁铁-超镁铁质岩体具有形成铜镍硫化物矿床的有利条件, 东昆仑造山带是重要的成镍远景区。

关键词: 成矿潜力; 镁铁-超镁铁岩体; 铜镍矿床; 石头坑德; 东昆仑

中图分类号: P618.41; P618.63

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)01-0081-16

Mineralogical characteristics of Shitoukengde mafic-ultramafic intrusion and analysis of its metallogenic potential, East Kunlun

ZHOU Wei¹, WANG Bang-yao^{1,2}, XIA Ming-zhe^{1,2}, XIA Zhao-de^{1,2}, JIANG Chang-yi^{1,2},
DONG Jun³ and XIE En-shun³

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3. No. 108 Geological Party, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration, Chengdu 611230, China)

Abstract: Located in the inner zone of the middle part of the eastern Kunlun orogenic belt, the Shitoukengde mafic-ultramafic intrusion is composed of gabbro-lithofacie, pyroxenite-lithofacie and peridotite-lithofacie. Geological data of field indicate that the emplacement order of each lithofacie is gabbro-lithofacie→pyroxenite-lithofacie→peridotite-lithofacie. This study shows the average content of Ni in spinel is 258×10^{-6} ; the olivine crystals are chrysolite with the forsterite content (Fo) ranging from 81 to 86, the content of Ni in olivine is from 471×10^{-6} to 2279×10^{-6} and the average is 1153×10^{-6} ; En of Orthopyroxene is from 80.35 to 83.89, and the average is 82.51. Based on distribution coefficient of Mg-Fe between olivine and melts, the most Fo-rich olivines indicate that the primary magma of Shitoukengde intrusion belongs to high MgO basaltic magma containing about 10.5% MgO. This intrusion is derived from 11.2%~14.0% partial melting of mantle. The study of

收稿日期: 2015-02-08; 接受日期: 2015-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302070, 41102045); 地质大调查项目(1212011121089); 中央高校基本科研业务费(2014G1271066); 长安大学优秀博士毕业论文资助项目(41273033)

作者简介: 周伟(1990-), 男, 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: geovas@163.com。

partial melting, primary magma, structural sign, rock assemblage, direct mineralized markers and mineral assemblage, Ni-content and Fo of olivine shows that the Shitoukengde intrusion has favorable conditions for the formation of copper-nickel deposit and the eastern Kunlun orogenic belt can be important nickel prospective region.

Key words: ore-forming potential; mafic-ultramafic rocks; Cu-Ni sulfide deposit; Shitoukengde; East Kunlun

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41302070, 41102045); China Geological Survey (1212011121089); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014G1271066); The Funds for Excellent Doctor Graduation Thesis of Chang'an University (41273033)

与镁铁-超镁铁质岩体有关的岩浆型铜镍矿床,是赋存铜、镍的重要矿床类型,分别占世界铜储量的5.5%和世界镍储量的60%以上(王之田等,1994)。而在我国,全部的镍、90%以上的铂以及约7.3%的铜,均来源于岩浆铜镍硫化物矿床(汤中立等,2006)。因此,无论是矿产开发,还是成矿研究和找矿预测,它都一直受到国内外矿业界及学术界的普遍关注。而关于全球岩浆硫化物矿床的分类,Naldrett(2004)根据该类矿床产出的大地构造环境将其划分为绿岩带型矿床、大陆边缘裂谷型矿床、克拉通型矿床以及活动造山带型等4类。在国内,汤中立等(2007)将之归结为:①古大陆边缘裂解环境的小侵入体矿床;②与碰撞后拉张有关的小侵入体矿床;③与大陆溢流玄武岩有关的小侵入体矿床。其中,与造山带碰撞伸展背景有关的铜镍硫化物矿床最具“中国特色”,主要分布于我国的北疆直到东北的中亚造山带范围(姜常义等,2012)。

东昆仑造山带是中央造山带西段的重要组成部分,同时也是青藏高原内部的一条巨型岩浆岩带和我国重要的多金属成矿带。近年来,我国的地质工作者陆续在东昆仑造山带发现了夏日哈木超大型镍矿床(李世金等,2012),石头坑德^①、冰沟南(王冠,2014)等一批镍矿点,从而丰富了“中国特色”造山带镍矿的理论和实践。石头坑德镍矿点是2013年四川省地质矿产勘查开发局一〇八地质队在距格尔木东约40 km的昆中带内发现的,目前对该岩体的研究相对薄弱,资料甚少,而尖晶石和橄榄石是岩浆中最早结晶的矿物,记录了与成矿有关的信息,本文在对上述矿物研究的基础上,进一步约束其岩浆演化过程,探讨成矿信息。同时,也为东昆仑镍矿勘查提供更多的资料和依据。

1 区域地质概况及岩体地质特征

研究区位于青藏高原东北部,东昆仑造山带东段,柴达木盆地南缘。东昆仑造山带的形成经历了漫长而复杂的演化过程,而阿尔金左行走滑断裂将其与西邻的西昆仑造山带隔开,二者合称为昆仑造山带。东昆仑以昆北、昆中和昆南3条区域性大断裂为界,分为昆北区、昆中区、昆南区和巴颜喀拉-松潘甘孜区(图1)。昆北断裂是穿越格尔木的东西走向的山前逆冲断裂,昆中断裂由西向东穿越阿牙克库木湖、纳赤台和清水泉,昆南断裂由西向东穿越木孜塔格、昆仑山口,直至阿尼玛卿带。昆北断裂以北为昆北区,主要为柴达木盆地。昆北断裂和昆中断裂之间为昆中区,昆中断裂和昆南断裂之间为昆南区,昆南断裂以南为巴颜喀拉-松潘甘孜区(姜春发等,1992;潘裕生等,1996;许志琴等,2007)。区内的前寒武纪变质岩石主要为古元古代金水口岩群,由下部白沙河岩组和上部小庙岩组组成。下部白沙河岩组主要是由大理岩、片麻岩、混合岩和角闪岩等组成,其原岩为灰岩、海相砂泥质碎屑岩和中基性火山岩等,形成时代可约束在2.0~1.9 Ga之间(王国灿等,2007)。上部小庙岩组主要由石英岩、大理岩、片麻岩和片岩等组成,其原岩为浅海相碎屑岩和碳酸盐岩等,形成时代可约束在1.7~1.6 Ga(陈有炘等,2011)。

石头坑德镁铁-超镁铁质岩体位于昆中区内,格尔木东约40 km。围岩为金水口岩群白沙河岩组的黑云斜长片麻岩,片麻理产状 $220^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 56^{\circ}$,与围岩呈侵入接触关系,在与围岩接触部位岩石蚀变强烈。岩体出露面积约4.0 km²,呈岩床状,走向近EW

① 四川省地质矿产勘查开发局一〇八地质队, 2013. 青海省都兰县石头坑德多金属矿.

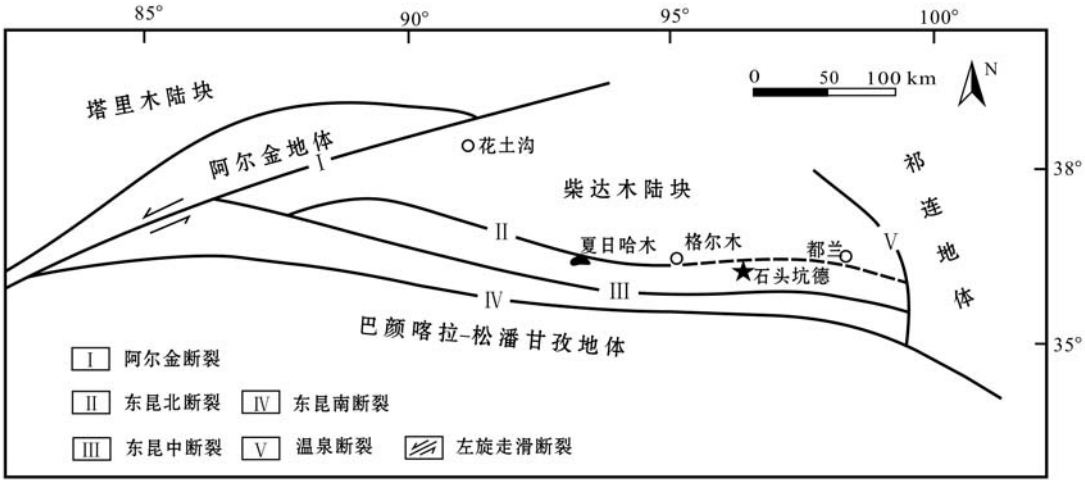


图 1 东昆仑大地构造单元划分[据姜春发等(2000)、孟繁聪等(2013)修改]
Fig. 1 Tectonic unit division and position of the study area in East Kunlun (modified after Jiang Chunfa *et al.*, 2000; Meng Fancong *et al.*, 2013)

向(图 2)。由辉长岩相、辉石岩相及橄榄岩相组成，辉长岩相包括辉长岩、暗色橄榄辉长岩；辉石岩相包括单辉辉石岩、二辉辉石岩和方辉辉石岩；橄榄岩相包括单辉橄榄岩、方辉橄榄岩和纯橄岩。野外

