https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.015



造山带铜镍硫化物矿床的岩浆起源: 以东天山黄山南铜镍矿床为例

王 旋^{1,3},曹 俊^{1,2,3*},张盖之^{1,3}

东华理工大学核资源与环境省部共建国家重点实验室,江西南昌 330013
 成都理工大学自然资源部构造成矿成藏重点实验室,四川成都 610059
 东华理工大学地球科学学院,江西南昌 330013

摘 要:位于中亚造山带南缘的新疆东天山地区因其出露大量的二叠纪镁铁质-超镁铁质岩体并产出一系列铜镍硫化物 矿床而成为近年来地质学界关注的焦点.选择新疆东天山地区黄山南含铜镍矿镁铁质-超镁铁质岩体为研究对象,对其 开展了系统的岩石学、矿物学和地球化学研究,以探讨造山带铜镍硫化物矿床的岩浆起源与性质.黄山南岩体主要由方 辉橄榄岩、二辉橄榄岩、橄榄二辉岩、(橄榄)辉长苏长岩和闪长岩组成.各岩相显示富集大离子亲石元素和轻稀土元素、 强烈亏损 Nb-Ta、Ti,类似于典型岛弧火山岩特征.黄山南镁铁质-超镁铁质岩具有较大变化范围的 ε_{Nd}(*t*=282.5 Ma)值 (-1.31~4.22)和(^{sr}Sr/^{se}Sr),比值(0.703 2~0.706 9)以及高的(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb),比值(17.67~18.90),暗示其来源于一个适度富 集的亏损地幔并经历了 5%~20% 新生地壳物质混染和~5% 上地壳物质混染.根据橄榄石最高 Fo 牌号(摩尔含量为 86.6%)计算的黄山南母岩浆为苦橄质岩浆(MgO=12.11%、FeO_{Total}=11.14%、Ni=306×10⁶),指示其岩浆源区应为软流 圈和交代地幔楔共同熔融的源区.黄山南橄榄石低的 Ca(<725×10⁶)和 100×Mn/Fe(1.18~1.38)、高的 Ni(1451×10⁶~ 2 813×10⁶)和 Mn/Zn(11.09~23.53),暗示黄山南母岩浆来源于含有辉石岩的不均一橄榄岩地幔源区.因此,我们推测黄 山南岩体的原始岩浆来源于早期经历过俯冲流体改造的含有辉石岩的交代岩石圈地幔源区. 关键词:中亚造山带;东天山;镁铁质-超镁铁质岩体;铜镍硫化物矿床;辉石岩;矿床学. 中图分类号: P612 文章编号: 1000-2383(2021)11~3829~21 收稿日期;2021-02-03

Origin of Ore-Forming Magmas Associated with Ni-Cu Sulfide Deposits in Orogenic Belts: Case Study of Permian Huangshannan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, NW China

Wang Xuan^{1,3}, Cao Jun^{1,2,3*}, Zhang Gaizhi^{1,3}

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2. Key Laboratory of Tectonic Controlled Mineralization and Oil Reservoir of Ministry of Natural Resources,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: The East Tianshan is situated along the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt, and its outcrops of a series of important magmatic Ni-Cu sulfide deposits hosted by mafic-ultramafic intrusions are the focus of recent studies. In this study, it

引用格式:王旋,曹俊,张盖之,2021.造山带铜镍硫化物矿床的岩浆起源:以东天山黄山南铜镍矿床为例.地球科学,46(11):3829-3849.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 42063005);江西省青年科学基金项目(No. 20192BAB213024);自然资源部构造成矿成藏重点实验室开 放研究课题(No. gzck202006);东华理工大学研究生创新基金项目(No. DHYC-202002).

作者简介:王旋(1996-),女,硕士生,研究方向为岩浆矿床研究.ORCID:0000-0001-6932-4896. E-mail:296660903@qq.com * 通讯作者:曹俊,ORCID:0000-0002-5848-3573. E-mail:caojun-1987@163.com

presents a systematic study of petrology, mineralogy and geochemistry of the Huangshannan sulfide ore-bearing maficultramafic intrusion of the East Tianshan region, in order to further discuss the origin and nature of its parental magma. The Huangshannan intrusion consists of an ultramafic unit, which is composed of harzburgite, lherzolite and olivine websterite, and a mafic unit, which is composed of (olivine) gabbronorite and diorite. The rocks of the intrusion are characterized by enrichments of large ion lithophile elements, light rare earth elements and strong negative Nb-Ta, Ti anomalies, similar to that of typical arc volcanics. These rocks also have variable isotope compositions [$\epsilon_{Nd}(t=282.5 \text{ Ma})=(-1.31)-4.22$; ($^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr})_i=$ 0.703 2 - 0.706 9; ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i=17.67 - 18.90$], indicating the parental magma was derived from a moderately enriched depleted mantle source and contaminated by 5% - 20% juvenile arc crust and then by ~5% upper crustal materials. According to its highest Fo olivine, the estimated parental magma of the Huangshannan intrusion has 12.11% MgO, 11.14% FeO_{Total} and 306×10^{-6} Ni, indicating the picritic magma was generated from partial melting of both the asthenosphere and mantle wedge. The low Ca ($<725\times10^{-6}$), $100\times\text{Mn/Fe}$ (1.18-1.38) and high Ni ($1451\times10^{-6}-2.813\times10^{-6}$), Mn/Zn (11.09-23.53) ratios of the Huangshannan olivines indicate the Huangshannan parental magma may be derived from pyroxenite in a modally enriched peridotite mantle source. Therefore, it speculates that the Huangshannan primary magmas were likely derived from a lithospheric pyroxenite mantle source as the result of slab-derived fluid modification during previous subduction.

Key words: Central Asian Orogenic Belt; East Tianshan; mafic-ultramafic intrusion; Ni-Cu sulfide deposit; pyroxenite; ore deposit.

0 引言

目前,世界上超大型岩浆铜镍硫化物矿床(如 俄罗斯的Noril'sk和中国金川)多形成于与地幔柱 或大陆裂谷有关的地质背景(Naldrett, 2004).但近 年来的研究发现也有一些铜镍硫化物矿床形成于 汇聚板块边缘环境,比如挪威加里东期造山带中的 Bruvann 镍矿(Naldrett, 2011)、博兹瓦纳东部 Tati 和 Selebi-Phikwe 构造带中的铜镍硫化物矿床(Maier et al., 2010)、西班牙的 Aguablanca 矿床(Piña et al.,2006)和我国北山-东天山造山带的喀拉通克、 黄山东、黄山西和黑山铜镍矿(Song and Li, 2009; 邓宇峰,2011;Xie et al.,2012)以及东昆仑造山带 的夏日哈木镍钴矿(Song et al., 2016),这些研究成 果表明在造山带也可能发现有重要经济价值的 岩浆铜镍硫化物矿床.毫无疑问,这两类不同地 质背景产出的成矿岩浆地幔源区性质有非常明 显的差别.汇聚板块边缘造山带背景下的岩浆铜 镍硫化物矿床的成矿作用研究不仅将极大地丰 富对于铜镍硫化物矿床成因的认识,而且在我国 寻找此类矿床也具有重要的实际意义.

位于古生代中亚造山带南缘的岩浆铜镍硫化 物矿床是我国重要的镍矿资源产地,也是产出高镍 (硫化物 Ni含量>10%)铜镍硫化物矿床的重要区 域(毛亚晶等,2018).出露的含高镍硫化物岩体主要 有坡一和黄山南.这些赋存于小岩体中的铜镍硫化 物矿床因其成矿环境独特、成矿潜力巨大、特色显 著,引起了国内外学者的广泛关注.以往认为热液 作用的二次富集是高镍硫化物形成的重要机制,但 是随着近年来多个赋含原生高镍铜镍硫化物矿床 的发现与深入研究,结果表明高镍硫化物并不一定 是热液作用的产物,也可能是岩浆过程形成,包括 母岩浆富镍、岩浆结晶分异以及硫化物熔离和硅酸 盐岩浆-硫化物熔体发生反应(毛亚晶等,2018).其 中异常富镍岩浆是高镍硫化物形成的重要机制(Lu et al.,2019),也是世界上与科马提质岩浆相关的铜 镍硫化物矿床更为富镍的根本原因(Yang et al., 2013).然而,富镍玄武质岩浆的形成机制仍有争 议,尤其是在地幔源区普遍被改造的造山带地区辉 石岩地幔是否参与此类岩浆的形成仍未可知.

橄榄石是上地幔中最丰富的矿物相,是与源区 平衡的幔源熔体中最早结晶的硅酸盐矿物,记录了 最接近原始熔体的信息(Ammannati *et al.*,2016). 此外,橄榄石也是岩浆铜镍硫化物矿床中的主要矿 物,其成分与母岩浆密切相关(Li *et al.*,2004;Zhao *et al.*,2016).对比研究表明黄山南铜镍硫化物矿床 中橄榄石 Ni 含量($1540 \times 10^{-6} \sim 4.023 \times 10^{-6}$)明显 高于 Noril'sk($456 \times 10^{-6} \sim 2.281 \times 10^{-6}$)、金川 ($1515 \times 10^{-6} \sim 2.485 \times 10^{-6}$)和相邻的黄山东(502×10^{-6})和图拉尔根($314 \times 10^{-6} \sim 1.886 \times 10^{-6}$)铜镍硫 化物矿床(Zhao *et al.*,2016).值得指出的是,橄榄石 中的高Ni含量可以作为地幔是否存在再循环辉石 岩的标志,这是因为俯冲板片释放出的流体或富硅 熔体与地幔楔橄榄岩相互作用导致橄榄石转变为 辉石,由于Ni在辉石中具有更低的分配系数(Sobolev et al.,2005,2007),这样就会导致矿物相转 变过程中释放出Ni进入熔体中.近来随着分析测 试技术的提高,橄榄石的微量元素已被广泛应用 于识别幔源岩浆的演化和性质(Howarth and Harris,2017).本文通过对东天山黄山南铜镍硫化物 矿床中的橄榄石进行系统的主微量元素地球化学 研究工作,揭示黄山南铜镍硫化物矿床的岩浆地 幔源区及其深部地质过程,并进一步分析了它对 于造山带铜镍硫化物矿床形成的指示意义.

