

新疆北部岩浆铜镍硫化物矿床地质 分布特点与成矿背景探讨

张照伟, 李文渊, 张江伟, 王亚磊, 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:新疆北部地质构造演化复杂,多阶段演化中岩浆活动与成矿作用规模并不均衡。而二叠纪却是天山成矿带大规模岩浆活动和金属成矿作用的高爆发期。本研究紧紧围绕镁铁-超镁铁质侵入岩体及岩浆铜镍硫化物矿床,从地质分布特点、含矿岩体的岩浆起源、岩浆演化及成矿特点,系统研究深部相应岩浆作用的地质背景。通过典型矿床的深入剖析,破解制约找矿突破的控制因素,系统阐述了板块构造与地幔柱体制叠加并存的地质特征与成矿表现。新疆北部发育了5条镁铁-超镁铁质侵入岩带,东天山、北山及喀拉通克岩带具有较好的成矿表现,在时间上与塔里木隐伏大火成岩省密切相关。塔里木克拉通深部熔融的地幔物质,围绕刚性塔里木克拉通边缘不断上涌,并与表壳物质发生交换,随着俯冲板块的持续和减弱,深部上涌的地幔物质不断加强,先后形成因深部地幔物质多寡而金属聚集的不同矿床类型。围绕塔里木大火成岩省的周缘或造山带中,是岩浆铜镍硫化物矿床重要的理论研究基地和找矿方向。

关键词:地质分布;镁铁-超镁铁质岩体;岩浆铜镍硫化物矿床;成矿背景;新疆北部

中图分类号:P618.41

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2015)03-0335-20

Geological Distribution Characteristics and Metallogenic Background of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits in the North Part of Xinjiang

ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, ZHANG Jiangwei, WANG Yalei, YOU Minxin

(Key Laboratory of Genesis and Exploration of Magmatic Ore Deposits, Ministry of Land and Resources, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Geological tectonic evolution is complicated in the north of Xinjiang and its magmatism and mineralization was disequilibrium among multi-stage evolutions. The period of Permian was high outbreak stage on large-scale magmatism and mineralization. This study focused on mafic-ultramafic intrusions and magmatic Ni-Cu sulfide deposits, and researched metallogenic background and geological process of deep magma activation through geological distribution characteristics of mafic-ultramafic intrusions, magma origin, magma evolution and mineralization characteristics of

收稿日期:2015-03-12;**修回日期:**2015-05-19

基金项目:中国地质调查局“岩浆铜镍硫化物矿床成矿与找矿方向调查”(12120114044401)、“新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿耦合关系研究”(1212011121092)及“中国与西伯利亚二叠纪大火成岩省对比研究”(1212011120183)联合资助

作者简介:张照伟(1976-),男,山东庆云人,副研究员,博士,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

ore-bearing intrusions. By in-depth analysis of typical deposit, controlling factors that restricted prospecting were found out, geological characteristics and mineralization features of tectonic system coexistence of plate and mantle plume were systematically expounded. There were 5 mafic-ultramafic intrusion belts in north Xinjiang, and east Tianshan, Beishan and Kalatongke belts formed many magmatic Ni-Cu sulfide deposits related to mafic-ultramafic intrusions and large igneous province in time. The melt mantle material from the deep of Tarim craton upwells along the margin of rigid Tarim craton, and exchanges with supracrustal material. The deep mantle material strengthened constantly with sustainable weakened subduction, finally, different ore deposits were formed respectively because of deep mantle material content. Periphery or orogenic belts circling Tarim large igneous province is important direction for ore-formation theory study and prospecting of magmatic Ni-Cu sulfide deposits.

Key words: geological distribution; mafic-ultramafic intrusions; magmatic Ni-Cu sulfide deposits; metallogenic background; the north part of Xinjiang

新疆北部产出多个与镁铁-超镁铁质侵入岩体密切相关的岩浆铜镍硫化物矿床。镁铁-超镁铁质岩是不同岩相和化学组成的幔源岩浆岩组合,其岩石学和地球化学特征及变化不仅可以记录岩浆演化过程中不同阶段的动力学过程和岩浆生成的地幔动力学机制,同时也能够反映地幔小尺度地球化学不均一性特点,从而对探讨岩浆岩成因模式及地幔演化过程均具有重要的指示作用(宋谢炎等,2010;Zhang et al., 2014;张照伟等,2014a)。镁铁-超镁铁质岩体也是大陆环境下地幔独特岩浆作用、巨量金属聚集的产物,是人们认识地幔矿物组成、深部地质过程、地幔流体作用、成矿元素运移与聚集、壳幔岩浆作用与地球动力学等方面的重要窗口,对认识岩浆铜镍硫化物矿床的成因研究、形成背景、指导矿产资源勘查等具巨大作用(张照伟等,2014b)。

岩浆矿床是岩浆演化的特殊产物,是岩浆内金属聚集的异常表现,不同类型的矿床与特定的岩浆活动有成因联系(韩春明等,2006;Song et al., 2009;王京彬等,2008;周涛发等,2010;Zhou et al., 2010)。不同的岩浆活动又与地质构造环境密切相关。新疆岩浆成矿作用的多样性反映了岩浆作用的多样性及构造演化的特殊性(肖文交等,2008;Chai et al., 2008;王玉往等,2010;Liu et al., 2006;王金荣等,2010;Zhou et al., 2009;董连慧等,2010;郭召

杰等,2010;Zheng et al., 2006)。大火成岩省是地幔柱大规模岩浆活动的产物,其沟通了地核、地幔与地壳之间的物质与能量交换,形成 Cu、Ni、铂族元素(PGE)与 Fe、Ti、V、Cr 等超大型岩浆矿床,如 Noril'sk 铜镍矿、攀枝花 V-Ti 磁铁矿等超大型矿床(Pirajno, 2008)。峨眉大火成岩省与西伯利亚大火成岩省(~251Ma)是全球晚古生代基本同期地幔柱形成的 2 个最著名的大火成岩省。西伯利亚大火成岩省形成了 Noril'sk-Talnakh 世界级超大型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床,其 Ni 矿储量居世界第一(Ni 2000 万 t, Cu 3000 万 t)、PGE 储量居世界第二(5000t)(Naldrett, 2011)。峨眉地幔柱形成了超大型钒钛磁铁矿(如攀枝花矿床),Cu-Ni-PGE 矿化岩体广泛分布。地幔柱岩浆作用是 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床及 Ti-Fe 氧化物矿床的重要成矿机制,不同成矿作用矿床是成矿岩浆不同演化阶段和控制要素的产物。新疆分布着多个与镁铁-超镁铁岩有关的铜镍矿床(李文渊等,2011;Franco et al., 2008),矿床类型多样、时间集中、分布广泛(Zhang et al., 2009;李红霞等,2010;Jong et al., 2009;肖文交等,2006)。其地质分布特点和主要的成矿背景认识严重制约着后续的找矿工作,尚需详细系统深入研究,以解决成矿与找矿过程中存在的关键地质问题。笔者通过镍矿成矿地质构造背景、镁铁-超镁铁质岩体及岩浆铜镍硫化物矿床的分布特点与形成特征,旨

在探讨岩浆铜镍硫化物矿床的形成机制与背景,不仅可以深化新疆镁铁-超镁铁质岩体及岩浆铜镍硫化物矿床的理论认识,对拓展区域成矿潜力和找矿前景具非常重要的研究意义。

1 区域地质构造背景

新疆北部主要位于中亚造山带的南部偏西位置,也是镁铁-超镁铁质岩体及岩浆铜镍硫化物矿床比较发育的地区(张照伟等,2014a)。而中亚造山带又位于西伯利亚克拉通的南部、塔里木-华北克拉通的西部(图 1),它是全球最大的古生代增生造山带,与古亚洲洋的消减,西伯利亚克拉通南部增生北缘和塔里木板块之间的拼合作用有关(木合塔尔等,2010;李彤泰,2011;李源等,2011)。新疆北部地区指西伯利亚克拉通以南、塔里木克拉通以北的中国新疆境内地区,结合前人划分的基本理念和新疆现

有研究程度和认识水平,本研究将新疆北部地区划分为阿尔泰、东准噶尔、西准噶尔、准噶尔盆地、天山造山带和北山 6 个一级构造单元。阿尔泰造山带走向呈北西向,与东、西准噶尔,准噶尔盆地呈断层接触关系(额尔齐斯断裂)。天山造山带走向呈东西向,与东、西准噶尔,准噶尔盆地以北天山蛇绿混杂岩为界。新疆北部地区的断裂主要和山脉走向平行,除了西准噶尔和北山呈北东向外,大多走向呈北西向和东西向。

新疆地壳组成的最显著特点是大小不等的具有或可能具有前南华纪基底的古生代微陆块与包含古生代和中生代早期的蛇绿岩、增生杂岩和岩浆岩的不同方向构造带交织在一起,组成条块镶嵌的构造面貌(肖序常等,2010)。这一形成过程可以概括为被洋盆分隔的地块聚合形成统一的大陆地壳,并且表现出明显的阶段性:寒武纪—志留纪中期镶嵌构造、志留纪晚期—石炭纪早期线性构造、石炭纪晚



图 1 亚洲二叠纪玄武岩分布图(据 Zhang et al. , 2011 修改)

Fig. 1 Distribution of Permian basalts in Asia(Modified from Zhang et al. , 2011)

期一二叠纪板内构造。新疆北部南华纪以来地壳形成演化的一个突出特征,就是在石炭纪晚期至二叠纪期间发育大规模的后碰撞岩浆活动和成矿作用。已经获得的资料表明,这些岩浆活动无论是活动方式还是所形成的岩石类型,都与典型的大陆边缘和碰撞带的岩浆活动有很大的差别。天山及邻区古生代地壳形成过程,表现出明显的双向增生的特点,即与曾经被洋盆分隔的地块聚合伴生的水平方向上陆缘增生和垂直方向上幔源物质的注入补给(肖序常等,2010)。

大陆裂解和洋盆的扩张,其结构是导致大陆的分裂和离散运动(夏林圻等,2008)。从奥陶纪开始,新疆北部的古亚洲洋开始收缩,形成了现今位于新疆北部的古生代早期的活动陆缘杂岩。晚古生代早期地壳构造演化的一个突出特征,就是泥盆纪期间西伯利亚古板块增生边缘的地壳伸展,形成了大致平行排列的裂陷槽和小洋盆。在新疆境内,自北而南依次为诺尔特-红山咀裂陷槽、库尔提弧后盆地和卡拉麦里小洋盆(弧后盆地),在东准噶尔表现为不同类型(厚度大小和有无火山岩)泥盆纪岩相带的相间展布。而新疆北部泥盆纪晚期的构造格局,具有多岛洋的特征。准噶尔-吐哈地块、塔城、天山中的伊犁、巴伦台、喀拉塔格-星星峡等,都在古亚洲洋中被海洋盆地所分隔,其上基本都发育了活动陆缘建造。地质、古生物和古地磁资料表明,新疆北部的古生代洋盆在石炭纪中期相继关闭,此后新疆北部统一的大陆地壳基本形成(肖序常等,2010)。

石炭纪晚期至二叠纪,是新疆北部岩浆活动和内生成矿作用最为活跃的时期,形成了博格达、伊犁和北山等火山岩带,巴楚、喀拉通克、黄山、北山和菁布拉克等镁铁-超镁铁岩带,以及分布广泛的富碱质花岗岩。石炭纪晚期一二叠纪是新疆天山岩浆活动最为活跃的时期。这一时期岩浆活动所形成的岩浆岩,在空间上表现出岩浆活动集中发育在一些带状区域内,并且不同类型岩石表现出空间分带性,如喀拉通克、黄山、北山和菁布拉克等镁铁-超镁铁岩带,东-西准噶尔、觉罗塔格和南天山等富碱花岗岩带,博格达、伊犁和北山等火山岩带;在岩石类型方面表现出镁铁-超镁铁岩石相对比较发育。