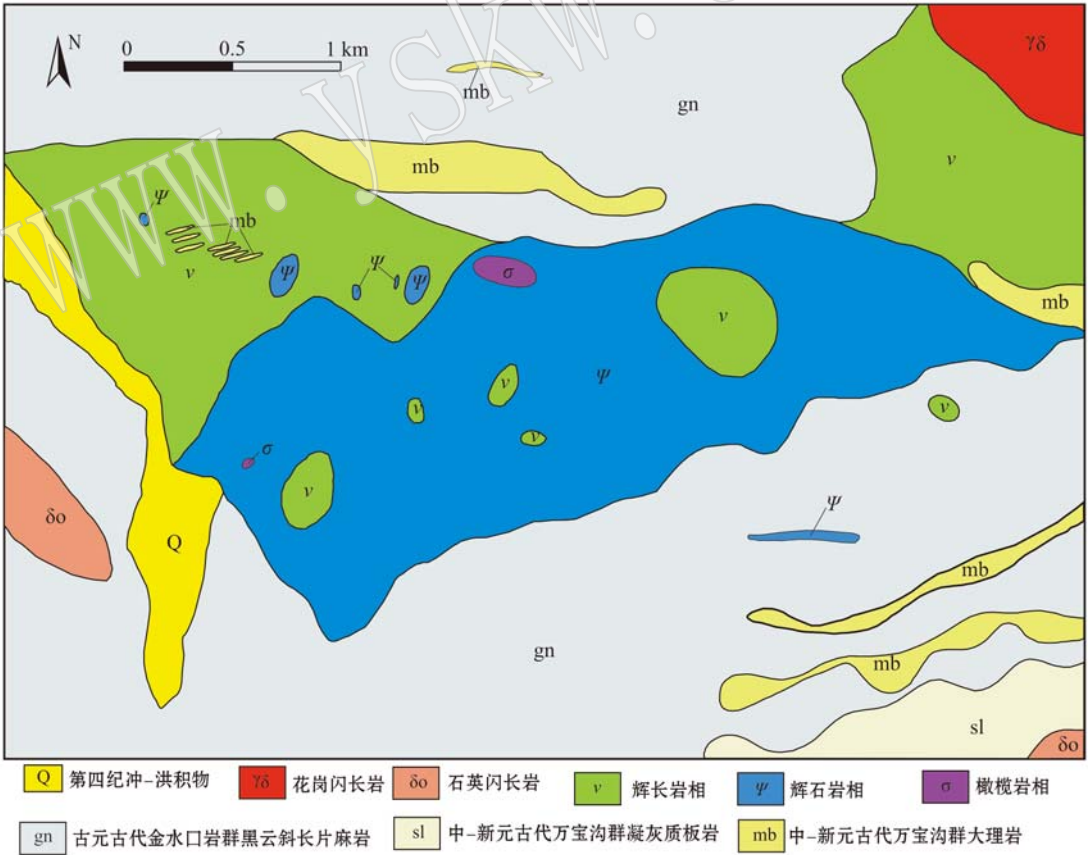


图 2 石头坑德岩体地质图^①
Fig. 2 Geological sketch map of Shitoukengde intrusion^①

① 四川省地质矿产勘查开发局一〇八地质队. 2013. 青海省都兰县石头坑德多金属矿[R].

地质观察表明,各岩相间的侵位先后顺序为辉长岩相→辉石岩相→橄榄岩相(图 3a、3b)。在橄榄岩中,橄榄石主要为堆晶相,辉石组成填隙相,发育包橄结构(图 3c、3d)。橄榄石呈浑圆粒状,粒径 0.5~1.5 mm,蚀变类型以蛇纹石化为主,亦见滑石化;辉石发育程度不等的次闪石化,也见有绿泥石化;斜长石为半自形-自形板条状,一般在 1.5~2.0 mm,聚片双晶清晰可见,绝大部分斜长石较新鲜,只有少数斜长石颗粒见有微弱的绢云母化。在暗色橄榄辉长岩中,发育 1%~3%的尖晶石,为红褐色,粒径多在 0.05~0.10 mm 之间,它们经常呈四方形或不规则形态分布于橄榄石、辉石等其它矿物的晶内(图 3e、3f)。

2 分析测试方法

本次研究,对尖晶石、橄榄石和斜方辉石进行电子探针测试。对采集的岩石样品,首先将岩石的氧化表面切除,选择新鲜面做岩石切片,并挑选新鲜的、无蚀变的矿物进行电子探针分析,其原理是将高度聚焦的电子束聚焦在矿物上,激发组成矿物元素的特征 X 射线。用分光器或检波器测定荧光 X 射线的波长,并将其强度与标准样品对比,根据不同强度校正直接计数出组分含量。电子探针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。分析仪器为日本 JXA-8100 型电子探针,加速电压 15 kV,束电流 2.0×10^{-8} A。分析条件为束斑大小 0.5 μm ,分辨率 6 nm。所选标样除 Ni 用单质外,其余均用矿物标样,具体为 Si: 石英;Fe: 磁铁矿;Mn: 红锰矿;Al: 刚玉;Ca: 硅灰石;Ti: 钛铁矿;Mg: 镁橄榄石;Cr: 铬铁矿;Na: 钠长石;K: 钾长石;P: 磷灰石。其分析精度为 10^{-4} 。

3 矿物晶体化学特征

为了对比方便,文中夏日哈木尖晶石和橄榄石数据引自凌锦兰(2014)。石头坑德尖晶石成分见表 1,其 Cr_2O_3 含量为 23.44%~31.42%,平均 28.69%; Al_2O_3 变化于 35.08%~41.07%,平均 37.32%; MgO 和 FeO 变化较小,分别为 11.06%~12.11% 和 19.84%~22.19%,平均值分别为 11.79% 和 20.93%;此外还含少量的 MnO (0.23%~0.32%) 和 TiO_2 (0.04%~0.43%);而 NiO 的含量均小于 0.1%,Ni 的平均值为 258×10^{-6} ; $\text{Cr}^\#$

$[100 \times \text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})] = 28 \sim 37$, $\text{Mg}^\# [100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})] = 47 \sim 52$ 。相比之下,石头坑德尖晶石 Cr_2O_3 和 FeO 比夏日哈木尖晶石低(分别为 36.10%~39.54% 和 22.12%~26.25%),但 Al_2O_3 和 MgO 较夏日哈木高(分别为 24.74%~28.45% 和 8.52%~10.38%),相应地石头坑德尖晶石 $\text{Mg}^\#$ 较夏日哈木高(40~46), $\text{Cr}^\#$ 较夏日哈木低(46~52),可能暗示了二者熔融程度的差异。而 Ni 平均含量与夏日哈木相当(318×10^{-6})。在图 4 中,两个岩体的尖晶石均落入高铁富镁尖晶石的范围,显示出相似的性质。

石头坑德橄榄石成分显示, $\text{FeO} = 13.29\% \sim 18.57\%$,平均 15.36%;而 MgO 为 42.64%~46.50%,平均 44.90%; $\text{Fo}[\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})] = 81 \sim 86$,平均为 84,均属贵橄榄石;橄榄石 NiO 含量变化于 0.06%~0.29%,平均值为 0.15%,而对应 Ni 含量为 $471 \times 10^{-6} \sim 2\,279 \times 10^{-6}$,平均 $1\,153 \times 10^{-6}$,远高于尖晶石的 Ni 含量,表明 Ni 更相容于橄榄石。夏日哈木橄榄石 $\text{FeO} = 12.30\% \sim 13.36\%$, MgO 为 44.5%~47.1%, $\text{Fo} = 86 \sim 87$,平均为 86.4;橄榄石 $\text{NiO} = 0.20\% \sim 0.34\%$,平均为 0.25%;对应 Ni 含量为 $1\,564 \times 10^{-6} \sim 2\,687 \times 10^{-6}$,平均为 $1\,983 \times 10^{-6}$ 。通过对比发现石头坑德橄榄石 Fo 和夏日哈木较一致,但夏日哈木橄榄石 Fo 较集中;而 NiO 和 Ni 均略低于夏日哈木。

石头坑德岩体斜方辉石成分见表 2。 $\text{FeO} = 9.25\% \sim 11.71\%$,平均为 10.79%; $\text{MgO} = 29.09\% \sim 31.12\%$,平均为 30.21%; Al_2O_3 变化不大,为 1.62%~2.71%,平均 2.43%; CaO 含量较低,为 0.03%~2.42%,平均值 0.48%。斜方辉石的 En 介于 80.35~83.89(平均 82.51), Fs 为 14.12~17.54(平均 16.54), Wo 介于 0.07~4.73(平均 0.95),均为古铜辉石。与夏日哈木镍矿床和柴北缘的牛鼻子梁镍矿床古铜辉石 En 值相近,分别为 75.3~83.6(平均 80.5) 和 80.61~83.59(平均 81.44)(凌锦兰,2014)。

4 讨论

4.1 地幔部分熔融程度

天然铬尖晶石的化学通式为 $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$, Irvine(1965)研究表明尖晶石普遍存在 Mg 与 Fe^{2+} 、Al 与 Cr 之间广泛的类质同像代替。

