

新疆黄山铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程

傅飘儿¹, 胡沛青^{1*}, 张铭杰¹, 贾元琴¹, 汤中立¹, 李文渊²

(1. 兰州大学 资源环境学院 地质科学研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

摘要: 黄山铜镍硫化物矿床镁铁-超镁铁质岩体岩相发育良好, 主要包括橄榄岩、辉石岩、辉长岩和闪长岩, 橄榄岩中部分橄榄石包含有硫化物珠滴。对该岩体不同岩相进行了主元素、微量元素、铂族元素和单矿物的分析, 结果表明, 不同类型岩石的化学组成受橄榄石、辉石和斜长石结晶分异作用的控制。微量元素和稀土元素具有相似的分布模式, $(La/Yb)_N$ 介于 1.14 ~ 3.65 之间, 明显亏损 Nb 和 Ta, 富集 Sr。含矿岩石 Cu/Pd 和 Ti/Pd 比值大于原生地幔岩浆。上述结果揭示黄山镁铁-超镁铁质岩体不同岩性的岩石具有不同的主元素和微量元素特征, 但母岩浆来自同一源区。根据橄榄石的 F_o 值和全岩的主要氧化物组成估算出母岩浆为高镁 (MgO 约为 15%) 玄武岩岩浆, 在岩浆作用过程中地壳富硅组分的混染是导致硫化物熔离的主要机制。

关键词: 成矿作用; 岩浆作用; 镁铁-超镁铁岩; 铜镍硫化物矿床; 黄山; 新疆

中图分类号: P588.12; P611.11

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2009)05-0432-17

Metallogenic magmatism of Huangshan Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang

FU Piao-er¹, HU Pei-qing^{1*}, ZHANG Ming-jie¹, JIA Yuan-qin¹, TANG Zhong-li¹ and LI Wen-yuan²

1. Institute of Geological Science, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China

Abstract: Huangshan Cu-Ni sulfide mafic-ultramafic intrusions show varied petrography, including peridotite, pyroxenite, gabbro and diorite. Some sulfide droplets were found in olivine of peridotite. The major elements, trace elements and platinum group elements (PGE) of whole rock samples of different type rocks, combined with estimated MgO content in the parent magma by F_o values of the olivine and the compositions of whole rock, indicate that different type of rocks are mainly controlled in chemical compositions by crystallization of olivine, pyroxene and plagioclase minerals, and display similar trace element and REE patterns. The REE show varied $(La/Yb)_N$ ratios, ranging between 1.14 and 3.65. Primitive mantle-normalized trace element distribution patterns display significantly Nb- and Ta-depletion, and Sr-enrichment. The ratios of Cu/Pd and Ti/Pd are higher than primitive mantle values. These evidences indicate that three episodes of mafic-ultramafic intrusions in Huangshan Cu-Ni sulfide deposit with distinctive major and trace elements characteristics, originated from the same source, in which MgO content of the parent magma is about 15%. The metallogenic magma is contaminated by crust components during magmatism. The contamination of Si-rich crustal component could be responsible for sulphur saturation as well as sulfide melt segregation.

Key words: mineralization; magmatism; mafic-ultramafic intrusion; Cu-Ni sulfide deposit; Huangshan; Xinjiang

0 引言

与镁铁-超镁铁质岩密切相关的铜镍硫化物

矿床是 Cu、Ni 和 PGE (铂族元素) 资源的重要矿床类型^[1], 其 Ni 和 PGE 产量占世界总产量的一半以上, Cu 储量占世界储量的 5.5%^[2-3]。岩浆铜镍硫化物矿床是大陆环境下地幔独特岩浆作用、巨量金属聚集

收稿日期 (Received): 2008-11-27; 改回日期 (Revised): 2009-03-06; 接受日期 (Accepted): 2009-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (40534020, 40772058, 40873005, 40273009); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NECT-04-0980);

国家科技支撑计划项目 (2006BAB01B08, 2006BAB01A01)

作者简介: 傅飘儿 (1984-), 女, 硕士, 矿床地球化学专业。E-mail: fupe06@lzu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): HU Pei-qing, E-mail: hupq@lzu.edu.cn, Tel: +86-931-8911843

的产物,成矿岩浆作用是认识地幔物质组成、岩浆事件、地幔流体作用与成矿元素运移聚集等壳幔相互作用的重要途径,对认识该类矿床的成因、指导勘查等具有重要意义^[4-10]。我国的Ni、Cu和PGE资源主要来自岩浆型铜镍硫化物矿床,除金川超大型铜镍硫化物矿床外,新疆阿尔泰和东天山是岩浆型铜镍硫化物的主要成矿带,如喀拉通克和黄山-镜儿泉镁铁-超镁铁质岩带赋存着众多岩浆铜镍硫化物矿床。喀拉通克和黄山东等矿床岩浆过程及成因已有详细的研究^[11-15],研究薄弱的黄山铜镍硫化物矿床含矿岩体岩相发育完整,橄榄岩相发育,是系统认识该区镁铁-超镁铁质成矿岩浆作用的典型地区。

黄山铜镍硫化物矿床位于土墩-二红洼-香山-黄山-镜儿泉铜镍成矿带^[16],含矿镁铁-超镁铁质岩体岩相分异良好,发育橄榄岩、辉石岩、辉长岩和闪长岩;慕纪录^[17]根据岩石组合特征和相互关系划分出三期侵入和八个岩相带。铜镍硫化物矿体主要赋存在二辉橄榄岩和橄榄二辉岩中,成矿过程为多期多阶段成矿^[17-18],可能形成于碰撞造山晚期伸展构造环境^[14, 19-23]或地幔柱成因^[9, 24, 25]。原始岩浆属高镁的拉斑玄武岩^[26-27],闪长岩锆石SHRIMP U-Pb法提供了岩浆侵入的精确年龄 $(269 \pm 2) \text{ Ma}$ ^[26]。目前关于成矿原始岩浆的组成(MgO含量)、岩浆侵位时的状态(晶粥或纯液相)、不同侵入岩相之间的相互关系(岩石地球化学及成因)以及硫化物与岩浆熔离的时空关系等问题还未明确。黄山含矿镁铁-超镁铁质岩体的两个最新深钻(约800 m)岩芯为系统认识成矿岩浆来源、性质及演化、硫化物熔离与成矿的控制因素等提供了理想样品。本研究拟通过岩相空间变化、造岩矿物组成、主元素、微量元素和铂族元素地球化学特征探讨成矿岩浆事件和成矿因素。

1 地质概况

1.1 区域地质特征

黄山铜镍硫化物矿床位于中亚造山带的南部,沿康古尔塔格深大断裂分布^[26, 28];含矿镁铁-超镁铁质岩体侵位于下石炭统干洞群,接触带出露有10~20 m宽的角岩,具明显的热侵位特征。下石炭统干洞群主要为细碧玢岩、砂砾岩、砂岩、变余粉砂岩、砂质灰岩和生物碎屑灰岩。由于受到区域构造运动的影响,地层倒转,向南倾斜,倾角较陡^[18]。

黄山含矿镁铁-超镁铁质岩体长3.8 km,西部最宽处约0.8 km,东部较窄(0.07 km)直至尖灭,平均宽约0.45 km,出露面积 1.71 km^2 ^[28],呈近东西向分布(图1)。该岩体年龄 $(269 \pm 2) \text{ Ma}$ ^[26]与黄山-镜儿泉镁铁-超镁铁岩带中同类矿床的年龄接近,如香山岩体角闪辉长岩锆石U-Pb年龄为 $(285 \pm 1.2) \text{ Ma}$ ^[19];黄山东岩体黑云母橄榄苏长岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄为 $(274 \pm 3) \text{ Ma}$ ^[14],铜镍矿石Re-Os等时线年龄为 $(282 \pm 20) \text{ Ma}$ ^[11],葫芦基性-超基性岩Re-Os等时线年龄为 $(283 \pm 13) \text{ Ma}$ ^[30],与塔里木二叠纪玄武岩的锆石U-Pb年龄 $(275 \pm 13) \text{ Ma}$ ^[31]也较接近。

1.2 侵入体岩相特征

黄山含矿镁铁-超镁铁岩体岩石分异较好,成层分布,由下往上依次为辉长岩-橄榄岩-辉石岩-辉长岩-闪长岩-橄榄岩。根据岩石产状和岩性特征,岩体可分为三套岩石组合:第一套为顶部橄榄岩(Pdt-1),主要分布在岩体东段,与下伏辉长岩接触带具有热液蚀变特征,无矿体赋存;第二套为岩体中部基性-超基性岩浆结晶序列,由下至上依次是橄榄岩(Pdt-2)、辉石岩(Pyt-2)、辉长岩(Gbr-2)和闪长岩(Drt-2),辉长岩与顶部橄榄岩呈突变接触,局部包含有少量顶部橄榄岩碎块^[32];第三套为底部辉长岩(Gbr-3),位于岩体西段的底部,厚约300 m,与上覆中部橄榄岩(Pdt-2)呈突变接触,局部穿插橄榄岩中^[32]。

该含矿岩体主要岩石类型为橄榄岩、辉石岩和辉长岩,岩石学特征如下。

橄榄岩 为单斜辉石橄榄岩,由橄榄石(40%~60%)、单斜辉石(30%~40%)及少量角闪石、铬尖晶石和金云母组成,硫化物含量变化较大(2%~30%),局部橄榄石含有硫化物珠滴(图2a)。其中橄榄石呈堆晶结构和半自形粒状结构,裂理较为发育,部分蛇纹石化;单斜辉石呈填隙晶充填于橄榄石粒间(图2b),具纤闪石化及淡绿色绿泥石化;角闪石呈黄褐色,与硫化物和金云母呈它形充填;矿物结晶顺序为橄榄石-单斜辉石-角闪石(金云母)。

辉石岩 主要是橄榄二辉岩,含少量二辉岩。橄榄二辉岩由辉石(45%~65%)和橄榄石(10%~25%)组成,含少量角闪石及硫化物,橄榄石呈它形粒状,边缘发育绿泥石化及蛇纹石化,辉石以填隙晶为主,部分蚀变成纤闪石,角闪石较少,棕色,

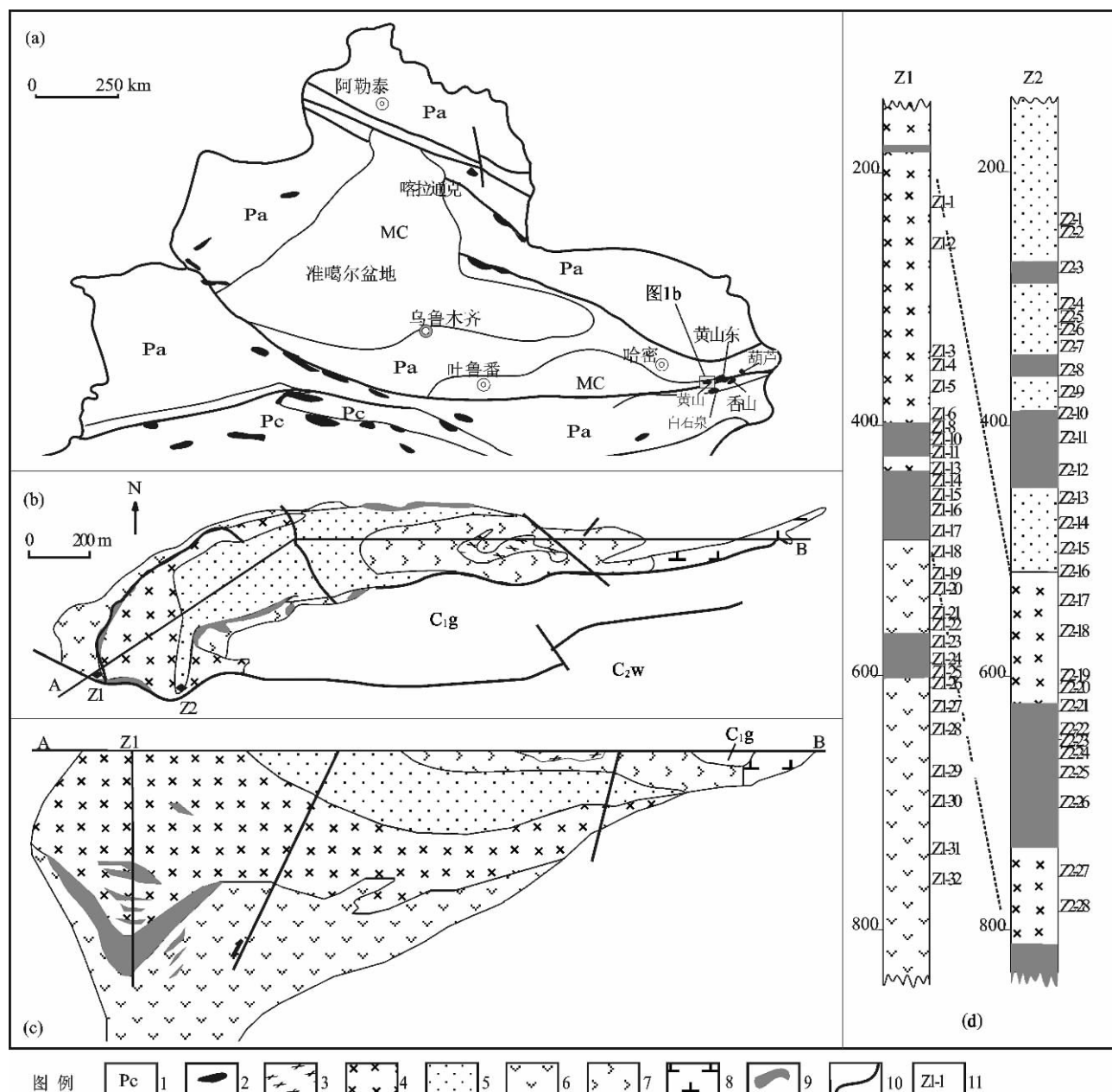


图 1 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体区域地质图(a)、岩体地质图(b)、剖面简图(c)和钻孔岩相柱状图(d)