1 地质背景

中亚造山带(Central Asian Orogenic Belt, CAOB)位于亚洲腹地,在大地构造上北邻欧洲和西 伯利亚克拉通,南接塔里木-华北克拉通,是全球最 大的显生宙增生型造山带(Şengör *et al.*,1993;Xiao *et al.*,2004,2013).中亚造山带的演化从新元古代 早期(~1.0 Ga)格林威尔碰撞造山事件开始,经历了 持续的裂解-俯冲增生/碰撞造山过程,最终在晚古 生代(~250 Ma)拼合(Khaih *et al.*,2003; Windley *et al.*,2007).作为中亚造山带南缘的重要组成部分, 天山造山带近东西向延伸~3 500 km,西起乌兹别克 斯坦,经塔吉克斯坦、吉尔吉斯坦、哈萨克斯坦,东延 至我国新疆和甘肃交界处.新疆东天山是中亚成矿 域的核心区域之一,以发育岩浆铜镍硫化物矿、斑岩 型铜钼矿、造山型金矿、砂卡岩型钨矿以及与海相火 山作用有关的铜、锌、铁矿为特色(李宁,2020).

新疆东天山以卡拉麦里-阿奇库都克-沙泉子 断裂为界从北向南可划分为北天山和中天山地块 两个次级构造单元,是中亚造山带南缘铜镍矿的主 要产地(图1;方林茹等,2019).北山裂谷带位于东 天山的南缘、塔里木盆地的东北缘,以红柳河断裂 为界与中天山地块相邻.中天山北缘的巴音沟蛇绿 岩是目前已知的天山造山带中最年轻的蛇绿岩套, 形成时间在 325~344 Ma (徐学义等, 2006a, 2006b). 它们很可能代表晚古生代北天山洋的洋壳 残片,指示北天山洋在北天山地区可能在早石炭世 已经闭合(Han et al., 2010). 与此不同的是, 中天山 南缘的榆树沟-铜花山蛇绿岩套中斜长花岗岩和斜 长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 435~439 Ma,代表 南天山北缘洋盆形成于奥陶纪-志留纪:岛弧英安 岩和花岗闪长岩年龄为~420 Ma,属于志留纪岛弧 岩浆作用;糜棱岩的形成年龄为402.8±1 Ma,是由 于早泥盆世板块斜向俯冲和碰撞作用产生;而石英 正长斑岩年龄为294.8±1.2 Ma,代表晚石炭纪俯冲 碰撞后的伸展阶段岩浆作用(杨经绥等,2011).它们



Fig.1 Simplified geological map of East Tianshan, which shows the distribution of the mafic-ultramafic intrusions and associated sulfide deposits

据 Mao et al. (2016)修改

代表了一期完整的洋盆裂解和关闭的过程.北天山 地块中沿康古尔断裂自西向东分布有土墩、香山、 黄山、黄山南、黄山东、葫芦、图拉尔根等规模不等 铜镍矿以及一批具有铜镍硫化物矿化的岩体,构成 一条长~200 km、宽~8 km的黄山-镜儿泉铜镍成 矿带(图1).年代学统计结果表明这些含铜镍矿岩 体除图拉尔根、葫芦、四顶黑山外主要形成于267~ 284 Ma(邓宇峰等,2021).中天山地块内赋存的主 要铜镍矿床为白石泉、天宇、天香和菁布拉克,主 要沿阿齐克库都克断裂带分布.北山裂谷带从最 西端的罗东岩体到甘肃北山的黑山岩体,构成了 一条长~300 km的镁铁质-超镁铁质岩带,代表性 铜镍矿床有坡一、坡十、坡东、黑山、红石山、红镍 山、蚕西、笔架山和旋窝岭,使该区成为颇具潜力 的铜镍成矿远景区(阮班晓等,2020).该带中的岩体除黑山外侵位年龄多集中在271~284 Ma,与 东天山镁铁质-超镁铁质岩体年龄相近(阮班晓 等,2020).因此,东天山-北山岩浆铜镍矿床除坡 北矿集区外其他都沿造山带缝合线分布,说明它 们处于汇聚板块边缘造山带内环境.

黄山南含铜镍硫化物矿镁铁质-超镁铁质岩体 位于哈密市东南160 km,位于黄山-镜儿泉铜镍成 矿带西段,康古尔断裂南侧.岩体长为5.2 km,最大 宽度为1.3 km,出露面积约为4 km²,地表呈透镜状 (图 2).已有钻孔资料显示其垂向延伸超过850 m. 黄山南岩体侵位于下石炭统干墩组黑云母石英片 岩、二云母石英片岩和含石榴石黑云母石英片岩 中,为一复式岩体(图 2).在岩体与围岩接触带发育



图 2 东天山东段镁铁质-超镁铁质岩体、铜镍硫化物矿床分布(a)和黄山南岩体地质平面图以及采样位置(b) Fig.2 Distribution and ages of the mafic-ultramafic intrusions and magmatic sulfide deposits in the eastern section of East Tianshan (a), plan view of the Huangshannan intrusion and the location of sampled drill-core in this study (b)

```
b.据 Mao et al.(2016)修改
```

细粒辉长岩冷凝边,岩体边缘可见围岩捕掳体(赵 云,2016).根据矿物组合、岩石结构及矿化程度, 黄山南岩体分为2个相带:超镁铁质岩相带和镁 铁质岩相带(Zhao et al., 2016). 超镁铁质岩相带 由方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、橄榄二辉岩和二辉岩 组成,分布于岩体东部:镁铁质岩相带主要为橄榄 辉长苏长岩、辉长苏长岩和闪长岩,在岩体东部和 西部均有出露,构成岩体的主体.在西部镁铁质岩 相带中可见零星小面积橄榄二辉岩包体;在超镁 铁质岩相带内,可观察到二辉岩包裹二辉橄榄岩 碎片(图2), 暗示岩体由至少两期岩浆侵位形成. 二辉橄榄岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉长苏长岩 SIMS 锆石 U-Pb 定年结果表明岩体形成年龄介于 $(278\pm2) \sim (284.1\pm2.3)$ Ma (Zhao *et al.*, 2015; Mao et al., 2016;邓宇峰等, 2021).该岩体赋存铜 镍硫化物矿石储量为 30 Mt,铜平均品位为 0.12%, 镍平均品位为 0.39% (Zhao et al., 2016). 迄今为止,在超镁铁质岩相带中发现18条矿体, 矿体厚度一般为5~25m,但在镁铁质岩相带中 尚未发现矿体.最主要矿体为赋存于二辉橄榄 岩相中的似层状矿体,其次为赋存于二辉岩相 中的透镜状矿体(图2).矿石类型主要有稀疏浸 染状(硫化物含量为1%~10%)、浸染状(硫化物 含量为10%~30%)和块状(硫化物含量>50%) 矿石(赵云,2016).稀疏浸染状和浸染状矿石分 布广,在各种矿体中均可见到,块状矿石少见.

2 岩相学特征

方辉橄榄岩呈半自形粒状结构,主要由89%~ 94%橄榄石和6%~11%斜方辉石以及少量普通角 闪石、金云母组成.橄榄石呈自形-半自形,粒度为 0.5~1.2 mm (图3a和3b).橄榄石表面裂理发育,蛇 纹石化强烈、沿裂隙有大量细粒状磁铁矿析出.斜 方辉石粒径为1~3 mm,大部分颗粒强烈纤闪石化.



图 3 黄山南岩体各岩相的显微照片(正交偏光)

Fig.3 Photomicrographs of the Huangshannan intrusion (cross polarized light)

a,b.方辉橄榄岩;c.二辉橄榄岩;d.橄榄二辉岩;e.辉长苏长岩;f.闪长岩.矿物缩写:Ol.橄榄石;Opx.斜方辉石;Cpx.单斜辉石;Pl.斜长石;Hb. 普通角闪石;Phl.金云母;Sul.硫化物;Po.雌黄铁矿 二辉橄榄岩呈暗绿色,嵌晶结构,主要由橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、普通角闪石等组成(图 3c).橄榄石含量约为70%~89%,粒径为0.3~5mm,裂理较为发育,蛇纹石化较强.斜方辉石含量约为6%~10%,呈不规则状,部分蚀变成透闪石.单斜辉石含量约为5%~10%,粒径为0.2~2mm.普通角闪石含量约为10%~20%,多出现在堆晶矿物之间的空隙.

橄榄二辉岩呈黑绿色,自形-半自形中粗粒 结构,包橄结构(图 3d).橄榄石含量为18%~ 38%,呈自形到半自形,颗粒大小为0.2~ 0.6 mm,多包裹于斜方辉石或者单斜辉石中.单 斜辉石含量为34%~37%,多呈单独的颗粒产 出,颗粒大小为0.1~2 mm.斜方辉石含量约为 25%~49%,颗粒大小为0.5~2 mm.少量(<3%) 普通角闪石充填于辉石和橄榄石颗粒的粒间.

(橄榄)辉长苏长岩呈灰白-灰黑色,半自形粒状结构(图3e),块状构造,主要由斜长石(35%~45%)、单斜辉石(20%~30%)、斜方辉石(10%~15%)、橄榄石(~5%)和少量角闪石、金云母组成.斜长石呈半自形板状,聚片双晶发育,暗色矿物多在其粒间,少量被辉石包嵌;橄榄石呈他形-半自形粒状,粒径为0.5~1.2 mm,裂纹发育;单斜辉石多呈半自形,少量粒状,边部普遍有纤闪石化;半自形-自形的斜方辉石发生较强蛇纹石化,少部分保留新鲜核部.角闪石不均匀分布,可见辉石包裹体.

闪长岩呈浅灰白色,中细粒结构(图 3f), 块状构造,主要由角闪石(40%~50%)、斜长石(30%~40%)、黑云母(5%~10%)和石英 (5%~10%)组成,矿物粒度一般为1~3 mm, 多呈半自形-自形粒状.

3 采样与分析方法

本文的岩石样品均采集自岩心ZK1303(42° 11′49.2″N,90°40′29.0″E),分布位置如图2所示,其 中方辉橄榄岩样品3件,二辉橄榄岩样品3件,橄榄 二辉岩样品7件,(橄榄)辉长苏长岩样品4件和闪 长岩样品1件.在岩相学鉴定的基础上,选取相对新 鲜的岩石样品开展全岩分析测试工作.全岩主量、 微量元素测试在南京大学现代分析测试中心完成. 主量元素采用XRF方法测定,使用的仪器为瑞士生 产的ARL9800XP+型X荧光仪,使用Li₂B₄O₇+Li-BO₂(67:33)混合溶剂和加拿大Glaisse高温自动燃 气熔样机制样.工作电压为40kV,电流为60mA,分析精度优于5%.微量元素含量运用ICP-MS方法测定,分析仪器为Finnigan MAT Element II多接受等离子体质谱仪(ICP-MS).使用国际标样BHVO-2和BCR-2来校正所测元素的含量.具体流程参见高剑峰等(2003),测试精度一般优于5%~10%.