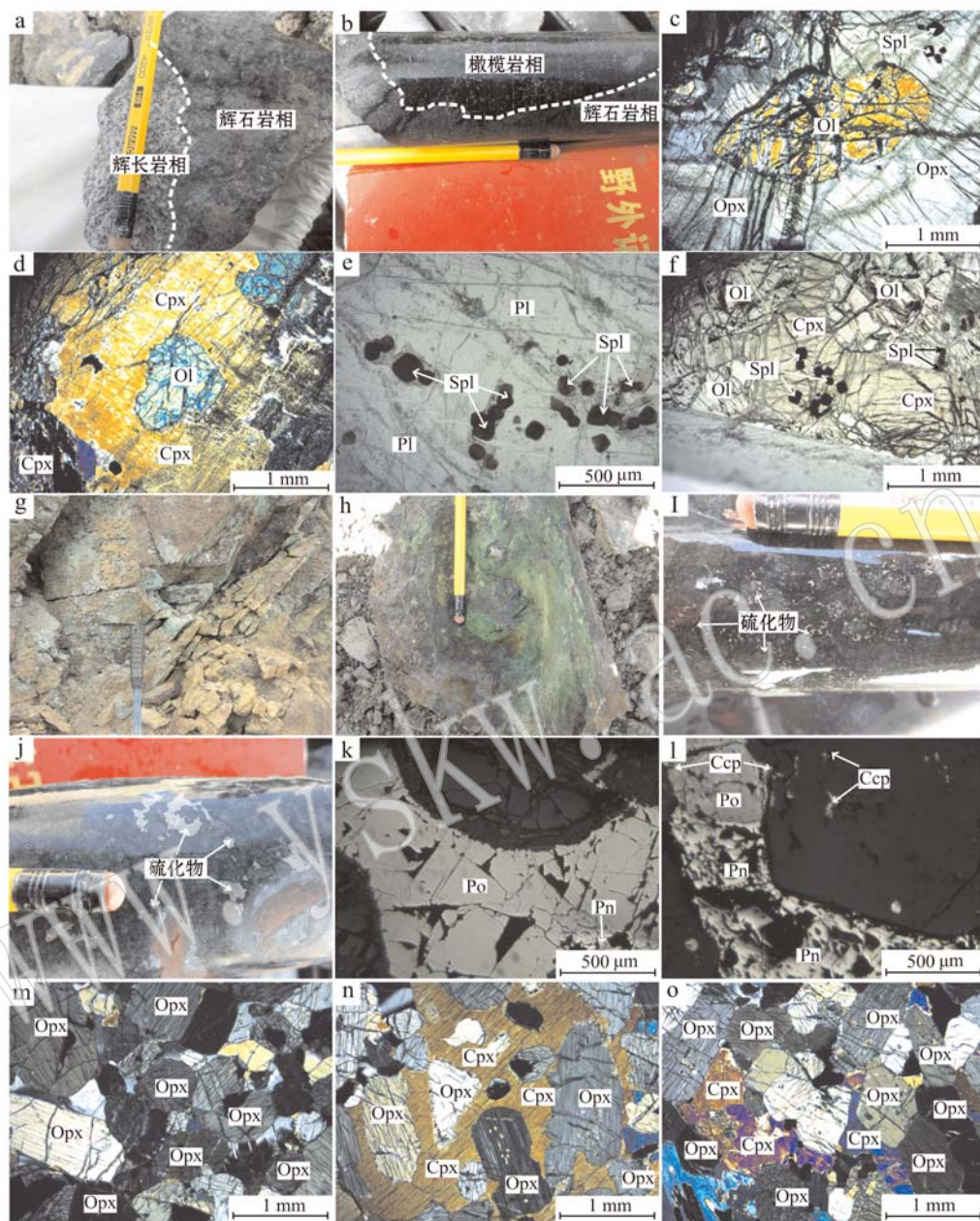


图 3 石头坑德岩体野外及镜下照片

Fig. 3 Field and microscope photographs of Shitoukengde intrusion

a—辉石岩相侵位辉长岩相; b—橄榄岩相侵位辉石岩相; c—包橄结构及辉石内部的尖晶石(-); d—包橄结构(+); e—斜长石内部的尖晶石(-); f—辉石内部的尖晶石(-); g—露头孔雀石化; h—镍华; i—细粒硫化物; j—粗粒硫化物; k—磁黄铁矿和镍黄铁矿(反射光); l—磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿(反射光); m—方辉辉石岩中的斜方辉石堆晶(+); n—二辉辉石岩中单斜辉石包裹斜方辉石(+); o—方辉辉石岩中的斜方辉石堆晶(+); Spl—尖晶石; Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石; Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Po—磁黄铁矿; Pn—镍黄铁矿; Ccp—黄铜矿

a—pyroxenite-lithofacie emplacing gabbro-lithofacie; b—peridotite-lithofacie emplacing pyroxenite-lithofacie; c—olivine-poikilitic texture and spinel in pyroxene (-); d—olivine-poikilitic texture (+); e—spinel in plagioclase; f—spinel in pyroxene (-); g—malachite mineralization; h—annabergite; i—fine sulfide (reflected light); j—coarse grained sulfide (reflected light); k—pyrrhotite and pentlandite; l—pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite; m—orthopyroxene cumulates in orthopyroxenite (+); n—orthopyroxene wrapped by clinopyroxene in websterite (+); o—orthopyroxene cumulates in orthopyroxenite (+); Spl—spinel; Ol—olivine; Opx—orthopyroxene; Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase; Po—pyrrhotite; Pn—pentlandite; Ccp—chalcopyrite

表 1 尖晶石和橄榄石成分表
Table 1 The composition of spinel and olivine

编号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#] /Fo	Cr [#] /Fa	Ni/10 ⁻⁶
石头坑德尖晶石																	w _B /%
S-35-3	暗色 橄榄 辉长 岩	—	0.43	35.08	29.95	—	22.19	0.29	11.06	—	0.09	0.08	—	99.16	47	36	707
S-35-4		0.04	0.04	37.43	29.05	0.02	20.38	0.25	11.93	0.05	0.02	—	0.02	99.22	51	34	157
S-35-5		0.02	0.14	37.09	28.8	0.02	20.69	0.27	11.94	—	0.01	—	0.01	99.00	51	34	79
S-35-20		0.08	0.09	41.07	23.44	—	21.55	0.27	11.93	—	0.07	0.03	—	98.54	50	28	550
S-35-8		—	0.09	36.11	29.9	—	21.21	0.32	11.6	0.02	—	0.03	—	99.28	52	36	0
S-35-16		0.04	0.14	38.03	28.25	—	20.68	0.28	11.99	0.02	0.05	0.06	—	99.55	49	33	393
001-1-11		0	0.11	36.44	31.42	—	19.84	0.23	12.11	—	0.08	0.04	0.01	100.28	51	37	629
石头坑德橄榄石																	
S-35-1	暗色 橄榄 辉长 岩	40.43	—	—	0.02	—	14.86	0.21	44.77	0.02	0.08	—	0.01	100.40	84	16	644
S-35-9		40.43	—	—	0.02	—	14.86	0.21	44.77	0.02	0.08	—	0.01	100.40	85	15	644
S-35-12		40.533	—	—	0.02	0.008	14.08	0.25	45.22	0.04	0.19	—	—	100.33	85	15	1501
S-35-18		40.393	—	0.013	0.01	0.008	14.46	0.17	44.85	0.01	0.07	—	—	99.98	85	15	511
S-35-19		40.46	0.021	—	0.03	0.016	14.27	0.22	45.31	0.01	0.18	0.03	—	100.55	85	15	1430
001-1-2		40.446	—	0.011	0.032	0.057	14.62	0.17	45.30	—	0.10	0.05	0.01	100.80	86	14	802
001-1-3		40.5	—	0.04	0.02	0.12	13.35	0.23	45.87	—	0.23	0.03	—	100.38	86	14	1807
001-1-5		41.19	—	—	0	—	13.29	0.22	45.5	0.02	0.13	0.03	0.02	100.39	86	14	1022
001-1-7		41.02	—	0.02	0.05	0.03	13.62	0.26	45.26	0.03	0.22	—	0	100.48	86	14	1729
001-1-9		40.98	—	0.1	0.14	0.01	13.65	0.16	45.36	—	0.16	0.01	—	100.56	86	14	1257
ST-10-1		40.09	—	0.02	0.06	—	17.27	0.22	42.64	—	0.06	—	—	100.37	81	19	471
ST-10-2		39.89	—	—	0.02	—	17.64	0.16	43.17	—	0.09	0.02	—	100.00	82	18	707
ST-10-3		40.44	0.01	—	0.01	—	18.09	0.22	41.38	—	0.06	—	—	100.21	81	19	471
ST-10-4		39.99	—	—	0.03	0.01	17.7	0.24	42.15	—	0.1	0.01	—	100.23	81	19	786
ST-10-5		39.81	0.02	—	0.02	—	18.01	0.21	42.29	—	0.04	—	—	100.4	81	19	314

