

张照伟, 王亚磊, 钱兵, 等. 青海省化隆地区镁铁-超镁铁质侵入岩含矿特点与成矿规律[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 724-736.
Zhang Zhaowei, Wang Yalei, Qian Bing, et al. Mineralization characteristics and metallogenic regularity of mafic-ultramafic intrusions in Hualong area, Qinghai Province[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 724-736(in Chinese with English abstract).

青海省化隆地区镁铁-超镁铁质侵入岩含矿特点 与成矿规律

张照伟 王亚磊 钱 兵 李 侃 张江伟 高永宝 尤敏鑫

(国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

摘要:铁质系列的镁铁-超镁铁质侵入岩具有镍矿成矿专属性,但并非所有的类似侵入岩都含矿,根据镁铁-超镁铁质侵入岩含矿特点可总结成矿规律,有效指导区域找矿实践。青海省化隆地区发育 114 个镁铁-超镁铁质侵入岩体,其含矿性特点与成矿规律是制约该岩带找矿突破的关键因素。本文通过对区内裕龙沟、亚曲、阿什贡及下什堂等岩体地质特征、年代学、岩石地球化学特征及区域对比分析研究,发现这些岩体具有相近的成岩时代,集中于 436-449 Ma,可能是同一构造背景的产物。S 同位素、Re-Os 同位素及 Sr-Nd 同位素共同揭示了岩体的母岩浆来自一个曾被交代富集的地幔源区,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.74 \sim +8.36$,初步表明其岩浆源区应该位于软流圈地幔,并混有一部分被俯冲板片交代的地幔楔物质。而这种交代富集事件可能与祁连-柴北缘在早古生代期间大规模的俯冲有关,是弧岩浆作用的成矿表现。化隆群富硅地层 S 的混入为硫化物的不混溶创造了条件,致使岩浆中熔离出的硫化物液滴聚集,侵位到理想空间形成不同品位不同类型的铜镍矿体。岩相分异充分、橄榄石富集、基性程度较高的侵入岩体相对易形成镍矿体,对青海省化隆地区镁铁-超镁铁质岩体的含矿性评价具有重要指示作用。

关键词: 镁铁-超镁铁质侵入岩;地质特征;含矿性;成矿规律;青海省

中图分类号: P618.63;P612 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0724-13

Mineralization characteristics and metallogenic regularity of mafic-ultramafic intrusions in Hualong area, Qinghai Province

ZHANG Zhao-wei, WANG Ya-lei, QIAN Bing, LI Kan,
ZHANG Jiang-wei, GAO Yong-bao, YOU Min-xin

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The ferruginous series mafic-ultramafic intrusions have Ni metallogenic specialization, but mafic-ultramafic intrusions

收稿日期: 2014-11-21; 改回日期: 2015-02-05

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201511020)和地质大调查项目(12120114044401)资助。

作者简介: 张照伟,男,1976年生,博士,高级工程师,主要从事岩浆铜镍硫化物矿床成矿理论与镍矿资源调查评价工作;

E-mail: zhaoweiz@126.com。

do not necessarily contain Ni ore. Mineralization characteristics can be used to summarize the metallogenic regularity of mafic-ultramafic intrusions and guide the regional exploration. There are 114 mafic-ultramafic intrusive bodies in Hualong area, and their mineralization characteristics and metallogenic regularity are important key factors for exploration breakthrough. The authors studied geological characteristics, geochronology and petrogeochemical characteristics of Yulonggou, Yaqu, Ashengong and Xiashentang intrusions in Hualong area, Qinghai Province, and found that the four intrusions have similar ages, focused in the range of 436Ma-449Ma, probably suggesting the products of the same tectonic setting in southern Qilian orogenic belt. S, Re-Os and Sr-Nd isotopes reveal that parent magma originated from a mantle source which had once experienced metasomatism. Its $\epsilon\text{Nd}(t)$ ratios are $-7.74\sim+8.36$, suggesting that the magma source might have been located in the asthenospheric mantle region contaminated by mantle wedge material with subduction plate metasomatism. The rich silicon strata of Hualong rocks group created the condition of assimilation and contamination for sulfide immiscibility, caused the addition of the rich silicon material, formed the sulfide immiscibility, and finally formed the different grades of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the Hualong rock belt, Qinghai Province. Sufficient lithofacies differentiation, enriched olivines and higher basic degree of mafic-ultramafic intrusions were favorable conditions for the formation of Ni orebodies, and could further guide the prospecting work in Hualong mafic-ultramafic intrusive rocks of Qinghai Province.

Key words: mafic-ultramafic intrusions; geological characteristics; mineralization; metallogenic regularity; Qinghai Province

About the first author: ZHANG Zhao-wei, born in 1976, doctor, senior engineer, mainly engages in the study of magmatic Ni-Cu sulfide deposits and mineral resource assessment, E-mail: zhaoweiz@126.com.

Ni金属因广泛应用于军事、航天等工业领域而备受世界各国青睐,赋存于镁铁-超镁铁质侵入岩中的岩浆铜镍硫化物矿床是其主要来源^[1-6]。尽管中国产有世界上第三大金川岩浆铜镍硫化物矿床,但每年冶炼出的Ni金属还远远不能满足中国经济快速发展对矿产品的需求,70%以上仍依赖进口。在国内勘查、评价、开发岩浆铜镍硫化物矿床是解决这一供需矛盾的有效方式。青海省化隆地区主要位于南祁连造山带内的化隆县,区域上恰处于南祁连、东昆仑及西秦岭的结合部位^[7-14]。在西起青海湖旁的裕龙沟,东到青甘两省交界化隆县的塔加,这一化隆镁铁-超镁铁岩带内,分布有114个镁铁-超镁铁岩体,按照岩体赋存部位及产出特点,合并为32个镁铁-超镁铁质岩体(群)。化隆岩带北邻是以拉脊山南缘断裂为界分隔的拉脊山岩带,产出有97个侵入岩体,按照各个岩体赋存位置与特点,合并为41个镁铁-超镁铁质岩体(群)。化隆岩带和拉脊山岩带均为青海省的重要镁铁-超镁铁质岩带。但这些岩体的含矿性目前尚不清楚^[15-16]。本文拟从岩体的岩石地球化学角度探讨岩体的成因进而研究其矿床成因和含矿性,总结成矿规律,探求找矿方向,为找矿勘探提供科学支撑与技术指导。通过对化隆岩带内裕龙沟、阿什贡、亚曲、下什堂等典型镁铁-超镁铁质岩体的地质、地球化学、同位素地球化学研究,旨在揭示区内镁铁-超镁铁质岩体的含

矿特点,确定制约成矿的关键要素,总结成矿规律,为区域找矿勘查提供工作方向和技术支撑。

1 区域地质背景

化隆岩带和拉脊山岩带是青海省8条重要的镁铁-超镁铁岩带中的2条,位于青海省疆图的东北部拉脊山及南部化隆地区(图1-a)。化隆镁铁-超镁铁岩带,北以拉脊山南缘深大断裂为界与拉脊山接触,南以青海湖-天水断裂为界与西秦岭造山带毗邻,呈西窄东宽的楔形,长约200 km,平均宽20 km(图1-a)^[16]。岩带北侧是拉脊山小洋盆,发育早古生代的镁铁-超镁铁质侵入体,且年龄主要集中在440-460 Ma(图1-a),但岩体多属于镁质系列,不利于形成镍矿。区域上,北祁连洋约在450 Ma完全闭合^[9,17]。岩带南侧为西秦岭造山带和柴北缘高压-超高压变质带,柴北缘高压-超高压变质带,约在450 Ma完成了俯冲后的折返^[18]。

化隆岩带的镁铁-超镁铁质岩体均侵位于化隆群中。化隆岩群是一套以石英岩、黑云母石英片岩、二云母片岩、石英片岩、角闪片岩、黑云斜长片麻岩、混合片麻岩和混合岩为主体的、变质程度较深的中-深变质岩系。化隆岩群变质岩与该地块北侧的拉脊山造山带(构造混杂岩带)的早古生代地层呈断层接触,其南侧边界与印支期褶皱带呈断层接触^[17]。拉脊山岩带的镁铁-超镁铁质岩体主要侵