Sr-Nd-Pb 同位素分析在中国科学院广州地球 化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成. 称取约150 mg的粉末样品以及标准样品放于 Teflon 溶样杯中, 加入1 mL 1:1 纯化 HNO₃和2 mL 纯 化HF,置于120℃电热板上保温>7 d之后蒸干,再 原位加入1mL浓缩HNO3再次蒸干.然后,在上述 样品中再次加入1mL浓缩HNO3后封盖120°C保 温4h以上.之后再次蒸干,加入1mL6mol/ LHCL,120°C保温4h后开盖蒸干,接着用移液枪 准确加入1.5 mL 2.5 mol/L HCL 保温2h. 最后, 使 用AG50-8X 阳离子交换树脂分离 Sr 和稀土元素 (REE)以及干扰元素,并进一步使用HDEHP树脂 分离获得纯化的 Nd.Pb 同位素分析的具体操作流 程为:准确称取100 mg左右样品放入Teflon溶样 杯中,加入HNO₃+HF混合酸,置于140℃电热板 上保温3d后蒸干.在蒸干样品中加入2mL纯化 HNO₃保温24h后开盖蒸干,然后移液枪准确加入 2 mL 6 mol/L HCL 保温 24 h,利用 HBr 作为提取 液在AG1-X8(200-400目)阳离子交换树脂分离 Pb. 分离纯化后的 Sr、Nd 和 Pb 溶液使用 Neptune MC-ICP-MS测试.测定过程中的质量分馏效应分 别用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219进行 校正.与样品一起进行分析测试的标样 BCR-2 所 获得的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr测定值为0.705 059 ± 10(2 σ)、 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 为 0.512 613 \pm 8 (2 σ) 和 $^{206}Pb/^{204}Pb$ = 18.743 ± 2(2σ),与 GeoReM 参考值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr= $0.704 \quad 92; \quad {}^{143}Nd/{}^{144}Nd = 0.512 \quad 635; \quad {}^{206}Pb/{}^{204}Pb =$ 18.754; http://georem.mpch-mainz.gwdg.de)相近.

偏光显微镜观察后,我们选取代表性样品中 的橄榄石和辉石利用电子探针进行成分分析.使 用的仪器为中国科学院广州地球化学研究所同 位素地球化学国家重点实验室 JEOL JXA-8100 型电子探针,工作条件:加速电压为15 kV,电流 为20 nA,束斑直径为1 μm.主量元素和背景的计 数时间分别为20 s 和10 s,微量元素和背景的计 数时间分别为40 s 和 20 s.原始数据采用 ZAF 程 序校正处理.使用透辉石(Si、Fe、Mg和 Ca)、钾 长石(K)、硬玉(Na和Al)、橄榄石(Ni)、金红石 (Ti)和MnO(Mn)标样进行标定.主量元素的分 析误差约为2%,微量元素分析误差为5%.

橄榄石微量元素分析是利用加拿大劳伦森 大学矿床勘探研究中心LA-ICP-MS完成.分析 仪器为 Photon Machines Analyte G2 193 nm型准 分子激光器和 Thermo Neptune Plus Multicollector ICP-MS联机.分析方式采用单点剥蚀,He气 作为载气.分析条件:激光束斑直径为60 μ m,剥 蚀频率为3 Hz,能量为100 mJ.测试过程中,采 用⁴⁴Ca内标和国际外标(Mong Ol 和 NIST610) (Woodhead *et al.*,2007).原始数据使用 Iolite 软件 (Paton *et al.*,2011)进行校正,分析误差<10%.

4 分析结果

4.1 全岩主量和微量元素

本次研究的代表性样品的全岩主量和微量 元素分析结果分别见附表1和附表2.所分析的 全岩样品在显微镜下均观察到不同程度的热液 蚀变特征,与其变化范围较大的LOI值 (0.98%~6.14%)相一致.为了消除烧失量对测 试结果的影响,本文首先将所有样品的主量元 素含量扣除烧失量,然后重新标准化到100%.

黄山南岩体的方辉橄榄岩显示了变化范围较 大的 MgO (29.76%~35.55%)、SiO₂ (44.58%~ 46.38%), Al_2O_3 (2.52%~3.12%), CaO(1.57%~ 3.75%), TiO₂ (0.20%~0.36%), Na₂O+K₂O (0.13%~0.30%)和 FeO_{Total}(12.70%~14.47%).二 辉橄榄岩的 MgO 含量变化范围为 30.17%~ 34.54%.随着MgO含量的减少,SiO₂、CaO、Al₂O₃和 Na₂O+K₂O含量分别从46.17%、1.90%、3.31%和 0.29% 增高到 47.98%、3.14%、6.05% 和 1.37%, FeO_{Total}含量从12.17%降低到9.60%.相反,黄山南 橄榄二辉岩有相对高的 SiO₂(50.35%~53.35%)、 Al_2O_3 (3.21%~5.30%) 和 Na_2O+K_2O (0.36%~ 2.34%)含量以及较低的MgO(22.79%~31.99%)、 $CaO(1.84\% \sim 5.71\%)$ 、FeO_{Total}(9.17%~11.01%)含 量.(橄榄)辉长苏长岩的 MgO 含量介于 3.48%~ 8.29%, SiO₂、Al₂O₃、CaO、FeO_{Total}、Na₂O+K₂O含量 在所有岩性中变化范围最大(图4).此外,闪长岩样 品(HSN-897)的地球化学组成为:SiO₂=58.62%, MgO=2.86%, $FeO_{Total}=7.24\%$, $Al_2O_3=17.56\%$, Na₂O+K₂O=5.74%. 如图 4 所示,随着 MgO 含量 的降低,SiO₂、Al₂O₃、CaO、TiO₂和Na₂O+K₂O含量增加,而FeO_{Total}含量降低.这些规律性的变化暗示黄山南岩体不同岩相之间具有显著的岩浆演化关系,其岩浆可能经历了不同程度的橄榄石、辉石、铁钛氧化物、普通角闪石的堆晶作用.

方辉橄榄岩和二辉橄榄岩有相似变化范围的 Cr、Ni 和 Cu 含量,分别为1 354×10⁻⁶~3 097× 10^{-6} 、1 418×10⁻⁶~6 278×10⁻⁶ 和 100×10⁻⁶~ 1 688×10⁻⁶, 而橄榄二辉岩具有相对较低的 Cr $(1 882 \times 10^{-6} \sim 2 849 \times 10^{-6})$, Ni $(894 \times 10^{-6} \sim$ 5 949×10⁻⁶) 和 Cu (34.54×10⁻⁶~1 652×10⁻⁶) 含 量.Cr、Ni和Cu含量在辉长岩和闪长岩中最低,变 化范围分别为23.64×10⁻⁶~1027×10⁻⁶、27.47× 10⁻⁶~603×10⁻⁶和19.61×10⁻⁶~324×10⁻⁶.黄山南 镁铁-超镁铁质岩体的全岩稀土元素(REEs)总体含 量较低,方辉橄榄岩和二辉橄榄岩中的稀土元素总 量多在11.19×10⁻⁶~20.93×10⁻⁶,橄榄二辉岩的 REE总量主要在11.95×10⁻⁶~30.25×10⁻⁶,(橄榄) 辉长苏长岩 REE 总量则为 77.45×10⁻⁶~127×10⁻⁶. 因此,不同岩石类型显示出由橄榄岩到橄榄二辉岩 再到(橄榄)辉长苏长岩-闪长岩稀土总量逐渐升高 的规律,表明各类岩石可能为同源岩浆分异形成. 在稀土元素配分图上(图 5),各岩性配分型式基 本一致,均显示略平坦的右倾型球粒陨石标准化 稀土配分曲线,(La/Yb)_N比值为0.78~7.28和变 化的 Eu 异常(Eu/Eu*=0.63~1.13). 在微量元素 蛛网图上(图5),这些样品普遍富集大离子亲石 元素(LILEs, Rb, Ba, Th, U和Pb)和亏损高场强 元素(Nb-Ta,Ti).与洋岛玄武岩(OIB)相比,黄山 南样品的稀土和微量元素含量偏低,配分曲线也 存在明显差异,说明黄山南岩体与塔里木地幔柱 岩浆活动可能并无直接联系(Zhao et al., 2015).

4.2 Sr-Nd-Pb同位素

本次研究选取了 12件代表性样品进行全岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析,测试结果及根据年龄计算的相 关参数见附表 3. 黄山南方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、 橄榄二辉岩 Sr-Nd 同位素组成变化范围较大, ϵ_{Nd} (*t*=282.5 Ma)和(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr);比值分别在 0.97~ 4.22和 0.7 032~0.7 059.与超镁铁质岩相比,(橄榄) 辉长苏长岩具有较低的 $\epsilon_{Nd}(t)(-1.31~2.78)$ 和更大 变化范围的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr);(0.705 0~0.706 9).在 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr);- $\epsilon_{Nd}(t)$ 相关图解上(图 6a),它们落在了 洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)重叠区



图4 黄山南岩体主量元素哈克图解

Fig.4 Plots of SiO₂ (a), Al₂O₃ (b), TiO₂ (c), (Na₂O+ K₂O) (d), CaO (e), and FeO_{Total} (f) vs. MgO in the Huangshannan intrusion 引用数据来自于 Zhao *et al.*(2015)和 Mao *et al.*(2016). a. SiO₂-MgO 图解; b. Al₂O₃-MgO 图解; c. TiO₂-MgO 图解; d. (Na₂O+K₂O)-MgO 图解; e. CaO-MgO 图解; f. FeO_{Total}-MgO 图解

域.黄山南样品的Pb同位素组成较为均一, (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb);为17.67~18.90,(²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb);为 15.24~15.63,(²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb);为37.20~38.30.在Pb-Pb图解上(图6b~6c),(²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb);和(²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb); 与(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb);正相关,并且位于北半球参考线之上 (NHRL;Hart,1984).在 $\epsilon_{Nd}(t)$ -(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb);,黄山南 样品偏向富集地幔端元(EMII;图6d).