续表 1
Continued Table 1

编号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#] /Fo	Cr [#] /Fa	Ni/10 ⁻⁶	
ST-10-7	方辉橄 榄岩	39.88	—	—	—	—	17.47	0.22	42.29	—	0.14	0.02	—	100.02	81	20	1 100	
ST-10-8		39.18	—	0.03	—	—	18.01	0.11	42.96	—	0.17	0.03	—	100.49	81	19	1 336	
S-3-1		40.56	—	0	0	0	14.09	0.27	45.01	—	0.13	0.03	—	100.09	85	15	1 022	
S-3-2		40.41	—	0.02	0	0	14.06	0.25	45.23	—	0.24	—	—	100.21	85	15	1 886	
S-3-4		40.31	0.02	0.01	0.09	0	13.68	0.12	45.94	—	0.23	—	—	100.39	86	14	1 807	
S-3-5		39.95	0.01	—	—	—	0.02	14.15	0.15	45.52	—	0.15	0.03	—	99.97	85	15	1 179
S-3-6		40.4	—	—	—	—	—	13.41	0.21	45.84	—	0.29	—	—	100.15	85	15	2 279
S-3-7		40.79	—	—	—	—	—	13.17	0.2	45.69	—	0.23	0.04	—	100.09	85	15	1 807
夏日哈木尖晶石																		
XR-4-5	纯橄 岩	0.02	0.01	24.74	39.54	—	26.25	0.21	8.52	—	0.06	0.05	—	99.39	37	52	487	
XR-4-2		0.05	0.03	28.12	38.54	—	22.12	0.15	10.38	—	—	—	—	99.38	46	48	0	
XR-4-1		0.07	0.03	28.45	37.29	—	23.18	0.17	10.25	—	0.04	—	—	99.48	44	47	306	
XR-4-10		0.05	0.04	28.29	36.10	0.01	24.63	0.19	9.10	—	0.06	0.09	0.01	98.57	40	46	471	
夏日哈木橄辉石																		
XR-4-6	纯橄 岩	39.84	—	0.07	0.01	—	12.83	0.16	45.25	—	0.34	0.02	0.01	98.53	86	14	2 687	
XR-4-7		39.98	—	—	—	0.04	12.87	0.19	45.46	—	0.22	—	0.00	98.76	86	14	1 721	
XR-4-9		40.09	0.01	—	0.02	0.03	12.30	0.23	45.32	0.00	0.26	—	0.01	98.25	87	13	2 059	
XR-1-1	方辉橄 榄岩	40.35	0.03	0.03	0.01	0.00	12.60	0.17	47.10	0.00	0.25	0.03	0.01	100.58	87	13	1 980	
XR-1-2		40.13	—	—	—	—	12.77	0.20	47.05	—	0.21	—	—	100.36	87	13	1 674	
XR-1-3		39.93	0.02	0.01	0.04	—	13.36	0.19	46.61	—	0.20	—	—	100.34	86	14	1 564	
XR-1-4		40.08	—	0.04	—	—	13.25	0.20	47.01	0.01	0.26	—	0.00	100.84	86	14	2 004	
XR-1-5		39.70	—	0.04	0.06	0.03	13.29	0.20	44.50	0.01	0.28	0.01	—	98.11	86	14	2 177	

表 2 石头坑德岩体斜方辉石成分表
Table 2 The composition of orthopyroxene from Shitoukengde intrusion

样号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	En	Fs	Wo	种类
ST-23-1	方辉辉石 岩	55.85	0.07	2.69	0.19	0.04	10.46	0.21	30.80	0.07	0.05	0.01	—	100.43	83.89	15.98	0.13	古铜辉石
ST-23-2		55.67	0.05	2.42	0.20	—	11.05	0.24	29.89	0.10	—	0.05	—	99.67	82.65	17.15	0.20	古铜辉石
ST-23-4		54.95	0.02	2.71	0.14	—	11.33	0.16	30.08	0.08	0.08	0.03	0.01	99.58	82.44	17.41	0.15	古铜辉石
ST-23-6		54.56	—	2.69	0.10	0.01	11.05	0.22	30.42	0.09	—	0.04	0.01	99.18	82.93	16.90	0.17	古铜辉石
ST-23-7		56.48	0.02	2.28	0.33	—	11.51	0.25	30.33	0.04	0.03	0.01	—	101.28	82.39	17.54	0.07	古铜辉石
ST-23-8		55.80	0.05	2.46	0.18	—	10.71	0.22	29.48	0.28	—	0.03	—	99.20	82.60	16.84	0.56	古铜辉石
ST-23-12		56.68	0.01	2.47	0.16	0.03	10.87	0.19	30.56	0.18	0.04	0.04	0.01	101.23	83.06	16.58	0.36	古铜辉石
ST-23-13		55.28	0.01	2.51	0.19	—	11.36	0.26	30.25	0.05	—	0.01	—	99.92	82.51	17.38	0.11	古铜辉石
ST-23-14		56.10	—	2.50	0.21	0.05	11.39	0.30	30.16	0.05	0.01	0.00	0.01	100.78	82.45	17.46	0.09	古铜辉石
ST-23-15		55.52	0.01	2.41	0.24	0.09	11.19	0.22	29.94	0.18	0.02	0.03	—	99.84	82.38	17.27	0.36	古铜辉石
ST-23-18	方辉橄 榄 岩	56.19	0.01	2.33	0.21	—	10.80	0.22	30.03	0.21	—	—	—	100.00	82.87	16.72	0.41	古铜辉石
ST-23-20		56.03	0.03	2.34	0.21	—	11.71	0.17	30.19	0.03	0.03	0.03	—	100.77	82.08	17.86	0.05	古铜辉石
ST-25-14		56.36	0.18	1.90	0.32	—	10.84	0.23	30.77	0.50	0.04	—	0.01	101.14	82.69	16.34	0.97	古铜辉石
ST-25-15		55.21	0.19	2.48	0.35	0.05	10.45	0.14	29.72	1.39	0.03	0.06	—	100.07	81.25	16.02	2.73	古铜辉石
ST-25-12		55.28	0.15	2.40	0.33	—	10.89	0.23	30.40	0.49	0.03	0.03	—	100.22	82.47	16.57	0.96	古铜辉石
ST-25-13		55.82	0.13	2.48	0.30	—	10.60	0.17	30.10	0.47	0.04	0.01	—	100.13	82.72	16.35	0.93	古铜辉石
ST-25-4		56.18	0.17	2.55	0.44	—	9.66	0.25	31.01	0.79	0.01	0.05	—	101.11	83.81	14.65	1.53	古铜辉石
ST-25-6		56.16	0.20	2.65	0.45	0.07	9.25	0.23	29.83	2.42	0.05	0.03	—	101.35	81.15	14.12	4.73	古铜辉石
ST-25-5		55.26	0.30	2.71	0.39	0.03	9.88	0.19	29.09	2.18	0.10	0.01	0.01	100.15	80.35	15.32	4.33	古铜辉石
ST-10-6	暗色橄 榄 辉长岩	56.65	—	1.62	0.08	0.01	10.87	0.21	31.12	0.04	0.04	—	0.01	100.65	83.56	16.37	0.07	古铜辉石

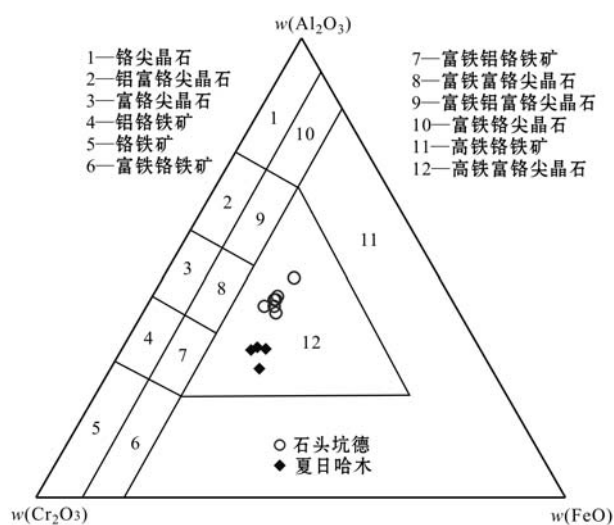


图4 尖晶石分类图(底图据朱福湘等,1985)

Fig. 4 The classification of spinel (base map after Zhu Fuxiang *et al.*, 1985)

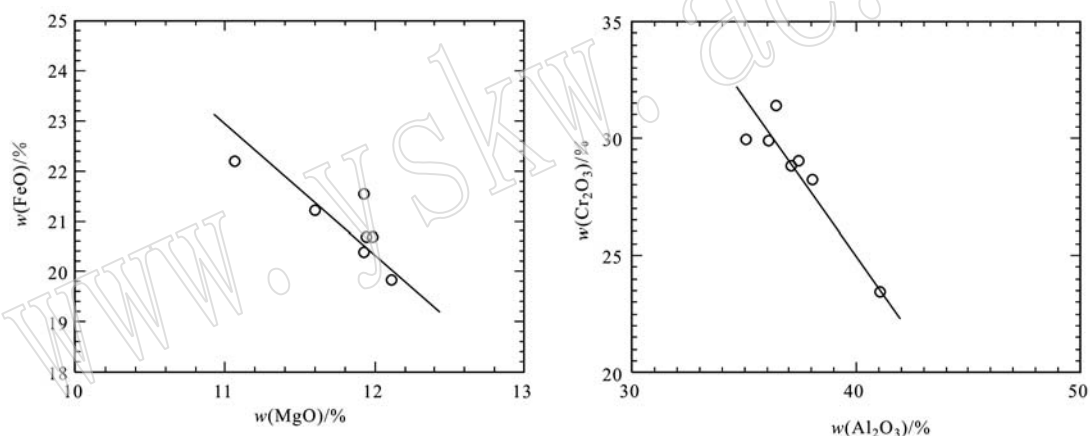


图5 石头坑德尖晶石类质同像判别图解

Fig. 5 Isomorphism discrimination diagram of spinel from Shitoukengde

4.2 原生岩浆性质

原生岩浆是指由地幔部分熔融而形成的岩浆,研究表明,地幔部分熔融过程中,熔体中 Ni、Cu、PGE 以及 S 含量随部分熔融程度的升高而增大,当地幔部分熔融程度达到 18% 时, Ni 和 PGE 将会达到最大值(Naldrett, 2011);当地幔部分熔融程度达到 25% 左右时,地幔中的 S 将全部进入到熔体中。孙赫等(2008)的模拟计算表明东天山成镍带图拉尔根、香山铜镍矿床的原生岩浆来自地幔 10%~20% 的部分熔融。所以能形成 Ni-Cu-PGE 矿床的岩浆,其地幔部分熔融程度一般较高,相应地 MgO 含量也较高,通常为高镁玄武质岩浆,也有苦橄质和科马提岩浆,而这些岩浆的 MgO 含量都大于 10%。