2 岩浆铜镍硫化物矿床地质分布特点

2.1 镁铁-超镁铁质岩与岩浆铜镍矿地质分布

新疆北部是中国岩浆铜镍硫化物矿床重要产出地区之一,主要形成于 5 个镁铁-超镁质侵入岩带中(图 2、表 1)。分布于库鲁克塔格构造带的兴地岩带,形成于元古宙。西天山菁布拉克岩带,成矿岩体为早古生代测年结果。目前研究较为详尽的是阿尔泰造山带喀拉通克岩带和天山造山带觉罗塔格构造带的黄山岩带,近年发现了北山岩带。这 3 个岩带已知矿床均形成于早二叠世。黄山岩带东西向展布,位于觉罗塔格构造带中,长约 270 km,呈分段成群集中出现的特点,大小近 20 个岩体,近年图拉尔根矿床是最主要发现,含矿岩体侵位于中石炭统中,岩石类型属闪长岩-辉长苏长岩-辉石橄榄岩组合。黄山岩带的岩体与喀拉通克相比,贫碱,但镁质含量高于喀拉通克。黄山东岩体呈带状特点,角闪二辉橄榄岩为主要含矿岩相;角闪岩分布于岩体南北边缘。喀拉通克岩带,位于额尔齐斯断裂南侧,长约 200 km,宽 10~20 km,有 8 个镁铁-超镁铁侵入岩集中分布,仅位于中东部的喀拉通克区发现了工业矿体。喀拉通克共有 9 个岩体,仅 I、II、III 号岩体构成矿床。岩石类型辉长岩类和闪长岩类,侵位于早石炭世南明水组。岩石基性程度低是显著特点,钙碱系列与其他铜镍岩体相别。喀拉通克 I 号岩体呈环带状特点,中心为黑云角闪橄榄苏长岩基性核,主要赋矿岩相;岩体内圈黑云角闪苏长岩,岩相底部产有铜镍硫化物矿体;岩体顶部和周边为闪长岩和石英闪长岩;边缘辉长辉绿岩,局部有铜镍硫化物矿体。基本为全岩矿化,主要为稀疏浸染状矿石,局部稠密浸染状,深部有块状矿石,Cu、Ni 含量不同矿石相对变化较大。北山岩带自南西而北东已发现坡十、罗中、坡一、红石山和笔架山矿化岩体。其中,坡十岩体进行深部钻探发现数条铜镍硫化物矿化体,镍含量偏低,但有铂族元素(PGE)富集体发现。

2.2 典型镁铁-超镁铁质侵入岩体与岩浆铜镍矿床地质特征

2.2.1 喀拉通克镁铁-超镁铁质岩带

该岩带位于阿尔泰造山带内,与岩浆型铜镍

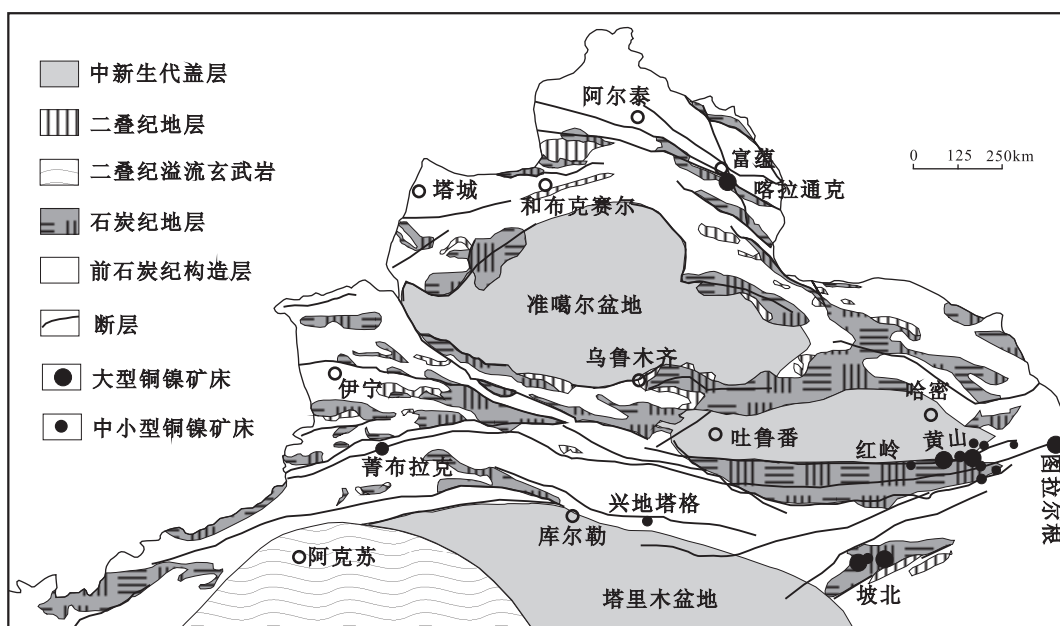


图2 新疆北部岩浆铜镍硫化物矿床地质分布略图

Fig. 2 Geological distribution map of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the north of Xinjiang

硫化物矿床密切相关。喀拉通克镁铁-超镁铁质岩体是规模最大和最有代表性的铜镍硫化物矿床的含矿岩体,位于新疆富蕴县东南28 km处,额尔齐斯断层南边,已发现9个镁铁质-超镁铁质岩体,均侵位于下石炭统那林卡拉组上段中(图3)。围岩以含炭质细-粗屑沉凝灰岩为主,间夹炭质板岩和含砾沉凝灰岩。喀拉通克镁铁-超镁铁质岩体根据岩体与构造的关系分为南、北2个岩带。南岩带位于矿区南部背斜中,由1、2和3号岩体组成,为半隐伏产状,基性程度高,含矿性好;在1号岩体中已探明了大型铜镍矿床,2和3号岩体中已探明了中型铜镍矿床。北岩带位于矿区北部背斜内,由4~9号岩体所组成,岩体较小,形态复杂,分异作用不明显,含矿性较差(王润民等,1991;Zhang et al.,2009)。

喀拉通克镁铁-超镁铁质岩体岩石为基性程度低、钙碱系列,主要岩石类型为辉长岩类和闪长岩类,具较好的岩相分带。成矿镁铁质岩体主要由橄榄苏长岩、苏长岩和闪长岩组成。喀拉通克1号岩体可分为4个岩相,自上而下为:黑云闪长岩相、黑云角闪苏长岩相、黑云角闪橄榄苏长岩相、黑云角闪辉绿辉长岩相,各岩相之间呈渐变过渡关系。黑云角闪橄榄苏长岩相是主要的含矿岩相。2号岩体自上而下划分为3个岩相:闪长岩

相、辉长苏长岩相、橄榄苏长岩相。辉长苏长岩相为主要的含矿岩相,三相之间呈渐变过渡。3号岩体分带比较明显,自上而下分为闪长岩相、辉长苏长岩相和苏长岩相。在岩体下部辉长苏长岩与苏长岩的底部有似层状矿体,为浸染状贫矿石组成的底部矿体。各相之间呈渐变过渡关系。苏长岩中的锆石测得的SHRIMP U-Pb年龄为 (287 ± 5) Ma(韩宝福等,2010;Han et al.,2004),硫化物矿石Re-Os年龄为282~290 Ma(张作衡等,2007;Han et al.,2004;Zhang et al.,2008)。主要赋矿岩体为1[#]、2[#]和3[#]岩体,这些岩体岩相分异良好、相带清晰、矿化强烈,且硫化物矿石主要赋存于岩体下部。1号、2号和3号岩体赋存有铜镍硫化物矿体,主要为稀疏浸染状矿石,局部稠密浸染状,深部有块状矿石。橄榄苏长岩为主要的含矿岩相。

喀拉通克镁铁-超镁铁质岩体岩石化学组成随着MgO含量的减小,SiO₂、Al₂O₃和K₂O+Na₂O等含量呈系统增加趋势,TFeO含量减少,表明与矿物结晶演化有关(Song et al.,2009)。全岩主要氧化物组成与主要堆晶矿物的化学组成对比显示除了受主要堆晶矿物(橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和斜长石)控制外,还受到粒间矿物的影响。如石英、Ti-Fe矿、角闪石和黑云母的存在使全岩化学组成依次

表 1 新疆北部主要岩浆铜镍硫化物矿床地质特征一览表
Tab.1 Geological characteristics list for magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the north of Xinjiang

岩体名称	矿床规模	主要岩石类型	主要矿石类型	成岩成矿时代
白鑫滩	中型	辉石橄榄岩、橄榄辉长岩	主为浸染状,局部块状矿石	(277.9±2.6)Ma 含长辉石橄榄岩 LA-ICP-MS
土墩	中型	单辉橄榄岩、含长橄榄岩	稀疏浸染状、稠密浸染状矿石	284Ma
黄山东	大型	二辉橄榄岩、橄榄辉长岩	稀疏浸染状、稠密浸染状、块状矿石	(274±3)Ma 橄榄辉长岩 SHRIMP U-Pb
黄山	大型	辉石闪长岩、斜长角闪橄榄辉长岩	浸染状、细脉浸染状、角砾状和块状	(283.8±3.4)Ma 辉长岩 锆石 SIMS U-Pb
黄山西	大型	辉长苏长岩、辉石橄榄岩、橄榄二辉岩	块状、稠密浸染状、稀疏浸染状	(269±2)Ma 闪长岩 SHRIMP U-Pb
香山	中型	角闪辉橄岩、角闪橄榄岩	稀疏浸染状、稠密浸染状矿石	(283.0±3.0)Ma 辉长岩 SHRIMP U-Pb
葫芦	中型	辉长闪长岩、辉石岩、辉橄岩、橄榄岩	稀疏浸染状	(274.5±3.9)Ma 辉长闪长岩 LA-ICP-MS
二红洼	矿化点	橄榄岩、橄榄辉长岩	稀疏浸染状	(283.1±1.5)Ma 橄榄辉长岩 LA-ICP-MS
图拉尔根	大型	角闪辉长岩、角闪橄榄岩、角闪辉橄岩	浸染状、稠密浸染状、少量块状	(300.5±3.2)Ma 辉长岩 SHRIMP U-Pb
天宇	中型	橄榄岩、辉橄岩、橄辉岩、辉石岩	以稀疏浸染状为主	(280±2)Ma 辉长岩 锆石 SIMS U-Pb
白石泉	中型	辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、橄长岩	稀疏浸染状	(281.2±0.9)Ma 辉长岩 LA-ICP-MS
旋涡岭	矿化点	橄榄岩、橄长岩、橄榄辉长岩	仅局部见星点状矿化	(260.7±2.0)Ma 辉长岩 锆石 SIMS U-Pb
红石山	中型	纯橄岩、辉橄岩、橄长岩和辉长岩	星点状、稀疏浸染状	(281.8±2.6)Ma 橄榄辉长岩 锆石 SHRIMP
笔架山	矿化点	含长单辉橄榄岩、橄榄辉长岩	星点状	(279.2±2.3)Ma 辉长岩 锆石 SIMS U-Pb
坡一	大型	含长纯橄岩、二辉橄榄岩、二辉岩	星点状、稀疏浸染状、局部块状	(278±2)Ma 辉长岩 SHRIMP U-Pb
坡十	中型	橄榄辉长岩、橄榄岩、二辉岩	星点状、稀疏浸染状	(289±13)Ma 辉长岩 SHRIMP U-Pb
罗东	矿化点	纯橄岩、斜长二辉橄榄岩、橄长岩	未发现含有明显硫化物	(283.9±1.1)Ma 辉长岩 ICP-MS U-Pb
喀拉通克	大型	方辉橄榄岩、淡色辉长岩和辉长闪长岩	块状矿石、稠密浸染状、稀疏浸染状	(287±5)Ma 黑云母苏长岩 SHRIMP U-Pb
菁布拉克	中型	辉橄岩、橄榄辉长岩、辉石岩、闪长岩	稀疏浸染状、星点状、稠密浸染状	(431±6)Ma 辉石闪长岩 SHRIMP U-Pb
兴地Ⅱ号	小型	二辉岩、橄榄辉石岩、辉石橄榄岩、辉长岩	浸染状	(760±6)Ma 辉长岩 SHRIMP U-Pb