Fig. 1 Simplified regional geological map (a), geological map of intrusions (b) and cross sections of the mafic-ultramafic intrusion (c) in Huangshan Cu-Ni sulfide deposit. Also shown are two drilling cores sections (d)

图 1a 据 Liu *et al.* [29] 修改, 图 1b 和图 1c 据王润民等 [28] 修改。

1. 地层: Pc - 前寒武系, Pa - 古生界, MC - 中生界与新生界, C_{1g} - 下石炭统干洞群, C_{2w} - 中石炭统梧桐窝子群; 2. 镁铁-超镁铁岩体; 3. Pdt-1 - 岩体顶部橄榄岩; 4. Pdt-2 - 岩体中部橄榄岩; 5. Pyt-2 - 岩体中部辉石岩; 6. Gbr-2 - 岩体中部辉长岩; 7. Gbr-3 - 岩体底部辉长岩; 8. Drt-2 - 岩体中部闪长岩; 9. 矿体; 10. 断裂; 11. 钻孔岩芯采样位置及编号。

呈他形分布; 矿物结晶顺序是橄榄石-辉石-角闪石(金云母)。二辉岩由辉石和少量的角闪石(约 2% ~ 5%)组成, 角闪石充填于辉石间隙中。

辉长岩发育半自形粒状结构和辉长结构, 矿物粒度从下至上由粗到细, 具有互层性。由斜长石(40% ~ 60%)、斜方辉石(20% ~ 30%)、单斜辉石(10% ~ 30%)、角闪石(2% ~ 5%)及微量硫化物组

成。辉石呈柱状, 具两组解理; 角闪石为棕色, 它形充填, 其中包裹有辉石、斜长石及不透明金属矿物; 斜长石主要为中长石和拉长石, 多为自形的板状晶体, 矿物结晶顺序是辉石(斜长石)-角闪石。

1.3 矿床地质特征

黄山铜镍硫化物矿床中矿石主要以浸染状赋存

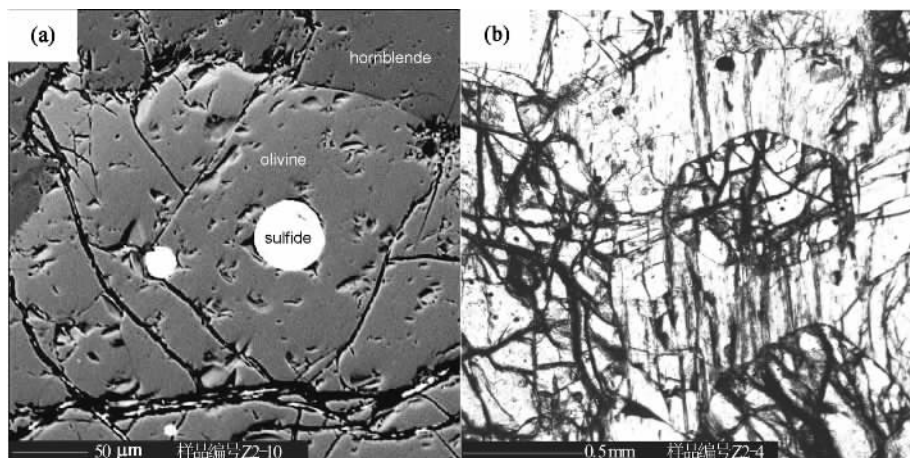


图2 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体矿物特征

Fig. 2 Features of minerals from the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion

(a) 橄榄石包含硫化物珠滴, (b) 辉石填隙晶(单偏光)。

(a) sulfide droplets in olivine crystals, (b) pyroxene interstitial among olivine crystals (polarizing).

于岩体中部橄榄岩相 (Pdt-2) 的下部及辉石岩相 (Pyt-2) 的底部, 局部可见块状矿石^[18, 28], 具有上贫下富的特征。各矿石层之间、矿石与赋存岩相之间均呈渐变接触。矿体 Ni、Cu 和 Co 平均品位分别是 0.488%、0.309% 和 0.032%, 伴生 Au、Ag 和铂族元素等, 矿石储量约 80.4 Mt。矿石矿物以磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿等金属硫化物为主, 次要矿物有紫硫镍矿、马基诺矿、黄铁矿、白铁矿、闪锌矿、针镍矿、墨铜矿、方硫镍矿和方黄铜矿等^[18]。

2 样品与分析方法

2.1 样品

样品主要采自黄山铜镍硫化物矿床含矿岩体的两个最新钻孔岩芯 (Z1 和 Z2), 深度分别为 764.2 m 和 789.7 m (图 1c 和图 1d), 对含硫化物矿体和具有完整岩浆结晶序列的中部岩相进行重点分析, 根据岩相变化和深度 (等间距) 系统采集样品, 在岩性、颜色和结构构造变化处增加采集样品, 并在地表采集对比样品。样品切制光薄片进行岩石学和矿相学分析。

2.2 分析方法

根据光薄片选择新鲜样品进行电子探针矿物组成分析, 蚀变程度低的样品在无铁器污染条件下破碎, 用去离子水和超声波反复清洗、烘干, 再用玛瑙研钵研磨成 200 目粉末, 搅拌均匀后分样进行主元素、微量元素及 PGE 分析。

电子探针分析在印第安纳大学采用 CAMECA-SX50 电子探针完成, 分析条件: 15 kV 加速电压, 25 nA 束流, 20 s 计数时间分析单矿物主元素。微量元素 Cr、Ti 和 Ni 用 100 nA 束流和 50 s 计数时间分析, 其检测极限约为 100 μg/g。

主元素分析在中国科学院地球化学研究所采用 AXIOS-PW4400 型 X 荧光仪完成, 用 LiB₄O₇ 作熔剂熔片, 样品浓度范围: $1 \times 10^{-6} \sim 100\%$, 相对误差

0.05%。硫 (S) 含量在兰州大学分析测试中心采用 VarioEL2-CHNS 型元素分析仪测定, 经 1800 °C 高温燃烧后进入 850 °C 的金属铜进行还原, 最后测定 S。全程用 He 作载气, 标样黄酸 (C₆H₇NO₃S) 的 S 为 18.5%。

微量元素分析在长安大学采用 Thermo-X7 型 ICP-MS 完成, 样品经高纯硝酸和氢氟酸酸化后用 ICP-MS 测定。PGE 分析在国家地质实验测试中心采用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 完成, 待测样品与碳酸钠、硼酸钠、硼砂、玻璃粉、硫磺和面粉混合倒入坩埚中, 加入适量钨稀释剂在 1150 °C 高温炉内熔融, 将熔体倒入铁模中冷却后取出钨扣, 用 HCl 溶解钨扣滤出不溶物, 在封闭溶样器中用王水溶解滤渣, 最后在 ICP-MS 上测定 Pt、Pd、Rh、Ir、Ru 和 Os, 全流程空白值: Os、Ir、Ru、Pd 0.3 μg/g, Pt、Rh 0.06 μg/g。

3 结果

3.1 主要矿物化学组成

橄榄石 黄山铜镍硫化物矿床镁铁-超镁铁质岩体的橄榄石化学组成电子探针分析结果见表 1。其 Fo 值变化范围大, 主要分布于 77.39 ~ 85.94 之间, 较地幔橄榄岩中的橄榄石 Fo 值 (90.8)^[33] 低, 比金川镁铁-超镁铁岩体的橄榄石 Fo 值高^[34]。同一矿物颗粒中 Fo 值自中心向边缘逐渐降低, 但变化不大 (小于 2.61)。橄榄石的 Fo 值与岩石类型、结构、Ni 含量、硫化物含量和蚀变程度密切相关。随基性程度的降低, Fo 值从 85.94 逐步降为 80.31; 在

表 1 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁质岩体橄榄石电子探针分析结果 (%)

Table 1 Chemical compositions of olivine from the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion

编号	岩性	样品类型	SiO ₂	MgO	FeO	MnO	CaO	NiO	Total	Fo	Ni (μg/g)
Z2-17	Pdt-2	Olv-LS	40.52	45.30	14.38	0.20	0.06	0.12	100.58	84.76	917
Z2-19	Pdt-2	Olv-LS	40.06	45.22	14.19	0.18	0.05	0.13	99.84	84.93	1043
HS-1	Pyt-2	Olv-LS	39.57	42.14	18.24	0.25	0.05	0.04	100.28	80.31	346
HS-3	Pyt-2	Olv-LS	39.70	42.70	17.33	0.24	0.05	0.06	100.08	81.30	464
Z2-8	Pyt-2	Olv-LS	39.40	43.87	16.11	0.25	0.07	0.07	99.78	82.78	568
Z2-11	Pyt-2	Olv-LS	39.79	43.03	17.02	0.23	0.06	0.07	100.21	81.71	552
Z2-12	Pyt-2	Olv-LS	39.19	43.43	16.84	0.22	0.04	0.08	99.81	81.99	638
Z2-13	Pyt-2	Olv-LS	40.12	44.21	16.38	0.21	0.07	0.08	101.08	82.68	652
Z2-16	Pyt-2	Olv-LS	38.81	42.06	17.85	0.23	0.05	0.15	99.13	80.63	1145
Z2-20	Pdt-2	Olv-LS	39.60	45.08	14.79	0.23	0.08	0.14	99.91	84.35	1081
Z1-29	Gbr-3	Olv-LS	39.07	40.21	20.69	0.28	0.03	0.04	100.32	77.39	335
Z1-30	Gbr-3	Olv-LS	39.23	40.98	20.09	0.27	0.00	0.05	100.63	78.21	419
Z1-14	Pdt-2	Olv-HS	39.29	44.32	15.99	0.29	0.04	0.14	100.08	83.04	1115
Z1-15	Pdt-2	Olv-HS	39.30	44.25	15.28	0.26	0.04	0.14	99.27	83.59	1077
Z1-17	Pdt-2	Olv-HS	39.53	44.70	15.74	0.22	0.05	0.16	100.40	83.44	1281
Z2-18	Pdt-2	Olv-HS	39.21	43.74	16.23	0.28	0.03	0.13	99.63	82.55	999
Z2-4	Pyt-2	Olv-HS	39.73	43.83	15.75	0.22	0.06	0.08	99.67	83.09	625
Z2-6	Pyt-2	Olv-HS	39.59	43.77	15.62	0.22	0.09	0.09	99.39	83.22	670
Z2-7	Pyt-2	Olv-HS	39.62	44.34	16.12	0.24	0.06	0.08	100.46	82.92	620
Z2-9	Pyt-2	Olv-HS	39.66	43.56	16.05	0.22	0.06	0.09	99.63	82.74	672
Z2-10	Pyt-2	Olv-HS	39.13	43.60	15.98	0.25	0.06	0.07	99.08	82.79	551
Z2-14	Pyt-2	Olv-HS	39.94	44.12	15.90	0.22	0.05	0.08	100.31	83.04	624
Z2-18	Pdt-2	Olv-Inc	39.24	44.62	14.67	0.22	0.05	0.14	98.95	84.29	1100
Z2-20	Pdt-2	Olv-Inc	39.48	45.82	13.26	0.17	0.05	0.16	98.94	85.94	1250
HS-3	Pyt-2	Olv-Re	38.51	35.68	26.14	0.53	0.03	0.05	100.94	70.48	376