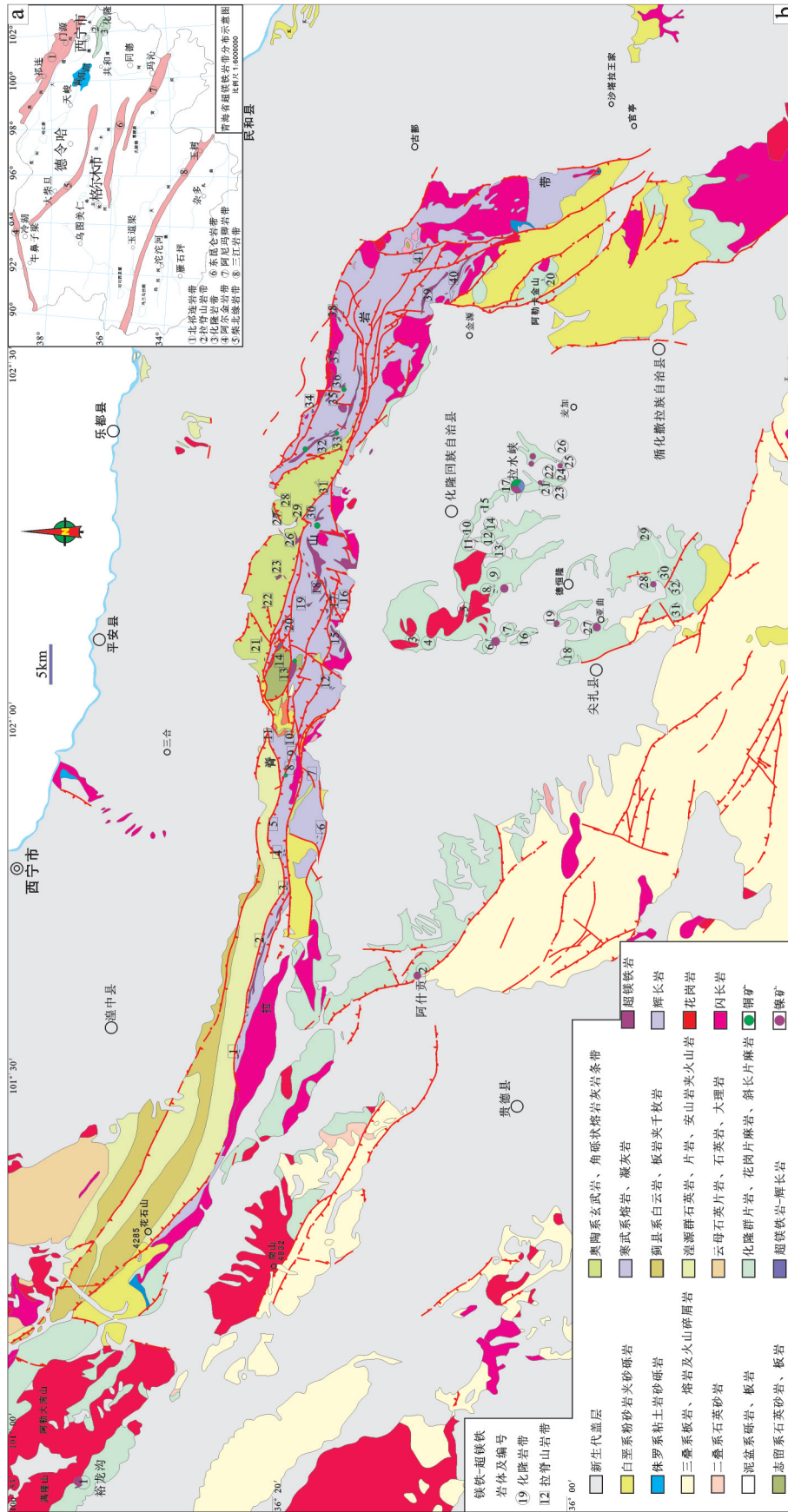


图1 青海省化隆地区镁铁-超镁铁质侵入岩分布略图

Fig.1 Sketch distribution map of mafic-ultramafic intrusions in Hualong County, Qinghai Province

位于湟源群中,湟源岩群与化隆岩群都属于元古宙,且可以对比。在这套变质岩系之上直接被新生代西宁群和贵德群红层角度不整合覆盖(图1-b)。化隆镁铁-超镁铁质岩带区域内所出露地层除元古界化隆岩群外,还有早古生界上寒武统六道沟群,中生界三叠系、侏罗系、白垩系,新生界盖层等。

在西窄东宽楔形的化隆岩带内,发育有114个镁铁-超镁铁质侵入岩,因其出露位置和特点合并为32个岩体(群)(图1-b)。裕龙沟岩体位于青海湖旁,属于化隆岩带的最西端,向东依次是贵德县的阿什贡岩体,化隆县的下什堂岩体和亚曲岩体,到达化隆岩带的东端(图1-b)。这4个岩体处于化隆岩带的不同位置,含矿特点与赋矿岩性也不尽相同,可以代表化隆镁铁-超镁铁质岩带的含矿特点,进而总结成矿规律,有效指导区域找矿和镁铁-超镁铁质岩体含矿性评价。

2 镁铁-超镁铁质岩体及矿化特征

青海省化隆岩带内的岩体类型总的属镁铁-超镁铁类,各岩体的岩石类型主要是橄榄岩、辉石岩、角闪石岩及辉长岩等。裕龙沟是角闪石岩型岩体,全部或绝大部分由角闪石岩或黑云母角闪石岩、辉石角闪石岩、橄榄角闪石岩所组成,是岩带内重要的成矿岩体类型。橄榄岩型岩体则以阿什贡为代表,由橄榄岩组成,有少量的二辉辉石岩、角闪石岩、紫苏辉长岩。而在单辉辉石岩-辉长岩型岩体中,由单辉辉石岩、辉长岩或其中一种岩石组成。其特征是岩石中不出现斜方辉石,辉石岩与辉长岩常常由于辉石和斜长石的增减而彼此过渡。岩石化学成分是钙高镁低,岩体无铜镍矿化或矿化微弱。该类型岩体在岩带内出露相对较多,代表岩体有亚曲、下什堂等。

2.1 裕龙沟镁铁-超镁铁岩体

裕龙沟岩体受一组北西向构造断裂控制,由几个岩体组成,其中最大的一个岩体出露长1200 m,东段宽40~80 m,中段宽10~15 m,西段宽68 m,向两端尖灭,已控制最大延深430 m。岩体呈340°延伸,倾向北东,倾角40°~60°,为一上陡下缓的单斜岩体^[4]。裕龙沟岩体目前已发现10个铜镍矿(化)体,主要分布于岩体东段,形成一牛轭状含矿带。最大的矿体呈扁豆状,沿走向长130 m,侧伏方向长

360 m,平均厚10.4 m,走向285°左右,侧伏方向345°左右,侧伏角40°左右。从钻孔剖面图上也可以看出矿体有向下变厚、镍金属品位变富,后尖灭的趋势,也有的矿体向深部直接尖灭。矿体严格受岩相控制,角闪-辉长岩相矿化最好,黑云角闪岩-黑云角闪辉石杂岩相次之。矿石构造以稀疏-中等浸染状构造为主,局部呈稠密浸染状构造,以硫化物为主组成的矿石结构具有典型的填间结构,局部有似海绵陨铁结构分布。矿石的主要矿物由紫硫镍铁矿、少量磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、镍黄铁矿、砷铂矿、碲铋矿等构成^[4]。