图 5 中, $\text{FeO}-\text{MgO}$ 及 $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$ 负相关性较好,表明石头坑德尖晶石存在 Mg 与 Fe^{2+} 及 Al 与 Cr 之间的类质同像代替作用。尖晶石作为镁铁-超镁铁质岩中最早结晶的副矿物,其元素组成既可以指示其形成时的物理化学条件,也可以为研究岩石学与地球动力学提供重要信息。铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 随地幔部分熔融程度的增高而增大,其值大小可以作为推测地幔岩熔融程度、源区亏损程度以及结晶压力的灵敏指标(Dick and Bullen, 1984)。Hellebrand 等(2001)得出了用尖晶石估算地幔部分熔融的公式:

$$F(\%) = 10 \times \ln(\text{Cr}^\# / 100) + 24 \quad (1)$$

需要说明的是该公式适用于 $\text{Cr}^\# = 10 \sim 60$ 。利用该公式计算得到石头坑德岩体 $F = 11.2\% \sim 14.0\%$, 同样对夏日哈木尖晶石运用(1)式得到其 $F = 16.2\% \sim 17.5\%$ 。

现有的研究表明,属于高镁玄武质岩浆的有 Bushveld、Great Dyke、Stillwater、Noril'sk-Talnah、Sudbury、金川、喀拉通克、黄山、黄山东、图拉尔根、葫芦等岩体(Chai and Naldrett, 1992; 唐冬梅等, 2009; 姜常义等, 2009; 夏明哲, 2009; Zhang *et al.*, 2009), 上述不同学者计算得到喀拉通克和黄山岩带诸多含矿岩体原生岩浆的 MgO 含量都在 11%~12% 之间;属于苦橄质岩浆的有 Pechenga、坡一、坡十、红石山、罗东、白石泉、天宇等岩体(Naldrett, 1999; 柴凤梅等, 2006; 唐冬梅等, 2009; 凌锦兰等, 2011);而属于科马提岩浆仅限于太古代绿岩带中的科马提岩。

Chai 等(1992)、陈列锰等(2009)、Li 等(2011)

分别对金川岩体的原生岩浆模拟计算得到其 MgO 分别为 11.5%、12.3% 和 12.6%; Li 等(2015)研究夏日哈木矿床后, 得到其 MgO = 12.74%, 凌锦兰(2014)获得夏日哈木原生岩浆 MgO 含量应该略高于 10.7%, 而位于柴北缘的牛鼻子梁岩体的原生岩浆 MgO 含量为 10.8% (凌锦兰, 2014)。

目前, 有 4 种估算原生岩浆 MgO 含量的方法: 根据橄榄石的组成以及全岩地球化学特征获得原生岩浆组成 (Chai and Naldrett, 1992; Li and Ripley, 2011); 假定原生岩浆由橄榄石和熔体组成, 凭借岩石的成分演化, 估算橄榄石分离结晶后残余岩浆的成分 (陶琰等, 2002); 利用橄榄石和熔浆 Fe-Mg 分配关系, 绘制 MgO- F_o -FeO 关系图, 恢复原生岩浆的组成 (张招崇等, 2003a; 李永生等, 2012); 通过 MELTs 软件模拟计算, 以获原生岩浆组成 (陈列锰等, 2009; Li and Ripley, 2011)。

根据橄榄石的组成以及全岩地球化学特征对石头坑德岩体原生岩浆 MgO 含量估计, 利用 Mg-Fe 在结晶相橄榄石和熔体之间的分配系数 K_D , 其定义如下 (Roeder and Emslie, 1970):

$$K_D = X_{(FeO/MgO)_{\text{橄榄石}}} / X_{(FeO/MgO)_{\text{熔体}}} = 0.3 \pm 0.03 \quad (2)$$

将(2)式中的摩尔分数换算成质量分数, 取 $K_D = 0.3$, 并且根据橄榄石 F_o 的定义可得到:

$$MgO = 0.56095 \times K_D \times F_o / (1 - F_o) \times FeO \quad (3)$$

选择石头坑德岩体橄榄石 F_o 最大值 86, 而与之对应的全岩 $FeO = 10.17\%$ (未发表资料), 得到石头坑德岩体原生岩浆 $MgO = 10.5\%$, 表明其属于高镁玄武质岩浆。已有地球物理研究证明, 现代上地幔的位势温度 (t_p) 只有 1280℃, 在这种温度下通过部分熔融作用产生的原生岩浆 MgO 含量只有 11% 左右 (Davies, 1988; Mckengie and Bickle, 1988), 而石头坑德岩体原生岩浆 $MgO = 10.5\%$, 该结果可以与 11% 相互印证。

4.3 成矿潜力

4.3.1 构造

镁铁-超镁铁质岩体是幔源岩浆结晶分异的产物, 必须存在深大断裂作为导岩、导矿构造。控制岩浆铜镍硫化物矿床成矿作用的首要因素是具有连通地幔的断裂和通道构造, 或者具有陆壳缝合构造 (Naldrett, 1999)。深大断裂是重大构造岩浆事件的产物, 往往也是岩浆和矿液活动的通道, 起着既控岩又控矿的作用, 常沿主要的断裂或断裂带形成矿带

或矿田, 其次级断裂则直接控制了矿体的产出, 构造的多期活动可以导致矿化的多期叠加。汤中立等 (2011) 研究则认为世界上小岩体矿床一般都邻近深大断裂。如黄山岩带两侧的黄山-康古尔塔格断裂带; 坡北北部的淤泥河深大断裂; 红旗岭南缘的辉发河深大断裂; 喀拉通克北缘额尔齐斯深断裂带; 牛鼻子梁北侧的阿尔金及其次级断裂等。石头坑德岩体与夏日哈木同处东昆仑造山带之昆中区内, 昆中断裂是一区域性深大断裂, 莫霍面深度和岩石圈深度均显示南高北低, 落差分别为 8 km 和 20 km (王国灿等, 1999), 昆中断裂及其次级断裂无疑对岩体的侵位起了控制作用。

4.3.2 岩石组合

石头坑德岩体出露面积约 4.0 km², 具有中国典型小岩体的特征 (汤中立等, 1991), 而且岩石类型丰富, 岩浆分异充分, 橄榄岩相 (包括单辉橄榄岩、方辉橄榄岩和纯橄岩)、辉石岩相 (包括单辉辉石岩、二辉辉石岩和方辉辉石岩)、辉长岩相 (包括辉长岩、暗色橄榄辉长岩) 均有发育, 且岩相带清楚, 为一复式岩体, 系岩浆多次侵位的产物, 侵位顺序为辉长岩相→辉石岩相→橄榄岩相。夏日哈木镍矿床赋存的 I 号岩体地表出露约 0.7 km², 由橄榄岩相 (纯橄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩)、辉石岩相 (橄榄方辉辉石岩、方辉辉石岩、含长二辉岩) 和苏长-辉长岩相 (橄榄辉长岩、暗色辉长苏长岩、辉长岩、淡色辉长岩) 组成, 侵位顺序与石头坑德岩体相反, 最新的研究表明它是富含硫化物的橄榄质岩浆、富含硫化物的辉石质岩浆、硫化物矿浆及含少量硫化物的辉长质岩浆分阶段侵入形成的 (杜玮, 2015)。柴北缘的牛鼻子岩体出露面积约 8.0 km², 岩石类型包括斜长二辉橄榄岩、角闪二辉橄榄岩、橄榄二辉岩、角闪二辉岩、角闪橄榄辉长岩、暗色辉长岩、辉长岩、淡色辉长岩、石英闪长岩和英云闪长岩等 (凌锦兰等, 2014)。这些特点与北疆范围内的镁铁-超镁铁质岩体及镍矿床很相似, 它们面积一般 0.0 n ~ n km² 之间, 规模较小, 如坡北、黄山、黄山东、香山、土敦、二红洼、串珠、马蹄等 (王润民等, 1987; 唐冬梅等, 2009; 孙涛等, 2010), 岩体大多为岩浆多期次侵入的复式岩体, 岩石类型丰富。其中, 黄山东、黄山岩体为正序 (闪长岩-辉长岩-辉石岩-橄榄岩), 即中性岩侵位早, 含矿的超基性岩侵位晚, 矿体保留较好, 相对集中和完整; 白石泉岩体为反序, 橄榄岩、辉橄岩先侵位成矿, 晚期后又有不含矿的辉长岩、闪长岩侵入 (秦克章