注: Olv-LS 代表低硫样品 (< 1% S) 中的橄榄石; Olv-HS 代表高硫样品 (> 1% S) 中的橄榄石; Olv-Re 代表蚀变残余橄榄石; Olv-Inc 代表包橄结构橄榄石。岩性代号含义同图 1 中。

Ni-Fo 关系图 (图 3) 中, 低硫样品 (Olv-LS) 中橄榄石 Ni 含量与 Fo 值呈正相关关系; 高硫样品 (Olv-HS) 中橄榄石 Ni 含量随 Fo 值减小变化不明显。包橄结构中的橄榄石 (Olv-Inc) Fo 值 (84.20 ~ 85.94) 高于其他橄榄石中的 Fo 值; 蚀变残余橄榄石 (Olv-Re) 的 Fo 值一般小于 72.00。

辉石 斜方辉石呈自形至半自形短柱状, 以嵌晶形式出现在橄榄岩、辉石岩和辉长岩中, 周围常有磁铁矿分布; En 介于 70 ~ 84 之间, 属古铜辉石。橄榄岩中斜方辉石的 Al₂O₃ 含量介于 1.44% ~ 4.14% 之间, 与地幔橄榄岩中斜方辉石的 Al₂O₃ 含量 (2.1% ~ 5.0%)^[35] 相近。辉长岩中斜方辉石的 En 介于 64 ~ 70 之间, 属紫苏辉石。单斜辉石呈半自形或它形的短柱状, 以嵌晶和填隙形式出现在橄榄岩、辉石岩与辉长岩中, 晶体大小不一, 为不同世代的矿

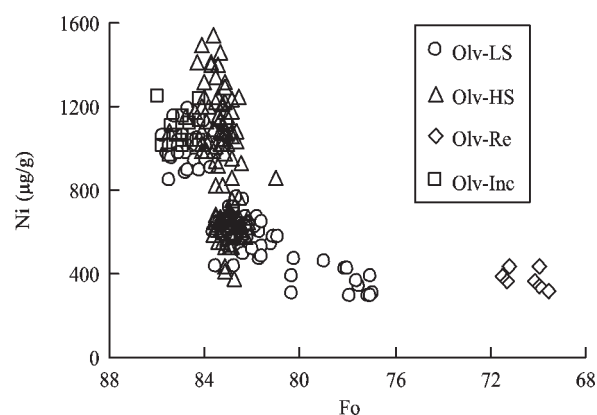


图 3 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁质岩体不同类型橄榄石 Ni 含量与 Fo 组成特征

Fig. 3 Plot of Ni vs. Fo contents in different types of olivine from the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion
图中样点代号含义见表 1 注中。

物,且粒度较斜方辉石大,主要发生次闪石化和绿泥石化。

斜长石 主要出现在辉长岩中,少量出现在辉石岩中, A_n 在50~70变化范围内。辉长岩中呈半自形板柱状,辉石岩中呈嵌晶状包裹辉石和橄榄石或呈填隙状分布于橄榄石和辉石之间。

3.2 主元素

黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁岩体不同类型岩石全岩主元素和微量元素分析结果列于表2。对全岩主要氧化物进行烧失量(LOI)和硫化物校正,硫化物校正根据 Barnes *et al.*^[11]、Li *et al.*^[36]和 Tao *et al.*^[37]方法计算,扣除硫化物含量后计算为100%氧化物组成。

黄山含矿镁铁-超镁铁岩体不同类型岩石化学组成与岩石类型密切相关,且呈连续变化趋势:SiO₂含量从橄榄岩(44.99%~47.74%)、辉石岩(48.77%~52.24%)到辉长岩(50.22%~53.51%)连续增加,MgO和FeO含量从橄榄岩(分别为37.23%~32.38%、13.47%~8.51%)、辉石岩(30.74%~22.33%、10.26%~5.86%)到辉长岩(20%~7.48%、8.81%~6.27%)连续降低,显示同一岩浆结晶分异特征。在主要氧化物含量与MgO的相关图中,随MgO含量的减小,FeO随之减小(图4c),SiO₂、CaO、Al₂O₃和Na₂O+K₂O随之增大(图4a~图4f),揭示岩石组成主要受橄榄石和辉石(MgO含量在25%~40%范围内)及辉石和斜长石结晶作用(MgO 6%~25%)的控制,即岩浆经历了橄榄石、辉石和斜长石的结晶作用。与模式地幔岩^[39]相比,黄山镁铁-超镁铁岩体中的橄榄岩SiO₂含量相近,MgO和TiO₂含量较低,Al₂O₃、CaO和P₂O₅含量较高。

在MgO相关图中(图4a~图4d),顶部橄榄岩(Pdt-1)较中部橄榄岩(Pdt-2)偏基性,具较高的Mg、Al和Ca;岩体中部基性-超基性岩序列主要氧化物组成呈连续变化;底部辉长岩(Gbr-3)与上覆橄榄岩(Pdt-2)主要氧化物含量变化不连续,底部辉长岩较中部辉长岩(Gbr-2)具高的SiO₂和FeO及较低的CaO(图4a~图4d)。

Cu、Ni、Co、Cr和V等相容元素含量较高,平均分别是1329 μg/g、2111 μg/g、195 μg/g、1930 μg/g和102 μg/g,其中Cu、Ni、Co和Cr含量随MgO含量降低而降低,V随MgO的降低而升高(表2)。橄榄岩中Ni和Co随MgO含量减小出现两种变化区间

(图4g~图4h),其中含硫高的橄榄岩Ni和Co含量大于1000 μg/g,明显高于含硫低的橄榄岩。

3.3 微量元素

在微量元素原始地幔标准化分布图解上(图5),黄山铜镍硫化物矿床镁铁-超镁铁岩体不同类型岩石微量元素分布模式与Voisey's Bay^[41]、Noril'sk^[42]、喀拉通克铜镍硫化物矿床相似:与原始地幔相比,均明显亏损Nb和Ta,富集Sr。大离子亲石元素(LILE)丰度低于塔里木盆地二叠纪玄武岩^[43]。

微量元素富集程度随岩石基性程度降低而增大,但岩体中部的橄榄岩(Pdt-2)和辉石岩(Pyt-2)明显低于底部辉长岩(Gbr-3)。橄榄岩(Pdt-2)微量元素分布模式与原始地幔相似(图5a),除Rb、Ba、Th和U等不相容元素含量略高于原始地幔以及Cu、Co和Ni等成矿元素富集外,其他元素含量接近原始地幔组成。部分橄榄岩中Rb、Ba和K等亏损可能受蚀变作用的影响。辉石岩(Pyt-2)微量元素分布模式与橄榄岩(Pdt-2)相似,LILE丰度略高于橄榄岩,成矿元素Cu、Co和Ni含量低于橄榄岩并且亏损Co和Ni。底部辉长岩(Gbr-3)微量元素的丰度最高,富集LILE,亏损成矿元素Cu、Co和Ni,与塔里木盆地二叠纪玄武岩^[43]分布模式相似(图5b)。

黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁岩体稀土元素总量(ΣREE)介于5.51~62.3 μg/g之间,较接近原始地幔组成。稀土元素丰度随岩石基性程度增高而降低,ΣREE从底部辉长岩(30.0~62.3 μg/g)、中部辉石岩(13.3~21.1 μg/g)到中部橄榄岩(5.51~27.9 μg/g)依次降低,但底部辉长岩明显高于中部橄榄岩和辉石岩。该岩体不同岩性的岩石稀土元素原始地幔标准化分布模式相似(图6),轻重稀土分馏较弱,(La/Yb)_N介于1.14~3.65之间,小于金川、白石泉和喀拉通克含矿镁铁超镁铁岩体(分别介于2.58~8.84^[44-45]、1.94~8.24^[46]和4.50~12.7^[47]之间),与黄山东相近(1.18~3.59)^[26]。地表样品(HS-1、HS-2和HS-3)(La/Yb)_N介于1.14~1.60(见表2),表现出LREE略亏损的特征,可能受蚀变影响。中部橄榄岩和辉石岩表现为δEu负异常,δEu平均值分别为0.89和0.90,变化范围分别为0.75~0.98和0.87~0.94;底部辉长岩δEu变化于0.71~1.12之间,平均为0.97,部分表现为负异常,岩浆演化过程中可能存在斜长石的分离结晶。

表 2 黄山铜镍硫化物矿床镁铁-超镁铁质岩体主要氧化物(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果Table 2 Compositions of major elements (%) and trace elements ($\mu\text{g/g}$) of the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion

编号	Z1-5	Z1-10	Z1-13	Z2-17	Z2-19	Z2-20	Z2-22	Z1-1	Z1-7	Z1-14	Z1-16	Z1-17	Z2-28	HS-1	HS-2
岩性	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pyt-2	Pyt-2
SiO ₂	40.34	37.94	38.11	41.09	42.52	41.19	36.61	-	-	-	-	-	-	48.04	48.87
Al ₂ O ₃	2.63	1.65	4.03	4.36	4.21	5.69	4.62	-	-	-	-	-	-	4.30	3.73
Fe ₂ O ₃	10.48	19.61	19.62	11.99	12.13	11.82	16.67	-	-	-	-	-	-	9.34	9.87
MgO	27.36	26.95	25.18	34.00	32.27	30.77	25.93	-	-	-	-	-	-	20.76	23.84
CaO	4.22	3.19	3.23	1.73	3.08	3.03	3.19	-	-	-	-	-	-	11.54	9.80
Na ₂ O	0.20	0.22	0.24	0.64	0.62	0.56	0.21	-	-	-	-	-	-	0.59	0.61
K ₂ O	0.01	0.02	0.03	0.28	0.25	0.30	0.01	-	-	-	-	-	-	0.12	0.11
MnO	0.12	0.12	0.09	0.12	0.12	0.11	0.15	-	-	-	-	-	-	0.13	0.14
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.03	0.05	0.04	0.04	0.06	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03
TiO ₂	0.17	0.14	0.10	0.20	0.22	0.19	0.34	-	-	-	-	-	-	0.35	0.32
LOI	13.67	9.10	8.19	5.02	3.71	7.57	11.30	-	-	-	-	-	-	3.67	1.88
S	0.00	3.15	2.74	0.83	0.62	0.93	1.64	11.10	5.63	4.09	0.70	1.46	7.30	0.55	1.15
Rb	0.06	0.25	0.93	5.41	5.08	7.38	0.20	0.37	0.36	2.42	3.92	2.69	4.28	2.50	1.61
Ba	2.49	2.04	7.30	57.2	49.7	95.1	3.85	2.67	8.19	25.0	36.1	28.5	63.4	32.8	29.0
Th	0.25	0.29	0.39	0.53	0.73	0.53	0.58	0.28	0.27	0.35	0.35	0.33	0.27	0.28	0.26
U	0.08	0.17	0.17	0.20	0.25	0.17	0.23	0.09	0.12	0.14	0.14	0.12	0.17	0.13	0.17
Nb	0.23	0.38	0.40	0.78	0.78	0.82	0.92	0.32	0.34	0.64	0.48	0.44	0.91	0.40	0.40
Ta	0.02	0.02	0.03	0.06	0.06	0.06	0.07	0.03	0.02	0.05	0.04	0.03	0.07	0.03	0.03
Sr	94.1	68.2	77.9	95.7	73.6	124.1	78.1	33.6	37.8	49.3	50.5	68.9	139.1	60.6	55.5
Zr	9.43	6.12	11.4	23.2	33.7	24.6	28.5	10.5	10.9	16.1	16.1	15.4	31.5	18.4	16.6
Hf	0.26	0.20	0.32	0.61	0.77	0.67	0.78	0.29	0.29	0.49	0.45	0.45	0.97	0.61	0.53
Y	2.37	2.25	3.37	3.90	4.90	4.49	5.42	1.81	2.07	4.18	3.98	4.02	9.29	8.87	7.42
V	47.2	62.9	42.2	85.0	53.6	61.8	85.0	41.7	43.5	57.6	76.4	75.9	164	173	143
Cr	2160	2250	2017	2446	2072	2158	1862	1865	2224	2298	2010	2324	1478	2011	2199
Co	102	416	365	137	135	148	274	755	448	363	243	261	403	103	102
Ni	536	5537	5135	664	674	817	4156	10764	6330	4674	2794	4106	10226	267	270
Cu	108	1386	5009	264	173	208	3108	1276	780	2402	1604	3174	18234	181	155
Zn	50.1	64.5	146	84.9	81.9	97.6	86.0	54.2	58.5	101	106	92.9	118	57.9	63.1
La	1.07	0.54	0.96	2.28	2.38	2.37	2.37	1.22	1.07	1.73	1.56	1.29	2.85	1.49	1.30
Ce	2.56	1.45	2.92	5.43	5.83	5.75	5.58	2.83	2.41	4.41	3.62	3.29	7.80	4.30	3.78
Pr	0.38	0.22	0.46	0.76	0.83	0.82	0.78	0.38	0.33	0.66	0.51	0.49	1.25	0.75	0.65
Nd	1.77	1.08	2.14	3.27	3.62	3.62	3.55	1.60	1.37	2.92	2.36	2.32	5.90	3.97	3.42
Sm	0.50	0.34	0.58	0.75	0.91	0.84	0.90	0.35	0.30	0.77	0.66	0.65	1.70	1.33	1.10
Eu	0.16	0.10	0.20	0.24	0.30	0.31	0.25	0.11	0.06	0.25	0.23	0.24	0.59	0.43	0.37
Gd	0.61	0.48	0.75	0.94	1.10	1.01	1.15	0.44	0.41	0.95	0.88	0.86	2.10	1.71	1.47
Tb	0.09	0.07	0.12	0.14	0.18	0.16	0.19	0.06	0.06	0.16	0.14	0.14	0.37	0.31	0.26
Dy	0.52	0.46	0.69	0.82	1.00	0.92	1.12	0.38	0.38	0.90	0.83	0.86	2.18	1.88	1.58
Ho	0.11	0.10	0.15	0.17	0.22	0.20	0.25	0.08	0.09	0.19	0.18	0.19	0.48	0.41	0.34
Er	0.30	0.29	0.42	0.48	0.58	0.54	0.67	0.23	0.27	0.52	0.50	0.50	1.25	1.08	0.93
Tm	0.04	0.04	0.06	0.07	0.09	0.08	0.10	0.04	0.04	0.08	0.07	0.07	0.18	0.16	0.13
Yb	0.30	0.29	0.43	0.48	0.58	0.52	0.64	0.24	0.28	0.49	0.48	0.47	1.09	0.94	0.82
Lu	0.05	0.05	0.07	0.08	0.09	0.08	0.10	0.04	0.05	0.08	0.08	0.07	0.16	0.15	0.13
δEu	0.89	0.76	0.93	0.88	0.92	1.03	0.75	0.86	0.52	0.90	0.92	0.98	0.96	0.87	0.89
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	2.56	1.34	1.60	3.41	2.94	3.27	2.66	3.65	2.74	2.53	2.33	1.97	1.88	1.14	1.14
ΣREE	8.46	5.51	9.95	15.9	17.7	17.2	17.7	8.00	7.12	14.1	12.1	11.4	27.9	18.9	16.3

(续表 2)

编号	HS-3	Z2-4	Z2-6	Z2-7	Z2-9	Z2-11	Z2-13	Z2-14	Z2-15	Z1-21	Z1-24	Z1-27	Z1-29	Z1-30	Z1-32
岩性	Pyt-2	Pyt-2	Pyt-2	Pyt-2	Pyt-2	Pyt-2	Pyt-2	Pyt-2	Pyt-2	Gbr-3	Gbr-3	Gbr-3	Gbr-3	Gbr-3	Gbr-3
SiO ₂	46.35	46.27	47.27	46.55	46.68	46.76	46.64	46.16	47.46	47.22	49.56	52.58	51.81	51.13	51.66
Al ₂ O ₃	3.71	4.71	4.49	4.43	4.26	4.29	3.87	4.22	4.45	4.84	9.07	17.24	12.05	10.54	10.77
Fe ₂ O ₃	10.03	11.12	11.10	11.43	11.94	11.50	11.91	11.55	11.89	10.23	9.33	7.61	9.44	9.27	9.89
MgO	24.72	28.02	27.40	28.17	29.39	27.50	29.33	29.10	26.14	18.80	15.90	7.35	12.96	14.19	14.18
CaO	8.23	5.82	6.67	5.87	5.25	6.65	5.85	5.53	3.87	12.91	8.36	9.15	9.83	9.92	9.58
Na ₂ O	0.65	0.84	0.83	0.80	0.76	0.79	0.59	0.88	0.66	0.42	1.66	3.31	2.06	1.78	1.80
K ₂ O	0.12	0.24	0.22	0.21	0.22	0.18	0.13	0.24	0.16	0.09	1.32	0.62	0.29	0.35	0.32
MnO	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	0.13	0.12	0.11	0.15	0.15	0.15
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.13	0.16	0.05	0.07	0.05
TiO ₂	0.27	0.30	0.29	0.28	0.25	0.28	0.20	0.34	0.28	0.36	1.06	0.90	0.60	0.64	0.54
LOI	4.72	1.73	1.09	1.08	0.62	1.42	0.84	1.63	3.61	3.97	2.17	0.20	0.57	1.04	0.09
S	0.97	1.03	1.07	0.98	0.92	0.96	0.92	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.43	0.00
Rb	2.04	4.89	4.91	5.50	5.83	3.67	3.40	4.40	3.31	0.52	35.4	11.57	6.33	7.03	7.16
Ba	29.9	47.8	51.4	56.0	53.2	42.4	33.4	51.4	32.1	7.64	282	163	82.5	70.1	78.8
Th	0.35	0.41	0.55	0.51	0.53	0.49	0.36	0.54	0.46	1.07	2.01	1.01	0.55	0.66	0.65
U	0.15	0.20	0.21	0.19	0.20	0.19	0.15	0.23	0.17	0.32	0.80	0.37	0.23	0.30	0.29
Nb	0.46	0.62	0.75	0.61	0.74	0.73	0.46	0.81	0.66	1.13	3.11	2.22	1.06	1.14	0.99
Ta	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.03	0.06	0.05	0.09	0.23	0.16	0.08	0.08	0.07
Sr	59.8	82.3	95.0	79.4	88.6	85.7	78.8	88.7	62.7	52.4	157	353	256	200	214
Zr	18.4	21.8	26.3	21.5	23.1	24.0	16.8	27.7	21.8	59.6	92.9	38.8	36.8	43.1	53.0
Hf	0.52	0.61	0.73	0.61	0.63	0.67	0.48	0.77	0.58	1.52	2.48	1.16	1.07	1.18	1.28
Y	6.33	5.56	6.45	5.37	5.34	6.15	4.67	6.71	4.66	12.0	18.8	15.3	12.0	11.7	11.3
V	124	105	107	107	97.6	112	101	110	116	143	153	133	166	161	166
Cr	2121	2280	2310	2210	2229	2128	2313	2412	1961	2349	1484	241	673	927	805
Co	100	113	117	114	122	127	121	129	131	146	71.0	42.5	55.3	54.6	62.0
Ni	284	396	434	401	451	506	451	526	593	562	101	29.6	41.0	51.6	47.2
Cu	130	87.7	123	124	183	136	94.7	140	177	487	46.8	55.0	39.9	42.3	36.6
Zn	64.6	79.9	76.6	87.1	80.6	73.3	78.1	78.0	79.8	62.5	79.3	69.1	72.3	72.5	81.4
La	1.58	1.94	2.45	1.90	2.31	2.16	1.56	2.53	2.08	3.83	8.00	6.62	3.33	3.42	3.32
Ce	4.12	4.98	6.06	4.77	5.49	5.52	3.79	6.36	4.81	10.4	20.0	16.0	8.63	8.87	8.35
Pr	0.66	0.75	0.90	0.71	0.79	0.84	0.57	0.94	0.65	1.62	2.89	2.33	1.34	1.34	1.25
Nd	3.24	3.45	4.08	3.26	3.46	3.84	2.65	4.37	2.76	7.51	12.7	10.5	6.33	6.33	5.96
Sm	0.99	0.94	1.12	0.88	0.92	1.06	0.76	1.17	0.70	2.10	3.31	2.73	1.87	1.83	1.73
Eu	0.33	0.33	0.37	0.31	0.31	0.35	0.26	0.39	0.24	0.54	1.02	1.09	0.77	0.66	0.69
Gd	1.26	1.24	1.43	1.20	1.18	1.36	1.00	1.49	0.94	2.59	4.03	3.32	2.39	2.34	2.21
Tb	0.22	0.20	0.23	0.19	0.19	0.22	0.16	0.25	0.15	0.44	0.68	0.56	0.41	0.40	0.39
Dy	1.33	1.18	1.35	1.12	1.12	1.30	0.98	1.43	0.93	2.55	3.88	3.20	2.47	2.45	2.35
Ho	0.29	0.26	0.29	0.25	0.24	0.29	0.21	0.31	0.21	0.55	0.83	0.69	0.55	0.53	0.52
Er	0.78	0.71	0.79	0.68	0.67	0.76	0.60	0.82	0.60	1.47	2.28	1.85	1.49	1.44	1.42
Tm	0.11	0.10	0.12	0.10	0.10	0.11	0.09	0.12	0.09	0.22	0.33	0.27	0.22	0.22	0.21
Yb	0.71	0.65	0.72	0.63	0.63	0.71	0.56	0.76	0.62	1.31	2.07	1.72	1.37	1.34	1.36
Lu	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.09	0.12	0.10	0.20	0.31	0.26	0.22	0.22	0.21
δEu	0.90	0.94	0.90	0.92	0.91	0.89	0.91	0.90	0.91	0.71	0.86	1.11	1.12	0.98	1.08
(La/Yb) _N	1.60	2.14	2.44	2.16	2.63	2.18	2.00	2.39	2.41	2.10	2.77	2.76	1.74	1.83	1.75
ΣREE	15.7	16.8	20.0	16.1	17.5	18.6	13.3	21.1	14.9	35.3	62.3	51.2	31.4	31.4	30.0