注:数据来源:Han et al. ,2004;Tang et al. , 2012;2013;张作衡等,2007;三金柱等,2010;毛景文等,2002;Zhou et al,2004;2009;颜炜等,2011。

具有较高的 SiO₂、TFeO、TiO₂ 和 Na₂O+K₂O。喀拉通克镁铁-超镁铁质岩体橄榄岩微量元素配分模式和含量接近原始地幔,不相容元素 Rb、Ba 和 U 等含量略高于原始地幔,而 Th 和 Y 含量低于原始地幔,成矿元素 Cu、Co 和 Ni 富集。微量元素特征总体富集 Rb、Ba、U 和 K 等大离子亲石元素(LILE),相对亏损 Nb 和 Ta 等高场强元素

(HFSE),Sr 正异常,Ti 负异常(Zhang et al. , 2009; Li et al. , 2011a),δEu 弱的正异常或异常不明显,介于 0.91~1.26 之间,平均值分别为 1.05。轻重稀土分馏较明显,富集轻稀土元素(图 4a)。喀拉通克含矿镁铁质岩体与东天山地区黄山含矿镁铁质-超镁铁质岩体具有相似原始地幔标准化配分模式,均明显亏损 Nb 和 Ta,Sr 异常不明显,Ti 轻微

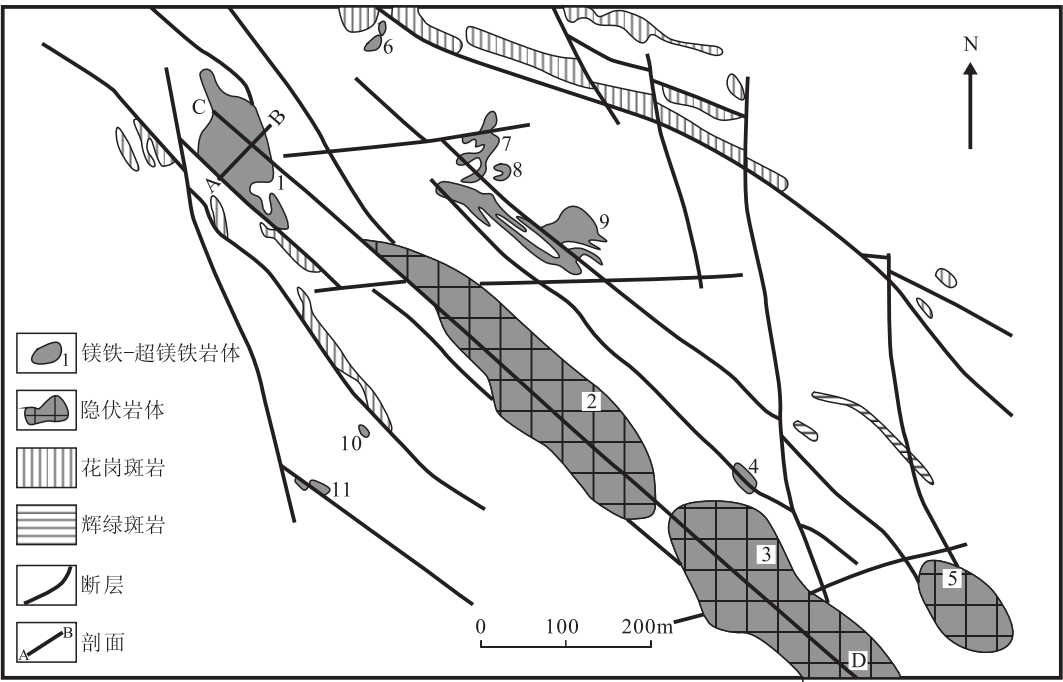


图 3 喀拉通克铜镍硫化物矿床成矿镁铁质岩体空间分布(王润民等,1991)

Fig. 3 Simplified geological map of the mafic intrusions of the Kalatongke deposit

富集;Zn 和 V 等含量接近原始地幔,和塔里木盆地二叠纪玄武岩相似。橄长岩、苏长岩的微量元素配分模式与橄榄岩相似,但微量元素含量高于橄榄岩,不同类型岩石稀土元素总量(ΣREE)介于 $3.8 \times 10^{-6} \sim 146.4 \times 10^{-6}$ 之间,从闪长岩($65.3 \times 10^{-6} \sim 146.4 \times 10^{-6}$)、苏长岩($33.8 \times 10^{-6} \sim 81.6 \times 10^{-6}$)、橄长岩(34.26×10^{-6})到

橄榄岩(3.83×10^{-6})逐步降低,即 REE 丰度随岩石基性程度增高而降低。随岩石基性程度降低,微量元素和稀土元素富集程度增大(图 4b)。3 号岩体闪长岩较 1 号和 2 号岩体更加富集 LILE,但是亏损成矿元素 Ni 和 Co,Cu 轻微富集。苏长岩(La/Yb)_N 介于 4.23~9.20 之间,与金川含矿镁铁-超镁铁岩体(2.58~8.84)相近。

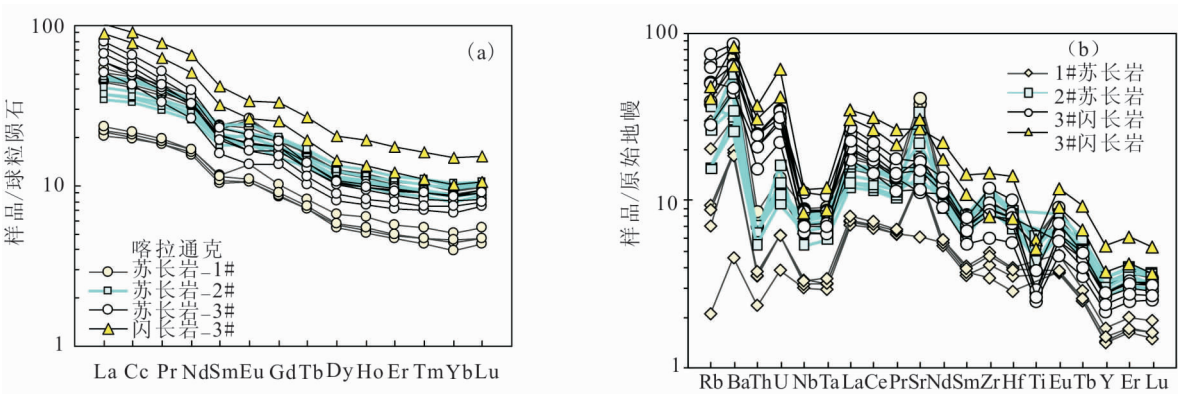


图 4 (a)喀拉通克镁铁-超镁铁质岩体不相容元素配分和(b)稀土元素配分图
(原始地幔数据来自 Sun, and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite normalized PEE patterns of the Kalatongke mafic ultramafic intrusions

2.2.2 东天山镁铁-超镁铁质岩带

该岩带位于塔里木板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块之间。分布有众多镁铁-超镁铁质岩体,东天山占据中亚造山带(CAOB)中间的一部分,具有很大的多金属成矿经济潜力的黄山-镜儿泉矿带为目前已知的在东天山地区最大 Cu-Ni 硫化矿带(Tang et al., 2012; 2013)。二红洼、黄山、黄山东、香山、黄山南、土墩、镜儿泉、葫芦和图拉尔根等大小近 20 个杂岩体赋存有 Ni-Cu 硫化物矿床和钒钛磁铁矿矿床。岩体类型属橄榄岩-辉石岩、辉长苏长岩与闪长岩组合。东天山镁铁-超镁铁质岩带存在岩浆矿床成矿类型不同的三种类型的岩体,黄山东、黄山、二红洼、图拉尔根与葫芦镁铁-超镁铁质侵入体赋存有铜镍硫化物矿床,香山镁铁-超镁铁质杂岩体同时赋存镍硫化物矿床和钛铁氧化物矿床,而尾亚杂岩体赋存有大型钒钛磁铁矿矿床。在岩相学、岩石化学、微量元素地球化学方面有所不同。

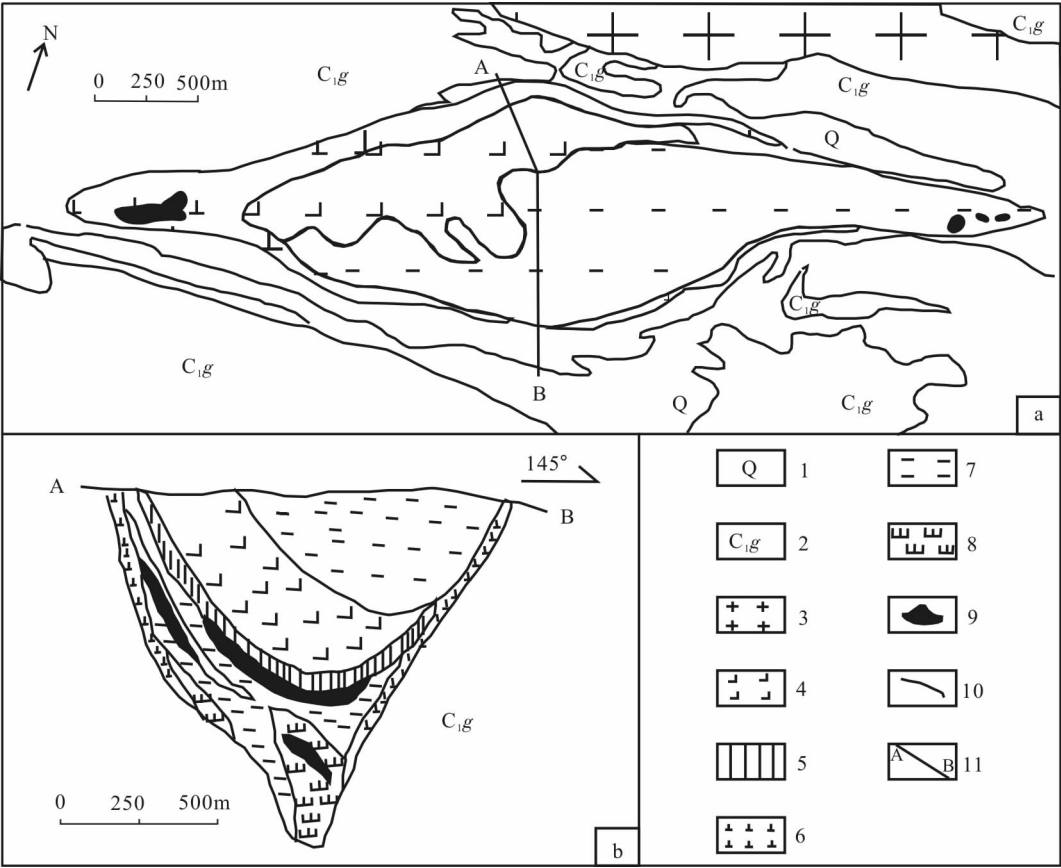
黄山东含矿镁铁-超镁铁质岩体为橄榄岩、二辉橄榄岩、辉石岩、橄长岩、苏长岩、辉长岩和闪长岩组成的一复式岩体,岩相分异好(图 5)。从顶部向下分别为闪长岩、角闪石辉长岩、橄榄石辉长岩、辉长苏长岩二辉橄榄岩,含硫化物的二辉橄榄岩和含钛铁矿的角闪石辉长岩底部(Deng et al., 2014)。地表由岩体中心向北依次出露角闪辉长岩、橄榄辉长岩、橄榄岩、角闪辉长岩和闪长岩。根据野外产状结合钻井资料可区分出 4 套岩石组合:岩体核部含矿橄榄岩-辉长岩组合:从下向上主要为橄榄岩、橄榄辉长岩和角闪辉长岩,各岩相之间渐变接触,是岩体的主要组成部分,橄榄岩局部含有硫化物珠滴;中部含矿橄榄岩-辉长岩组合:辉长岩与上覆核部橄榄岩呈明显的侵入接触,与下部橄榄岩呈渐变接触;橄榄岩下部均赋存有大量的硫化物矿体;底部赋矿苏长岩:与上覆角闪辉长岩呈明显的侵入接触关系;边部闪长岩。黄山东铜镍硫化物矿床矿体主要赋存于两套橄榄岩-辉长岩组合的底部,以及岩体底部的苏长岩中,赋矿岩石以角闪二辉橄榄岩和辉石岩为主。矿石以浸染状为主,含少量的块状矿石(Zhou et al., 2004)。含矿岩体中橄榄苏长岩锆石 SHRIMP 年龄为