2.2 阿什贡镁铁-超镁铁岩体

阿什贡镁铁-超镁铁岩体侵位于元古宇黑云斜长片麻岩中,岩体呈北西向线状延伸,与区域构造线方向基本吻合,其接触面与围岩片麻理产状亦大体一致,局部斜交呈10°~20°不等夹角,为受层间裂隙构造控制的脉状岩体。一般规模很小,常呈群分布,主要划分4个独立的单斜岩体,由北西至南东依次编号为m₁、m₂、m₃、m₄。岩体形态呈陡倾的透镜状或脉状,局部分枝复合,岩体总体剥蚀程度较浅,但从北向南剥蚀程度有逐渐加深的趋势。阿什贡镁铁-超镁铁岩体主要由4个岩相带组成,分别是橄榄岩相、辉石岩相、角闪石岩相及辉长岩相^[9]。

阿什贡岩体内见有一个原生硫化镍矿体,主要产于辉长苏长岩中,该矿体长186 m,平均厚14.6 m,延深超过100 m,倾向北东,倾角较陡,一般在60°以上。但矿体形态较简单,主要为陡倾斜的透镜状,从勘探线剖面的样品分析来看,Ni品位有向深部变富的趋势。原生矿石为他形粒状结构,稀疏浸染状构造为主。金属硫化矿物主要是磁黄铁矿、镍黄铁矿、少量紫硫镍矿、黄铜矿、斑铜矿等。矿物共生组合主要表现为磁黄铁矿-镍黄铁矿-黄铜矿,金属硫化矿物为集合体,呈小团块状、斑点状和似脉状。另外一种矿物共生组合主要是紫硫镍矿-黄铜矿-黄铁矿-磁黄铁矿,紫硫镍矿呈他形粒状集合体,粒度较小,多为交代溶蚀磁黄铁矿和镍黄铁矿。矿石品位一般不高,原生矿石镍一般平均0.73%,但在氧化矿石中,镍含量均比原生矿中要高^[9]。

2.3 下什堂镁铁-超镁铁岩体

下什堂岩体顺层侵入于元古宇化隆群关藏沟岩组中的条纹-条痕状黑云二长混合岩内,岩体与

围岩产状基本一致。总体走向 320° ,北西和南东两端略偏北为 340° ,地表呈一“S”型透镜体状,长约120 m,宽16~45 m,北东倾斜,倾角较陡。岩石包括二辉橄榄岩、斜辉橄榄岩、闪辉橄榄岩、橄榄岩、二辉辉石岩、辉石岩、角闪辉长岩和闪长岩等,为一个超镁铁-镁铁质岩体。总体具明显的对称分异现象,中心为橄榄岩和部分橄辉岩,边缘相由内向外依次为辉石岩、角闪石岩和闪长岩,各岩相间均呈逐渐过渡关系。

下什堂岩体中已发现两个铜镍矿体,主要产于岩体中心的橄榄岩相内,其中I号矿体:已控制长34 m,厚度西部2.58 m,东部3.10 m,平均厚度3.02 m。矿体走向 340° ,北东倾斜,倾角大于 60° ,产状与岩体基本一致。II号矿体:位于I号矿体以西,二者近于平行产出。控制长30 m,西部厚3.34 m,东部1.81 m,平均厚度2.58 m,走向 335° 。据钻孔资料,矿体向深部有所增厚,产状变缓,并同围岩呈过渡渐变关系^[17]。

2.4 亚曲镁铁质岩体

亚曲岩体地表露头宽10~25 m不等,深部可增至80 m左右,并发育黄色及棕褐色氧化带。北西走向,倾斜向北东,呈现出北北西-北侧伏,其南端延深达260 m,向北部延深也在200 m以上。岩体北段为一较简单的薄透镜状体,其南段地表则被片麻状闪长岩残余体所分隔成两枝,但在深部又合二为一,且有尖灭趋势。岩体各部分连接起来,反映在剖面上呈现出“V”字形特征^[14]。亚曲镁铁质岩体的岩石类型主要有辉长岩、辉长-苏长岩及闪长岩等3个岩相带,岩石类型主要为表现为角闪石化辉长-苏长岩,角闪石化黑云母辉长岩和石英闪长岩^[20]。

亚曲矿体基本赋存于辉长岩和闪长岩当中,为一镁铁质杂岩体,地表矿化地带发育黄、棕褐色氧化带。北西走向,向北东倾斜,延深超过260m,北部延深也已超过200m。亚曲矿体的形态比较复杂,其北段为薄的透镜体,属于完全隐伏的铜镍矿体。岩体南段地表出露部分被片麻状闪长岩的残余体分隔为两枝,但在深部又合二为一,且有向下尖灭的趋势,岩体的各部分联系起来,反映在剖面上呈现“V”字形产状,矿体也随之表现出了相类似的特征。岩体内共有大小矿体19个。于岩体南段,铜镍矿体主要集中于岩体下盘的角闪石化辉长岩内,而亚曲岩体的北段几乎全岩矿化,并且两侧的矿体比

中部的都要富。矿石类型除浸染状与斑杂状外,还有角砾状及块状矿石。矿石中的金属矿物由磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿、针镍矿、黄铁矿、斑铜矿、白铁矿等构成。矿石的结构则以半自形-他形粒状结构和海绵陨铁状结构为主。矿石构造主要以稀疏浸染状为主,少有珠滴状构造、块状构造、稠密浸染状构造^[20]。

3 岩相学与岩石地球化学

3.1 岩相学特征

青海省化隆地区的裕龙沟、阿什贡、下什堂、亚曲侵入岩体的岩石类型不尽相同,裕龙沟主要是辉石岩,且出现明显角闪石化(图2-a),镍矿化也主要发育在辉石岩相中,表现为磁黄铁矿、黄铜矿及黄铁矿组合(图2-b)。阿什贡镁铁-超镁铁质岩体主要是二辉橄榄岩和橄榄辉石岩,但存在蚀变现象(图2-c),矿化主要表现为镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿的矿物组合,并且镍黄铁矿基本沿着磁黄铁矿的裂隙发育(图2-d)。下什堂镁铁-超镁铁质岩体以二辉橄榄岩和二辉岩为主,岩相分异充分且对称分布,早期结晶的橄榄石被稍后结晶的且较粗大的斜方辉石晶体所包裹(图2-e、f),斜方辉石与单斜辉石含量基本相当。亚曲岩体基本表现了镁铁质岩的特征,主要为辉石辉长岩(图2-g),岩石中所发育的镍黄铁矿基本沿着磁黄铁矿的裂隙生长(图2-h)。化隆地区的侵入岩,基本属于镁铁-超镁铁系列,并且不同程度的蚀变现象,说明成岩之后普遍遭受了区域性热事件的改造。

3.2 主量元素地球化学

裕龙沟、阿什贡、下什堂、亚曲侵入岩样品的 SiO_2 介于35.78%~53.78%,属镁铁-超镁铁岩类。与岩相学特征相对应, Al_2O_3 、 $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 含量变化范围相对较大。角闪石岩、辉长岩和辉长闪长岩的 MgO 含量低(2.75%~12.36%), Al_2O_3 (10.50%~19.46%)、 CaO (2.40%~9.10%) 和 Na_2O (2.21%~3.01%)含量较高,这主要与岩石中斜长石含量高低直接相关^[6,17,19]。主要含矿岩相辉长岩和辉石橄榄岩的m/f值为1.1~3.0,属于铁质系列镁铁-超镁铁岩类,对镍成矿有利。