4.3 矿物化学成分

4.3.1 主量元素 黄山南岩体的橄榄石无明显的环带结构(图3),Fo牌号[Fo=100×molecuar Mg/(Mg+Fe)]介于77.1%~86.6%(摩尔百分比),均为贵橄榄石,其中方辉橄榄岩中橄榄石

Fo值集中在82.3%~84.7%(摩尔百分比). 二辉 橄榄岩和橄榄二辉岩中的橄榄石组成变化范围 较大,Fo值为77.1%~86.6%(摩尔百分比).(橄 榄)辉长苏长岩中橄榄石具有最低的Fo值(附表 4). 橄榄石 Ni含量变化范围为943×10⁻⁶~ 3 693×10⁻⁶,显示出在较小的Fo范围内,Ni含量 快速降低的特点(图7a).CaO含量绝大多数小于 786×10⁻⁶,与Fo值未显示出相关性(图7b).

黄山南岩体的斜方辉石端元组成Fs=13.4%~ 30.5%(摩尔百分比),Wo=0.23%~4.91%(摩尔百 分比),En=66.6%~85.0%(摩尔百分比),为紫苏 辉石和古铜辉石(图7c;附表5),其Mg^{*}值与共生橄



Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized incompatible element patterns for the Huangshannan intrusion

球粒陨石和原始地幔来自于 Sun and McDonough(1989);黄山南引用数据来自于 Zhao *et al.*(2015)和 Mao *et al.*(2016);黑山来自于 Xie *et al.*(2014);黄山西和黄山东来自于邓宇峰(2011);吐哈玄武岩来自于唐冬梅等(2017);夏日哈木来自于张志炳(2016);金川来自于鲍坚(2019)





图 a 演化曲线采用二元混合模型,分别用库鲁克塔格新元古代花岗闪长岩和塔里木元古代片麻状花岗岩为塔里木下、上地壳.香山数据引自 肖庆华(2010);黄山东和黄山西数据引自邓宇峰(2011);塔里木玄武岩和巴楚基性岩墙数据引自 Wei et al.(2014);其他数据引自 Xie et al. (2012).黄山南各岩性图例同图4

榄石 Fo值非常接近,并且与 Al₂O₃含量成低压分离 结晶趋势(图 7d).单斜辉石端元组成Fs=7.06%~ 18.40%(摩尔百分比),Wo=40.2%~45.9%(摩尔 百分比),En=40.3%~47.3%(摩尔百分比),主要 为透辉石和普通辉石(图 7e;附表 6).方辉橄榄岩中 的单斜辉石化学组成为 Mg^{*}=71.2~73.6,Al₂O₃= 2.90%~3.63%, TiO₂=0.90%~1.01%, CaO= 19.2%~19.9%;橄榄二辉岩中的单斜辉石具有相 对较高的 Mg^{*}(75.1~87.4)、Al₂O₃(1.29%~ 3.64%)、CaO(19.4%~21.6%)和低的TiO₂ (0.13%~0.44%)含量;(橄榄)辉长苏长岩中的单 斜辉石化学组成为 Mg^{*}=69.5,Al₂O₃=3.22%, TiO₂=0.68%,CaO=19.4%.

4.3.2 橄榄石微量元素 黄山南岩体主要岩性中 橄榄石的 Ni 含量为1451×10⁻⁶~2813×10⁻⁶,与 Fo 值(Fo_{80.2~84.6})显示很好的正相关性(图8).Mn 含量为1179×10⁻⁶~1567×10⁻⁶,与Fo 值呈负相 关.同时,橄榄石显示出低 Ca 和 Ti 含量,分别为 <725×10⁻⁶、11.23×10⁻⁶~71.34×10⁻⁶(图9;附 表 7).Zn 含量为 $55.75 \times 10^{-6} \sim 132.6 \times 10^{-6}$,与 Mn 和 Mn/Zn 显示了很好的正相关(图 8).100×Mn/ Fe 值主要介于 1.18~1.38,不超过 1.4,明显不同 于 橄 榄 岩 (>1.4;图 8).Mn/Zn 比 值 范 围 为 11.09~23.53(图 8),而 10 000×Zn/Fe 值低于橄 榄岩,从富铁橄榄石的 5.44,增加到富镁橄榄石 的 12.08(图 8).橄榄石的 Co 含量为 124.0× $10^{-6} \sim 225.3 \times 10^{-6}$, Sc 含量为 $5.47 \times 10^{-6} \sim 9.00 \times$ 10^{-6} ,与 Ni 含量存在负相关(图 9).橄榄石的 Li 含量为 $2.89 \times 10^{-6} \sim 11.61 \times 10^{-6}$,与 Ti、Zn 含量显 示较好正相关性,同时落在起源于含金云母再 循环地壳物质的地中海钾镁煌斑岩区域(图 9).

5 讨论

5.1 蚀变影响

虽然镜下观察到部分岩石样品中暗色矿物经 历了蚀变作用(图3),但除4个样品外(HSN-349、 HSN-365、HSN-718、HSN-950)黄山南样品的烧失



图7 黄山南岩体橄榄石 Fo-Ni(a); Fo-Ca(b); 辉石 Wo-En-Fs 分类图(c); 斜方辉石 Mg[#]-Al₂O₃(d); 单斜辉石 TiO₂+Cr₂O₃-Al₂O₃ (e)、TiO₂-Al₂(f)和 TiO₂-Al₂O₃-Na₂O 分类图(g)

Fig.7 Olivine Fo-Ni(a); Fo-Ca(b); pyroxene Wo-En-Fs classfication diagram (c); orthopyroxene Mg[#]-Al₂O₃ (d); clinopyroxene TiO₂+Cr₂O₃-Al₂O₃(e), TiO₂-Al₂(f) and TiO₂-Al₂O₃-Na₂O(g) classfication diagram

图 a 和 b 中橄榄石数据为电子探针分析结果.香山数据引自肖庆华(2010);黄山东和黄山西数据引自邓宇峰(2011);黑山数据引自Xie et al. (2014);夏日哈木橄榄石数据引自张志炳(2016);金川橄榄石数据引自康健等(2019);其他数据引自 Howarth and Harris(2017)

量相对较低(LOI=0.98%~3.77%;附表1).黄山南 样品中K₂O含量与LOI之间为负相关,表明K元素 可能在蚀变过程中发生了丢失,而其他主量元素含 量与LOI之间没有明显的不相关性,这表明这些元 素在蚀变过程中基本不活动.此外,黄山南镁铁一 超镁铁质岩的Pd、Ni和Ir含量之间正相关关系也支



图 8 黄山南岩体橄榄石的100×Mn/Fe-100×Ni/Mg (a);Zn-Mn (b);10 000×Zn/Fe-100×Mn/Fe (c)和Mn/Zn-Ni (d)协变图解 Fig.8 Huangshannan olivine 100×Mn/Fe-100×Ni/Mg (a);Zn-Mn (b);10 000×Zn/Fe-100×Mn/Fe (c) and Mn/Zn-Ni (d) covariation diagrams

橄榄石数据为LA-ICP-MS分析结果;引用数据来自于Howarth and Harris(2017)



 Fig.9
 Huangshannan olivine Co-Ni (a); Sc-Ni (b); Li-Ti (c) and Li-Zn (d) covariation diagrams

 橄榄石数据为LA-ICP-MS分析结果;引用数据来自于Ammannati et al.(2016)

持其赋含的硫化物组合未受热液或变质蚀变作用影响(Zhao et al., 2015).

高场强元素(HFSEs)和稀土元素(REEs)在 后期热液蚀变过程中可能是活动的(Pearce et al.,1992),而锆元素(Zr)在低级变质作用和蚀变 作用过程中是不活动的(Wang et al.,2008).因 此,Zr与HFSEs、REEs之间的相关关系可以用来 示踪这些元素在蚀变过程中的活动性(Wang et al.,2008).黄山南样品的REEs、HFSEs(Th、Nb、 Ta、Hf)与Zr之间显示了明显的相关性(附表1), 表明这些元素在蚀变过程是不活动的.因此,本 文将主要利用黄山南岩体样品的REEs和HF-SEs元素含量和比值来探讨岩浆作用过程.

5.2 地壳混染作用

地壳混染作用是幔源岩浆在上升和侵位过 程中不可避免的过程(DePaolo,1981).地壳物质 的加入可以改变岩浆成分,进而使矿物的结晶 顺序、成分以及全岩地球化学特征随之改变.如 前说述,黄山南岩体中存在着围岩捕掳体,也证 实岩浆在上升过程或在岩浆房残留中围岩混染 的贡献.黄山南岩体富集轻稀土元素以及 Nb-Ta、Ti负异常(图5)可能也与地壳混染作用有 关.(Nb/Th)_{PM}是判断岩浆是否存在 Nb 异常的 指标,(Th/Yb)_{PM}则可以用来指示地壳混染作用 (Rollinson,1993).黄山南岩体的(Nb/Th)_{PM}比 值从 0.08 变化到 2.42,大多数低于 N-MORB 的 平均值(2.31; Sun and McDonough,1989),其在 (Nb/Th)_{PM}-(Th/Yb)_{PM}比值图解上(图 10),位 于亏损的幔源岩浆与上地壳的混合线附近.



Fig.10 (Th/Yb)_{PM}-(Nb/Th)_{PM} diagram for the Huangshannan intrusion

底图引自 Zhao et al.(2015)

我们分别利用库鲁克塔格新元古代花岗闪长 岩和塔里木元古代片麻质花岗岩的平均成分(Hu et al., 2006; Zhang et al., 2017) 作为两个可能的地壳 混染端元,通过计算表明幔源岩浆在深部经过 5%~20%的下地壳混染,之后在地壳浅部~5%的 上地壳混染,可以解释黄山南岩体Sr-Nd同位素特 点(图 6a).同时,黄山南岩体中超镁铁质岩相比镁 铁质岩石在深部地壳混染的比例更低(图6a),这也 与两类岩石中矿物组合的变化相一致.由于在黄山 南岩体的围岩中尚未发现A型花岗岩(图2),我们 推测第一阶段地壳混染作用发生在新生下地壳底 部而第二阶段的地壳混染主要出现在岩浆上升穿 过上覆围岩地层过程.并且两阶段的地壳混染对黄 山南铜镍硫化物矿床的形成是至关重要的(Zhao et al., 2015). 黄山南岩体矿石硫化物 Cu/Pd比值 (47 804~284 637) 明显高于地幔值(~7 000; Barnes and Lightfoot, 2005),表明其母岩浆很可能 因为原始岩浆在深部发生过硫化物熔离作用而导 致母岩浆 Pd 亏损(Ruan et al., 2020). 同时, 黄山南 铜镍硫化物矿床具有放射性 Os 同位素异常 $[\gamma Os(t) = 108 \sim 129]$, 但 类 似 地 幔 的 $\delta^{34}S$ 值 (-0.4‰~0.8‰)指示其母岩浆受到第一阶段地壳 混染的改造,引起深部硫化物饱和(Mao et al., 2017). 橄榄石中出现硫化物包体(图3)也支持这一 结论.幔源岩浆混染了同期的由新生下地壳部分熔 融形成的A型花岗质岩浆,造成岩浆中SiO。含量升 高,FeO含量降低,岩浆中硫的溶解度降低从而达 到早期硫化物饱和.这种硫饱和的岩浆在上升到地 壳浅部的过程中,由于压力效应造成岩浆中硫的 溶解度升高(Mavrogenes and O'Neill, 1999), 再次 变成硫不饱和的岩浆.当岩浆到达地壳浅部,由于 选择性吸收了地壳围岩中的硫化物,并导致了第 二次硫化物的饱和.随后,硫化物原地熔离形成 黄山南岩体中浸染状矿化(Zhao et al., 2015).