(274 ± 3) Ma(韩宝福等, 2010),硫化物 Re-Os 年龄为(282 ± 20) Ma(毛景文等, 2002)。

图拉尔根镁铁-超镁铁质岩体由 1 号岩体(南部)和 2 号岩体(北部)组成(图 6)。1 号岩体地表长约 740m,宽 20~60m,岩体地表出露面积不足 0.005km²,岩体向下延伸较深且变宽变大,呈巨大透镜体状,属于半隐伏岩体。整个杂岩体东缓西陡,产状变化复杂。2 号岩体位于 1 号岩体西北约 1km 处。1 号岩体为矿床的主体,含矿性较好。图拉尔根矿床一号岩体的锆石 SHRIMP 年龄为(300.5 ± 3.2) Ma,二号岩体为(357.5 ± 2.5) Ma(三金柱等, 2010)。

图拉尔根岩体属铁质超基性岩类,具贫碱和钛、低铝和钙等特征。1 号岩体主要由角闪橄榄岩、角闪辉石岩和橄榄辉石岩组成,局部有辉长岩出露,所有含矿岩相都有棕色角闪石,反映出洋壳俯冲带入大量含水水源。岩性从中心向外依次为角闪橄榄岩相、橄辉岩相、角闪辉石相和辉长岩相。岩相呈渐变过渡,但基性-中性岩相局部出露。2 号岩体主要出露角闪辉长岩相,大地电磁测深图像揭示深部与 1 号岩体具有同源性和同一构造通道。基本全岩矿化,富含钴,顶部富矿,2 号岩体主要为角闪辉长岩;两者都具有同源互补性。岩浆源区为含有早期俯冲地壳物质的软流圈地幔,源区地壳混染低,约为 5%(Tang et al., 2012),有偏向钙碱性岩浆演化的趋势。

东天山镁铁-超镁铁质岩带赋存铜镍硫化物矿床的有黄山东、黄山、二红洼、图拉尔根与葫芦镁铁-超镁铁质岩体,主要元素氧化物 SiO₂、MgO、Al₂O₃、FeO 和 CaO 含量变化较大。SiO₂、CaO、Al₂O₃、K₂O + Na₂O 和 TiO₂ 等主要元素氧化物含量随 MgO 的降低呈系统增加,TF_{FeO} 逐渐减少。显示出玄武岩浆分异结晶系统的变化特征。在 MgO 含量为 8%~15%范围内的样品,各主要元素氧化物出现大幅度的波动。辉长岩和苏长岩类 MgO/TF_{FeO} 值分别介于 0.40~2.67 和 1.14~2.92 之间,平均值分别为 1.32 和 2.19。镁铁-超镁铁质侵入体为铁质超基性岩,具有拉斑玄武岩系列演化趋势(Xia et al., 2004)。图拉尔根与葫芦岩体表现出相似的岩石化



1. 第四系;2. 下石炭统干洞组;3. 晚古生代花岗岩;4. 橄榄辉长岩;5. 橄榄岩;6. 闪长岩;7. 角闪辉长岩;
8. 苏长岩;9. 矿体;10. 断层;11. 剖面位置

图 5 黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体地质图(据胡沛青等,2010)

Fig. 5 Geological map of the mafic-ultramafic of the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit

学特征, SiO_2 含量总体较低, 具有低碱、 Ti 、 Al_2O_3 、 K_2O 和 CaO 特征。东天山镁铁-超镁铁质岩带赋存铜镍硫化物矿床的黄山东、黄山、二红洼、图拉尔根与葫芦镁铁-超镁铁质杂岩体不同类型岩石原始地幔标准化的微量元素配分模式相似, 曲线形态表现出较好的一致性(图 7)。普遍富集 Cs 、 Rb 、 Ba 、 Sr 和 K 等大大离子亲石元素(LILE)及 Sr , 亏损 Th 、 Nb 、 Ta 、 Zr 和 Hf 等高场强元素(HFSE), 轻重稀土分馏较弱, U 和 Th 显示从不同程度亏损到弱富集。 Nb/Ta 值 $11.50 \sim 15.80$, 平均 13.6 ; Zr/Hf 值 $28.65 \sim 42.24$, 平均 35.45 , 介于原始地幔($\text{Nb}/\text{Ta} = 17.39$, $\text{Zr}/\text{Hf} = 36.25$)(Sun et al., 1989)和地壳值(11 和 33)(Nicholas, 2013)之间。 Nb 的亏损暗示着有大陆地壳物质的混染或源区存在俯冲的洋壳物质, Sr 的正异常反映了斜长石的堆晶作用。图拉尔根微量元素具有 Nb 、 Ta 亏损, Th 、LILE 富集。 Th/Ta 平均值为 4.6 , 高于原始地幔的 Th/Ta 值

(2.2), 绝大部分样品的 La/Sm 小于 2, 说明很少受到地壳物质的混染, 通常认为高 $\text{La}/\text{Sm}(>4.5)$ 值指示了地壳物质的混染。不同类型岩石稀土总量(ΣREE)介于 $10 \times 10^{-6} \sim 156 \times 10^{-6}$ 之间, 从辉长岩($12.79 \times 10^{-6} \sim 155.94 \times 10^{-6}$)、苏长岩($13.68 \times 10^{-6} \sim 24.70 \times 10^{-6}$)到橄榄岩($10.01 \times 10^{-6} \sim 18.73 \times 10^{-6}$)逐步降低。不同类型岩石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线基本平行, 配分模式相似; 轻稀土元素(LREE)富集, 轻重稀土分馏较弱, (La/Yb)_N 值(黄山: $1.18 \sim 3.59$; 二红洼: $1.83 \sim 5.69$; 土墩: $1.34 \sim 2.52$)(Xiao et al., 2009)小于金川矿床($2.58 \sim 8.84$, 平均 5.30)(刘平等, 2010)和喀拉通克铜镍硫化物矿床($4.5 \sim 12.7$)(Sun et al., 2013)和力马河(平均 11.0)。图拉尔根的 (La/Yb)_N 较高($2.9 \sim 27.5$, 平均值为 6.5)。 δEu 变化较大, 黄山东 $\delta\text{Eu} = 0.50 \sim 2.57$, 黄山岩体 δEu 为弱的负异常或异常不明显, 其中二辉

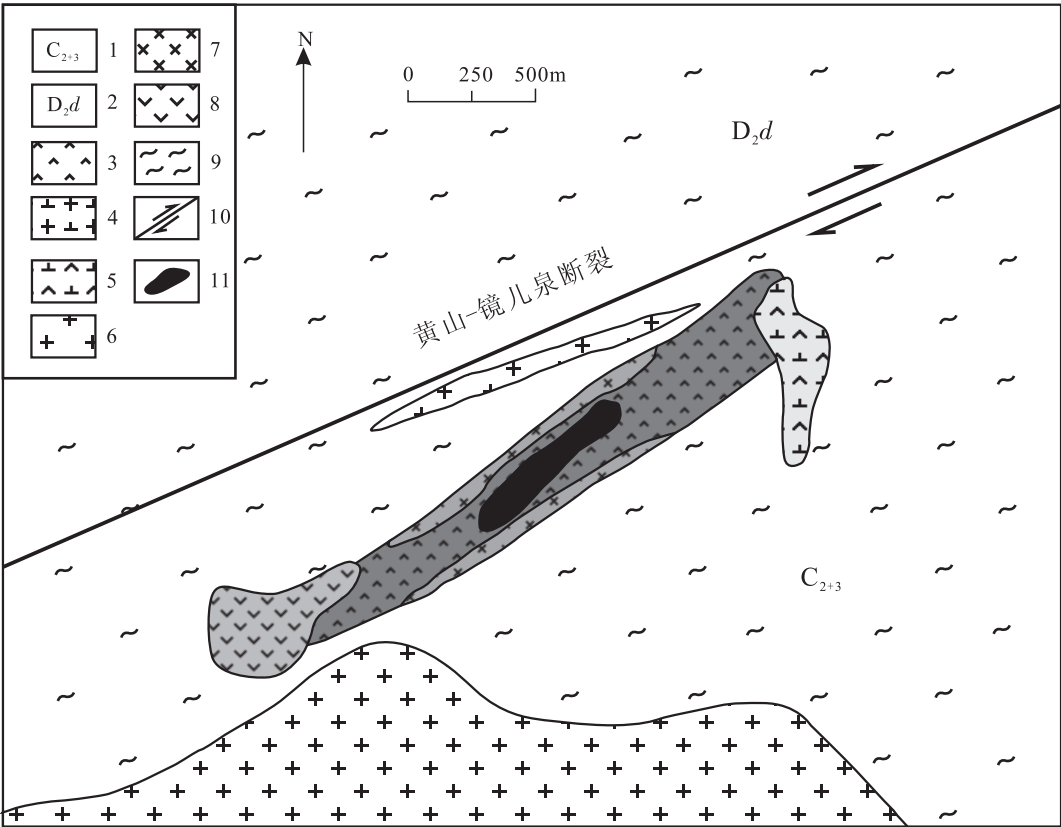
橄榄岩、橄榄辉石岩和辉长苏长岩 δEu 依次为 0.75~0.98、0.87~0.94 和 0.71~1.12, 平均值分别为 0.89、0.90 和 0.97。二红洼不同程度的正锔异常; 土壤 $\delta\text{Eu}=0.85\sim1.1$ 。

2.2.3 北山镁铁-超镁铁质岩带

北山裂谷带发育大量镁铁-超镁铁质侵入岩, 有罗东岩体、坡北岩体、漩渦岭岩体和红石山等岩体呈北东-南西向展布, 在坡北和红石山岩体中发现有大型铜镍矿床。锆石 U-Pb 定年表明这些岩体形成时代大多介于 260~288Ma 之间(李华芹等, 2006, 2010; Zhang et al., 2009; Qin et al., 2011), 为早二叠纪岩浆作用产物。

坡北岩体位于北山地区, 呈岩盆状, 出露面积约为 200km², 主要由坡一、坡三、坡七、坡十等多个岩体组成, 其中坡一和坡十岩体发现有铜镍硫化物矿体。坡北 1 号岩体位于岩带中段, 侵位于石炭系下统变质岩及早期细粒辉长苏长岩中。岩体平面形态大致呈

不规则梯形管状侵入体, 东西长达 3.2 km, 南北宽达 1.08 km, 出露面积 3.6 km², 向下延伸 1 600 m。岩体呈盆状, 四周流面产状均向内倾斜, 南部较缓, 倾角约 40°, 西北部倾角, 一般 45°~62°, 东北部较陡, 倾角可达 70°(图 8)。岩体主要为多次侵位形成的橄榄岩、橄榄辉石岩、橄榄辉长岩、辉长苏长岩、辉长岩等不同岩相构成构成镁铁质、超镁铁质复式岩体。各岩相特征如下: 岩体内部及南部边缘为橄榄岩、橄榄辉石岩和辉石岩, 及少量橄榄辉长岩相, 具中粒结构。岩体四周分布浅色橄榄辉长岩相, 具中粒辉长结构。橄榄辉长岩相主要分布于东部及南侧, 与浅色橄榄辉长岩及其他超基性岩相呈渐变关系, 是过渡相。辉长苏长岩相主要出露在东部和西部, 呈长条状沿白地洼断裂南侧分布, 岩石具细粒结构。上述各相岩体中赋存有辉长岩脉。坡一侵入体辉长岩锆石 U-Pb 谐和年龄为 $(278\pm2)\text{Ma}$ (李华芹等, 2006) 和 $(274\pm4)\text{Ma}$ (Wang et al., 2013)。