等,2006;李金祥等,2007)。

4.3.3 直接矿化标志及矿物组合

石头坑德岩体露头矿化较好,在地表形成硫化物矿床氧化带,出现赤铁矿、孔雀石、蓝铜矿等,可见镍华(图 3g、3h)。在钻孔内亦可见稀疏浸染状-星点状硫化物(图 3i、3j),其赋存岩性为二辉橄榄岩和方辉辉石岩,镜下鉴定多为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿(图 3k、3l)。这些特征表明,石头坑德岩体矿化标志明显。矿物组合方面,岩石中发育大量斜方辉石,尤其在方辉辉石岩和二辉辉石岩中斜方辉石堆晶普遍(图 3m、3n、3o)。以上这些矿石矿物和造岩矿物都是形成铜镍硫化物矿床十分有利的矿物相。

据 Naldrett(1999)的资料,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,如俄罗斯的 Noril'sk,中国甘肃的金川(汤中立等,2006)、吉林的红旗岭(Wei *et al.*, 2013)、新疆的喀拉通克(张招崇等,2003b; Zhang *et al.*, 2009)、云南的白马寨(Sun *et al.*, 2008)等矿床。秦克章等(2007)认为,当岩体中橄榄石和斜方辉石共存,且两者牌号 F_o 和 En 较为相近的情况下,对成矿才更有利。如喀拉通克 F_o 为 74~80, En 为 77~81;图拉尔根 F_o 均值为 82.7, En 均值为 81.7;白石泉矿床中 F_o 均值为 82.9, En 均值为 84.8(王福同等,1992)。石头坑德岩体 F_o 均值为 84, En 均值为 82.51,二者相近,说明对成矿有利。

4.3.4 橄榄石 Ni 含量及 F_o

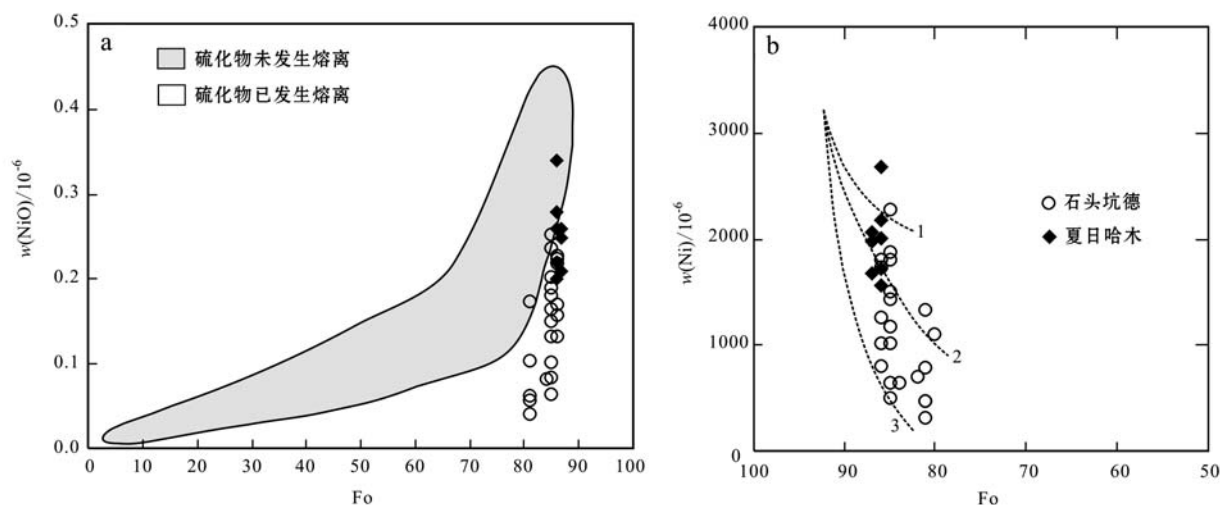
Ni 既有亲石性,也具有亲硫性,可以作为 Mg 的类质同象进入含 Mg 较高的橄榄石晶格中,而 Ni 在橄榄石和熔体间的分配系数 D^{Ni} 在 4~9 之间,一般取 7(Li *et al.*, 2003),远远小于它在硫化物与熔体间的分配系数(300~1000)(Barnes and Maier, 1999),一般取 500(Peach and Mathez, 1993)。橄榄石是玄武质岩浆中结晶的主要液相线矿物,其 Ni 的含量不仅可以反映岩浆成分,还记录了结晶分异、硫化物熔离等与成矿作用关系密切的地质信息,原始地幔中的 Ni 含量约为 $2\,000 \times 10^{-6}$ (Taylor and McLennan, 1985)。已有的研究表明,橄榄石中 Ni 的平均含量为 0.402%,但镁铁-超镁铁质岩石中的 Ni 含量大多低于此值。

Naldrett(1999)认为橄榄石中 Ni 的贫化可以作为有无发生深部硫化物熔离的标志, Ni 的亏损越强烈,越有利于成矿。未分异的饱和硫化物的岩浆中橄榄石正常含镍为 $2\,500 \times 10^{-6}$,此数值意味着岩体

不易成矿。只有当橄榄石中的 Ni 贫化至 $2\,200 \times 10^{-6}$ 以下时,才显示该岩体发生过深部硫化物的熔离,从而对成矿有利,数值越低越有利于成矿。石头坑德岩体橄榄石 $Ni = 471 \times 10^{-6} \sim 2\,279 \times 10^{-6}$,在有利成矿的范围内;夏日哈木橄榄石 Ni 为 $1\,564 \times 10^{-6} \sim 2\,687 \times 10^{-6}$,均在此范围之内。东天山地区的香山、图拉尔根橄榄石均出现 Ni 的急剧亏损,分别为 $900 \times 10^{-6} \sim 1\,800 \times 10^{-6}$ 和 $700 \times 10^{-6} \sim 1\,200 \times 10^{-6}$ (孙赫等,2008;姜超等,2014),我国的金川橄榄石中的 Ni 也集中于 $500 \times 10^{-6} \sim 1\,900 \times 10^{-6}$ (汤中立等,1991)。当岩浆中的 S 达到饱和,导致橄榄石中的 Ni 大量进入硫化物,所以橄榄石中 Ni 的亏损可以作为判断镁铁-超镁铁质岩体含矿性的一个标志(秦克章等,2012)。

石头坑德橄榄石 F_o 值为 81~86,其与东天山地区的图拉尔根($F_o = 82 \sim 85$)、香山($F_o = 81 \sim 85$)、圪塔山口($F_o = 83 \sim 87$)、葫芦($F_o = 82 \sim 86$)(孙赫等,2008;秦克章等,2012;冯宏业等,2014;姜超,2014)、东昆仑的夏日哈木($F_o = 86 \sim 87$)、柴北缘的牛鼻子梁($F_o = 82 \sim 84$)(凌锦兰等,2014)等诸多含矿岩体和矿床有较为一致的变化范围,说明石头坑德岩体橄榄石 F_o 亦在有利成矿的范围之内。在 F_o -NiO 图中(图 6a),石头坑德和夏日哈木两岩体的橄榄石大多位于硫化物发生熔离的区域,表明它们都发生过硫化物的熔离,且石头坑德橄榄石 NiO 较夏日哈木贫化得多。Simpkin 等(1970)对全球各种镁铁质侵入岩及喷出岩中橄榄石 F_o 与 Ni 含量做过统计,王福同等(1992)在上述研究的基础上,对玄武质岩浆的分异作用进行了计算,得出了不含硫化物、含硫化物的 3 条模拟曲线(图 6b),曲线的含义为:当橄榄石投点在曲线 1 附近,可视为橄榄石 Ni 含量属正常值,其所在岩体不利于成矿;投点在曲线 2 或曲线 3 附近,则说明橄榄石 Ni 亏损,其所在岩体有一定的分异作用,投点越靠近曲线 3 说明对成矿越有利。石头坑德橄榄石与夏日哈木相似,大部分位于曲线 2 及其附近,进一步说明有利成矿。

综上所述,石头坑德岩体具有形成铜镍硫化物矿床的有利条件,并在局部地段已有成矿的显示,需要进一步寻找成矿大规模富集的有利地段。值得一提的是,许寻会等(2014)对夏日哈木铜镍矿床西部开木棋河地区的成矿地质条件、地球物理及地球化学条件分析后,认为该区分布的辉石岩、辉长岩岩浆分异较好,物化探异常高,具有形成岩浆铜镍矿床的

图 6 石头坑德和夏日哈木橄榄石 F_o 与 NiO 、 Ni 图解Fig. 6 The diagram of F_o versus NiO , Ni from Shitoukengde and Xiarihamu olivine

有利条件。最近发现的石头坑德和冰沟南镍矿点证明东昆仑造山带成镍潜力巨大,而本次研究可为今后该区镍矿勘查提供更多的资料和依据。

5 结论

(1) 石头坑德镁铁-超镁铁质岩体位于东昆仑造山带之昆中区内,其围岩为金水口岩群的白沙河岩组。其岩石类型丰富,岩浆分异充分,是由辉长岩相(辉长岩和暗色橄榄辉长岩)、辉石岩相(单辉辉石岩、二辉辉石岩和方辉辉石岩)、橄榄岩相(单辉橄榄岩、方辉橄榄岩和纯橄岩)组成复式岩体,各岩相间为侵入接触关系,先后顺序为辉长岩相→辉石岩相→橄榄岩相。

(2) 石头坑德岩体尖晶石属高铁富铬尖晶石,其 Ni 的平均值为 258×10^{-6} ,对尖晶石的研究表明该岩体来源于地幔 $11.2\% \sim 14.0\%$ 的部分熔融,而夏日哈木岩体来自于 $16.2\% \sim 17.5\%$ 的地幔部分熔融。

(3) 石头坑德岩体橄榄石为贵橄榄石($F_o = 81 \sim 86$, 平均 84), Ni 含量为 $471 \times 10^{-6} \sim 2\,279 \times 10^{-6}$, 平均 $1\,153 \times 10^{-6}$; 斜方辉石为古铜辉石, ($En = 80.35 \sim 83.89$, 平均 82.51)。且橄榄石 F_o 和斜方辉石 En 较接近。利用 $Mg-Fe$ 在结晶相橄榄石和熔体之间的分配系数得到其原生岩浆 $MgO = 10.5\%$, 属高镁玄武质岩浆。

(4) 通过对石头坑德岩体的部分熔融程度、原

生岩浆、构造标志、岩石组合、直接矿化标志及矿物组合、橄榄石 Ni 含量及 F_o 的研究,表明石头坑德镁铁-超镁铁质岩体具有形成铜镍硫化物矿床的有利条件,进一步认为东昆仑造山带是重要的成镍远景区。

致谢 感谢张招崇教授对本文提出的建设性意见,同时也对刘明武老师、王柱命老师的实验工作表示感谢!