注：LOI 为烧失量；岩性代号含义同图 1。

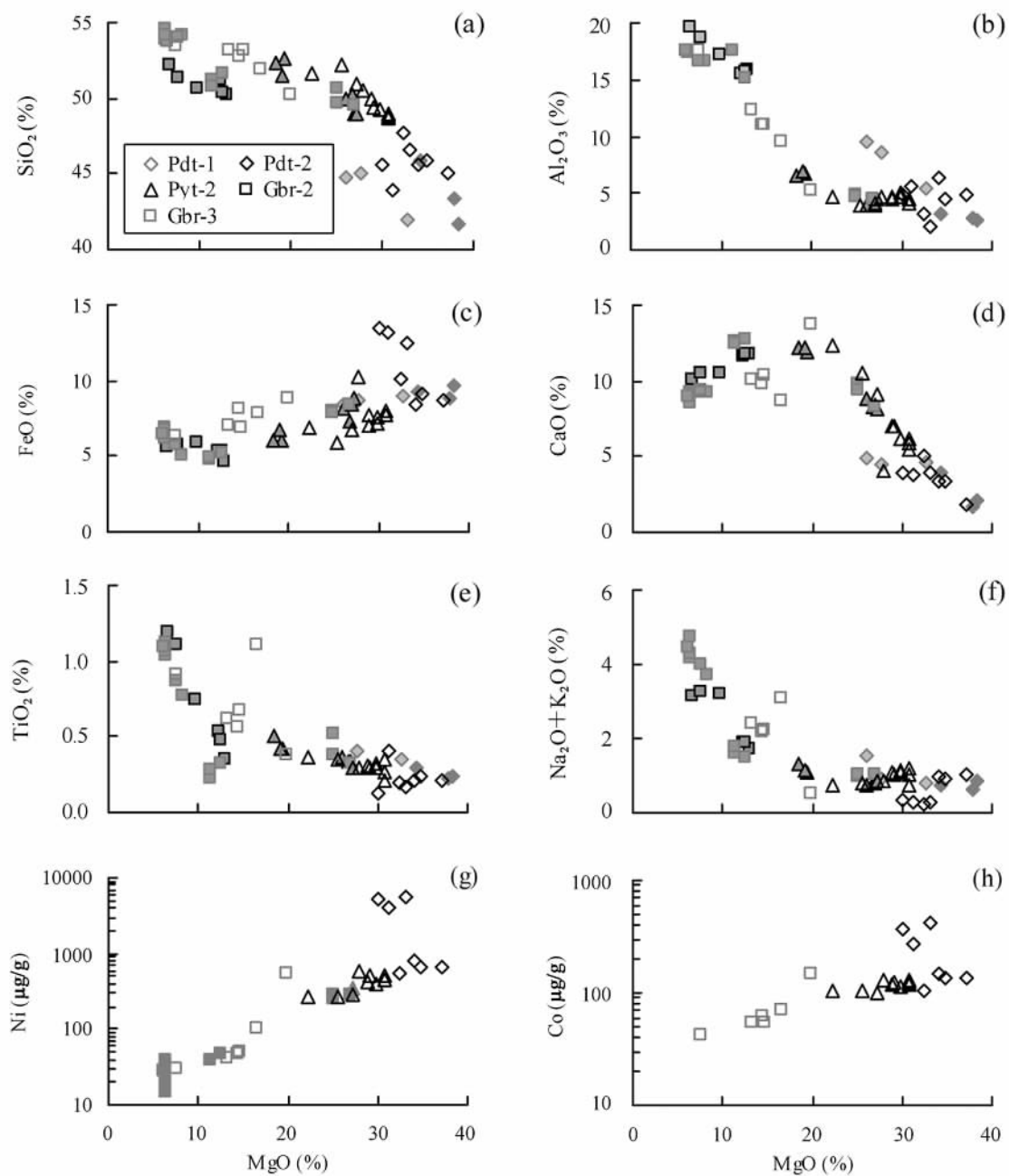


图 4 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体全岩 MgO 与其他元素相关性

Fig. 4 Plots of major element vs. MgO contents for different types of rock from the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion
实心图例数据来自文献 [17, 26, 28, 38], 岩性代号含义同图 1。

3.4 铂族元素

黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体铂族元素分析结果见表 3。岩体中部橄榄岩 (Pdt-2) 和辉石岩 (Pyt-2) 的铂族元素含量较低, Ir、Ru、Rh、Pt 和 Pd 分别介于 0.02 ~ 1.13、0.19 ~ 1.92、0.02 ~ 0.73、0.41 ~ 9.69 和 0.41 ~ 8.23 ng/g 之间, 且含硫化物样品中的铂族元素含量明显高于不含硫化物的样品。全岩铂族元素质量分数换算成 100% 硫化

物中的质量分数^[1]显示, Ir、Rh、Pt 和 Pd 随深度变化基本一致, 在 630 m (Z2) 和 440 ~ 470 m (Z1) 出现铂族元素峰值 (图 7), 与硫化物矿石产出深度相当。

铂族元素原始地幔标准化分布模式见图 8, 分布曲线基本平行。与原始地幔相比, 表现为 PPGE (Rh、Pt、Pd) 富集, 部分 IPGE (Os、Ir、Ru) 亏损, 与 Voisey's Bay 铜镍硫化物矿床铂族元素分布模式相似, 元素丰度低于 Sudbury、Noril'sk 和金川等超大型岩浆铜镍硫化物矿床。

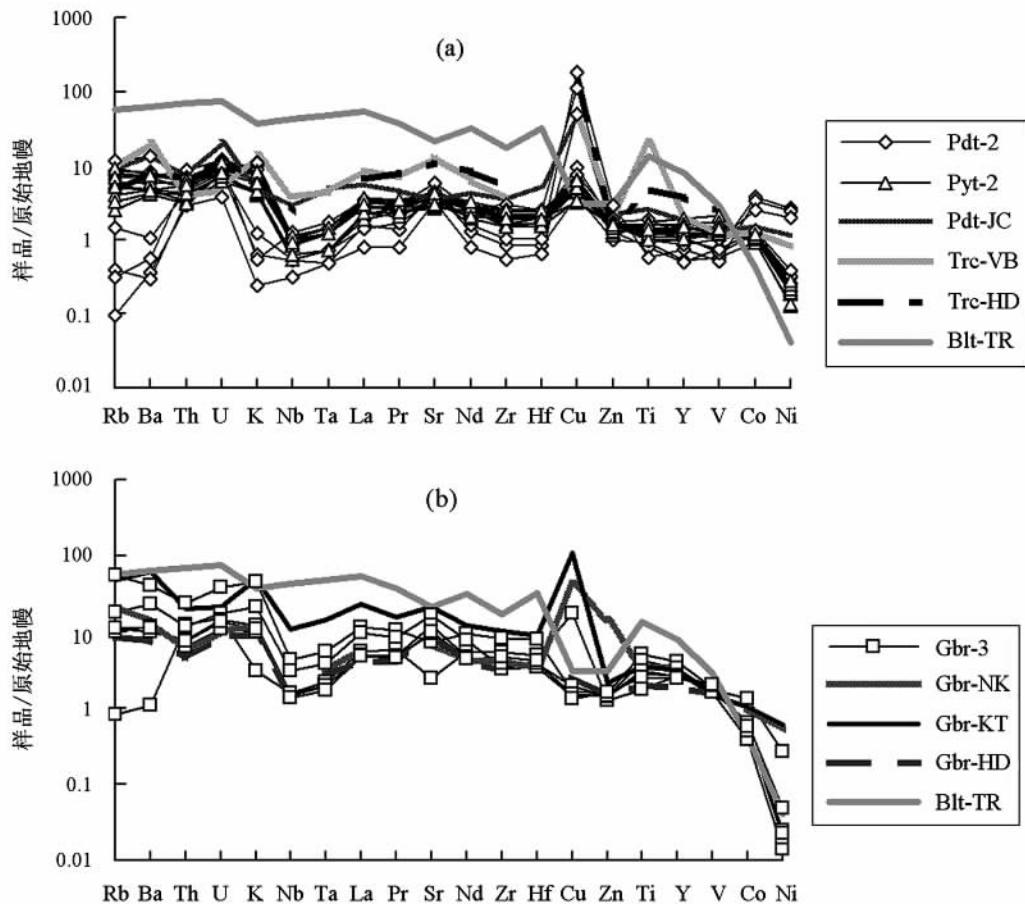


图5 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体微量元素原始地幔标准化分布模式

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element patterns of the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion (primitive mantle data from [40])

Trc - 橄长岩; Blt - 玄武岩; JC - 金川^[12]; VB - Voisey's Bay^[41]; HD - 黄山东^[26]; NK - Noril'sk^[42]; KT - 喀拉通克^[12]; TR - 塔里木盆地^[43]; 其余代号含义同图1。原始地幔数据引自文献[40], 以下同。

黄山含矿镁铁-超镁铁质岩体的 $\text{Cu}/(\text{Ni} + \text{Cu})$ 、 $\text{Pt}/(\text{Pt} + \text{Pd})$ 和 $(\text{Pt} + \text{Pd})/(\text{Os} + \text{Ir} + \text{Ru})$ 比值依次为 $(0.11 \sim 0.65)$ 、 $(0.20 \sim 0.68)$ 和 $(1.73 \sim 11.1)$, 与拉斑玄武岩成因岩浆矿床的变化范围 (分别是 $0.25 \sim 0.59$ 、 $0.28 \sim 0.72$ 和 $5.70 \sim 55.6$) 一致^[49]。 Cu/Pd 比值变化范围在 $1.08 \times 10^5 \sim 35.3 \times 10^5$ 之间, 平均为 14.2×10^5 , Ti/Pd 比值变化范围在 $7.15 \times 10^5 \sim 54.2 \times 10^5$ 之间 (样品 Z1-13 除外), 大于原生地幔岩浆 ($\text{Cu}/\text{Pd} = 6500$, $\text{Ti}/\text{Pd} = 3 \times 10^5$)^[50]。

4 讨论

4.1 不同侵位期次岩石地球化学特征

黄山铜镍硫化物矿床镁铁-超镁铁质岩体岩相分异良好, 根据岩石空间分布、接触关系和岩性特征可以分成三套岩石组合: 顶部橄榄岩、中部基性-超

基性岩序列和底部辉长岩, 与慕纪录^[17]所划分的早、中和晚三期岩浆侵位相对应。三套岩石在主元素和微量元素地球化学特征方面明显不同。

顶部橄榄岩与下伏中部辉长岩呈突变接触。在 MgO 与氧化物相关图中, 顶部橄榄岩与中部橄榄岩主要氧化物含量变化呈现不同趋势 (在 MgO 约 28% 处), 且较中部橄榄岩偏基性, 具有相对高 Mg 、 Al 和 Ca 的特征 (图 4)。

中部橄榄岩、辉石岩、辉长岩和闪长岩的基性-超基性岩序列, 各岩石类型之间呈渐变岩浆结晶接触关系。中部橄榄岩和辉石岩的微量元素和稀土元素原始地幔分布模式与底部辉长岩相似, 但富集程度明显低于底部辉长岩 (图 5, 图 6)。在中部辉长岩中偶包含有顶部橄榄岩碎块^[32], 岩体中部基性-超基性岩岩浆侵位晚于顶部橄榄岩。

底部辉长岩与上覆橄榄岩呈突变接触, 两者在 MgO 与氧化物相关图中, 主要氧化物含量变化不连

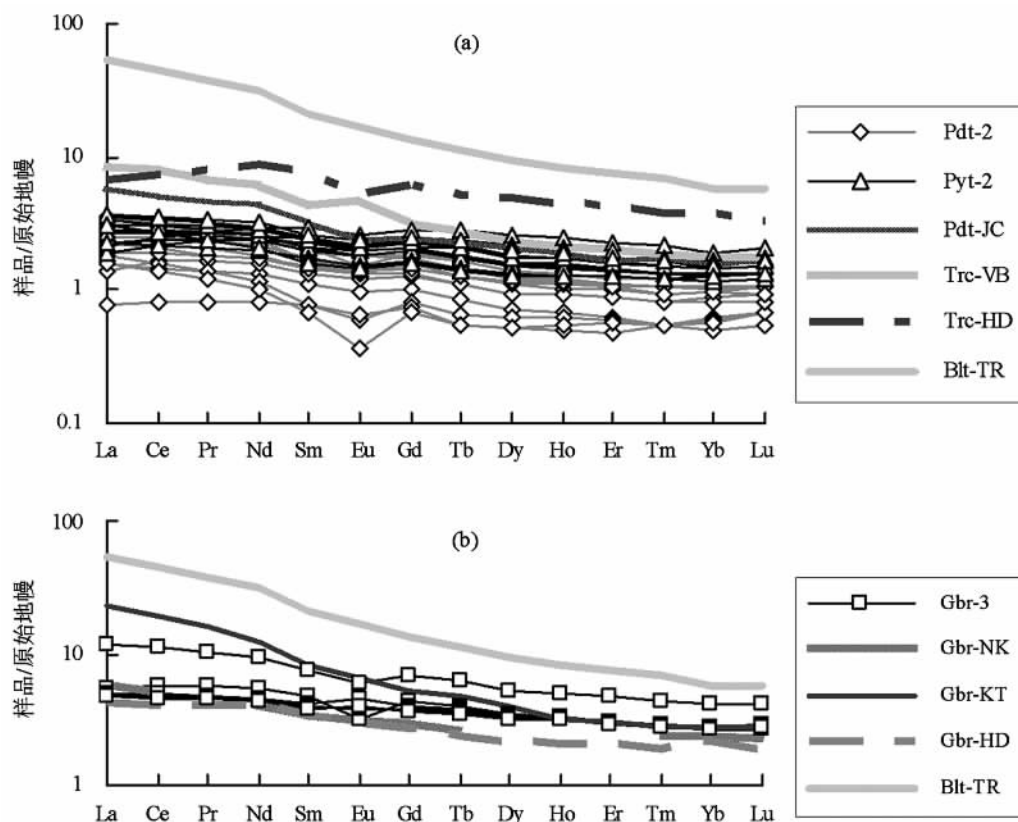


图 6 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁质岩体稀土元素分布模式图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized REE patterns of the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion
图中代号含义同图 5。