3.3 微量元素地球化学

裕龙沟、阿什贡、下什堂、亚曲侵入岩体微量元

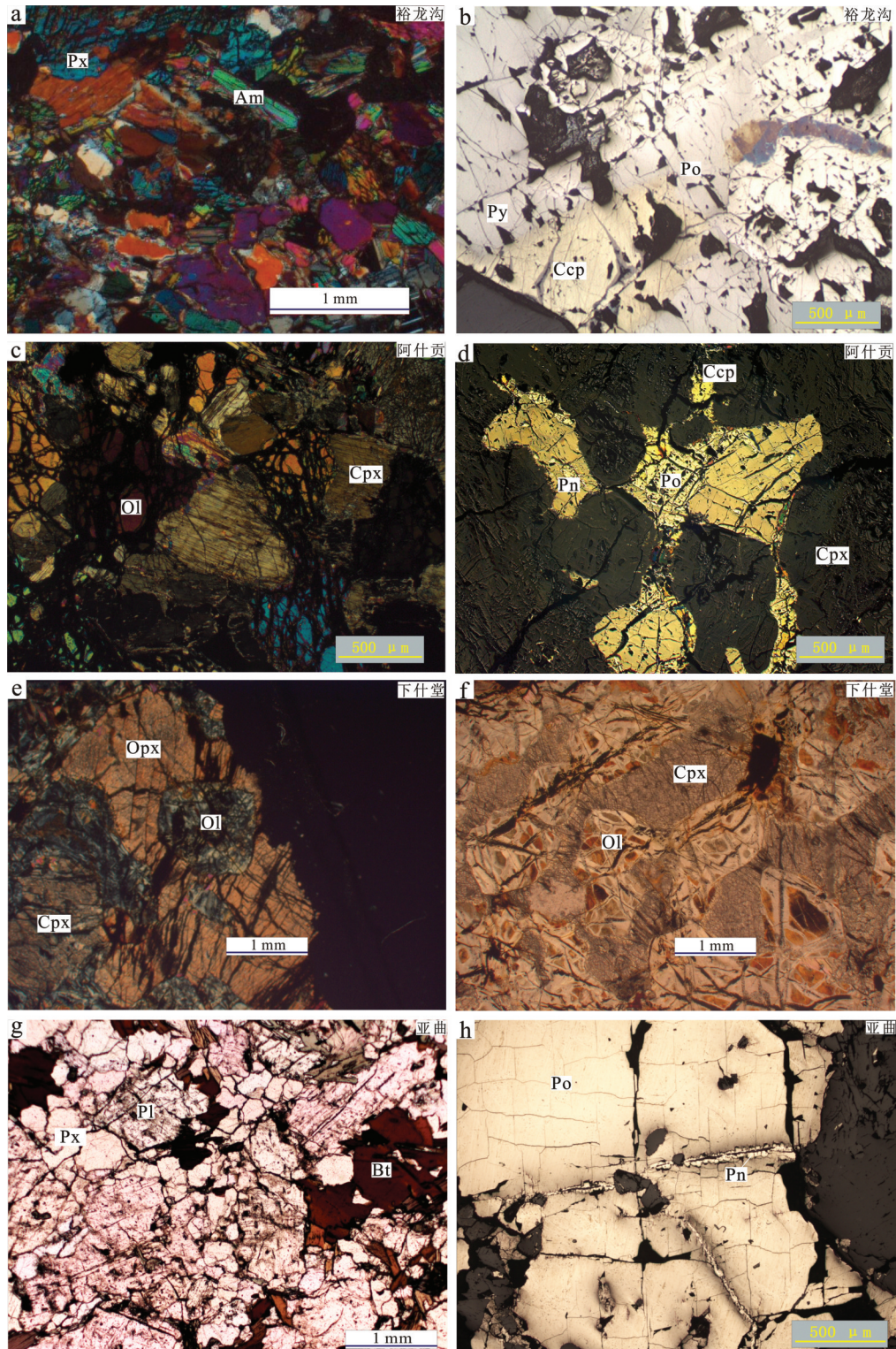


图2 青海省化隆地区镁铁-超镁铁质侵入岩体岩相显微照片

Amp—角闪石; Bt—黑云母; Ccp—黄铜矿; Cpx—单斜辉石; Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石; Pl—斜长石; Pn—镍黄铁矿; Po—磁黄铁矿; Px—普通辉石; Py—黄铁矿

Fig.2 Microphotographs of mafic-ultramafic intrusions in Hualong, Qinghai Province

Amp—Hornblende; Bt—Biotite; Ccp—Chalcopyrite; Cpx—Clinopyroxene; Ol—Olivine; Opx—Orthorhombic pyroxene; Pl—Plagioclase; Pn—Pentlandite; Po—Pyrrhotite; Px—Pyroxene; Py—Pyrite

素分析显示,多数样品的 Σ REE总体相对较小(Σ REE=36.83 $\times 10^{-6}$ ~106.69 $\times 10^{-6}$)^[6,17,19]。除1件辉石橄榄岩样品(La/Sm)_N=1.19外,大多数样品的(La/Yb)_N=2.04~25.20、(La/Sm)_N=1.50~4.17、(Gd/Yb)_N=1.19~3.84,数值变化较大,表明轻重稀土元素之间的分馏程度较强,轻、重稀土元素内部分馏程度较弱。所有样品稀土元素配分曲线都呈轻稀土富集的右倾型(图3-a), δ Eu=0.41~0.98,显示不同程度的负铕异常,可能暗示岩浆演化过程中发生了斜长石的分离结晶。

裕龙沟、阿什贡、下什堂、亚曲侵入岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图表现了相似的变化特征(图3-b),普遍富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、U),相对亏损高场强元素,且有明显的Nb、Ta及Ti的负异常。

4 同位素地球化学

4.1 U-Pb年代学

选择青海省化隆镁铁-超镁铁质侵入岩带的裕龙沟、阿什贡、下什堂及亚曲岩体进行锆石U-Pb年代学研究,并通过ID-TIMS和LA-ICP-MS两种方法进行测试。裕龙沟辉石岩、亚曲辉石辉长岩所选出的锆石,表现出了岩浆锆石成因形态(图4-b),在加拿大多伦多大学年代学实验室进行锆石溶蚀法ID-TIMS测定,分别获得(442.7 \pm 1.6)Ma (MSWD=0.59)(图5-a)和(440.74 \pm 0.33) Ma (MSWD=1.1)(图

5-b)的年龄数据。阿什贡辉岩和下什堂辉岩样品所挑选出的锆石如图4-a、c所示,都表现出了岩浆锆石的成因特点,并在中国地质科学院矿产资源研究所进行了激光剥蚀LA-ICP-MS锆石U-Pb测定,分别获得了(436.1 \pm 1.2)Ma (MSWD=0.13)(图5-c)和(449.8 \pm 2.4)Ma (MSWD=0.31)(图5-d)成岩时代信息^[3-4,6,19-20]。

利用ID-TIMS和LA-ICP-MS两种方法对化隆带内镁铁-超镁铁岩体所获得的锆石U-Pb年龄在误差允许范围内是一致的,均集中在440~449 Ma,说明此类岩体形成于早古生代,可能是同期的产物。

4.2 S同位素

S的含量是决定硫化物是否发生不混溶的关键因素,S的含量高,硫化物与硅酸盐岩浆发生不混溶,并形成硫化物液滴的聚集与成矿。当然,S可以地幔来源,也可以是后期地壳S的混入,只要S的溶解度达到饱和,硫化物便会发生不混溶而从硅酸盐岩浆中析出。S同位素是判定S源的主要方法,一般认为,矿石中如果 δ^{34} S值在-2‰~+2‰之间的,S多属于地幔来源。如果矿石中 δ^{34} S值均在+2‰以上,说明有地壳S的混入。青海省化隆镁铁-超镁铁岩带内不同矿床中矿石的 δ^{34} S值介于0.8‰~4.32‰,多数在+2.12‰以上,表明矿石中的硫不同程度地有地壳S的混入^[6]。这一现象从野外钻孔岩心中也得到了证实,化隆群内的黑云斜长片麻岩作为捕虏体可在镁