5.3 母岩浆性质

由于尚未发现黄山南岩体中可以代表岩体侵 位时母岩浆成分的冷凝边,且主要组成岩石具有明 显的分离结晶和堆晶特征(图4),因此黄山南岩体 母岩浆组成很难准确地估算.一种可行的途径就是 当堆晶相主要为橄榄石时,利用橄榄石Fo值反算法 及质量平衡原理计算母岩浆成分(Chai and Naldrett,1992;Li and Ripley,2011).在黄山南岩体中, 最可能接近满足这种条件的岩石类型就是岩体中

具橄榄石 Fo 最大值的二辉橄榄岩 (Mao et al., 2016). 利用黄山南岩体最原始的橄榄石(Fo = 86.6% 摩尔百分比)的成分,橄榄石-熔体的Fe-Mg 交换系数 $K_{\rm D}$ =0.3 (Roeder and Emslie, 1970) 和 FeO/(FeO+Fe₂O₃)=0.9,以及15个二辉橄榄岩样 品平均成分(附表1; Mao et al., 2016),采用Li and Ripley(2011)的方法,可以计算得到黄山南岩体的 母岩浆成分为 SiO₂=52.81%, TiO₂=0.93%, $Al_2O_3 = 12.92\%$, FeO = 10.02%, $Fe_2O_3 = 1.24\%$, MnO=0.01%, MgO=12.11%, CaO=7.75%, $Na_2O = 1.12\%$, $K_2O = 1.07\%$, $P_2O_5 = 0.15\%$, NiO = 0.039%.这也符合黄山南岩体单斜辉石主量元素成 分反映出其母岩浆为大陆拉斑玄武质岩浆的特征 (图7g).另外,根据Libourel(1999)提出的橄榄石-熔 体 CaO 平 衡 关 系: CaO_{olivine}=0.087 7×(e^{0.106×CaO melt}-1),我们利用黄山南自形-半自形橄榄石中CaO含 量(大多数<0.11%)可以计算出初始岩浆CaO含 量为7.71%,与上述估算的母岩浆中CaO含量相 同.对于这个计算结果的可靠性,我们还可以利用 岩浆热力学软件 MELTS 进行模拟验证 (Ghiorso and Sack, 1995).利用上面得到的母岩浆成分结果 加上0.3% H₂O,在压力为1kbar,氧逸度为QFM条 件下,通过MELTS软件模拟得到矿物晶出顺序为: 尖晶石→橄榄石→斜方辉石→斜方辉石+斜长 石→单斜辉石+斜长石,这与黄山南岩体岩相学观 察的矿物结晶顺序类似.值得注意的是,黄山南岩 体橄榄石 Fo 最大值(摩尔百分比为 86.6%) 与黑山 岩体(摩尔百分比为86.9%; Xie et al., 2014) 接近, 但高于黄山东(摩尔百分比为84%;Gao and Zhou, 2013)、黄山西(摩尔百分比为85%~86%; Mao et al., 2014) 岩体, 因此其对应的母岩浆 MgO 含量也 与黑山母岩浆 MgO 含量(11.3%; Xie et al., 2014) 相近,并且高于黄山东和黄山西的母岩浆 MgO含 量(分别为10.0%和8.71%; Gao and Zhou, 2013; Mao et al., 2014).Gao and Zhou (2013)根据黄山 东岩体富含斜方辉石和低CaO(<0.11%)橄榄石 的特征认为该岩体的母岩浆属于玻安质岩浆,但 本次研究表明它们的母岩浆应为苦橄岩(MgO> 12%;Le Bas, 2000),而玻安质的地球化学特征可 能更多源自于浅部围岩混染(Yao et al., 2021).

相对于显生宙地幔橄榄石(~Fo_{90-91.5}; Gaul et al., 2000),黄山南岩体具有较低的橄榄石牌号(摩 尔百分比为77.1%~86.6%),暗示其母岩浆在侵位

之前经历过一定程度的结晶分异.岩浆较低的Ni含 量及较高的Cu/Ni比值通常被用来作为橄榄石早期 结晶分异的证据(Lesher and Keavs, 2002),因为Ni 在玄武质岩浆橄榄石分离结晶时是相容元素,而Cu 是不相容元素.黄山南岩体相对较高的Cu/Ni比值 (0.02~11.78; 原始地幔 Cu/Ni=0.01) 暗示母岩浆 早期经历过橄榄石结晶分异.反之,黄山南原始岩 浆的成分可以通过向母岩浆逐渐地加入橄榄石来 计算得到.我们使用添加平衡橄榄石的方法(Herzberg and Asimow, 2008) 通过已经计算得到的黄山 南岩体母岩浆成分反推与Fog的橄榄石相平衡的原 始岩浆成分.最后所恢复的原始岩浆MgO含量为 16.60%, FeO_{Total} 含量为 11.98%, NiO 含量为 0.07%,属于苦橄质岩浆.这代表了原始岩浆的最 大值,因为没有考虑地壳混染作用.所以黄山南岩 体原始岩浆中 MgO 的含量应该介于 12.11%~ 16.60%,表明其原始岩浆是地幔高程度部分熔融的 产物,例如峨眉山大火成岩省中的苦橄岩(Wang et al.,2007),正是这种地幔高程度的部分熔融为形成 黄山南铜镍硫化物矿床奠定了物质基础.

5.4 地幔源区特征

在岛弧体系中,由于源区残留金红石、榍石和 钛铁矿等富钛矿物,受俯冲交代影响的地幔楔发生 部分熔融产生的岩浆将亏损 Nb、Ta和 Ti等元素, 同时由于俯冲流体/沉积物的加入,弧岩浆中富集 大离子亲石元素(K、Rb、Sr、Ba、U、Th、Pb)而亏损 高场强元素(Nb、Zr、Ti) (Pearce and Peate, 1995; Johnson and Plank, 1999). 黄山南岩体各类岩石表 现出岛弧岩浆的地球化学特征,富集大离子亲石元 素(Rb,Ba,Th)而亏损高场强元素(Nb-Ta,Zr-Hf, Ti)(图5),说明其源区应为受过俯冲交代的地幔 楔.黄山南岩体单斜辉石与典型阿拉斯加型岩体在 Alz-Ti图中具有相似的演化趋势,介于弧堆晶和裂 谷堆晶趋势之间(图7f),反映其地幔源区经历了俯 冲作用有关的改造作用.在Nb/Yb-Th/Yb图中(图 11a),黄山南样品均偏离 MORB-OIB 演化线,落在 大陆弧玄武岩区域,也反映了源区有来自俯冲组分 的贡献.需要注意的是,黄山南岩体在Nb/Yb-Th/ Yb图中显示经历了明显的地壳物质混染作用,但这 种混染可能与大陆上地壳物质并无直接联系(Zhao et al., 2015). 此外, 黄山南样品的(Ta/La)_{PM}比值是 与俯冲相关的镁铁质岩石接近(图11b),暗示其地幔源 区受到古老俯冲事件的改造(Hofmann and Jochum,



图 11 黄山南岩体 Nb/Yb-Th/Yb (a)和(Ta/La)_{PM}-(Hf/Sm)_{PM}(b)比值图解 Fig.11 Nb/Yb-Th/Yb (a) and (Ta/La)_{PM}-(Hf/Sm)_{PM}(b) diagrams for the Huangshannan intrusion a.底图引自Xie *et al.*(2012); b.底图引自Zhu *et al.*(2010)

1996).这种受俯冲交代的地幔楔既可以存在于洋壳 俯冲阶段(Han et al.,2007),也可以存在于俯冲结 束,碰撞后的阶段,但继承了俯冲时的地幔源区特 点(Song and Li,2009).最新的SIMS 锆石 U-Pb定 年表明黄山南岩体形成于278~284.1 Ma (Zhao et al.,2015;Mao et al.,2016;邓宇峰等,2021),明显晚 于北天山洋闭合时间(~316 Ma;Han et al.,2011). 值得注意的是,博格达地区晚石炭纪发育的高铝玄 武岩显示岛弧玄武岩的地球化学特征,被认为是北 天山洋向南俯冲的岩浆响应(Xie et al.,2014).因 此,黄山南岩体可能形成于造山后岩石圈伸展阶 段,但继承了早期俯冲交代的岩浆地幔源区特征, 从而仍表现出岛弧岩浆的特征(Zhao et al.,2015).

与东天山一系列二叠纪铜镍硫化物含矿岩体 相似,黄山南岩体各岩相显示出略微富集轻稀土、 大离子亲石元素并强烈亏损高场强元素的特征,明 显不同于OIB(图5).已有研究表明北山地区坡北 和黑山岩体低的稀土元素含量和富集大离子亲石 元素特征,可能暗示其源区很可能为软流圈与上覆 交代地幔楔的混合源区(Song et al., 2011; Xie et al., 2012). 同样的,黄山南岩体低的稀土元素含量 和略微富集轻稀土元素、大离子亲石元素特征、低 的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值、高的(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb); 比值和变化较大的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr);表明黄山南岩体具有 MORB 和岛弧的双 重特征,其源区很可能为软流圈和地幔楔共同熔融 的源区(Xie et al., 2012).此外,黄山南单斜辉石投 影在岛弧和MORB两个趋势之间(图7e),同样表明 黄山南岩体具有洋中脊和岛弧岩浆的双重特征,暗 示其岩浆源区为软流圈和交代地幔楔共同熔融的 源区(Xie et al., 2012).由于Ce和Pb相似的地球化 学性质,Ce/Pb比值可用来示踪岩浆源区性质(Sun and McDonough,1989).实验研究表明与俯冲相关 的流体的Ce/Pb比值也一般小于20(Chung et al., 2001).黄山南岩体的Ce/Pb比值为1.72~7.26,与 东天山其他岩体相近(0.04~10,Su et al.,2013), 明显低于N-MORB(25,Sun and McDonough, 1989),表明黄山南岩体地幔源区经历了明显的 与流体相关的富集作用.方林茹等(2019)研究表 明觉罗塔格构造带图拉尔根和香山岩体在角闪 石晶出时岩浆水含量为3.4%~5.1%,与基性弧 岩浆的初始水含量(~4%)相当,也指示地幔源 区早期受到俯冲流体交代作用从而保留了部分 俯冲弧岩浆的特征.黄山南岩体方辉橄榄岩和 二辉橄榄岩中普通出现的普通角闪石和金云母 可能也暗示其起源于受俯冲流体交代的地幔.