表 3 黄山铜镍硫化物矿床 PGE 元素分析结果 (ng/g)

Table 3 Compositions of PGE from the Huangshan Cu-Ni sulfide deposit (ng/g)

编号	Z1-1	Z1-7	Z1-10	Z1-13	Z1-14	Z1-16	Z1-17	Z2-20	Z2-22	Z2-28	Z2-9	Z2-13	HS-1
岩性	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pdt-2	Pyt-2	Pyt-2	Pyt-2
Os	1.41	0.31	0.15	0.41	0.34	0.30	0.35	0.08	0.63	2.06	0.11	0.05	0.09
Ir	1.04	0.2	0.06	0.19	0.13	0.04	0.15	0.02	0.21	1.13	0.05	0.04	<0.02
Ru	0.98	0.30	0.19	0.61	0.32	0.24	0.50	0.35	0.58	1.92	0.51	0.36	0.19
Rh	0.73	0.24	0.06	0.16	0.12	0.05	0.11	0.03	0.17	0.57	0.02	0.03	0.02
Pt	2.06	3.37	3.02	5.94	1.26	0.54	3.99	0.52	4.94	9.69	0.55	0.41	0.49
Pd	8.23	2.10	1.43	4.60	2.19	0.84	2.38	0.59	3.46	6.68	0.61	0.52	0.41
Pd/Ir	7.91	10.5	23.8	24.2	16.8	21.0	15.9	29.5	16.5	5.91	12.2	13.0	-
Pt/(Pt + Pd)	0.20	0.62	0.68	0.56	0.37	0.39	0.63	0.47	0.59	0.59	0.47	0.44	0.54
Ti/Pd ($\times 10^5$)	-	-	7.26	1.63	-	-	-	21.2	7.15	-	25.8	24.6	54.2
Cu/Pd ($\times 10^5$)	12.6	28.0	35.3	10.1	19.2	27.0	15.1	5.02	10.5	14.9	1.08	1.25	4.29
Cu/(Ni + Cu)	0.11	0.12	0.22	0.52	0.36	0.41	0.47	0.41	0.46	0.65	0.73	0.59	0.51
(Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru)	3.00	6.75	11.1	8.71	4.37	2.38	6.37	2.47	5.92	3.20	1.73	2.07	-

注：岩性代号含义同图 1。

续 (图 4)。底部辉长岩与中部辉长岩相较具有更高的 SiO_2 和 FeO 及较低的 CaO ，并在 MgO 含量 13% 左右各主要氧化物含量变化也呈现不同趋势 (图 4)。在底部辉长岩与中部橄榄岩接触带中，局部辉长岩穿插橄榄岩^[32]，暗示底部辉长岩岩浆侵位晚于中部基性 - 超基性岩岩浆。

4.2 成矿岩浆类型

黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁质岩体中不同期次或不同岩性岩石的主元素和微量元素特征指示岩浆来自同一源区。岩体主元素随 MgO 含量整体呈连续变化趋势 (图 4)；不同类型岩石的微量

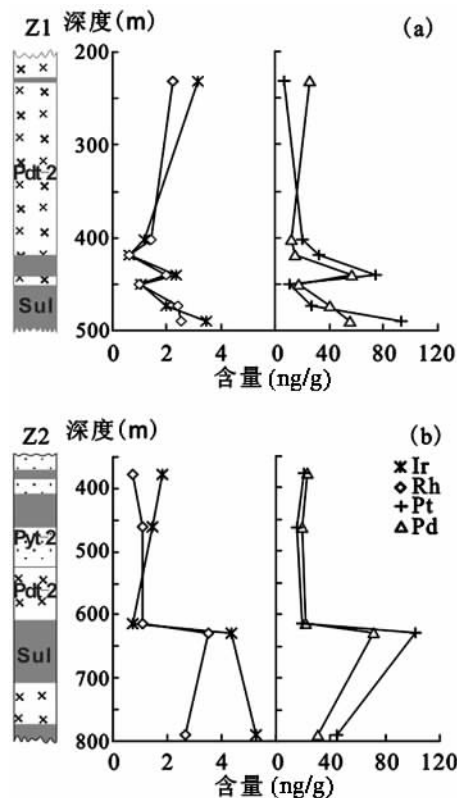


图 7 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁质岩体
100% 硫化物 PGE 特征

Fig. 7 Plots of Ir, Rh, Pt and Pd contents normalized 100% sulfide varied with depths (m) in the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion
Sul 代表硫化物, 其他代号含义同图 1。

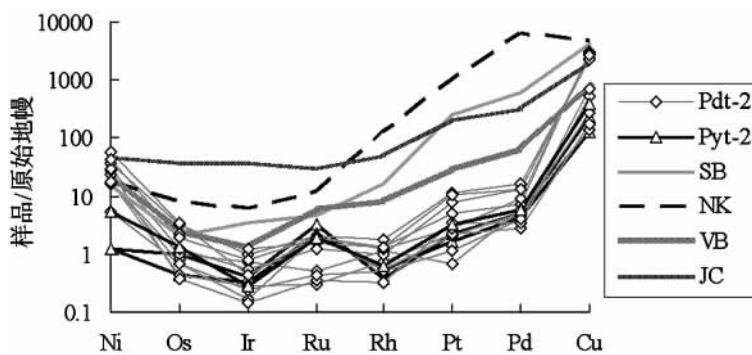


图 8 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁质岩体
100% 硫化物 PGE 原始地幔标准化分布模式图

Fig. 8 Primitive mantle-normalized patterns of PGE normalized 100% sulfides of the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion
SB - Sudbury^[1]; NK - Noril'sk^[1]; VB - Voisey's Bay^[1]; JC - 金川^[48]; 其余代号含义同图 1。

和稀土元素分布模式相似, 丰度随岩石基性程度的降低而升高, 且微量元素比值对 Ta/Yb 与 Nb/Y、Zr/Nb 与 Hf/Nb 均具有很强的相关性(图 9)。由于 Ta/Yb、Nb/Y、Zr/Nb 与 Hf/Nb 分配系数相近的不

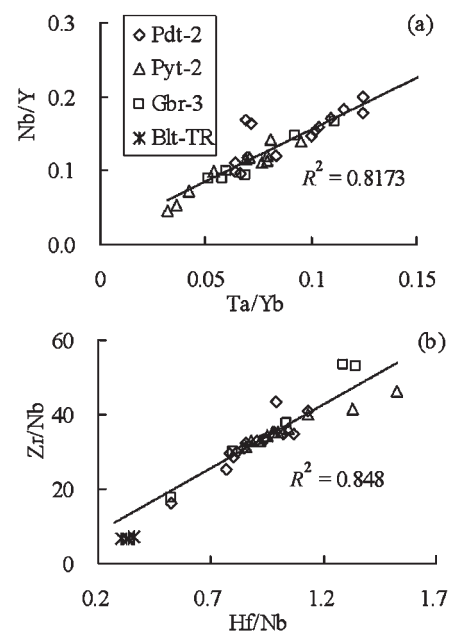


图 9 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁岩体
Nb/Y-Ta/Yb 和 Zr/Nb-Hf/Nb 相关图

Fig. 9 Diagrams of Nb/Y vs. Ta/Yb and Zr/Nb vs. Hf/Nb for the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion
图中代号含义同图 5。

相容元素对比值受分离结晶和部分熔融作用影响较小, 在 Nb/Y-Ta/Yb 和 Zr/Nb-Hf/Nb 图解中同一地幔源区样品分布在同一相关线上^[51]。黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁质岩体 Zr/Nb 和 Hf/Nb 比值分布于相关系数较高的趋势线上(图 9b), 即不同期次或不同岩性岩石可能为同源岩浆产物, 塔里木盆地早 - 中二叠世玄武岩样品^[43]的相关比值接近于趋势线。

黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁 - 超镁铁岩体橄榄岩微量元素具有近平坦的原始地幔标准化分布模式(图 5); 分配系数接近 1 的微量元素(如 Zn 等)丰度略高于原始地幔。不同性质的岩浆在 Cu/(Ni + Cu)、Pt/(Pt + Pd) 和 (Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru) 比值方面有所差异, 可用来指示岩浆矿床成矿岩浆的性质^[2]。黄山镁铁 - 超镁铁质岩体

Cu/(Ni + Cu) 比值 (0.11 ~ 0.65)、Pt/(Pt + Pd) 比值 (0.20 ~ 0.68) 和 (Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru) 比值 (1.73 ~ 11.1) 与拉斑玄武岩成因岩浆矿床的变化范围 (分别为 0.25 ~ 0.59, 0.28 ~ 0.72 和 5.7 ~ 55.6)

一致, 高于科马提岩岩浆矿床的变化范围 (分别为 0.04 ~ 0.06, 0.36 ~ 0.38 和 0.44 ~ 3.50) [49, 52], 黄山含矿岩体成母岩浆为玄武质岩浆。

黄山含矿岩体的地球化学特征表明母岩浆来源于地幔, 由于侵入体周围缺乏冷凝边和与岩浆侵入通道有密切关系的镁铁质岩墙, 对母岩浆成分缺乏直接约束。橄榄岩具有橄榄石堆晶结构, 主元素变化特征也显示橄榄石对岩石成分具有控制作用, 根据橄榄石-熔体平衡原理, 利用橄榄石和全岩主要氧化物组成进行母岩浆 MgO 含量的估算 [53]: 黄山含矿岩体中橄榄石 MgO 含量最高的 Fo 值为 85.94, 与其共存熔体的 MgO/FeO 质量比为 0.7680 ($K_D^{Ol-Melt} = 0.3 \pm 0.03$ [54]), 结合橄榄石堆晶岩中 MgO 和 FeO 含量, 推算出该岩体母岩浆含有 15% 的 MgO, 即黄山含矿岩体母岩浆可能是来自地幔的高 MgO 玄武质岩浆。这与黄山样品 Pd/Ir 与 Ni/Cu 比值位于高 MgO 玄武岩区 (图 10) 的结论一致。样品 Pd/Ir < 100 可排除后期变质热液交代作用的影响 [50]。

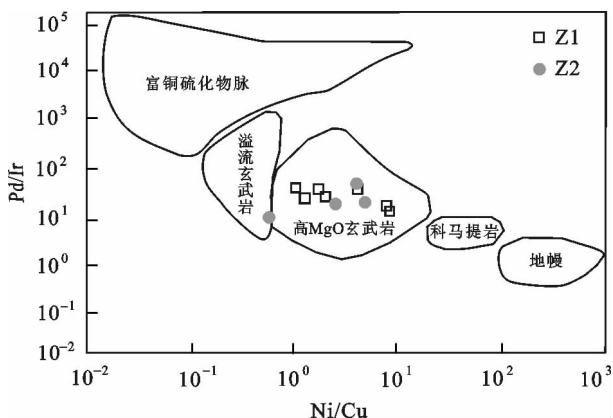


图 10 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体 Pd/Ir-Ni/Cu 特征 (图据 Chai *et al.* [53])

Fig. 10 Diagram of Pd/Ir vs. Ni/Cu in the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion

4.3 岩浆演化作用

岩浆在上升侵位过程中可能经历结晶分异、同化混染或岩浆混合作用的影响而改变组成。上述主元素、微量元素证据表明黄山含矿岩体不同类型岩石为同源岩浆演化的产物, 因此岩浆混合作用在黄山铜镍硫化物矿床成矿玄武质岩浆上升演化过程中对岩浆演化影响较小。