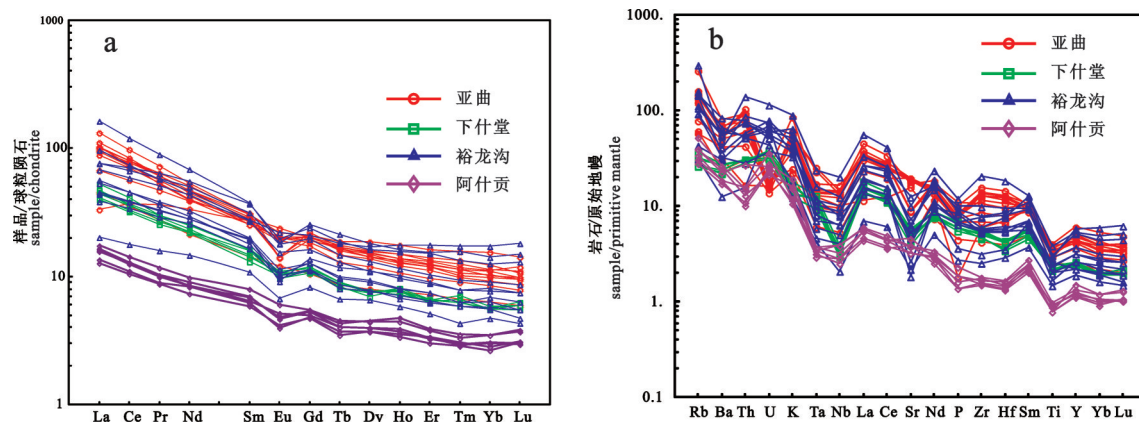


图3 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

(球粒陨石数据引自[18];原始地幔数据引自[6,17,19])

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b)
(Normalization values of chondrite after Sun and McDonough, 1989; primitive mantle after Sun and McDonough, 1995)

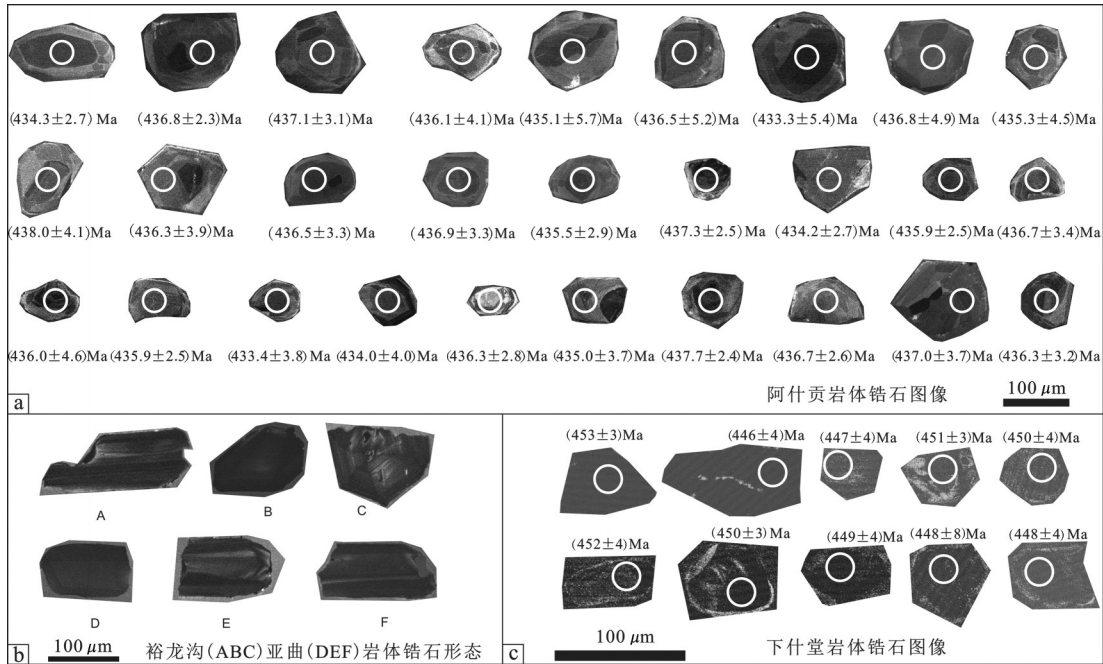


图4 青海省化隆地区镁铁-超镁铁质岩体锆石 CL 图像
Fig.4 CL images of zircon from mafic-ultramafic intrusions in Hualong, Qinghai Province

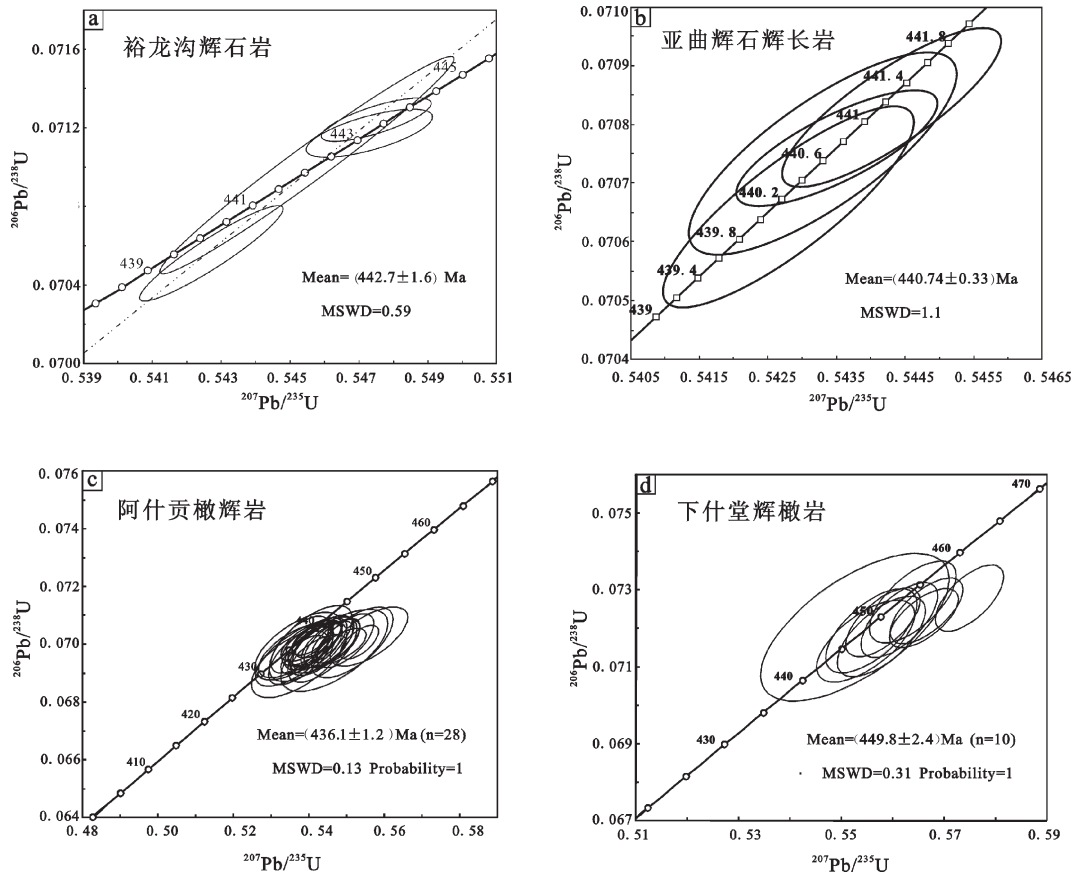


图5 青海省化隆地区镁铁-超镁铁质岩体锆石 U-Pb 谐和图
Fig.5 Concordia diagrams showing U-Pb analyses of zircons from mafic-ultramafic intrusions in Hualong, Qinghai Province