相较于世界上其他地区和东天山同时代的铜 镍硫化物矿床,黄山南矿床中的橄榄石在相同Fo值 条件下含有较高的Ni含量(943×10⁻⁶~3693× 10⁻⁶)和低的Ca含量($<786\times10^{-6}$)(图7a,7b).同 时,黄山南矿石100%硫化物Ni含量为9%~19%, 明显高于东天山其他同时代铜镍硫化物矿床的硫 化物(平均Ni含量为6%),属于典型的赋含高Ni硫 化物矿床(毛亚晶等,2018).尽管高Ni橄榄石和硫 化物的形成机制仍然存在争论,但是异常富Ni玄武 质母岩浆是引起橄榄石和硫化物高Ni含量的重 要因素(毛亚晶等,2018).Sobolev *et al.*(2005)发 现夏威夷玄武岩中橄榄石斑晶含有较高的Ni含 量,通过模拟计算认为对应岩浆Ni含量可达到 500×10⁻⁶~600×10⁻⁶,高于洋中脊岩浆Ni含量 ($<200\times10^{-6}$).进一步地,他们提出富Ni岩浆来 源于辉石岩源区部分熔融,辉石岩源区则由再循环的洋壳与地幔橄榄岩反应形成辉石岩地幔源区(Sobolev et al.,2005,2007).这一模型也被引入到铜镍硫化物矿床中,用来解释赋含高镍硫化物矿床的成因(Lu et al.,2019).但是,由于橄榄石与熔体之间Ni的配分受到温度和压力的控制,橄榄岩源区在高温和高压条件下同样可以产生高Ni 岩浆(Howarth and Harris,2017).因此,辉石岩源区可能不是形成富Ni玄武质岩浆的必要条件.

Mn、Zn、Fe在岩浆过程中有相似的橄榄石-熔体分配系数(分别为0.89、1.01和1.1; Foley et al., 2013; Howarth and Harris, 2017).Mn/Fe比值 主要取决于地幔源区中橄榄石的含量,由于橄榄 石 是 地 幔 中 D^{ol/liq}Fe>D^{ol/liq}Mn (D^{ol/liq}Fe =1.09, D^{ol/liq}Mn=0.89)唯一的硅酸盐矿物相.正因为如 此,富橄榄石地幔源区相对于贫橄榄石地幔源区 的部分熔融将会释放更多的Mn,因此富橄榄石的 地幔源区产生高Mn/Fe比值的熔体,然而贫橄 榄石地幔源区产生的熔体则与此相反.此外,由于 两者相似的电价和半径,Fe和Mn在岩浆中的配 分行为相似,因此Mn/Fe比值不受岩浆分异过程 中橄榄石结晶的影响,近似为一常数,是岩浆源区 性质的重要指针(Howarth and Harris, 2017).

Sobolev et al.(2007)的实验岩石学结果表明与 辉石岩熔体平衡的橄榄石 100×Mn/Fe 值为 1.05~ 1.35, 而橄榄岩熔体与辉石岩熔体存在明显不同, 与 之平衡的橄榄石100×Mn/Fe值>1.6.黄山南橄榄 石有显著高的 Mn/Fe, 表明地幔熔融过程中全岩 D^{Fe}相对于D^{Mn}有增加,暗示地幔源区以橄榄岩为主. 黄山南橄榄石在Zn-Mn、100×Mn/Fe-10 000×Zn/ Fe显示出与Payenia玄武岩中橄榄石斑晶相似的成 分变化趋势,暗示其可能来源于辉石岩源区(图8). 同时,从橄榄岩源区熔体结晶的橄榄石有高(>15) 的 Mn/Zn 值, 而从辉石岩源区熔体结晶的橄榄石则 有低(<13)Mn/Zn值(Howarth and Harris, 2017). 黄山南橄榄石 Mn/Zn 比值介于 11.09~23.53,显示 为辉石岩和橄榄岩混合源区的特征(图8). Co、Sc 与Ni比较时会显示出两种不同的趋势:一种是与Ni 呈正相关的"大洋"趋势,代表地幔源区有再循环洋 壳加入而形成的辉石岩组分;一种是呈负相关的 "造山"趋势,代表地幔源区有再循环大陆沉积物加 入形成的含金云母辉石岩组分(Foley et al., 2013). 黄山南橄榄石的Co、Sc与Ni显示了负相关(图9),

表明源区中可能有再循环大陆沉积物加入形成的 含金云母辉石岩组分.此外,黄山南橄榄石的低 Ca含量可能反映其结晶于含水母岩浆,因为水能 明显降低 D^{ol/lig}Ca(Altunkaynak *et al.*,2019),这也 暗示黄山南岩体可能起源于富水的交代地幔源 区.同时,基于与包括黄山南岩体在内的中亚造山 带南缘含铜镍矿化杂岩体最高 Fo 牌号(摩尔百 分比为 86%~90%)橄榄石平衡的熔体 V/Sc 比 值估算的地幔源区氧逸度(~FMQ-~FMQ+ 1)也高于 MORB(≪FMQ),暗示了少量俯冲板 片中的氧化组分交代了上覆地幔楔(Cao *et al.*, 2020).因此,我们推测黄山南岩体的高 Ni (~542×10⁻⁶)原始岩浆来源于早期经历过俯冲 流体改造的含有辉石岩的交代岩石圈地幔源区.

6 结论

(1)黄山南镁铁质一超镁铁质岩体结晶自含
 12.11%MgO和306×10⁻⁶Ni的苦橄质母岩浆.

(2)黄山南母岩浆在深部岩浆房混染了5%~20%新生地壳物质部分熔融形成的同期花岗质岩浆,之后在地壳浅部加入了~5%围岩地壳物质.

(3)黄山南岩体与OIB和E-MORB明显不同,显示MORB和岛弧的双重特征,暗示其岩浆源区应为软流圈和交代地幔楔共同熔融的源区,而产生的如此高Ni(~542×10⁻⁶)的原始岩浆很可能来自受俯冲流体改造的含有辉石岩的交代岩石圈地幔源区.

致谢:中国科学院广州地球化学研究所同位素 地球化学国家重点实验室梁细荣研究员协助完成 了全岩同位素地球化学测试;华北水利水电大学任 明浩博士在野外样品采集过程中给予了极大帮助; 在此一并表示感谢!

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

References

- Altunkaynak, Ş., Ünal, A., Howarth, G. H., et al., 2019. The Origin of Low-Ca Olivine from Ultramafic Xenoliths and Host Basaltic Lavas in a Back-Arc Setting, James Ross Island, Antarctic Peninsula. *Lithos*, 342/343: 276-287. https://doi.org/10.1016/j. lithos.2019.05.039
- Ammannati, E., Jacob, D. E., Avanzinelli, R., et al., 2016. Low Ni Olivine in Silica - Undersaturated Ultrapotassic Igneous Rocks as Evidence for Carbonate Metasomatism in the Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 444:

64-74. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.039

- Bao, J., 2019. Mg-Sr-Nd Isotopic Constraints on the Genesis of the Jinchuan Cu-Ni-(PGE) Sulfide Deposit (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou, 1-61 (in Chinese with English abstract).
- Barnes, S. J., Lightfoot, P. C., 2005. Formation of Magmatic Nickel Sulfide Ore Deposit and Processes Affecting Their Copper and Platinum Group Element Contents. *Economic Geology One Hundredth Anniversary Vol*ume, 179-213. https://doi.org/10.5382/AV100
- Cao, Y. H., Wang, C. Y., Wei, B., 2020. Magma Oxygen Fugacity of Mafic - Ultramafic Intrusions in Convergent Margin Settings: Insights for the Role of Magma Oxidation States on Magmatic Ni-Cu Sulfide Mineralization. *American Mineralogist*, 105(12): 1841-1856. https:// doi.org/10.2138/am-2020-7351
- Chai, G., Naldrett, A. J., 1992. The Jinchuan Ultramafic Intrusion: Cumulate of a High-Mg Basaltic Magma. Journal of Petrology, 33(2): 277-303. https://doi.org/ 10.1093/petrology/33.2.277
- Chung, S. L., Wang, K. L., Crawford, A. J., et al., 2001. High-Mg Potassic Rocks from Taiwan: Implications for the Genesis of Orogenic Potassic Lavas. *Lithos*, 59(4): 153– 170. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00067-6
- Deng, Y. F., 2011. Geneses of the Huangshandong and Huangshanxi Mafic-Ultramafic Intrusions and Hosted Cu-Ni Sulfide Deposits, Northern Tianshan, Xinjiang (Dissertation). Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 1–177 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Y. F., Song, X.Y., Xie, W., et al., 2021. Determination of Sedimentary Ages of Strata in the Huangshan-Jingerquan Mineralization Belt and Its Geological Significance. Acta Geologica Sinica, 95(2): 362-376 (in Chinese with English abstract).
- DePaolo, D. J., 1981. Trace Element and Isotopic Effects of Combined Wallrock Assimilation and Fractional Crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53(2): 189-202. https://doi.org/10.1016/0012-821X (81)90153-9
- Fang, L.R., Tang, D.M., Qin, K.Z., et al., 2019. The Indicative Significance of Amphibole Composition to Magmatic Process of Copper - Nickel Deposits in Eastern Tianshan. Acta Petrologica Sinica, 35(7): 2061-2085 (in Chinese with English abstract)
- Foley, S. F., Prelevic, D., Rehfeldt, T., et al., 2013. Minor and Trace Elements in Olivines as Probes into Early Igneous and Mantle Melting Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 363: 181–191. https://doi.org/