1. 中上石炭统英安质、安山质含角砾凝灰岩、晶屑凝灰岩; 2. 中泥盆统大南湖组凝灰质砂岩; 3. 角闪橄榄岩; 4. 花岗闪长岩; 5. 闪长玢岩; 6. 花岗细晶岩; 7. 辉长岩; 8. 安山玢岩; 9. 挤压破碎带; 10. 区域大断裂; 11. 铜镍矿体

图 6 新疆东天山图拉尔根铜镍矿区地质图

Fig. 6 Geological of the Tulargen Cu-Ni deposit in eastern Xinjiang

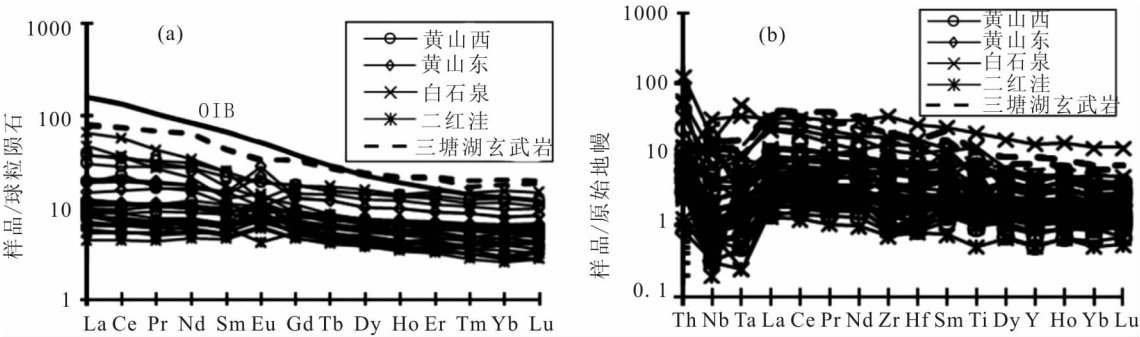


图 7 (a)天山铜镍硫化物矿床镁铁-超镁铁杂岩体稀土元素和(b)微量元素配分模式图
(球粒陨石数据来自 Sun and McDonough,1989,原始地幔据 McDonough et al. ,1995)

Fig.7 (a)Chondrite normalized PEE patterns and (b)primitive mantle-normalized trace element patterns
of the Tianshan mafic ultramafic intrusions

坡北镁铁-超镁铁质岩体中 SiO_2 、 MgO 以及 Al_2O_3 氧化物含量变化范围较大, Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 TFeO (全铁) 含量较低。 TFeO 与 MgO 之间呈明显正相关, SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 与 MgO 呈明显负相关, 表明分离结晶受橄榄石和辉石的控制。 总体上显示出相容元素(Ni 、 Co 、 Cr 等)含量高。 坡十镁铁-超镁铁岩体具有明显的岩相分带现象, 各岩相之间的矿物含量呈现渐变过渡关系, 尤其反映在辉长岩-纯橄岩-二辉橄榄岩的钻孔剖面上。 全岩的主量元素具连续变化的特征(Li et al. , 2009), 因此在岩石学和地球化学上坡十岩体具有结晶分异的特征(Zhou et al., 2009)。 坡北岩体不同类型岩石大离子亲石元素(Cs 、 Rb 、 Sr 、 Ba 、 U 和 Th)丰度有较大变化范围, 坡北岩体与红石山岩体(281.8 ± 2.6) Ma 微量元素原始地幔标准化配分型式基本一致(图 9), 与典型岛弧 Marianas 和 Philippines 岛弧火山岩以及阿拉斯加型岩体 Kondyor 岩体相似(Su et al. , 2013)。 不相容元素(Rb 、 U 、 Zr 和 Y 等)含量低, 明显富集大离子亲石元素(Rb 、 Sr 、 Th 和 U), Pb 正异常, 亏损高场强元素(HREE 、 Zr 、 Hf 、 Ti 、 Nb 和 Ta), 与典型的 OIB 明显不同, 而与平均地壳(CC)、标准全球俯冲物质(GLOSS)特征相似(Li et al. , 2013)。 坡北岩体各岩石类型样品的 ΣREE 变化范围为 $2.20 \times 10^{-6} \sim 52.67 \times 10^{-6}$, 橄榄岩相岩石稀土元素总量较很低, 石英闪长岩的稀土元素总量较大。 斜长岩与石英闪长岩的稀土元素配分曲线属轻稀土元素富集型, 其余岩石属近平坦型、轻稀土元素弱富集或弱亏损型(图 9)。 ($\text{La}/$

Yb)_N 值为 0.54 ~ 5.02, (La/Sm)_N 值为 0.52 ~ 3.55, (Gd/Yb)_N 值为 0.59 ~ 2.51, 表明岩浆演化过程中轻重稀土元素之间、轻稀土元素、重稀土元素内部分馏程度较弱。 岩体 Eu 异常较明显, δEu 为 0.57 ~ 3.13, 辉长岩相具有明显的正 Eu 异常, 含斜长石的橄榄岩相也具有弱的正 Eu 异常(Tao et al. , 2010; 颜炜等, 2011)。

2.2.4 菁布拉克镁铁-超镁铁岩带

该岩带处于伊犁微板块南部边缘隆起活动带内, 那拉提山北麓深大断裂南侧, 那拉提山深大断裂带内多金属成矿带之菁布拉克铜镍成矿远景区内。 镁铁-超镁铁质侵入岩呈串珠状岩株零星分布于那拉提山北麓深大断裂的南侧, 常被后期的花岗岩及派生脉岩穿切。 其中菁布拉克岩体属铁质系列的镁铁-超镁铁质岩体, 该岩体分异良好, 岩相分带明显, 其内具有良好的铜镍矿化, 是这一带目前发现的唯一有工业意义的岩体。 岩体平面形态为纺锤状, 长轴呈北东东向, 与区域构造线方向一致, 东西长 2.5 km, 南北最宽 1.3 km。 岩体与围岩接触面向南陡倾, 一般倾角 $60^\circ \sim 75^\circ$, 岩体内不同的岩相带作同心环状分布, 各岩相带向中心倾斜, 倾角 $50^\circ \sim 65^\circ$, 局部有向外陡倾的现象。 据上述特征推测, 岩体空间上呈岩盆状, 底深大于 700 m, 目前仅剥蚀至岩体中部偏上的部位。 目前地表所见矿化主要分布于Ⅲ岩相带, 集中出现在内、外过渡带上。 表现为两种成因形式, 一是呈稀疏浸染状分布成岩矿物颗粒间, 为岩浆熔离作用形成, 分布极为广泛, 是矿区主要矿化类型; 一是呈巢状富集体出现, 为熔离贯入作用形

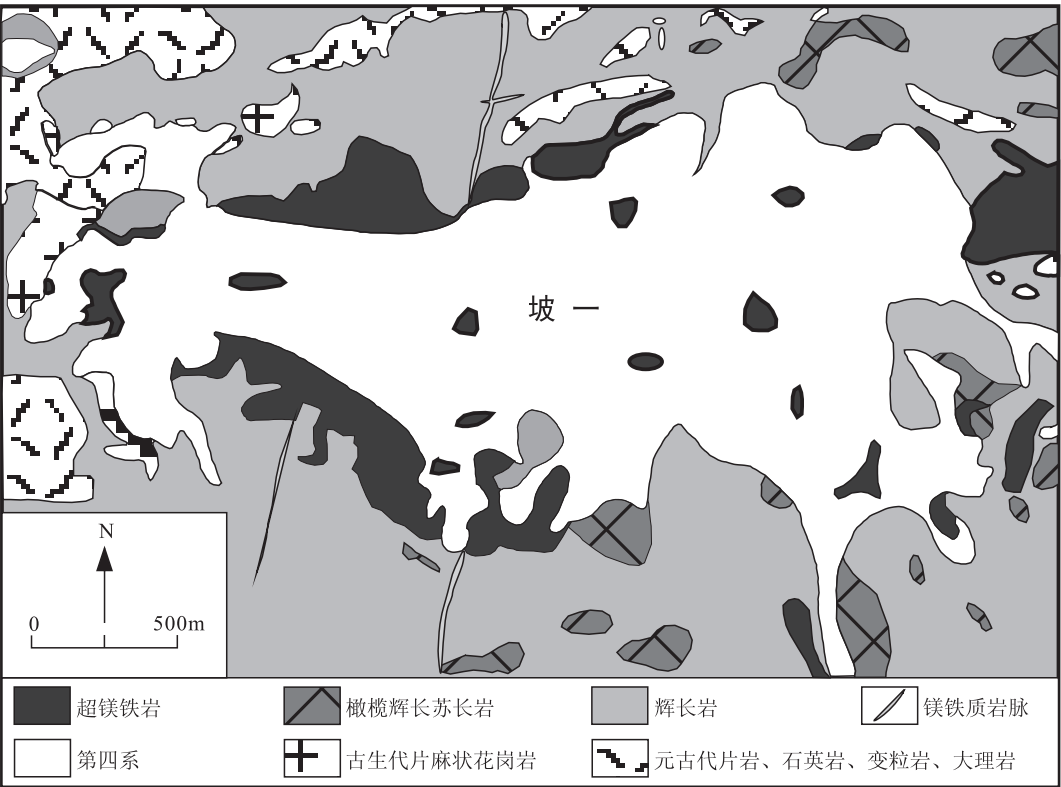


图 8 新疆坡一侵入体地质图(据姜常义等,2012)

Fig. 8 The geological map of Poyi intrusion (After Jiang et al. ,2012)

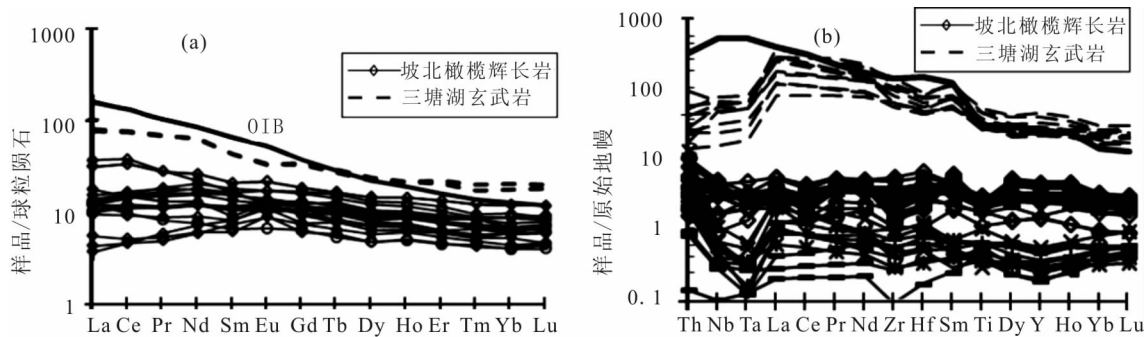


图 9 (a)坡北岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式图和(b)不相容元素配分图 (原始地幔数
据来自 Sun and McDonough,1989)

Fig. 9 (a) Chondrite normalized PEE patterns and(b) primitive mantle-normalized trace element patterns
of the Pobei mafic ultramafic intrusions

成,伴有强烈的次闪石化。岩体虽然分异现象明显,但由于动力作用及后期热液作用,岩体蚀变强烈,再加之覆盖严重,岩相界线不清。岩体略具垂直分带,水平分带不明显。从上部到下部,从上盘到下盘,由基性到超基性,按岩性不同可分为 4 个类型,分别为:①橄榄辉石岩、辉石岩、角闪辉石岩:

是岩体中的超基性岩,占岩体面积不足十分之一,与辉长岩及辉绿辉长岩分异界限明显,主要分布在剥蚀较深部位及底盘。②辉石橄长岩、苏长岩、辉长岩、角闪辉长岩、石英辉长岩、片麻状辉长岩、碎裂辉长岩:是岩体的主要岩石类型,分布岩体各处,约占岩体面积十分之三,与超基性岩接触界线