在岩浆结晶分异过程中, 橄榄石组成受母岩浆成分、岩浆结晶分异、填隙硅酸盐与硫化物熔体的准固相反应以及后期蚀变等因素的控制。早期堆晶橄

榄石的组分可能受圈闭硅酸盐或硫化物熔体平衡作用改造, 使橄榄石中 Fo-Ni 相关性不明显, 甚至呈负相关 [1, 36, 55, 56]。岩体含硫化物样品中橄榄石的 Fo 值与 Ni 含量的弱相关性或负相关性可能与橄榄石和硫化物熔体之间的 Fe、Ni 交换反应有关。低硫样品中橄榄石的 Fo 值与 Ni 含量呈正相关关系 (图 3), 表明岩浆演化过程中存在橄榄石结晶分异作用。橄榄岩、辉石岩及部分辉长岩表现为 δEu 负异常, 表明成矿岩浆可能经历深部岩浆房斜长石分离结晶作用。

黄山含矿岩体不同岩石类型微量元素原始地幔标准化分布模式指示亏损 Nb 和 Ta, 富集 Sr, 橄榄岩亏损 Ti (图 5), 以及大量斜方辉石 (30% ~ 40%) 的出现 [32] 均指示存在地壳物质的混染。Sm/Nd 和 Nb/Ta 分别为 0.21 ~ 0.34、10.67 ~ 19.00, 介于原始地幔值 (0.33, 17.83) [40] 和地壳值 (0.17, 0.83) [57-58] 之间, 且 Th/Nb、Th/Ta 和 La/Nb 平均值分别为 0.63、9.62 和 3.47, 具有大陆地壳特征, Ir/Pd 和 Pt/Pd 几乎全部位于幔源与壳源之间 (图 11) [59]。黄山铜镍硫化物矿床成矿玄武质岩浆在上升演化过程中可能经历了岩浆结晶分异作用和同化混染作用。

4.4 成矿作用

岩浆铜镍硫化物矿床成矿作用主要是地幔硅酸盐岩浆中的硫化物与硅酸盐岩浆熔离, 促使亲铜元素在硫化物熔体中富集, 成矿的关键是岩浆中的硫

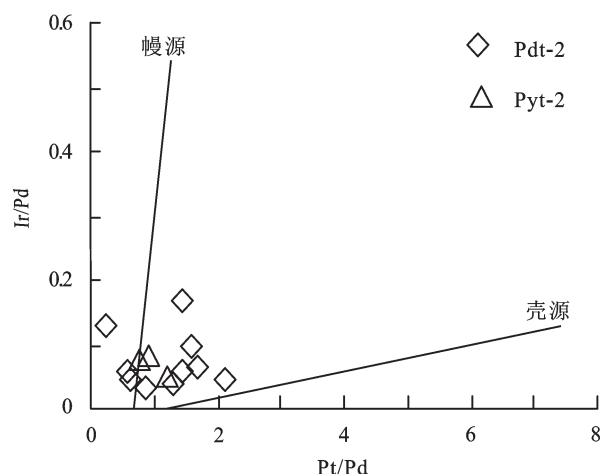


图 11 黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体 Ir/Pd-Pt/Pd 特征 (底图据 Jiang *et al.* [59])

Fig. 11 Diagram of Pt/Pd vs. Ir/Pd for the Huangshan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion
图中代号含义同图 1。

达到饱和。但硅酸盐岩浆中硫的溶解度与压力负相关,因此由上地幔部分熔融形成的基性岩浆在上侵过程中,其硫化物含量将由饱和趋向于不饱和。一般认为通过以下五种方式可使岩浆中的硫达到饱和^[36, 41, 55, 60]:(1)快速冷却:随温度降低,硫的溶解度也降低,硫进入饱和区;(2)岩浆混合:两种或两种以上成分差异较大的岩浆混合,改变硫的饱和曲线,使硫进入饱和区,形成不混溶的硫化物;(3)岩浆分离结晶:镁铁-超镁铁质岩浆随橄榄石、辉石等造岩矿物大量晶出,岩浆中硫浓度不断提高,从而达到饱和;(4)外来硫的加入:富含硫的围岩被岩浆同化,增加岩浆硫含量,使硫达到饱和;(5)岩浆与富Si的围岩同化混染:富含SiO₂物质的加入可以降低岩浆中硫的溶解度。

黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁岩体分异较好,中部岩段具有橄榄岩-辉石岩-辉长岩-闪长岩完整的岩浆结晶序列,微量元素组成特征揭示不同岩性不同期次的岩石具有同源性,因此岩浆快速冷凝、岩浆混合等因素在黄山成矿作用过程中影响较低。岩体中部橄榄岩、辉石岩和辉长岩具有大量的橄榄石和辉石堆积晶,且矿体主要赋存在岩体中部橄榄岩中,局部橄榄岩的橄榄石中含有硫化物珠滴,显示硫化物熔离作用发生在橄榄石结晶时或结晶前,表明岩浆分离结晶不是硫化物熔离的控制因素。黄山含矿岩体亏损Nb和Ta(图5),Sm/Nd和Nb/Ta比值介于原始地幔与地壳之间,以及大量斜方辉石(30%~40%)的出现等揭示岩浆演化过程中受到地壳物质混染,地壳富硅组分的加入可能是引发硫化物熔离的重要因素。

黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁岩体Cu/Pd($1.08 \times 10^5 \sim 35.3 \times 10^5$)和Ti/Pd($7.15 \times 10^5 \sim 54.2 \times 10^5$)大于原生地幔岩浆(Cu/Pd=6500, Ti/Pd= 3×10^5)^[50],证实岩浆经历了硫化物熔离作用。中部橄榄岩部分橄榄石含有硫化物珠滴,表明成矿岩浆携带有早期熔离的硫化物,岩浆可能存在深部熔离作用。

5 结 论

(1)黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体三次岩浆侵位形成的岩体具有不同的主元素和微量元素等岩石地球化学特征。顶部橄榄岩较中部橄榄岩偏基性,含有相对较高的Mg、Al和Ca;中部橄榄岩和辉石岩的大离子亲石元素和稀土元素丰度

明显低于底部辉长岩,且与成矿密切相关。底部辉长岩与中部辉长岩相比偏酸性,具有较高的FeO和较低的CaO。

(2)黄山铜镍硫化物矿床不同期次不同岩性的岩石具有同源特征,其母岩浆可能是来自地幔的高MgO(15%)玄武质岩浆,在岩浆作用过程中经历了岩浆结晶分异作用和地壳混染作用。

(3)黄山铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩岩浆在深部熔离了部分硫化物。促使硫饱和与硫化物熔离的主要因素可能是地壳富硅组分的加入。

工作得到国家自然科学基金(40534020, 40772058, 40873005和40273009)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-04-0980)、国家科技支撑计划项目(2006BAB01B08, 2006BAB01A01)的资助;钱壮志、姜常义、孟广路、陶琰和何克参与了样品的采集和实验分析工作;印第安纳大学Edward M. Ripley和Chusi Li教授在野外考察、实验分析和论文撰写等方面给予了全面指导;两位审稿人提出了建设性意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] Barnes S-J, Lightfoot P C. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents [M]//Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, Richards J P. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists One Hundredth Anniversary Volume 1905-2005. Littleton: Society of Economic Geologists, 2005: 179-214.
- [2] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物矿床模式及地质特征对比 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 14-209.
Tang Zhong-li, Li Wen-yuan. Metallogenic Model of Jinchuan Cu-Ni Deposit and Geological Characteristics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 14-209 (in Chinese).
- [3] Naldrett A J. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 1-668.
- [4] Barnes S-J, Couture J F, Sawyer E W, Bouchaib C. Nickel-copper occurrences in the Belleterre-Angliers Belt of the Pontiac Subprovince and the use of Cu-Pd ratios in interpreting platinum-group element distributions[J]. Econ Geol, 1993, 88(6): 1402-1418.
- [5] Hu Pei-qing, Zhang Ming-jie, Tang Zhong-li, Li Chu-si, Wang Ji-zhou. Chemical and stable isotopic compositions of volatiles in mantle peridotites of the Yushigou ophiolite in Qilian orogenic belt, western China[J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(1): 169-176.
- [6] Zhang Ming-jie, Hu Pei-qing, Zheng Peng, Wang Xian-bin, Li Li-wu. The occurrence modes of H₂ in mantle-derived rocks[M]//Mao J, Bierlein F P. Mineral Deposit Research, Chapter 1-19.

- New York: Springer, 2005: 73 – 76.
- [7] Zhang Mingjie, Hu Peiqing, Niu Yaoling, Su Shangguo. Chemical and stable isotopic constraints on the nature and origin of volatiles in the sub-continental lithospheric mantle beneath eastern China [J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2): 55 – 66.
- [8] 张铭杰, 王先彬, 李立武. 地幔流体组成 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 401 – 412.
- Zhang Ming-jie, Wang Xian-bin, Li Li-wu. Composition of mantle fluid [J]. *Earth Sci Front*, 2000, 7(2): 401 – 412 (in Chinese with English abstract).
- [9] 毛景文, Pirajno F, 张作衡, 柴凤梅, 杨建民, 吴华, 陈世平, 程松林, 张长青. 天山 - 阿尔泰东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床: 主要特点及可能与地幔柱的关系 [J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 925 – 942.
- Mao Jing-wen, Pirajno F, Zhang Zuo-heng, Chai Feng-mei, Yang Jian-min, Wu Hua, Chen Shi-ping, Cheng Song-lin, Zhang Chang-qing. Late variscan post-collisional Cu-Ni sulfide deposits in east Tianshan and Altay in China: Principal characteristics and possible relationship with mantle plume [J]. *Acta Geol Sinica*, 2006, 80(7): 925 – 942 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪 [J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461 – 469.
- Wang Jing-bin, Wang Yu-wang, He Zhi-jun. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China [J]. *Geol China*, 2006, 33(3): 461 – 469 (in Chinese with English abstract).
- [11] 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 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 – 330.
- Mao Jing-wen, Yang Jian-min, Qu Wen-jun, Du An-dao, Wang Zhi-liang, Han Chun-ming. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance [J]. *Mineral Deposit*, 2002, 21(4): 323 – 330 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 何立新, 何永胜, 周刚. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(3): 217 – 224.
- Zhang Zhao-chong, Yan Sheng-hao, Chen Bai-lin, He Li-xin, He Yong-sheng, Zhou Gang. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit [J]. *Acta Petrol Mineral*, 2003, 22(3): 217 – 224 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 何立新, 何永胜, 周刚, 柴凤梅. 阿尔泰造山带南缘镁铁质 - 超镁铁质杂岩体的 Sr、Nd、O 同位素地球化学及其源区特征探讨 [J]. *地质论评*, 2006, 52(1): 38 – 42.
- Zhang Zhao-chong, Yan Sheng-hao, Chen Bai-lin, He Li-xin, He Yong-sheng, Zhou Gang, Chai Feng-mei. Sr, Nd and O isotope geochemistry of the mafic-ultramafic complexes in the south margin of Altay orogenic belt and discussion on their sources [J]. *Geol Rev*, 2006, 52(1): 38 – 42 (in Chinese with English abstract).
- [14] 韩宝福, 李建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁 - 超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *科学通报*, 2004, 49(22): 2324 – 2328.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Li Zonghuai. Zircon SHRIMP U-Pb age and geology of Kalatongke-Huangshan mafic-ultramafic complex, Xinjiang, China [J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(22): 2324 – 2328 (in Chinese).
- [15] 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 张招崇, 闫升好, 杨建民, 屈文俊, 王志良. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(4): 285 – 293.
- Zhang Zuo-heng, Chai Feng-mei, Du An-dao, Zhang Zhao-chong, Yan Sheng-hao, Yang Jian-min, Qu Wen-jun, Wang Zhi-liang. Re-Os dating and ore-forming material tracing of the Karatungk Cu-Ni sulfide deposit in northern Xinjiang [J]. *Acta Petrol Mineral*, 2005, 24(4): 285 – 293 (in Chinese with English abstract).
- [16] 毛景文, 杨建民, 韩春明, 王志良. 东天山铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型 [J]. *地球科学*, 2002, 27(4): 413 – 424.
- Mao Jing-wen, Yang Jian-min, Han Chun-min, Wang Zhi-liang. Metallogenic systems of polymetallic copper and gold deposits and related metallogenic geodynamic model in eastern Tianshan, Xinjiang [J]. *Earth Sci*, 2002, 27(4): 413 – 424 (in Chinese with English abstract).
- [17] 慕纪录. 新疆哈密黄山铜镍矿床中浅富矿体特征及形成机制 [J]. *矿物岩石*, 1996, 16(1): 58 – 67.
- Mu Ji-lu. On the characteristics and forming mechanism of the rich and shallow-seated ores in the Huangshan copper-nickel deposit Hami, Xinjiang [J]. *J Mineral Petrol*, 1996, 16(1): 58 – 67 (in Chinese with English abstract).
- [18] 韩春明, 肖文交, 崔彬, 毛启贵, 张继恩, 敖松坚. 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 Chun-ming, Xiao Wen-jiao, Cui Bin, Mao Qi-gui, Zhang Ji-en, Ao Song-jian. Major types and characteristics of Late Paleozoic copper deposits in north Xinjiang, northwest China [J]. *Acta Geol Sinica*, 2006, 80(1): 74 – 89 (in Chinese with English abstract).
- [19] 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究 [J]. *新疆地质*, 2002, 20(4): 302 – 308.
- Qin Ke-zhang, Fang Tong-hui, Wang Shu-lai, Zhu Bao-qing, Feng Yi-min, Yu Hai-feng, Xiu Qun-ye. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains, NW-China [J]. *Xinjiang Geol*, 2002, 20(4): 302 – 308 (in Chinese with English abstract).
- [20] 吴华, 李华芹, 莫新华, 陈富文, 路远发, 梅玉萍, 邓岗. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性 - 超基性岩的形成时代及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2005, 79(4): 498 – 502.
- Wu Hua, Li Hua-qin, Mo Xin-hua, Chen Fu-wen, Lu Yuan-fa, Mei Yu-ping, Deng Gang. Age of the Baishiquan mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance [J]. *Acta Geol Sinica*, 2005, 79(4): 498 – 502 (in Chinese with English abstract).
- [21] 孙赫, 秦克章, 李金祥, 徐兴旺, 三金柱, 丁奎首, 惠卫东, 许英霞. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球