10.1016/j.epsl.2012.11.025

- Gao, J.F., Lu, J.J., Lai, M.Y., et al., 2003. Analysis of Trace Elements in Rock Samples Using HR-ICPMS. Journal of Nanjing University (Natural Science), 39(6): 844 – 850 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. F., Zhou, M. F., 2013. Generation and Evolution of Siliceous High Magnesium Basaltic Magmas in the Formation of the Permian Huangshandong Intrusion (Xinjiang, NW China). *Lithos*, 162/163: 128-139. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.002
- Gaul, O. F., Griffin, W. L., O' Reilly, S. Y., et al., 2000. Mapping Olivine Composition in the Lithospheric Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 182 (3/4): 223-235. https://doi.org/10.1016/S0012-821X (00)00243-0
- Ghiorso, M. S., Sack, R. O., 1995. Chemical Mass Transfer in Magmatic Processes IV. A Revised and Internally Consistent Thermodynamic Model for the Interpolation and Extrapolation of Liquid-Solid Equilibria in Magmatic Systems at Elevated Temperatures and Pressures. Contributions to Mineralogy and Petrology, 119(2/3): 197-212. https://doi.org/10.1007/BF00307281
- Han, B. F., Guo, Z. J., Zhang, Z. C., et al., 2010. Age, Geochemistry, and Tectonic Implications of a Late Paleozoic Stitching Pluton in the North Tian Shan Suture Zone, Western China. *Geological Society* of America Bulletin, 122(3/4): 627-640. https:// doi.org/10.1130/b26491.1
- Han, B. F., He, G. Q., Wang, X. C., et al., 2011. Late Carboniferous Collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili Terranes in the Western Segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and Implications for the Northern Xinjiang, Western China. *Earth-Science Reviews*, 109(3-4): 74-93. https: // doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.09.001
- Han, C. M., Xiao, W. J., Zhao, G. C., et al., 2007. Re-Os Dating of the Kalatongke Cu-Ni Deposit, Altay Shan, NW China, and Resulting Geodynamic Implications. Ore Geology Reviews, 32(1/2): 452-468. https://doi. org/10.1016/j.oregeorev.2006.11.004
- Hart, S. R., 1984. A Large-Scale Isotope Anomaly in the Southern Hemisphere Mantle. *Nature*, 309(5971): 753-757. https://doi.org/10.1038/309753a0
- Herzberg, C., Asimow, P. D., 2008. Petrology of Some Oceanic Island Basalts: PRIMELT2.XLS Software for Primary Magma Calculation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(9): Q09001. https://doi.org/10.1029/ 2008gc002057

- Hofmann, A. W., Jochum, K. P., 1996. Source Characteristics Derived from Very Incompatible Trace Elements in Mauna Loa and Mauna Kea Basalts, Hawaii Scientific Drilling Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B5): 11831-11839. https://doi.org/ 10.1029/95JB03701
- Howarth, G. H., Harris, C., 2017. Discriminating between Pyroxenite and Peridotite Sources for Continental Flood Basalts (CFB) in Southern Africa Using Olivine Chemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 475: 143– 151. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.043
- Hu, A.Q., Zhang, G.X., Chen, Y.B., 2006. Isotope Geochronology and Geochemistry for Major Geological Events of Continental Crustal Evolution of Xinjiang, China. Geological Publishing House, Beijing, 427.
- Johnson, M.C., Plank, T., 1999. Dehydration and Melting Experiments Constrain the Fate of Subducted Sediments. *Geochemistry*, *Geophysics*, *Geosystems*, (1):1007. https: //doi.org/10.1029/1999GC000014
- Kang, J., Chen, L. M., Song, X. Y., et al., 2019. Trace Elements in Olivines from the Giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Deposit, NW China, and Its Geological Implication. Advances in Earth Science, 34(4): 382 - 398 (in Chinese with English abstract).
- Khain, E. V., Bibikova, E. V., Salnikova, E. B., et al., 2003. The Palaeo-Asian Ocean in the Neoproterozoic and Early Palaeozoic: New Geochronologic Data and Palaeotectonic Reconstructions. *Precambrian Research*, 122:329– 358. https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00218-8
- Le Bas, M.J., 2000. IUGS Reclassification of the High-Mg and Picritic Volcanic Rocks. *Journal of Petrolo*gy, 41:1467-1470. https://doi. org/10.1093/petrology/ 41.10.1467
- Lesher, C. M., Keays, R. R., 2002. Komatiite Associated Ni-Cu - (PGE) Deposits: Mineralogy, Geochemistry, and Genesis. In: Cabri, L. J., ed., The Geology, Geochemistry, Mineralogy, and Mineral Beneficiation of the Platinum - Group Elements. *Canadian Institute of Mining*, *Metallurgy*, and *Petroleum*, 54:579-617.
- Li, C.S., Ripley, E.M., 2011. The Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Deposit: Tectonic Setting, Magma Evolution, Ore Genesis, and Exploration Implications. In: Li, C.S., Ripley, E.M., eds., Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry, and Genesis. Society of Economic Geology Special Publication, 17:164-180. https://doi. org/10.5382/Rev.17
- Li, C. S., Xu, Z. H., Waal, S. A., et al., 2004. Compositional Variations of Olivine from the Jinchuan Ni-Cu Sul-

fide Deposit, Western China: Implications for Ore Genesis. *Mineralium Deposita*, 39(2): 159–172. https://doi. org/10.1007/s00126-003-0389-5

- Li, N., 2020. Metallogenesis of the Xiaobaishitou W-(Mo) Deposit in East Tianshan, Xinjiang (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 1-195 (in Chinese with English abstract).
- Libourel, G., 1999. Systematics of Calcium Partitioning between Olivine and Silicate Melt: Implications for Melt Structure and Calcium Content of Magmatic Olivines. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 136: 63– 80. https://doi.org/10.1007/s004100050524
- Lu, Y. G., Lesher, C. M., Deng, J., 2019. Geochemistry and Genesis of Magmatic Ni-Cu-(PGE) and PGE-(Cu)-(Ni) Deposits in China. Ore Geology Reviews, 107: 863-887. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.03.024
- Maier, W. D., Barnes, S. J., Sarkar, A., et al., 2010. The Kabanga Ni Sulfide Deposit, Tanzania: I. Geology, Petrography, Silicate Rock Geochemistry, and Sulfur and Oxygen Isotopes. *Mineralium Deposita*, 45(5): 419– 441. https: //doi.org/10.1007/s00126-010-0280-0
- Mao, Y.J., Qin, K.Z., Barnes, S.J., et al., 2017. Genesis of the Huangshannan High-Ni Tenor Magmatic Sulfide Deposit in the Eastern Tianshan, Northwest China: Constraints from PGE Geochemistry and Os-S Isotopes. Ore Geology Reviews, 90: 591-606. https://doi. org/10.1016/j. oregeorev.2017.05.015
- Mao, Y. J., Qin, K. Z., Li, C., et al., 2014. Petrogenesis and Ore Genesis of the Permian Huangshanxi Sulfide Ore-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, Western China. *Lithos*, 200: 111–125. https://doi.org/10.1016/ j.lithos.2014.04.008
- Mao, Y.J., Qin, K.Z., Tang, D.M., 2018. Characteristics, Genetic Mechanism, and Exploration Perspective of Ni-Rich Sulfide in Magmatic Ni-Cu Systems. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2410-2424 (in Chinese with English abstract).
- Mao, Y. J., Qin, K. Z., Tang, D. M., et al., 2016. Crustal Contamination and Sulfide Immiscibility History of the Permian Huangshannan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, NW China. Journal of Asian Earth Sciences, 129: 22-37. https://doi.org/10.1016/j. jseaes.2016.07.028
- Mavrogenes, J. A., O' Neill, H. S. C., 1999. The Relative Effects of Pressure, Temperature and Oxygen Fugacity on the Solubility of Sulfide in Mafic Magmas. *Geochimi*ca et Cosmochimica Acta, 63(7/8): 1173-1180. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00289-0

Naldrett, A.J., 2004. Magmatic Sulfide Deposits: Geology,

The Amount of Recycled Crust in Sources of Mantle -

Geochemistry and Exploration. Springer-Verlag, Berlin, 1-728. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08444-1

- Naldrett, A.J., 2011. Fundamentals of Magmatic Sulfide Deposits. In: Li, C.S., Ripley E.M., eds., Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry, and Genesis. Society of Economic Geology Special Publication, 17:1-26. https://doi.org/10.5382/Rev.17
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., et al., 2011. Iolite: Freeware for the Visualisation and Processing of Mass Spectrometric Data. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 26(12): 2508-2518. https://doi.org/ 10.1039/c1ja10172b
- Pearce, J. A., Peate, D. W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 23(1): 251-285. https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343
- Pearce, J.A., Thirlwall, M.F., Ingram, G., et al., 1992. Isotopic Evidence for the Origin of Boninites and Related Rocks Drilled in the Izu-Bonin (Ogasawara) Forearc, Leg 125. Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results, 125: 237 - 261. https://doi.org/ 10.2973/odp.proc.sr.125.134.1992
- Piña, R., Lunar, R., Ortega, L., et al., 2006. Petrology and Geochemistry of Mafic-Ultramafic Fragments from the Aguablanca Ni-Cu Ore Breccia, Southwest Spain. *Economic Geology*, 101: 865-881. https://doi. org/ 10.2113/ gsecongeo.101.4.865
- Roeder, P. L., Emslie, R. F., 1970. Olivine-Liquid Equilibrium. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 29: 275-289. https://doi.org/10.1007/BF00371276
- Rollinson, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman, London, 1-352.
- Ruan, B.X., Lü, X.B., Yu, Y.M., et al., 2020. Petrogenesis, Mineralization and Prospecting Information of Permian Mafic - Ultramafic Rocks, Beishan, Xinjiang. *Earth Science*, 45(12): 4481-4497 (in Chinese with English abstract).
- Ruan, B. X., Yu, Y. M., Lü, X., et al., 2020. Sulfide Segregation Mechanism of Magmatic Ni Mineralization in Western Beishan Region, Xinjiang, NW China: Case Study of the Hongshishan Mafic - Ultramafic Complex. Ore Geology Reviews, 122: 103503. https://doi.org/ 10.1016/j.oregeorev.2020.103503
- Şengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299– 307. https://doi.org/10.1038/364299a0

Sobolev, A.V., Hofmann, A.W., Kuzmin, D.V., et al., 2007.