References

- Barnes S J and Maier W D. 1999. The fractionation of Ni , Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids[A]. Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C, *et al.* Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and their Application to Mineral Exploration[C]. Canada, 69~106.
- Chai Fengmei, Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, *et al.* 2006. Platinum Group Elements geochemistry of Baishiquan mafic-ultramafic intrusives in Central Tianshan Block, Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(2): 123~128(in Chinese with English abstract).
- Chai G and Naldrett A J. 1992. The Jinchuan ultramafic intrusion: cumulate of a high-Mg basaltic magma[J]. Journal of Petrology, 33 (2): 277~303.
- Chen Liemeng, Song Xieyan, Danyushevsky L V, *et al.* 2009. Parental magma composition of the Jinchuan intrusion, Gansu Province and MELTS thermodynamic modelling of fractional crystallization[J]. Acta Geologica Sinica, 83(9): 1 302~1 315(in Chinese with English abstract).

- Chen Youxin, Pei Xianzhi, Li Ruibao, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age of Xiaomiao Formation of Proterozoic in the eastern section of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geoscience*, 25(3): 510~521(in Chinese with English abstract).
- Davies G F. 1988. Ocean bathymetry and mantle convection, large-scale flow and hotspots[J]. *Geophysical Research*, 93: 10 467~10 480.
- Dick H J B and Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86: 54~76.
- Du Wei. 2015. Study on the mafic-ultramafic rocks of Xiarihamu Nickel Mining Area in East Kunlun[D]. Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Feng Hongye, Xu Yingxia, Tang Dongmei, *et al.* 2014. Mineralogical characteristics of olivine and spinel for Getashankou Cu-Ni-Bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan, NW China[J]. *Geology and Exploration*, 50(2): 346~359(in Chinese with English abstract).
- Hellebrand E, Snow J E, Dick H J, *et al.* 2001. Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites[J]. *Nature*, 410: 677~681.
- Irvine T N. 1965. Chromian spinel as a petrogenetic indicator[J]. *Earth Science*, 2: 648~672.
- Jiang Chao, Qian Zhuangzhi, Zhang Jiangjiang, *et al.* 2014. Characteristics and genetic significances of olivine from Xiangshan complex in Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Geoscience*, 28(3): 478~488(in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Xia Mingzhe, Qian Zhuangzhi, *et al.* 2009. Petrogenesis of Kalatongke mafic rock intrusions, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 749~764(in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Ling Jinlan, Zhao Yanfeng, *et al.* 2012. Ore-bearing potential evaluation index system of mafic and ultramafic intrusions-used to search for magmatic sulfide deposits[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 51~60(in Chinese with English abstract).
- Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, *et al.* 1992. Opening-Closing Tectonics of Kunlun Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~224(in Chinese).
- Jiang Chunfa, Wang Zongqi and Li Jinyi. 2000. Opening-Closing Tectonics of the Central Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~108(in Chinese).
- Li C, Ripley E M and Naldrett A J. 2003. Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusion, Siberia: Implications for ore forming processes in dynamic magma conduits[J]. *Economic Geology*, 98: 69~86.
- Li C and Ripley E M. 2011. The giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposits: tectonic setting, magma evolution, ore genesis and exploration implications[J]. *Reviews in Economic Geology*, 17: 163~180.
- Li Chusi, Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, *et al.* 2015. Geochronology, petrology and Hf-S isotopes of the newly-discovered, world-class Xiarihamu magmatic Ni-Cu deposit in the Qinghai-Tibet Plateau, western China[J]. *Lithos*, 216~217: 224~240.
- Li Jinxiang, Qin Kezhang, Xu Xingwang, *et al.* 2007. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complex in East Tianshan, Xinjiang: constraints on ore genesis and tectonic setting[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 43~57(in Chinese with English abstract).
- Lin Jinlan, Xia Mingzhe, Guo Naxin, *et al.* 2011. Petrogenesis of Ludong mafic-ultramafic layered intrusion, Beishan region, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 40(6): 499~515(in Chinese with English abstract).
- Ling Jinlan. 2014. Petrogenesis of mafic-ultramafic intrusions and mineralogenesis of Nickel Sulfide Deposit in the Periphery of Qaidam Block, Qinghai China[D]. Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Ling Jinlan, Zhao Yanfeng, Kang Zhen, *et al.* 2014. Petrogenesis and mineralization of Niubiziliang mafic-ultramafic intrusion in the northern margin of Qaidam Block, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1 628~1 646.
- Li Shijin, Sun Fengyue, Gao Yongwang, *et al.* 2012. The theoretical guidance and the practices of small intrusions forming large deposits[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 185~191(in Chinese with English abstract).
- Li Yongsheng, Zhang Zhaochong and Nie Baofeng. 2012. An improved simple method for estimating primitive magma-A case for picrite in the Lijiang Area of Emeishan Large Igneous Province[J]. *Geological Review*, 58(4): 653~659(in Chinese with English abstract).
- Mckenzie D and Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere[J]. *Journal of Geology*, 29: 625~679.
- Meng Fancong, Cui Meihui, Wu Xiangke, *et al.* 2013. Magmatic and metamorphic events in granitic gneisses from the Qimantag, East Kunlun Mountains, Northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2 107~2 122(in Chinese with English abstract).
- Naldrett A J. 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis[J]. *Mineral Deposits*, 34: 227~240.
- Naldrett A. 2004. Magmatic sulfide deposits. *Geology, Geochemistry and Exploration*[J]. Berlin Springer, 727.
- Naldrett A J. 2011. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[A]. Li C and Ripley E M. Magmatic Ni-Cu and PGE deposits: *Geology, Geochemistry and Genesis*[C]. Review in Economic Geology: Denver, Colorado, 1~50.
- Pan Yusheng, Zhou Weiming, Xu Ronghua, *et al.* 1996. Geological characteristics and evolution of the Kunlun Mountains region during the Early Paleozoic[J]. *Science in China(Series D)*, 26(4): 302~307(in Chinese with English abstract).
- Peach C L and Mathez E A. 1993. Sulfide melt-silicate melt distribution

- coefficients for nickel and implication for the distribution of other chalcophile elements[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 57(13): 3 013 ~3 021.
- Qin Kezhang, Xu Xingwang, Liang Guanghe, *et al.* 2006. Advance in research on metallogenetic regularity, target selection and location prognosis for large-scale Cu, Ni and Au deposits at eastern Tianshan [J]. *Mineral Deposits*, 25(S): 301 ~304(in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Ding Kuishou, Xu Xingwang, *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 Kezhang, Tang Dongmei, Su Benxun, *et al.* 2012. The tectonic setting, style, basic feature, relative erosion degree, 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).
- Roeder P L and Emslie R F. 1970. Olive-liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 29: 275 ~289.
- Simpkin T and Smith J V. 1970. Mineral element distribution in olivine [J]. *Journal of Geology*, 78.
- Sun He, Qin Kezhang, Li Jingxiang, *et al.* 2008. Constraint of mantle partial melting on PGE mineralization of mafic-ultramafic intrusion in Eastern Tianshan: Case study on Tulargen and Xiangshan Cu-Ni deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1 079 ~1 086(in Chinese with English abstract).
- Sun Tao, Qian Zhuangzhi, Tang Zhongli, *et al.* 2010. Zircon U-Pb chronology, platinum group element geochemistry 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).
- Sun Xiaoming, Wang Shengwei, Sun Weidong, *et al.* 2008. PGE geochemistry and Re-Os dating of massive sulfide ores from the Baimazhai Cu-Ni deposit, Yunnan Province, China[J]. *Lithos*, 105: 12 ~24.
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2009. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusion in eastern Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 817 ~831(in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli and Li Wenyuan. 1991. Studies of metallogenetic regularity of nickel sulfide deposits in China and their prospects[J]. *Mineral Deposits*, 10(3): 193 ~203(in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, Jiangchangyi, *et al.* 2006. Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits and Metallogenetic Prognosis in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 10 ~185(in Chinese).
- Tang Zhongli, Yan Haiqing, Jiao Jiangang, *et al.* 2007. Regional metallogenetic controls of small intrusion hosted Ni-Cu(PGE) ore deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 92 ~102(in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, *et al.* 2011. Trends of research in exploration of magmatic sulfide deposits and small intrusions metallogenetic system[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 33(1): 1 ~9(in Chinese with English abstract).
- Tao Yan, Gao Zhenmin, Luo Taiyi, *et al.* 2002. Inversion of primary magma composition for Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 70 ~82(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1 ~320.
- Wang Futong, Ma Dalin, Liu Guanghai, *et al.* 1992. Metallogeny and Prospecting Model of the Karatunk, Cu-Ni-Au Ore Belt in Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 181 ~210.
- Wang Guan. 2014. Metallogenesis of nickel deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Jilin University(in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Zhang Tianping, Liang Bin, *et al.* 1999. Composite ophiolitic melange zone in central part of eastern section of eastern Kunlun orogenic zone and geological significance of "fault belt in central part of eastern section of eastern Kunlun orogenic zone" [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 24(2): 129 ~133(in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Wei Qirong, Jia Chunxing, *et al.* 2007. Some ideas of Precambrian geology in the East Kunlun[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 929 ~937(in Chinese with English abstract).
- Wang Runming, Liu Dequan and Yin Dingtai. 1987. The conditions of controlling metallogeny of Cu, Ni sulphide ore deposits and the orientation of looking for ore Hami, Xinjiang, China[J]. *Mineral Petrol*, 7: 1 ~152(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhitian, Qin Kezhang and Zhang Shoulin. 1994. *Large Copper Mine Geology and Prospecting* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 162(in Chinese).
- Wei Bo, Wang Yan, Li Chusi, *et al.* 2013. Origin of PGE-depleted Ni-Cu sulfide mineralization in the Triassic Hongqiling No. 7 orthopyroxenite intrusion, Central Asian Orogenic Belt, Northeastern China [J]. *Economic Geology*, 108: 1 813 ~1 831.
- 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).
- Xu Xunhui and Wang Haigang. 2014. Analysis of nickel metallogenetic potential of Kaimuqihe area in east Kunlun[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 34(4): 457 ~461(in Chinese with English abstract).

- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, *et al.* 2007. Orogenic Plateau: Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~458(in Chinese).
- Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2003a. A method for identifying primary magma-Examples from picrite and alkali basalts[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 33(2): 130~134(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, *et al.* 2003b. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit[J]. Aata Petrological et Mineralogica, 22(3): 217~224(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Chai Fengmei, *et al.* 2009. 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.
- Zhu Fuxiang, Li Binglun and Yuan Qilin (translated). 1985. Chromite Deposits in Ural[M]. Beijing: Geological Publishing House, 12.
- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 等. 2006. 新疆哈密白石泉含铜镍镁铁-超镁铁质岩体铂族元素特征[J]. 地球学报, 27(2): 123~128.
- 陈列锰, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 等. 2009. 金川岩体母岩浆成分及其分离结晶过程的熔浆热力学模拟[J]. 地质学报, 83(9): 1302~1315.
- 陈有圻, 裴先治, 李瑞保, 等. 2011. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石 U-Pb 年龄[J]. 现代地质, 25(3): 510~521.
- 杜 玮. 2015. 夏日哈木镍矿区镁铁-超镁铁质岩石研究[D]. 长安大学.
- 冯宏业, 许英霞, 唐冬梅, 等. 2014. 东天山圪塔山口铜镍矿区镁铁-超镁铁质岩体橄榄石与尖晶石矿物学特征[J]. 地质与勘探, 50(2): 346~359.
- 姜 超, 钱壮志, 张江江, 等. 2014. 新疆东天山香山岩体橄榄石特征及其成因意义[J]. 现代地质, 28(3): 478~488.
- 姜常义, 凌锦兰, 赵彦锋, 等. 2012. 镁铁质-超镁铁质岩体含矿性评价指标体系——应用于寻找岩浆硫化物矿床[J]. 西北地质, 45(4): 51~60.
- 姜常义, 夏明哲, 钱壮志, 等. 2009. 新疆喀拉通克镁铁质岩体群的岩石成因研究[J]. 岩石学报, 25(4): 749~764.
- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 1992. 昆仑开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 1~224.
- 姜春发, 王宗起, 李锦铁. 2000. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 1~108.
- 李金祥, 秦克章, 徐兴旺, 等. 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[J]. 矿床地质, 26(1): 43~57.
- 凌锦兰, 夏明哲, 郭娜欣, 等. 2011. 新疆北山地区罗东镁铁质-超镁铁质层状岩体岩石成因[J]. 地球化学, 40(6): 499~515.
- 凌锦兰. 2014. 柴缘镁铁质-超镁铁质岩体与镍矿床成因研究[D]. 长安大学.
- 凌锦兰, 赵彦锋, 康 珍, 等. 2014. 柴达木地块北缘牛鼻子梁镁铁质-超镁铁质岩体岩石成因与成矿条件[J]. 岩石学报, 30(6): 1628~1646.
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 等. 2012. 小岩体成大矿理论指导与实践——青海东昆仑夏日哈木铜镍找矿突破的启示意义[J]. 西北地质, 45(4): 185~191.
- 李永生, 张招崇, 聂保锋. 2012. 一种改进的简单的估算原始岩浆的方法——以峨眉山大火成岩省丽江苦橄岩为例[J]. 地质论评, 58(4): 653~659.
- 孟繁聪, 崔美惠, 吴祥珂, 等. 2013. 东昆仑祁漫塔格花岗岩片麻岩记录的岩浆和变质事件[J]. 岩石学报, 29(6): 2107~2122.
- 潘裕生, 周伟明, 许荣华, 等. 1996. 昆仑山早古生代地质特征与演化[J]. 中国科学(D辑), 26(4): 302~307.
- 秦克章, 徐兴旺, 梁光河, 等. 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[J]. 矿床地质, 25(S): 301~304.
- 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.
- 孙 赫, 秦克章, 李金祥, 等. 2008. 地幔部分熔融程度对东天山镁铁质-超镁铁质岩铂族元素矿化的约束——以图拉尔根和香山铜镍矿为例[J]. 岩石学报, 24(5): 1079~1086.
- 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.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙 赫, 等. 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[J]. 岩石学报, 25(4): 817~831.
- 汤中立, 李文渊. 1991. 中国硫化镍矿床成矿规律的研究与展望[J]. 矿床地质, 10(3): 193~203.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 2006. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 10~185.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 2007. 中国小岩体镍铜(铂族)矿床的区域成矿规律[J]. 地学前缘, 14(5): 92~102.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 2011. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. 地球科学与环境学报, 33(1): 1~9.
- 陶 琰, 高振敏, 罗泰义, 等. 2002. 云南宝金山超镁铁岩原始岩浆成分反演[J]. 岩石学报, 18(1): 70~82.
- 王福同, 马大林, 刘光海, 等. 1992. 新疆喀拉通克铜镍金矿带成矿规律和找矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 181~210.
- 王 冠. 2014. 东昆仑造山带镍矿成矿作用研究[D]. 吉林大学.

- 王国灿, 张天平, 梁 斌, 等. 1999. 东昆仑造山带东段昆中复合带蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”地质涵义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 24(2): 129~133.
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴, 等. 2007. 关于东昆仑地区前寒武纪地质的一点认识[J]. 地质通报, 26(8): 929~937.
- 王润民, 刘德权, 殷定泰. 1987. 新疆哈密土墩-黄山一带铜镍硫化物矿床成矿控制条件及找矿方向的研究[J]. 矿物岩石, 7: 1~152.
- 王之田, 秦克章, 张守林. 1994. 大型铜矿地质与找矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 162.
- 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.
- 许寻会, 王海岗. 2014. 东昆仑开木棋河地区镍矿成矿潜力分析[J]. 西安科技大学学报, 34(4): 457~461.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2007. 造山的高原: 青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京: 地质出版社, 1~458.
- 张招崇, 王福生. 2003a. 一种判别原始岩浆的方法——以苦橄岩和碱性玄武岩为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 33(2): 130~134.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2003b. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 22(3): 217~224.
- 朱福湘, 李秉伦, 袁启林(译). 1985. 乌拉尔铬铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 12.

致 谢

2015 年度, 许多专家们在百忙之中抽出时间, 接受编辑部邀请为本刊评审了稿件, 他们对文章的学术质量进行了把关, 付出了辛勤的劳动, 也为提高刊物质量做出了贡献。在此, 编辑部特代表主编及主办单位, 向这些专家表示衷心的感谢! 这些专家有(以姓氏笔画为序):

万渝生	于炳松	马昌前	丰成友	王 涛	王 瑞	王长秋	王立本	王晓霞	冯 敏	史仁灯
叶 霖	白朝益	任留东	刘 羽	刘 琰	刘俊来	朱永峰	朱建明	江思宏	吴平霄	吴春明
宋玉财	宋谢炎	张 旗	张万良	张永生	张永旺	张华锋	张作衡	张良钜	张连昌	张建新
张招崇	李 营	李 惠	李永军	李永峰	李龙明	李怀坤	李金洪	李厚民	李振清	李益龙
杜利林	杜杨松	杨志明	杨荣华	杨富全	汪 灵	连 宾	陆现彩	陈 鸣	陈建林	陈能松
周永章	和钟铨	范大伟	范宏瑞	范晨子	郑水林	郑远川	郑常青	侯增谦	柏道远	胡恭任
赵 磊	赵广江	钟大康	倪 文	党 志	夏林圻	徐九华	徐夕生	徐冠立	柴凤梅	耿元生
莫宣学	袁 超	崔益顺	戚学祥	童 英	葛文春	覃小锋	谢桂青	韩宝福	韩春明	鲁安怀
蔡元峰	裴先治	樊祺诚	薛怀民							