铁-超镁铁质岩体边缘相零星见到^[5,16]。

4.3 Sr-Nd 同位素

Sr-Nd 同位素研究作为一种辅助手段可进一步探讨岩浆源区性质,因为它对样品的要求相对比较严格,利用同位素含量及相关比值来推测岩浆源区的可能部位。从青海省化隆镁铁-超镁铁质岩带内裕龙沟、亚曲及下什堂岩体的全岩 Sr-Nd 同位素组成来看, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 和 ε_{Nd} 值根据锆石 U-Pb 年龄(*t*=441Ma)计算,裕龙沟样品 ε_{Nd}(*t*) 值介于 -5.7 ~ -7.7, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值介于 0.711447 ~ 0.713884。亚曲岩体 ε_{Nd}(*t*) 值较高,介于 -4.1 ~ +8.4, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 介于 0.70565 ~ 0.70969。下什堂岩体的 ε_{Nd}(*t*) 值变化范围较小,介于 -2.52 ~ -2.62, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值介于 0.709012 与 0.714682。亚曲辉石辉长岩相对于辉长闪长岩具有较高的 ε_{Nd} 值和较低的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值^[6]。亚曲辉长岩的 ε_{Nd} 值与岛弧玄武岩的值接近,但其 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值较岛弧玄武岩高。亚曲辉石辉长岩及裕龙沟岩体辉石岩样品与岛弧玄武岩相比,均具有较低的 ε_{Nd} 值和较高的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值^[6]。

4.4 Re-Os 同位素

Re-Os 同位素研究是探讨岩浆源区性质的重要手段和方法。在化隆镁铁-超镁铁质岩带内选择典型裕龙沟、亚曲铜镍矿床的硫化物开展了 Re-Os 同位素研究,表现了较高的 Os 同位素比值(0.245~1.18),远高于地幔橄榄岩 (<0.13),即使是早期堆晶形成的辉石橄榄岩的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值(0.245)也明显高于地幔橄榄岩。这么富含放射性成因 Os 的特征只能是母岩浆被地壳物质混染所致^[17,20]。理由如下:Os 是强相容元素,而 Re 是中等程度不相容元素,这种地球化学性质的巨大差别使 Os 在地幔源区部分熔融过程中主要残留在地幔岩中,而 Re 则主要进入玄武质熔体,导致地幔岩具有很低的 Re/Os 比值,而地壳具有很高的 Re/Os 比值。随着时间演化,地幔岩具有很低的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值 (<0.13; 比球粒陨石还要低),而地壳岩石(尤其老地壳)具有很高的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值(太古代基性麻粒岩可达 80 以上,TTG 也达 5~10)。重要的是,地幔岩由于具有很高的 Os 含量(平均 3200×10⁻¹²)远高于任何交代介质的 Os 含量(1×10⁻¹²~100×10⁻¹²)使得地幔橄榄岩的 Os 同位素体系不会受到任何后期地幔交代作用的影响而保持很低的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值,这已被大量地幔橄

岩 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 数据所证实。所以化隆地区镁铁-超镁铁岩的高 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值反映其母岩浆在侵位过程中发生了强烈的地壳物质混染。

前人研究表明 γ_{Os}(*t*) 值的大小与地壳混染程度成正相关关系^[24],芬兰 Keivinstä 矿床的 γ_{Os}(*t*) 值为 +130~+170,壳源 Os 约占 >28%;加拿大 Sudbury 矿床 γ_{Os}(*t*) 值为 +430~+814,壳源 Os 占有很大比例;澳大利亚 Kimberley 岩体 γ_{Os}(*t*) 值为 +950~+1300^[25]。裕龙沟、亚曲的 Re-Os 同位素特征表明化隆一带赋存铜镍矿床的镁铁-超镁铁质岩体遭受了一定程度的地壳混染,但混染程度存在很大差别;裕龙沟矿床/点的 Os 为壳幔混合来源,而亚曲矿床的 Os 以壳源为主,另一部分来自地幔^[20]。尽管 γ_{Os}(*t*) 值的大小不能严格区分壳源还是幔源,但至少说明幔源物质在成矿过程中或多或少卷入了部分壳源物质。

5 成矿作用与成矿规律

5.1 岩浆源区与构造背景

在化隆镁铁-超镁铁质侵入岩的样品中,部分橄榄石落在 Ni 含量亏损区,说明岩浆在深部发生过硫化物的熔离作用,熔离的硫化物与橄榄石发生反应,进一步萃取并降低了橄榄石中的镍含量^[24]。除此之外,硫化物深部熔离还有来自铜镍矿石中 Cu/Pd 比值远大于地幔岩中 Cu/Pd 比值的证据。在 Ni/Cu-Pd/Ir 图解上,大多数样品落在高镁玄武岩、层状侵入体和溢流玄武岩区域,初步显示了与玄武质岩浆有关的特征。母岩浆为含橄榄石和硫化物的“晶粥”,此法也只能约束母岩浆中 MgO 含量的上限或初始岩浆的下限,因而,化隆岩带镁铁-超镁铁质岩体的母岩浆可能为 MgO 含量 >9.5% 的拉斑玄武质岩浆^[21]。化隆镁铁-超镁铁质岩体适度演化的岩浆具有轻稀土元素富集型配分曲线,同时富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr 等),亏损高场强元素(Th、Nb、Ti 等),其中 Sr 在 100×10⁻⁶~600×10⁻⁶^[6]。这些特征表明该岩体的母岩浆来自一个曾被交代富集的地幔源区。虽然 Nd-Sr 同位素数据一致表明其母岩浆在侵位过程中受到了不同程度的地壳混染,但裕龙沟的 2 件样品具有较低的 γ_{Os}(*t*=442.4 Ma) 值(11.4 和 20.8),基本未遭受地壳物质的混染,其 Nd-Sr 同位素组成应该最接近其地幔源区的 Nd-Sr 同位素组成。化隆镁铁-超镁铁质岩体的 ε_{Nd}(*t*) =

-7.74~+8.36,这与上述富集LREE和大离子亲石元素的不一致特征说明其母岩浆应该来自一个在岩浆生成前不久被交代富集的岩石圈地幔。

在Nb/Yb-Th/Yb的协变图中(图6),裕龙沟、亚曲和下什堂岩体位于MORB-OIB线的上方,落入现代岛弧玄武岩(数据来源 <http://www.petdb.org>)和形成于岛弧背景的西班牙Aguablanca含矿镁铁-超镁铁岩体区域。区域内的锆石U-Pb年龄信息显示,450 Ma北祁连大洋已俯冲消亡完全闭合而成为祁连地块与华北地台的缝合带,此时柴北缘洋也已俯冲但还未最终消亡,至430 Ma完成了大洋俯冲消亡和折返的超高压-高压变质带,随后进入陆陆碰撞阶段^[23]。化隆岩带北邻的拉脊山,同样产出有440~450 Ma的镁铁-超镁铁侵入岩和同时期花岗岩,进一步揭示拉脊山小洋盆最终于450 Ma闭合。此时的化隆地区,处于拉脊山小洋盆和柴北缘洋完全俯冲闭合转为碰撞造山阶段,岩浆在后碰撞的伸展部位上侵而形成了化隆地区的镁铁-超镁铁岩体。这些证据从不同侧面证明,其岩浆源区应该位于软流圈地幔,并混有一部分被俯冲板片交代的地幔楔物质。而这种交代富集事件显然与祁连、柴北缘在早古生代期间大规模的板片俯冲有关。由于俯冲带熔/流体对地幔楔交代富集事件的时间与该富集地幔发生熔融的时间相隔较近,致使化隆地区镁铁-超镁铁质岩体虽然具有富集的微量元素特

征,但未遭受同化混染的样品却基本保持了亏损地幔的同位素性质。

5.2 成矿作用

岩浆中硫达到饱和,产生硫化物液滴的不混溶,这些液滴聚集在有限的空间沉淀下来形成与镁铁-超镁铁质岩体密切相关的岩浆铜镍硫化物矿床^[27-30]。深部硫化物熔离的诱因除橄榄石等矿物的分离结晶外,不同程度的地壳混染在化隆地区对成矿也具有很重要的贡献^[31-34]。研究认为,如果岩浆发生大约20%的分离结晶作用,残余岩浆中硫含量上升将会达到饱和和曲线位置,进一步的分离结晶作用就可导致硫化物的熔离^[35-37]。而大多数玄武岩浆在地表条件下硫将永远达不到饱和,除非岩浆至少有60%的分离结晶。但是,无论初始岩浆中硫是否饱和,硫化物熔离要求岩浆发生45%~50%的分离结晶,可见结晶分异与地壳混染耦合,对硫化物熔离非常重要,并且地壳物质同化混染将有助于启动早期的硫化物熔离^[6, 20, 38-40]。