Sobolev, A.V., Hofmann, A.W., Sobolev, S.V., et al., 2005. An Olivine-Free Mantle Source of Hawaiian Shield Basalts. *Nature*, 434: 590-597. https://doi.org/10.1038/ nature03411

org/ 10.1126/science.1138113

Derived Melts. Science, 316: 412-417. https://doi.

- Song, X.Y., Li, X.R., 2009. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, NW China: Implications for the Formation of Magmatic Sulfide Mineralization in a Postcollisional Environment. *Mineralium Deposita*, 44: 303-327. https://doi.org/10.1007/s00126-008-0219-x
- Song, X.Y., Xie, W., Deng, Y.F., et al., 2011. Slab Break-off and the Formation of Permian Mafic-Ultramafic Intrusions in Southern Margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China. *Lithos*, 127: 128-143. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.08.011
- Song, X. Y., Yi, J. N., Chen, L. M., et al., 2016. The Giant Xiarihamu Ni-Co Sulfide Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, 111(1): 29-55. https://doi.org/10.2113/ econgeo.1111.1.29
- Su, B.X., Qin, K.Z., Tang, D.M., et al., 2013. Late Paleozoic Mafic - Ultramafic Intrusions in Southern Central Asian Orogenic Belt (NW China): Insight into Magmatic Ni-Cu Sulide Mineralization in Orogenic Setting. Ore Geology Reviews, 51: 57-73. https://doi.org/10.1016/j. oregeorev.2012.11.007
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tang, D.M., Qin, K.Z., Xue, S.C., et al., 2017. Nature of Primitive Magmas of Early Permian Basalts in Tuha Basin, Xinjiang: Constraints from Melt Inclusions. Acta Petrologica Sinica, 33(2): 339-353 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Zhou, M. F., Qi, L., 2007. Permian Flood Basalts and Mafic Intrusions in the Jinping (SW China)-Song Da (Northern Vietnam) District: Mantle Sources, Crustal Contamination and Sulfide Segregation. *Chemical Geology*, 243(3/4): 317-343. https://doi.org/ 10.1016/j.chemgeo.2007.05.017
- Wang, X.C., Li, X.H., Li, W.X., et al., 2008. The Bikou Basalts in the Northwestern Yangtze Block, South China: Remnants of 820-810 Ma Continental Flood Basalts?. Geological Society of America Bulletin, 120: 1478 -

1492. https://doi.org/10.1130 /B26310.1

- Wei, X., Xu, Y. G., Feng, Y. X., et al., 2014. Plume-Lithosphere Interaction in the Generation of the Tarim Large Igneous Province, NW China: Geochronological and Geochemical Constraints. *American Journal of Science*, 314(1): 314-356. https://doi. org/10.2475/01.2014.09
- Windley, B.F., Alexeiev, D., Xiao, W.J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Geological Society*, 164: 31-47. https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022
- Woodhead, J., Hellstrom, J., Hergt, J., et al., 2007. Isotopic and Elemental Imaging of Geological Materials by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. Journal of Geostandards and Geoanalytical Research, 31: 331-343. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2007.00104.x
- Xiao, Q.H., 2010. Origin of Xiangshanxi Cu-Ni-Ti-Fe Composite Deposit in Eastern Tianshan, NW China, and Its Implications (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 1-191 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W.J., Windley, B.F., Allen, M.B., et al., 2013. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Tectonics of the Chinese Tianshan Orogenic Collage. *Gondwana Research*, 23: 1316–1341. https://doi. org/10.1016/j. gr.2012.01.012
- Xiao, W.J., Zhang, L.C., Qin, K.Z., et al., 2004. Paleozoic Accretionary and Collisional Tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the Continental Growth of Central Asia. American Journal of Science, 304: 370-395. https://doi.org/10.2475/ajs.304.4.370
- Xie, W., Song, X. Y., Chen, L. M., et al., 2014. Geochemistry Insights on the Genesis of the Subduction-Related Heishan Magmatic Ni-Cu-(PGE) Deposit, Gansu, Northwestern China, at the Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Economic Geology*, 109(6): 1563– 1583. https: //doi.org/10.2113/econgeo.109.6.1563
- Xie, W., Song, X. Y., Deng, Y. F., et al., 2012. Geochemistry and Petrogenetic Implications of a Late Devonian Mafic-Ultramafic Intrusion at the Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 144/145: 209– 230. https: //doi.org/10.1016/j.lithos.2012.03.010
- Xu, X. Y., Li, X.M., Ma, Z.P., et al., 2006a. LA-ICPMS Zircon U-Pb Dating of Gabbro from the Bayingou Ophiolite in the Northern Tianshan Mountains. Acta Geologica Sinica, 80(8):1168-1176 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.Y., Xia, L.Q., Ma, Z.P., et al., 2006b. SHRIMP Zircon

U - Pb Geochronology of the Plagiogranites from Bayingou Ophiolite in North Tianshan Mountains and the Petrogenesis of the Ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 83–94 (in Chinese with English abstract).

- Yang, J.S., Xu, X.Z., Li, T.F., et al., 2011. U-Pb Ages of Zircons from Ophiolite and Related Rocks in the Kumishi Region at the Southern Margin of Middle Tianshan, Xinjiang: Evidence of Early Paleozoic Oceanic Basin. Acta Petrologica Sinica, 27(1): 77-95 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. H., Maier, W. D., Hanski, E. J., et al., 2013. Origin of Ultra-Nickeliferous Olivine in the Kevitsa Ni-Cu-PGE-Mineralized Intrusion, Northern Finland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(1): 81-95. https://doi.org/10.1007/s00410-013-0866-5
- Yao, Z., Mungall, J. E., Jenkins, M. C., 2021. The Rustenburg Layered Suite Formed as a Stack of Mush with Transient Magma Chambers. *Nat. Commun.*, 12(1): 505. https://doi.org/10.1038/s41467-020-20778-w
- Zhang, Y., Wei, X., Xu, Y. G., et al., 2017. Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions of the Lower Crust beneath Northern Tarim: Insights from Igneous Rocks in the Kuluketage Area, NW China. *Mineralogy and Petrology*, 111(2): 237-252. https://doi.org/10.1007/s00710-016-0470-2
- Zhang, Z.B., 2016. Genetic Significance from Mineralogy of Xiarihamu Ni-Cu Sulfide Deposit, Eastern Kunlun Orogenic Belt (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., 2016. Magmatic Sulfide Mineralization of the Cluster of Ni-Cu Deposits in the Eastern Tianshan and the Application of Cu Isotopes for Tracing Concealed Orebodies (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 1-139 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Xue, C. J., Zhao, X. B., et al., 2015. Magmatic Cu-Ni Sulfide Mineralization of the Huangshannan Mafic-Untramafic Intrusion, Eastern Tianshan, China. Journal of Asian Earth Sciences, 105: 155–172. https://doi. org/10.1016/j.jseaes.2015.03.031
- Zhao, Y., Xue, C. J., Zhao, X. B., et al., 2016. Origin of Anomalously Ni-Rich Parental Magmas and Genesis of the Huangshannan Ni - Cu Sulfide Deposit, Central Asian Orogenic Belt, Northwestern China. Ore Geology Reviews, 77: 57-71. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.003
- Zhu, W. G., Zhong, H., Li, X. H., et al., 2010. The Early Jurassic Mafic-Ultramafic Intrusion and A-Type Granite from Northeastern Guangdong, SE China: Age, Origin, and Tectonic Significance. *Lithos*, 119(3/4): 313–329.

https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.005

附中文参考文献

- 鲍坚,2019. Mg-Sr-Nd同位素组成对金川Cu-Ni-(PGE)硫化 物矿床成因的制约(硕士学位论文).兰州:兰州大学, 1-61.
- 邓宇峰,2011.新疆北天山黄山东与黄山西镁铁-超镁铁岩 体及Cu-Ni硫化物矿床成因(博士学位论文).贵阳:中国 科学院地球化学研究所,1-177.
- 邓宇峰,宋谢炎, 颉炜,等, 2021. 黄山-镜儿泉铜镍成矿带 地层时代的厘定及其地质意义探讨. 地质学报, 95(2): 362-376.
- 方林茹,唐冬梅,秦克章,等,2019.角闪石成分对东天山铜 镍矿床岩浆过程的指示意义.岩石学报,35(7): 2061-2085.
- 高剑峰,陆建军,赖鸣远,等,2003. 岩石样品中微量元素的 高分辨率等离子质谱分析.南京大学学报(自然科学 版),39(6):844-850.
- 康健, 陈列锰, 宋谢炎, 等, 2019. 金川超大型 Ni-Cu-(PGE) 矿床橄榄石微量元素特征及地质意义. 地球科学进展, 34(4): 382-398.
- 李宁,2020. 新疆东天山小白石头钨(钼)矿床成矿作用研究 (博士学位论文). 北京:中国地质科学院,1-195.
- 毛亚晶,秦克章,唐冬梅,2018.高镍铜镍矿床的特征、形成

机制与勘查展望. 岩石学报, 34(8): 2410-2424.

- 阮班晓,吕新彪,俞颖敏,等,2020.新疆北山二叠纪镁铁-超镁铁质岩成因、成矿作用和找矿信息.地球科学,45 (12):4481-4497.
- 唐冬梅,秦克章,薛胜超,等,2017. 吐哈盆地早二叠世玄武 岩原始岩浆性质:来自熔融包裹体成分的制约. 岩石学 报,33(2):339-353.
- 肖庆华,2010.新疆东天山香山西铜镍-钛铁复合型矿床成 因研究及意义(博士学位论文).北京:中国科学院地质 与地球物理研究所,1-191.
- 徐学义,李向民,马中平,等,2006a.北天山巴音沟蛇绿岩 形成于早石炭世:来自辉长岩LA-ICPMS锆石U-Pb年 龄的证据.地质学报,80(8):1168-1176.
- 徐学义,夏林圻,马中平,等,2006b.北天山巴音沟蛇绿岩 斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研 究.岩石学报,22(1):83-94.
- 杨经绥,徐向珍,李天福,等,2011.新疆中天山南缘库米什 地区蛇绿岩的锆石 U-Pb 同位素定年:早古生代洋盆的 证据.岩石学报,27(1):77-95.
- 张志炳,2016. 东昆仑夏日哈木铜镍硫化物矿床矿物成因意 义探讨(硕士学位论文). 北京:中国地质大学.
- 赵云,2016.东天山岩浆Cu-Ni矿集区成矿作用及Cu同位素 示踪研究(博士学位论文).北京:中国地质大学,1-139.