清楚,与辉长辉绿岩、辉石闪长岩呈过渡关系。③辉长辉绿岩:出露于岩体西部及边缘,与其它岩石为过渡关系,无明显界线。岩石为辉长辉绿结构,部分有反应边结构,块状构造。辉石大部分被阳起石、透闪石、绿泥石所交代。④辉石闪长岩:出露于岩体中部,与其它岩石为过渡关系,无明显界线。岩石为细一中粒,半自形粒状结构,块状构造。长石环带明显,中心轻微泥化、绢云母化,角闪石全部被阳起石、纤闪石交代。辉石岩与各岩相带的截然接触关系说明辉石岩是后期就位的,多次贯入侵位。辉石橄榄岩多见堆晶结构,也可见到堆积韵律层。各种岩相(除辉石岩)之间没有明显的边界,辉石岩与早期岩体形成混合岩相带,说明各次岩浆的贯入时间间隔比较短,早期岩浆来不及完全结晶而形成。

LA-ICP-MS法获得辉石闪长岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $(414.8 \pm 0.9) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.41$) 岩体的稀土总量总体变化较小,岩体中各样品的 La/Sm 值介于 $1.07 \sim 2.61$ 之间,球粒陨石标准化分配曲线为平缓型到轻稀土元素低度富集型,与岛弧拉斑玄武岩的稀土元素配分模式比较类似。总体上富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba 和 Sr 等),相对亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等),尤其明显亏损 Nb、Ti 和 Ta。岩体的稀土总量总体变化较小,岩体中各样品的 La/Sm 值介于 $1.07 \sim 2.61$ 之间,球粒陨石标准化分配曲线为平缓型到轻稀土元素低度富集型,与岛弧拉斑玄武岩的稀土元素配分模式比较类似。总体上富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba 和 Sr 等),相对亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等),尤其明显亏损 Nb、Ti 和 Ta。岩石样品明显的 PGE 亏损,岩石样、矿石样 Cu/Pd 值($24 \times 10^3 \sim 10\,804 \times 10^3$)高于原始地幔 Cu/Pd 值(7.69×10^3),母岩浆演化过程中经历了深部硫化物部分熔离的过程。 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $0.3\text{‰} \sim 1\text{‰}$ 之间,具塔式分布特征,与陨石硫同位素组成接近,表明该矿床硫饱和与硫化物熔离并非地壳硫的加入所致(朱志新等, 2011); 菁布拉克岩体岩石具有低的 Os 含量($0.0146 \times 10^{-9} \sim 0.276 \times 10^{-9}$)、高的 Re/Os ($29 \sim 292$) 和高 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值($0.277 \sim 0.916$),说明早期的岩浆遭受了较强的地壳混染。而 8 号矿体中的网脉状矿石具有高的 Os 含量($15.1 \times 10^{-9} \sim 32.6 \times 10^{-9}$)、低的 Re/Os 值($2 \sim 2.3$) 和低 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值

($0.125 \sim 0.141$),表明其地幔来源(Yang et al., 2012; 2014)。菁布拉克含矿杂岩体的形成与早古生代南天山洋向中天山板块下的俯冲作用有关,沉积物脱水产生流体交代地幔楔以及软流圈地幔上涌减压导致地幔部分熔融,分离结晶及同化混染作用导致岩浆中硫达到饱和而发生硫化物熔离作用形成菁布拉克含铜镍的镁铁质岩体。

2.2.5 兴地塔格镁铁-超镁铁岩带

位于塔里木克拉通东北部边缘的库鲁克塔格微陆块,因发育有新元古代的镁铁-超镁铁质侵入岩体而引起研究者的广泛关注。这些镁铁-超镁铁质侵入岩体基本沿断裂东西分布,均侵入到兴地岩群老地层中,故自西向东命名为兴地Ⅳ号、兴地Ⅱ号、兴地Ⅲ号、兴地Ⅰ号及最东段的兴地Ⅴ号镁铁-超镁铁质侵入岩(杨合群等, 1997)。兴地Ⅰ号岩体是带内出露最大的岩体,面积约 20 km^2 ,兴地Ⅳ号约 10 km^2 ,兴地Ⅱ号约 12 km^2 ,兴地Ⅲ号约 2 km^2 ,而兴地Ⅴ号岩体出露面积小于 1 km^2 。通过锆石 U-Pb 年龄测定,获得了兴地Ⅱ号和兴地Ⅳ号岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 720 Ma 和 724 Ma ,获得辉绿岩墙的锆石 LA ICP-MS U-Pb 年龄约为 760 Ma 。而前人研究也获得了兴地Ⅳ号岩体辉长岩-闪长岩的锆石 LA ICP-MS U-Pb 年龄为 737 Ma ,获得兴地Ⅰ号岩体辉长岩 Sm-Nd 等时线年龄为 761 Ma 及兴地Ⅱ号岩体辉长岩锆石 LA ICP-MS U-Pb 年龄 760 Ma 。地球化学研究初步表明,上述岩体基本都富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素和重稀土元素,具有富集型大陆岩石圈地幔源区性质特点,并且遭受了不同程度的地壳混染。这些与库鲁克塔格地区的基性杂岩、基性岩墙、双峰式火山岩及碱性花岗岩共生于板内裂谷环境,可能是新元古代 Rodinia 超大陆裂解时岩浆作用的直接产物。除此之外,在库鲁克塔格地区,还发育有 $830 \sim 800 \text{ Ma}$ 时期的岩浆活动,同样是塔里木一期比较重要的岩浆事件,对应的可能是碰撞后的伸展背景。这两期岩浆活动可能都与超大陆的聚合关系密切,从全球尺度来看,是超大陆汇聚或裂解所产生岩浆作用的直接证据,并且在有利的部位经深部地幔带上来的金属元素富集成矿。

兴地塔格镁铁-超镁铁岩带形成时代相对上述 4 个岩带都老,是新元古代岩浆作用的产物。但含矿性较差,未能引起研究者的兴趣,就新元古代岩浆

作用事件本身而言,它代表了一期非常重要的地质事件,可能与 Rodinia 超大陆裂解密切相关(Ye et al., 2013; Zhang et al., 2013)。进一步将新元古代的岩浆事件相联系,共同探讨形成机制与背景,是下一步的研究内容,金川超大型岩浆铜镍硫化物矿床亦是新元古代与 Rodinia 超大陆裂解密切相关的成矿表现,其二者之间的关系和背景认识值得探讨。

3 成矿机制及背景认识

3.1 岩浆铜镍硫化物矿床成矿机制

从硅酸盐岩浆中熔离出来且富含亲铜元素的硫化物液滴发生聚集、就位,固结形成岩浆铜镍硫化物矿体(Naldrett, 2011; Li et al., 2011b; Chen et al., 2015)。深部地幔部分熔融产生的岩浆上涌到浅部地壳或喷出地表,在这一岩浆从深部熔融源区到浅部地壳的运移过程中,会经历多个变化,岩浆的性质随之发生改变,如果岩浆中的 S 达到过饱和,硫化物则以小液滴的形式与硅酸盐岩浆发生不混溶,进而分离出来(Maxim et al., 2007; 2008; Wang et al., 2007; Nadine et al., 2010; Stephen et al., 2013)。当然,熔离出来的硫化物液滴必须发生运移和聚集才能形成有经济价值的矿床(Xia et al., 2015)。硫化物熔离又可进一步分为深部熔离和就地熔离,汤中立院士所提出的小岩体成大矿也主要是深部熔离的概念,中国金川岩浆铜镍硫化物矿床就是其典型的代表(Ripley et al., 2014; Chen et al., 2015);岩浆通道成矿主要是就地熔离的观点,深部熔离也可少量发生(Joshua et al., 2014),代表矿床是俄罗斯的诺里尔斯克岩浆铜镍硫化物矿床(Li et al., 2011a)。硫化物不混溶的发生是镁铁-超镁铁质岩浆成矿的关键环节(Ripley et al., 2010; Yannick et al., 2012; Gao et al., 2013)。最新研究认为,要形成岩浆铜镍硫化物矿床,在地幔-地壳尺度内的深部过程至少要经历 7 个环节(Naldrett, 2011):①地幔部分熔融生成岩浆。②岩浆上涌进入地壳。③地壳混染等因素导致硫化物不混溶作用。④岩浆携卷熔离的硫化物液滴进入地壳浅部。⑤熔离出的硫化物液滴发生聚集。⑥通过新鲜岩浆补给硫化物富集。⑦冷却、结晶成矿。地幔部分熔融的岩浆进入地壳就伴有硫化物不混溶的发生,一直持续到岩浆最终就位成矿。

3.2 新疆北部岩浆铜镍矿形成背景讨论

Qin et al. (2011)通过对比塔里木盆地内部与东天山、北山地区的二叠纪玄武岩的地球化学特征后提出两者系同一个地幔柱的产物。塔里木盆地内部的玄武岩具有高钛低镁、低 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值等特点,可能是地幔柱外围区域低程度部分熔融的产物。而东天山、北山地区的玄武岩具有低钛高镁、高 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值等特点,暗示它们可能来自于高程度部分熔融的岩石圈地幔,与具有更高温度的地幔柱头部有更为密切的关系。徐义刚等(2013)等研究认为,塔里木克拉通岩石圈没有发生减薄和破坏,其喷发时限主要表现为喷出岩 290Ma 峰值和侵入岩 280Ma 的峰值,相应的岩浆作用也主要发生在塔里木克拉通边缘,尤其是与造山带交汇部位。可见,塔里木地幔柱作为深部源区,会为克拉通周缘的岩浆活动与成矿作用提供物质和能量,相邻区域大量内生金属矿床的巨量爆发与塔里木地幔柱活动存有密切关系。

岩浆铜镍硫化物矿床是镁铁-超镁铁质岩浆发生硫化物不混溶作用而富集的结果,一般形成于稳定克拉通内部或者边缘,与地幔柱、大火成岩省及板块构造密切相关,是深部地幔于浅部地壳具体的成矿表现。新疆北部发育有 5 条镁铁-超镁铁质岩带,主要集中在新元古代、早古生代及晚古生代,岩浆成矿作用均集中在晚古生代的早二叠世,可能是区域内较大规模岩浆事件的具体表现。兴地塔格镁铁-超镁铁质侵入岩体的形成,可能是伴随新元古代 Rodinia 超大陆裂解岩浆作用在兴地塔格地区的地质表现,也许与金川超大型岩浆铜镍硫化物矿床的形成背景相似,但现在的地质分布格局不能反映当时的构造状貌,很难判定当初岩浆作用的具体表现及波及的范围。西天山菁布拉克镁铁-超镁铁岩带,尽管形成了镍矿体,但规模相对较小,经济价值不大。其镁铁-超镁铁质岩体表现了与岛弧岩浆作用相关的地质信息,可能与南天山洋的俯冲消亡密切相关,至少发育的岩浆作用卷入了上述物质而成岩成矿。

喀拉通克、东天山及北山镁铁-超镁铁质岩带,形成时代相近,集中发育于二叠纪,是大规模岩浆作用于上述 3 个地区的不同成岩成矿表现,也许是因为表壳物质的不同而表现出了不同的成矿特征。塔里木隐伏大火成岩省的认识已获得多数学者的认可(余星等, 2009; 陈汉林等, 2009; Yu et al., 2011;