在450 Ma之前,南祁连及邻区处于俯冲阶段,受柴北缘大洋及北祁连洋的影响,在南祁连化隆地区发生岛弧火山作用。从岩体的形成时代及构造背景分析,440~450 Ma,柴北缘洋已俯冲闭合,受北祁连洋南向俯冲及柴北缘洋北向俯冲的影响,拉脊山小洋盆也被迫关闭。此时化隆地块处于俯冲后的碰撞造山阶段,几乎与此同时形成的岩浆沿后碰撞伸展的薄弱地带上侵成岩成矿,最终形成了化隆镁铁-超镁铁岩带和岩浆镍铜硫化物矿床。裕龙沟、阿什贡、下什堂及亚曲所表现出的成矿特点不尽相同,主要是地壳S的加入同化混染程度不同的结果,这也与 $\gamma_{Os}(t)$ 相一致。

5.3 成矿规律

青海省化隆镁铁-超镁铁质岩带发育有114个小侵入岩体,其成矿规律的认识对于指导区域找矿扩大找矿成果具有重要意义。裕龙沟、阿什贡、下什堂及亚曲镁铁-超镁铁质侵入岩体的产出位置完全能够代表整个岩带的含矿性特点。从上述岩体特征、岩相学特点、成岩年代学、同位素地球化学及成矿作用等方面可总结青海省化隆地区镁铁-超镁铁质侵入岩体的含矿性特点及成矿规律。(1)成岩成矿时代,集中在440 Ma左右,其形成机制与柴北缘洋及拉脊山小洋盆的俯冲闭合密切相关,是弧岩

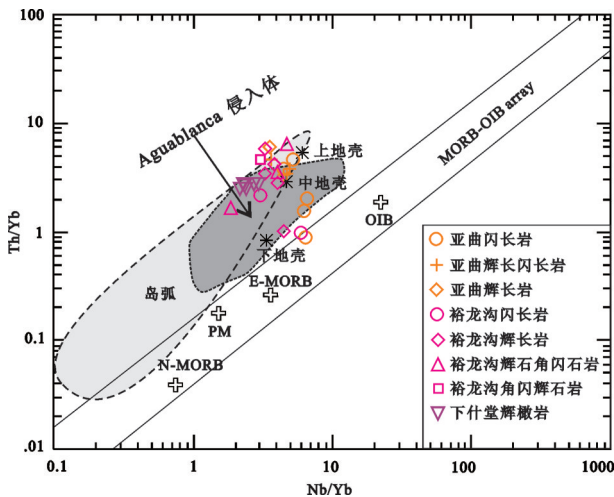


图6 青海省化隆地区裕龙沟、亚曲和下什堂岩体Th/Yb对Nb/Yb图解

Fig.6 The diagram of Th/Yb versus Nb/Yb from Yulonggou Yaqu and Xiashentang intrusions in Hualong, Qinghai Province

浆作用参与的产物;(2)赋矿岩相,镍矿化基本都发育在基性程度较高的橄榄岩相和辉石岩相,并且橄榄石含量越高镍矿越富;(3)地壳S的混入对成矿具有重要作用,青海省化隆地区化隆岩群中的黑云斜长片麻岩为硫化物的不混溶提供了部分重要S源,以致于对成矿的规模和混染程度形成重要影响;(4)区域性构造热事件对成岩成矿具有破坏作用及PGE元素的再次富集作用,三高一低的地球物理特征同样适用该地区的镍矿成矿特征,化探找镍矿在青海省化隆地区效果不佳;(5)铁质系列的镁铁-超镁铁质侵入岩具有岩浆镍矿的成矿专属性,岩相分异充分、基性程度较高的橄榄岩相和辉石岩相是比较理想的含矿岩相,橄榄石的出现及多寡对岩体的含矿性评价具有重要指示意义。

6 结 论

(1)青海省化隆地区镁铁-超镁铁质侵入岩,岩浆分异充分,矿化多赋存在基性程度较高的橄榄岩相与辉石岩相中。岩石轻稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE)相对富集,适度亏损高场强元素,其形成背景可能与柴北缘洋俯冲、拉脊山小洋盆闭合-后碰撞伸展密切相关。

(2)化隆群黑云斜长片麻岩为硫化物的不混溶提供了必要的部分S源,所形成的岩浆于局部伸展的构造薄弱地带涌侵位并最终成岩成矿,地壳S的加入及同化混染程度的不同是导致镁铁-超镁铁质侵入岩含矿不同的主要原因。

(3)青海省化隆地区镁铁-超镁铁质侵入岩含矿特点及成矿规律的认识,对区域找矿并扩大找矿成果具有重要作用。岛弧背景参与的岩浆活动与镍矿成矿作用可认为是进一步的找矿方向和重要地区,同时也丰富完善了镁铁-超镁铁质岩体及岩浆铜镍硫化物矿床的理论研究与新认识。

参考文献(References):

- [1] 李文渊. 祁连山岩浆作用有关硫化金属矿床成矿与找矿[D]. 西安: 西北大学, 2004.
Li Wenyuan. Mineralization and Prospection of Metallic Sulfide Deposit Associated with the Magmatic Activity of Qilian Mountain, Northwest China[D]. Xi'an: Northwest University, 2004(in Chinese with English abstract).
- [2] 高永宝, 李文渊, 谢燮, 等. 青海化隆地区拉水峡铜镍矿床地质、地球化学特征及成因[J]. 地质通报, 2012, 31(5): 763-772.

- Gao Yongbao, Li Wenyuan, Xie Xie, et al. Geology, geochemistry and genesis of the Lashuixia Ni-Cu deposit in Hualong area, Qinghai Province[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(5): 763-772(in Chinese with English abstract).
- [3] 张照伟, 李文渊, 高永宝, 等. 青海省拉水峡基性杂岩体地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 地质与勘探, 2012, 48(5): 959-968.
Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Gao Yongbao, et al. Geochemical characteristics of the Lashuixia basic complex in Qinhai Province and its constraints on genesis of the deposit[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(5):959- 968(in Chinese with English abstract).
- [4] 张照伟, 李文渊, 高永宝, 等. 南祁连裕龙沟岩体ID-TIMS锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(2): 455-462.
Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Gao Yongbao, et al. ID-TIMS zircon U-Pb age of Yulonggou intrusive rocks in Southern Qilian Mountain and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(2): 455-462(in Chinese with English abstract).
- [5] 张照伟. 南祁连化隆地区镁铁-超镁铁质侵入岩地质、地球化学特征与铜镍成矿[D]. 西安: 长安大学, 2013.
Zhang Zhaowei. The Geological and Geochemical Characteristics of Mafic-ultramafic Intrusions in the Hualong Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013(in Chinese with English abstract).
- [6] Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B, et al. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western China: zircon U-Pb age and Sr-Nd-Os-S isotope constraints from the Yulonggou and Yaqu gabbroic intrusions[J]. Mineralium Deposita, 2014, 49(2): 279-292.
- [7] 贾群子, 杨钟堂, 肖朝阳, 等. 祁连成矿带成矿区划和找矿潜力[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 86-100.
Jia Qunzi, Yang Zhongtang, Xiao Chaoyang, et al. Subdivision of Qilian metallogenic belt and its prospecting potentiality[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 86- 100(in Chinese with English abstract).
- [8] 李文渊. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J]. 地球学报, 2004, 25(3): 313-320.
Li Wenyuan. Main mineral deposit associations in the Qilian Mountains and their metallogenic dynamics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(3): 313-320(in Chinese with English abstract).
- [9] Song S, Zhang L, Niu Y, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology, 2006, 47(3): 435-455.
- [10] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成[J]. 地质学报, 2006, 80(12): 1793-1806.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The early Palaeozoic terrene framework and the formation of the high-pressure (HP)