Yuan et al., 2012), 与喀拉通克、东天山及北山镁铁-超镁铁质岩带的形成在时间上和空间上均具有相近性, 可能是同一岩浆作用的不同表现。除塔里木大火成岩省之外, 在欧亚大陆上还发育有 2 个大火成岩省, 西伯利亚大火成岩省和峨眉山大火成岩省, 形成时代非常接近 251~260Ma(图 1)。西伯利亚大火成岩省形成了世界上最大的诺里尔斯克岩浆铜镍硫化物矿床, 而峨眉山大火成岩省除发育有世界上最大的攀枝花钒钛磁铁矿矿床之外, 还形成了多个中-大型岩浆铜镍硫化物矿床, 是硫化物和氧化物成矿的最好表现。塔里木隐伏大火成岩省在形成时代上相对上述 2 个大火成岩省早大约 20~30 Ma, 东天山、北山发育的多个与镁铁-超镁铁质侵入岩体密切相关的岩浆铜镍硫化物矿床, 在形成时代和地质表现上与塔里木大火成岩省特征相似, 可能是同一大规模岩浆作用的产物(张传林等, 2010; Qin et al., 2011; Li et al., 2011)。欧亚大陆上所发育的塔里木、峨眉山及西伯利亚 3 个大火成岩省在时间上相近, 空间上相连, 可能是超级地幔柱或其地幔柱幔枝在这 3 个地区岩浆作用的具体表现, 因表壳物质的不同而表现出了些许的差异。喀拉通克镁铁-超镁铁质岩体与岩浆铜镍硫化物矿床则是该超大规模岩浆作用与成矿的又一表现。

4 结论

(1) 新疆北部所发育的 5 条镁铁-超镁铁质岩带, 集中表现在 3 个时期, 新元古代、早古生代及晚古生代, 分别对应 Rodinia 超大陆裂解、板块构造及大火成岩省深部地幔岩浆作用于浅部地壳的地质表现。

(2) 与镁铁-超镁铁质侵入岩体密切相关的岩浆铜镍硫化物矿床, 是深部地幔岩浆硫化物不混溶作用发生并聚集的结果。新疆北部晚古生代表现出了较好的镍矿成矿潜力, 主要表现在东天山、北山及喀拉通克地区, 可能是与塔里木隐伏大火成岩省相伴大规模岩浆作用的结果。

(3) 亚欧大陆发育了 3 个形成时代相近的大火成岩省, 分别是塔里木、峨眉山及西伯利亚大火成岩省, 可能是一个超级地幔柱或幔枝大规模岩浆作用于上述 3 个地区不同阶段不同时间的具体表现。西伯利亚大火成岩省和峨眉山大火成岩省分别发育了

世界上最大的硫化物矿床和最大的氧化物矿床, 塔里木大火成岩省则表现出了巨大的镍矿成矿潜力, 坡一、坡十、坡东等区域是岩浆铜镍硫化物矿床重要的理论研究基地和找矿方向。

参考文献(References):

- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 等. 塔里木盆地二叠纪大火成岩省发育的时空特点[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2): 179-182.
- CHEN Hanlin, YANG Shufeng, LI Zilong, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Permian Large Igneous Province in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(2): 179-182(in Chinese with English abstract).
- 董连慧, 朱志新, 屈迅, 等. 新疆蛇绿岩带的分布、特征及研究新进展[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 2894-2904.
- DONG L H, ZHU Z X, QU X, et al. Spatial distribution, geological features and latest research progress of the main ophiolite zones in Xinjiang, NW-China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 2894-2904(in Chinese with English abstract).
- 郭召杰, 韩宝福, 张元元, 等. 中亚造山带中新生代壳幔相互作用特征与过程-新疆北部幔源岩浆岩系对比研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 431-439.
- GUO Z J, HAN B F, ZHANG Y Y, et al. Mesozoic and Cenozoic crust-mantle interaction in the Central Asian Orogenic Belt: A comparative study of mantle-derived magmatic rocks in northern Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 431-439(in Chinese with English abstract).
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2233-2246.
- HAN B F, GUO Z J, HE G Q. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2233-2246(in Chinese with English abstract).
- 韩春明, 肖文交, 崔彬, 等. 新疆北部晚古生代铜矿床主要类型和地质特征[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 74-89.
- HAN C M, XIAO W J, CUI B, et al. Major Types and Characteristics of Late Paleozoic Copper Deposits in North Xinjiang, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 74-89(in Chinese with English abstract).
- 胡沛青, 任立业, 傅飘儿, 等. 新疆哈密黄山东铜镍硫化物矿床成岩成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 158-168.

- HU P Q, REN L Y, FU P E, et al. Petrogenetic and ore-forming processes of Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in Hanmi, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 158-168(in Chinese with English abstract).
- 李华芹,陈富文,梅玉萍,等. 新疆坡北基性-超基性岩带 I 号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 450-463.
- LI H Q, CHEN F W, MEI Y P, et al. Isotopic ages of No. I intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 450-463(in Chinese with English abstract).
- 李华芹,陈富文. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京:地质出版社, 2010.
- LI Huaqin, CHEN Fuwen. Isotopic Geochronology of Regional Mineralization in Xinjiang, NW, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010(in Chinese).
- 李红霞,郭锋,李超文,等. 晚古生代古亚洲洋俯冲作用:来自珙春前山镁铁质侵入岩的年代学和地球化学记录[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1531-1540.
- LI H X, GUO F, LI C W, et al. Late Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and geochemical records from Qianshan mafic intrusion in Hunchun area, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(5): 1531-1540(in Chinese with English abstract).
- 李彤泰. 新疆哈密市黄山基性-超基性岩带铜镍矿床地质特征及矿床成因[J]. 西北地质, 2011, 44(1): 54-60.
- LI Tongtai. Geological Features and Metallogenesis of Cu-Ni Deposit in Basic-to-Ultrabasic Zone of Huangshan, Hami Area[J]. Northwestern Geology, 2011, 44(1): 54-60(in Chinese with English abstract).
- 李文渊,张照伟,高永宝,等. 秦祁昆造山带重要成矿事件与构造响应[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1135-1149.
- LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, GAO Yongbao, et al. Important metallogenic events and tectonic response of Qinling, Qilian and Kunlun orogenic belts[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1135-1149(in Chinese with English abstract).
- 李源,杨经绥,张健,等. 新疆东天山石炭纪火山岩及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 193-209.
- LI Y, YANG J S, ZHANG J, et al. Tectonical significance of the Carboniferous volcanic rocks in eastern Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 193-209(in Chinese with English abstract).
- 刘平平,秦克章,苏尚国,等. 新疆东天山图拉尔根大型铜镍矿床硫化物珠滴构造的特征及其对通道式成矿的指示[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 524-532.
- LIU P P, QIN K Z, SU S G, et al. Characteristics of multi-phase sulfide droplets and their implications for conduit-style mineralization of Tulargen Cu-Ni deposit, eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 524-532(in Chinese with English abstract).
- 毛景文,杨建民,屈文俊,等. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义[J]. 矿床地质, 2002, 21(4): 323-328.
- MAO J W, YANG J M, QU W J, et al. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(4): 323-328(in Chinese with English abstract).
- 木合塔尔·扎日,吴兆宇,吴昌志,等. 东天山板块缝合区(带)的构造演化与多金属矿床成矿的关系[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2010, 35(2): 245-253.
- MUHETAER Zari, WU Zhaoning, WU Changzhi, et al. Parati Abudukadir. Relationship between Tectonic Evolution and Polymetallic Mineralization of the East Tianshan Plate Suture Zone[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(2): 245-253(in Chinese with English abstract).
- 三金柱,秦克章,汤中立,等. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 3028-3035.
- SAN J Z, QIN K Z, TANG Z L, et al. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 3028-3035(in Chinese with English abstract).
- 宋谢炎,肖家飞,朱丹,等. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 153-163.
- SONG Xieyan, XIAO Jiafei, ZHU Dan, et al. New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 153-163(in Chinese with English abstract).
- 王金荣,李泰德,田黎萍,等. 新疆博格达造山带晚古生代构造-岩浆演化过程:火山岩组合及地球化学证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1103-1115.
- WANG J R, LI T D, TIAN L P, et al. Late Paleozoic tectono-magmatic evolution in Bogda Orogenic Belt, Xinjiang: Evidence from geochemistry of volcanic rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1103-1115(in Chinese with English abstract).
- 王京彬,王玉往,周涛发. 新疆北部后碰撞与幔源岩浆有关的成矿谱系[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 743-752.
- WANG J B, WANG Y W, ZHOU T F. Metallogenic spectrum related to post-collisional mantle-derived magma in

- north Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4):743-752(in Chinese with English abstract).
- 王玉往,王京彬,王莉娟,等. 新疆北部镁铁-超镁铁质岩的PGE成矿问题[J]. *地质前缘*, 2010, 17(1):137-152.
- WANG Yuwang, WANG Jingbin, WANG Lijuan, et al. PGE metallogenesis related to mafic-ultramafic complex in North Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1):137-152(in Chinese with English abstract).
- 王润民,赵昌龙. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床[M]. 北京:地质出版社, 1991.
- WANG R M, ZHAO C L. No. 1 Cu-Ni Sulfide Deposit in Karatungk, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991(in Chinese).
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,等. 天山及邻区石炭纪一早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J]. *西北地质*, 2008, 41(4):1-68.
- XIA L Q, XIA Z C, XU X Y, et al. Petrogenesis of Carboniferous-Early Permian Rift-Related Volcanic Rocks in the Tianshan and its Neighboring Areas, Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 2008, 41(4):1-68(in Chinese with English abstract).
- 肖文交,韩春明,袁超,等. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5):1062-1076.
- XIAO W J, HAN C M, YUAN C, et al. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of Northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1062-1076 (in Chinese with English abstract).
- 肖文交,舒良树,高俊,等. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用[J]. *新疆地质*, 2008, 26(1):4-8.
- XIAO W J, SHU L S, GAO J, et al. Continental dynamics of the Central Asian Orogenic Belt and its metallogeny [J]. *Xinjiang Geology*, 2008, 26(1): 4-8(in Chinese with English abstract).
- 肖序常,何国琦,徐新,等. 中国新疆地壳结构与地质演化[M]. 北京:地质出版社, 2010:197-233.
- XIAO Xuchang, HE Guoqi, XU Xin, et al. Crustal Tectonic Framework and Geological Evolution of Xinjiang Uygur Autonomous Region of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:197-233(in Chinese).
- 颜炜,宋谢炎,聂晓勇,等. 新疆坡十铜镍硫化物含矿岩体岩浆源区特征及构造背景探讨[J]. *地质前缘*, 2011, 18(3):189-200.
- XIE Wei, SONG Xieyan, NIE Xiaoyong, et al. Features of the mantle source and tectonic setting of the Poshu Ni-Cu sulfide-bearing intrusion, Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3): 189-200 (in Chinese with English abstract).
- 徐义刚,王焰,位荀,等. 与地幔柱有关的成矿作用及其主控因素[J]. *岩石学报*, 2013, 29(10):3307-3322.
- XU Y G, WANG Y, WEI X, et al. Mantle plume-related mineralization and their principal controlling factors[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(10):3307-3322(in Chinese with English abstract).
- 杨合群,洛长义,朱宝清,等. 新疆兴地含铜镍基性超基性侵入体地质特征及成矿条件[J]. *西北地质科学*, 1997, 18(2):43-53.
- YANG Hequn, LUO Changyi, ZHU Baoqing, et al. The Geological Features and Metallogenic Conditions of the Copper-Nickel-Bearing Basic-Ultrabasic Intrusive in Xingdi, Xinjiang [J]. *Northwest Geoscience*, 1997, 18(2):43-53(in Chinese with English abstract).
- 余星,陈汉林,杨树锋,等. 塔里木盆地二叠纪玄武岩的地球化学特征及其与峨眉山大火成岩省的对比[J]. *岩石学报*, 2009, 25(6): 1492-1498.
- YU X, CHEN H L, YANG S F, et al. Geochemical features of Permian basalts in Tarim Basin and compared with Emeishan LIP[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1492-1498(in Chinese with English abstract).
- 张传林,周刚,王洪燕,等. 塔里木和中亚造山带西段二叠纪大火成岩省的两类地幔源区[J]. *地质通报*, 2010, 29(6):779-794.
- ZHANG C L, ZHOU G, WANG H Y, et al. A review on two types of mantle domains of the Permian large igneous province in Tarim and the western section of Central Asian orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(6): 779-794 (in Chinese with English abstract).
- 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*, 2014a, 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*, 2014a, 35(1): 59-66(in Chinese with English abstract).
- 张照伟,李文渊,张江伟,等. 新疆天山石炭-二叠纪大规模岩浆成矿事件与形成机制探讨[J]. *西北地质*, 2014b, 47(1): 36-51.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, ZHANG Jiangwei, et al. Mineralization and formation mechanism of Carboniferous-Permian large-scale magmatic ore deposits in Tianshan orogenic belt and Adjacent area, Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 2014b, 47(1): 36-51(in Chinese with English abstract).