- and ultra-high pressure (UHP) metamorphic belts at the Central Orogenic Belt (COB)[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(12): 1793-1806(in Chinese with English abstract).
- [11] Xiao W, Windley B F, Yong Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3): 323-333.
- [12] 冯建赟, 裴先治, 于书伦, 等. 东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄[J]. *中国地质*, 2010, 37(1): 28-38.
Feng Jianyun, Pei Xianzhi, Yu Shulun, et al. The discovery of the mafic-ultramafic melange in Kekesha area of Dulan County, East Kunlun region, and its LA-ICP-MS zircon U-Pb age[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 28-38(in Chinese with English abstract).
- [13] 王玉往, 王京彬. 与镁铁-超镁铁质岩石有关的矿床类型[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 656-665.
Wang Yuwang, Wang Jingbin. Ore deposit types related to mafic-ultramafic rocks[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 656-665(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘飞, 杨经绥, 陈松永, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段基性岩地球化学和Sr-Nd-Pb同位素特征: 新特提斯洋内俯冲的证据[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 742-755.
Liu Fei, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition of mafic rocks in the western part of Yarlung Zangbo suture zone: Evidence for intra-oceanic supra-subduction within the Neo-Tethys[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 742-755(in Chinese with English abstract).
- [15] 李文渊. 祁连山岩浆作用有关金属硫化物矿床成矿与找矿[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-207.
Li Wenyuan. Mineralization and Prospection of Metallic Sulfide Deposit Associated with the Magmatic Activity of Qilian Mountain, Northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-207(in Chinese with English abstract).
- [16] 张照伟, 李文渊, 高永宝, 等. 南祁连山化隆微地块铜镍成矿地质条件及找矿方向[J]. *地质学报*, 2009, 83(10): 1483-1489.
Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Gao Yongbao, et al. Metallogenic geological conditions of Hualong dome-like massif, South Qilian Mountain and prospecting direction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(10): 1483-1489(in Chinese with English abstract).
- [17] 张照伟, 李文渊, 高永宝, 等. 青海省化隆县下什堂岩体地质-地球化学特征及其含矿性研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(4): 596-602.
Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Gao Yongbao, et al. Geology and geochemistry characteristics and ore-bearing potential of the Xiashentang intrusive rocks in Hualong County, Qinghai Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(4): 596-602 (in Chinese with English abstract).
- [18] 马中平, 李向民, 徐学义, 等. 南阿尔金山清水泉镁铁-超镁铁质侵入体LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年及其意义[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 1071-1078.
Ma Zhongping, Li Xiangmin, Xu Xueyi, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic-ultramafic intrusion of Southern Altun Orogen in Northwestern China and its implication[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 1071-1078(in Chinese with English abstract).
- [19] 张照伟, 李文渊, 郭周平, 等. 青海省阿什贡含镍矿镁铁-超镁铁岩体形成时代及其对成矿机制的启示[J]. *地球学报*, 2014, 35(1): 59-66.
Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Guo Zhouping, et al. Formation age of Agong Ni-bearing mafic-ultramafic intrusion in Qinghai Province and its enlightenment to metallogenic mechanism[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(1): 59-66(in Chinese with English abstract).
- [20] 张照伟, 李文渊, 高永宝, 等. 南祁连山曲含镍铜矿基性杂岩体形成年龄及机制探讨[J]. *地球学报*, 2012, 33(6): 925-935.
Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Gao Yongbao, et al. The formation age of the Yaqu Ni-Cu bearing basic complex in Southern Qilian Mountain and a discussion on its mechanism[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(6): 925-935(in Chinese with English abstract).
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [22] Sun S S, McDonough W F. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 223-253.
- [23] 高永宝, 李文渊, 张照伟, 等. 南祁连山龙沟铜镍硫化物矿床Re-Os同位素物质来源示踪研究[J]. *地球学报*, 2012, 33(6): 899-906.
Gao Yongbao, Li Wenyuan, Zhang Zhaowei, et al. Re-Os isotopic analysis of the Yulonggou Cu-Ni sulfide deposit in the South Qilian Mountain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(6): 899-906(in Chinese with English abstract).
- [24] Li C S, Ripley E M. The giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit: tectonic setting, magma evolution, ore genesis and exploration implications[C]//Li C, Ripley E M(eds.). *Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry and Genesis. Reviews in Economic Geology*. Denver, Colorado: Society of Economic Geologists, Ins, 2011: 163-180.
- [25] 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 等. 金属矿床Re-Os同位素示踪与定年研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(6): 669-677.
Jiang Shaoyong, Yang Jinghong, Zhao Kuidong, et al. Re-Os isotopic tracer and dating methods in ore deposits research[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 2000, 36(6): 669-677(in Chinese with English abstract).
- [26] 徐旺春, 张宏飞, 柳小明. 锆石U-Pb定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(10): 1174-1180.

- Xu Wangchun, Zhang Hongfei, Liu Xiaoming. Constraints on the forming age and tectonic significance of high-grade metamorphic rock series in Qilian Mountain by zircon U-Pb dating[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(10): 1174-1180(in Chinese).
- [27] Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 1-728.
- [28] Li C S, Ripley E M. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits[J]. Mineralium Deposita, 2005, 40(2): 218-230.
- [29] Li C S, Naldrett A J, Ripley E M. Controls on the Fe and Ni contents of olivine in sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions: principles, modeling and examples from Voisey's Bay[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 177-185.
- [30] Song X Y, Li X R. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in a postcollisional environment[J]. Miner. Deposita, 2008, 44: 1432-1466.
- [31] Maclean W H. Liquid phase relations in the FeS-FeO-Fe₂O₃-SiO₂ systems and their applications in geology[J]. Economic Geology, 1969, 64: 865-884.
- [32] Leshner C, Campbell I. Geochemical and fluid dynamic modeling of compositional variations in Archean komatiite-hosted nickel sulfide ores in Western Australia[J]. Economic Geology, 1993, 88(4): 804-816.
- [33] Maier W, Barnes S, Li C. Arc-evaluation of the role of crustal contamination in the formation of magmatic sulfides in the Bushveld Complex [C]// Proceedings of the 9th International Platinum Symposium. Billings Montana: Durham, Duke University, 2001: 283-285.
- [34] Lehmann J, Nicholas A, Brian W, et al. Field relationships and geochemical constraints on the emplacement of the Jinchuan intrusion and its Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Gansu, China[J]. Economic Geology, 2007, 102: 75-94.
- [35] Ryan B. The Nain-Churchill boundary and the Nain Plutonic Suite: A regional perspective on the geologic setting of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit[J]. Economic Geology, 2000, 95(4): 703-724.
- [36] Ripley E M, Li C, Shin D. Paragneiss assimilation in the genesis of magmatic Ni-Cu-Co sulfide mineralization at Voisey's Bay, Labrador: $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{33}\text{S}$, and Se/S evidence[J]. Economic Geology, 2002, 97(6): 1307-1318.
- [37] Tao Y, Li C S, Song X Y, et al. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China[J]. Mineralium Deposita, 2008, 43(8): 849-872.
- [38] Naldrett A J. Fundamentals of Magmatic Sulfide Deposits[C]//Li, Ripley. New Developments in Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits. Xi'an, 2009: 1-309.
- [39] 牛晓露, 杨经绥, 陈松永, 等. 雅鲁藏布江西段东波超镁铁岩体经历了俯冲带流体的改造: 来自铅族元素的证据[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 756-766.
- Niu Xiaolu, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. The reformation of the Dongbo ultramafic rock mass in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone by subduction-related fluids: Evidence from the platinum-group elements(PGE)[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 756-766(in Chinese with English abstract).
- [40] 秦克章, 田野, 姚卓森, 等. 新疆喀拉通克铜镍矿田成矿条件、岩浆通道与成矿潜力分析[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 912-935.
- Qin Kezhang, Tian Ye, Yao Zhuosen, et al. Metallogenetic conditions, magma conduit and exploration potential of the Kalatongk Cu-Ni orefield in Northern Xinjiang[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 912-935(in Chinese with English abstract).