- 张作衡,王志良,王彦斌,等. 新疆西天山菁布拉克基性杂岩体闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 353-360.
- ZHANG Zuoheng, WANG Zhiliang, WANG Yanbin, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of diorite from Qingbulake basic complex in western Tianshan Mountains of Xinjiang and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(4): 353-360 (in Chinese with English abstract).
- 周涛发,袁峰,张达玉,等. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及成矿作用研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 478-502.
- ZHOU T F, YUAN F, ZHANG D Y, et al. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 478-502 (in Chinese with English abstract).
- 朱志新,李锦轶,董连慧,等. 新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 170-179.
- ZHU Zhixin, LI Jinyi, DONG Lianhui, et al. Geological characteristics and tectonic significance of Paleozoic intrusive rocks in Western Tianshan of Xinjiang Province[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 170-179 (in Chinese with English abstract).
- A. J. Naldrett. Fundamentals of Magmatic Sulfide Deposits. Reviews in Economic Geology, 2011, 17: 1-50
- Benxun SU, Kezhang QIN, M. Santosh, et al. The Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan Terrane, NW China: Alaskan-type intrusive or rift cumulates? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 175-187.
- CHAI F M, ZHANG Z C, MAO J W, et al. Geology, petrology and geochemistry of the Baishiquan Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang, NW China: Implications for tectonics and genesis of ores[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32: 218-235.
- Christina Yan WANG, Meifu ZHOU, Liang QI. Permian flood basalts and mafic intrusions in the Jinping (SW China)-Song Da (northern Vietnam) district: Mantle sources, crustal contamination and sulfide segregation [J]. Chemical Geology, 2007, 243: 317-343.
- Chusi LI, Edward M. Ripley. The Giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Deposit: Tectonic Setting, Magma Evolution, Ore Genesis, and Exploration Implications[J]. Reviews in Economic Geology, 2011a, 17: 163 - 180.
- Chusi LI, Mingjie ZHANG, Piaoer FU, et al. The Kalatongke magmatic Ni - Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: product of slab window magmatism? [J]. Miner Deposita, 2011b.
- Chusi LI, Edward M. Ripley, Joyashish Thakurta, et al. Variations of olivine Fo-Ni contents and highly chalcophile element abundances in arc ultramafic cumulates, southern Alaska[J]. Chemical Geology, 2013, 351: 15-28.
- Dongyang ZHANG, Zhaochong ZHANG, He HUANG, et al. Platinum-group elemental and Re-Os isotopic geochemistry of the Wajilitag and Puchang Fe-Ti-V oxide deposits, northwestern Tarim Large Igneous Province [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 589-601.
- Edward M. Ripley. Ni-Cu-PGE mineralization in the Partridge river, south Kawishiwi, and Eagle intrusions: a review of contrasting styles of sulfide-rich occurrences in the midcontinent rift system [J]. Economic Geology, 2014, 109: 309-324.
- Feng YUAN, Taofa ZHOU, Dayu ZHANG, et al. 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 [J]. Ore Geology Reviews, 2012, 45: 5-15.
- FRANCO P J, MAO J W, ZHANG Z C, et al. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tian Shan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32: 165-183.
- GAO Jianfeng, ZHOU Meifu, PETER C. Lightfoot, et al. Sulfide saturation and magma emplacement in the formation of the Permian Huangshandong Ni-Cu sulfide deposit, Xinjiang, Northwestern China [J]. Economic Geology, 2013, 108: 1833-1848.
- Haimin YE, Xianhua LI, Zhongwu LAN. Geochemical and Sr-Nd-Hf-O-C isotopic constraints on the origin of the Neoproterozoic Qieganbulake ultramafic-carbonatite complex from the Tarim Block, Northwest China [J]. Lithos, 2013, 182-183: 150-164.
- Joshua Mukwakwami, C. Michael Leshner, Bruno Lafrance. Geochemistry of deformed and hydrothermally mobilized magmatic Ni-Cu-PGE ores at the Garson Mine, Sudbury [J]. Economic Geology, 2014, 109: 367-386.
- LI Ni, FAN Qicheng, SUN Qian, et al. Lithogeochemistry of Volcanic Rocks and Hosted Melt Inclusions in Wudalianchi, Heilongjiang, China [J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(5): 771-783.
- Liang QI, Meifu ZHOU. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China [J]. Chemical

- Geology, 2008, 248: 83-103.
- Liemeng CHEN, Xieyan SONG, Leonid V. Danyushevsky, et al. A laser ablation ICP-MS study of platinum-group and chalcophile elements in base metal sulfide minerals of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 955-967.
- LI Z L, CHEN H L, SONG B, et al. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin, Northwestern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(5): 917-927.
- LIU W, PAN X F. Methane-rich fluid inclusions from ophiolitic dunite and post-collisional mafic-ultramafic intrusion: The mantle dynamics underneath the Palaeo-Asian Ocean through to the post-collisional period [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242: 286-301.
- McCulloch M T, Gamble J A. Depleted source for volcanic arc basalts; constraints from basalts of Kenadec-Taupo volcanic zone based on trace elements, isotopes and subduction chemical geodynamics, continental magmatism [J]. *New Mexico: Bur Mine Resour Bull*, 1989, 180.
- Maxim Portnyagin, Kaj Hoernle, Pavel Plechov, Nikita Mironov, Sergey Khubunaya. Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H_2O , S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255: 53-69.
- Maxim Portnyagin, Renat Almeev, Sergei Matveev, et al. Experimental evidence for rapid water exchange between melt inclusions in olivine and host magma [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272: 541-552.
- Mengxi WANG, Christina Yan WANG, Yali SUN. Mantle source, magma differentiation and sulfide saturation of the ~637 Ma Zhouan mafic-ultramafic intrusion in the northern margin of the Yangtze Block, Central China [J]. *Precambrian Research*, 2013, 228: 206-222.
- Mingjie ZHANG, Chusi LI, Piaoer FU, et al. The Permian Huangshanxi Cu - Ni deposit in western China: intrusive - extrusive association, ore genesis, and exploration implications [J]. *Miner Deposita*, 2011, 46: 153-170.
- Mingjie ZHANG, Qingyan TANG, Peiqing HU, et al. Noble gas isotopic constraints on the origin and evolution of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, Western China [J]. *Chemical Geology*, 2013, 339: 301-312.
- Nadine Witting, D. Graham Pearson, Joel A. Baker, et al. A major element, PGE and Re-Os isotope study of Middle Atlas (Morocco) peridotite xenoliths: Evidence for coupled introduction of metasomatic sulphides and clinopyroxene [J]. *Lithos*, 2010, 115: 15-26.
- Nicholas Arndt. The lithospheric mantle plays no active role in the formation of orthomagmatic ore deposits [J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 1953-1970.
- QIN K Z, SU B X, Sakyi P A, et al. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume [J]. *American Journal of Science*, 2011, 311: 237-260.
- Ripley E M, Chusi Li, Craig H. Moore, et al. Micro-scale Si isotope studies of the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region, Siberia: Constraints on the genesis of coexisting anhydrite and sulfide minerals [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74: 634-644.
- Shenghong YANG, Meifu ZHOU, Peter C. Lightfoot, et al. Re-Os isotope and platinum-group element geochemistry of the Pobei Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic complex in the northeastern part of the Tarim Craton [J]. *Miner Deposita*, 2014, 49: 381-397.
- Shenghong YANG, Meifu ZHOU, Peter C. Lightfoot, et al. Selective crustal contamination and decoupling of lithophile and chalcophile element isotopes in sulfide-bearing mafic intrusions: An example from the Jingbulake intrusion, Xinjiang, NW China [J]. *Chemical Geology*, 2012, 302-303: 106-118.
- SONG Xieyan, XIE Wei, DENG Yufeng, et al. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of central Asian orogenic belt, Xinjiang, NW China [J]. *Lithos*, 2011, 127: 128-143.
- 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*, 2009, 44: 303 - 327.
- Stephen J. Barnes, Belinda Godel, Derya Guren, et al. Sulfide-olivine Fe-Ni exchange and the origin of anomalously Ni rich magmatic sulfides [J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 1971-1982.
- SUN S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics in ocean basalt: implication for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins* [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- TANG D M, QIN K Z, SUN H, et al. The role of crustal

- contamination in the formation of Ni-Cu sulfide deposits in Eastern Tianshan, Xinjiang, Northwest China: Evidence from trace element geochemistry, Re-Os, Sr-Nd, zircon Hf-O, and sulfur isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2012, 49: 145-160.
- TANG D M, QIN K Z, SU B X, et al. Ma YG, Magma source and tectonics of the Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China, traced from geochemical and isotopic signature[J]. *Lithos*, 2013, 170-171: 144-163.
- TANG Qingyan, MA Yansheng, ZHANG Mingjie, et al. The origin of Ni-Cu-PGE sulfide mineralization in the margin of the Zhubu mafic-ultramafic intrusion in the Emeishan Large Igneous Province, southwestern China[J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 1889-1901.
- Tao SUN, Zhuangzhi QIAN, Chusi LI, et al. Petrogenesis and economic potential of the Erhongwa mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Constraints from olivine chemistry, U-Pb age and Hf isotopes of zircons, and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes[J]. *Lithos*, 2013, 182-183: 185-199.
- XIA LQ, XU X Y, XIA Z C, et al. Petrogenesis of carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(3): 419-433.
- XIAO W J, Windley B F, HUANG B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 1189 - 1217.
- Yan TAO, Chusi LI, Ruizhong HU, et al. Re-Os isotope constraints on the genesis of the Limahe Ni-Cu deposit in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 2010, 119: 137-146.
- Yannick Branquet, Charles Gumiaux, Stanislas Sizaret, et al. Synkinematic mafic/ultramafic sheeted intrusions: Emplacement mechanism and strain restoration of the Permian Huangshan Ni-Cu ore belt (Eastern Tianshan, NW China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 56: 240-257.
- Yufeng DENG, Xieyan SONG, Liemeng CHEN, et al. Geochemistry of the Huangshandong Ni-Cu deposit in northwestern China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in orogenic belts[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 181-198.
- YU X, YANG S F, CHEN H L, et al. Permian flood basalts from the Tarim Basin, Northwest China SHRIMP zircon U Pb dating and geochemical characteristics[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(2-3): 485-497.
- ZHANG Z C, MAO J W, CHAI F M, et al. Geochemistry of the Permian Kalatongke Mafic Intrusions, Northern Xinjiang, Northwest China: Implications for the Genesis of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits[J]. *Economic Geology*, 2009, 104: 185 - 203.
- ZHANG Z H, MAO J W, DU A D, et al. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 204-217.
- Zhaode XIA, Changyi JIANG, Mingzhe XIA. Petrogenesis of the Xuanwoling mafic-ultramafic intrusion in the northeastern Tarim Block[J]. *Chin. J. Geochem*, 2015, 34(1): 69-84.
- Zhaowei ZHANG, Wen Yuan LI, Yongbao GAO, 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.
- ZHENG J P, Griffi, S Y, O'Reilly, et al. Granulite xenoliths and their zircons, Tuoyun, NW China: Insights into southwestern Tianshan lower crust[J]. *Precambrian Research*, 2006, 145: 159-181.
- ZHOU M F, ZHAO J H, JIANG C Y, et al. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province[J]. *Lithos*, 2009, 113: 583-594.
- ZHOU M F, Leshner C M, et al. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-PGE sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest, China: Implications for the tectonic evolution of the central Asian orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209: 233-257.