- 化学特征及其形成的构造背景 [J]. 中国地质, 2006, 33(3): 606 – 617.
- Sun He, Qin Ke-zhang, Li Jin-xiang, Xu Xing-wang, San Jin-zhu, Ding Kui-shou, Hui Wei-dong, Xu Ying-xia. Petrographic and geochemical characteristics of the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide deposit, East Tianshan, Xinjiang, and its tectonic setting [J]. Geol China, 2006, 33(3): 606 – 617 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王京彬, 徐新. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿 [J]. 地质学报, 2006, 80(1): 23 – 31.
- Wang Jing-bin, Xu Xin. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China [J]. Acta Geol Sinica, 2006, 80(1): 23 – 31 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 方同辉. 新疆哈密黄山地区铜镍硫化物矿床的稀土元素特征及意义 [J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 935 – 948.
- Wang Yu-wang, Wang Jing-bin, Wang Li-juan, Fang Tong-hui. REE characteristics of Cu-Ni sulfide deposits in the Hami area, Xinjiang [J]. Acta Petrol Sinica, 2004, 20(4): 935 – 948 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 林文蔚. 新疆北部 Cu-Ni-(PGE)硫化物矿床成矿系列探讨 [J]. 矿床地质, 2000, 19(2): 147 – 155.
- Wang Deng-hong, Chen Yu-chuan, Xu Zhi-gang, Lin Wen-wei. Cu-Ni-(PGE) sulfide metallogenic series in north Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2000, 19(2): 147 – 155 (in Chinese with English abstract).
- [25] Zhang Chuanlin, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ye Hai-min, Li Chang-nian. A Permian layered intrusive complex in the western Tarim Block, northwestern China: Product of a ca. 275-Ma mantle plume? [J]. J Geol, 2008, 116(3): 269 – 287.
- [26] Zhou Mei-Fu, Leshner C M, Yang Zhengxi, Li Jianwei, Sun Min. 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]. Chem Geol, 2004, 209(3/4): 233 – 257.
- [27] 钟应先. 新疆黄山杂岩体矿物学特征及其意义 [J]. 矿物岩石, 1991, 11(1): 14 – 23.
- Zhong Ying-xian. Mineralogical character and significance of Huangshan complex in Xinjiang [J]. J Mineral Petrol, 1991, 11(1): 14 – 23 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王润民, 刘德权, 殷定泰. 新疆哈密土墩 - 黄山一带铜镍硫化物矿床成矿控制条件及找矿方向的研究 [J]. 矿物岩石, 1987, 7(1): 1 – 152.
- Wang Run-min, Liu De-quan, Ying Ding-tai. The conditions of controlling metallogeny of Cu, Ni sulphide ore deposits and the orientation of looking for ore Hami, Xinjiang, China [M]. J Mineral Petrol, 1987, 7(1): 1 – 152 (in Chinese with English abstract).
- [29] Liu Wei, Fei Pan Xiao. 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 Planet Sci Lett, 2006, 242(3/4): 286 – 301.
- [30] 陈世平, 王登红, 屈文俊, 陈郑辉, 高晓理. 新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿时代 [J]. 新疆地质, 2005, 23(3): 230 – 233.
- Chen Shi-ping, Wang Deng-hong, Qu Wen-jun, Chen Zheng-hui, Gao Xiao-li. Geological features and ore formation of the Hulu Cu-Ni sulfide deposit, eastern Tianshan, Xinjiang [J]. Xinjiang Geol, 2005, 23(3): 230 – 233 (in Chinese with English abstract).
- [31] 李勇, 苏文, 孔屏, 钱一雄, 张克银, 张明利, 陈跃, 蔡习尧, 尤东华. 塔里木盆地塔中 - 巴楚地区早二叠世岩浆岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 [J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 1097 – 1107.
- Li Yong, Su Wen, Kong Ping, Qian Yi-xiong, Zhang Ke-yin, Zhang Ming-li, Chen Yue, Cai Xi-yao, You Dong-hua. Zircon U-Pb ages of the Early Permian magmatic rocks in the Tazhong-Bachu region, Tarim basin by LA-ICP-MS [J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(5): 1097 – 1107 (in Chinese with English abstract).
- [32] 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 廖静娟, 严正富, 杨浩, 王金珠. 造山带环境中的东疆型镁铁 - 超镁铁杂岩 [J]. 岩石学报, 1994, 10(4): 339 – 356.
- Gu Lian-xing, Zhu Jian-lin, Guo Ji-chun, Liao Jing-juan, Yan Zheng-fu, Yan Hao, Wang Jin-zhu. The east Xinjiang-type mafic-ultramafic complexes in orogenic environments [J]. Acta Petrol Sinica, 1994, 10(4): 339 – 356 (in Chinese with English abstract).
- [33] Dick H J B, Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas [J]. Contrib Mineral Petrol, 1984, 86(1): 54 – 76.
- [34] Li Chusi, Xu Zhanghua, de Waal S A, Ripley E M, Maier W D. Composition variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China [J]. Miner Deposita, 2004, 39(2): 159 – 172.
- [35] Dick H J B, Natland J H. Late-stage melt evolution and transport in the shallow mantle beneath the East Pacific Rise [C]. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 1996, 147: 103 – 134.
- [36] Li Chusi, Maier W D, de Waal S A. Magmatic Ni-Cu versus PGE deposits: Contrasting genetic controls and exploration implications [J]. S Afr J Geol, 2001, 104(4): 309 – 318.
- [37] Tao Yan, Li Chusi, Song Xieyan, Ripley E M. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China [J]. Miner Deposita, 2008, 43(8): 849 – 872.
- [38] 曾昭祥. 新疆哈密黄山铜镍硫化物矿床地质特征 [J]. 新疆地质, 1991, 9(4): 291 – 306.
- Zeng Zhao-xiang. Geologic characteristics of Huangshan Cu-Ni sulphide deposit in Hami, Xinjiang [J]. Xinjiang Geol, 1991, 9(4): 291 – 306 (in Chinese with English abstract).
- [39] Ringwood A E. Composition and Petrology of the Earth's Mantle [M]. New York: McGraw-Hill, 1975: 20 – 109.
- [40] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [M] // Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean

- Basins. *Geol Soc Spec Publ* 42, 1989: 313 – 345.
- [41] Li Chusi, Lightfoot P C, Amelin Y, Naldrett A J. Contrasting petrological and geochemical relationships in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada: Implications for ore genesis[J]. *Econ Geol*, 2000, 95(4): 771 – 799.
- [42] Arndt N T, Czamanske G K, Walker R J, Chauvel C, Fedorenko V A. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits[J]. *Econ Geol*, 2003, 98(3): 495 – 515.
- [43] 杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 厉子龙, 董传万, 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地早 - 中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(4): 504 – 511.
Yang Shu-feng, Chen Han-lin, Ji Deng-wu, Li Zi-long, Dong Chuan-wan, Jia Cheng-zao, Wei Guo-qi. Geological process of early to middle Permian magmatism in Tarim basin and its geodynamic significance[J]. *Geol J China Univ*, 2005, 11(4): 504 – 511 (in Chinese with English abstract).
- [44] 史基安, 王雷, 高野穆一郎, 王琪, 王金鹏, 叶先仁. 金川超镁铁质岩元素及稀有气体同位素地球化学特征 [J]. *矿物岩石*, 2005, 25(1): 45 – 51.
Shi Ji-an, Wang Lei, Takano B, Wang Qi, Wang Jin-peng, Ye Xian-ren. Element and noble gas isotopic geochemistry of ultramafic rocks in Jinchuan[J]. *J Mineral Petrol*, 2005, 25(1): 45 – 51 (in Chinese with English abstract).
- [45] 焦建刚, 闫海卿, 钱壮志, 刘瑞平, 李晶晶. 龙首山岩带典型镁铁 - 超镁铁质岩体岩石地球化学特征 [J]. *矿物岩石*, 2006, 26(1): 49 – 56.
Jiao Jian-gang, Yan Hai-qing, Qian Zhuang-zhi, Liu Rui-ping, Li Jing-jing. Geochemical characteristics of typical mafic-ultramafic rocks in Longshou mountains[J]. *J Mineral Petrol*, 2006, 26(1): 49 – 56 (in Chinese with English abstract).
- [46] 李金祥, 秦克章, 徐兴旺, 孙赫, 程松林, 吴华, 莫新华. 新疆东天山白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因和构造背景的制约 [J]. *矿床地质*, 2007, 26(1): 43 – 57.
Li Jin-xiang, Qin Ke-zhang, Xu Xing-wang, Sun He, Cheng Song-lin, Wu Hua, Mo Xin-hua. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complex in East Tianshan, Xinjiang: Constraints on ore genesis and tectonic setting[J]. *Mineral deposits*, 2007, 26(1): 43 – 57 (in Chinese with English abstract).
- [47] 冉红彦, 肖森宏. 喀拉通克含矿岩体的微量元素与成岩构造环境[J]. *地球化学*, 1994, 23(4): 392 – 401.
Ran Hong-yan, Xiao Sen-hong. Trace element abundances and tectonic environment of the host intrusion of Kalatongke Cu-Ni deposit[J]. *Geochimica*, 1994, 23(4): 392 – 401 (in Chinese with English abstract).
- [48] Su Shangguo, Li Chusi, Zhou Mei-Fu, Ripley E M, Qi Liang. Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China [J]. *Miner Deposita*, 2008, 43(6): 609 – 622.
- [49] Naldrett A J. Nickel sulfide deposits: Classification, composition, and genesis[M] // Skinner B J. *Economic Geology: Seventy-Fifth Anniversary Volume, 1905 – 1980*. El Paso: Econ Geol Publ Co, 1981: 628 – 685.
- [50] Maier W D, Barnes S J, de Waal S A. Exploration for magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits: A review of recent advances in the use of geochemical tools, and their application to some South African ores[J]. *S Afr J Geol*, 1998, 101(3): 237 – 253.
- [51] Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: Trace element constraints [M] // Menzies M A, Cox K G. *Oceanic and Continental Lithosphere: Similarities and Differences*. Oxford: Clarendon Press, 1988: 415 – 445.
- [52] 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 汤中立, 王东生, 任小华. 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征及其意义 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 219 – 226.
Wang Rui-ting, Mao Jing-wen, He Ying, Tang Zhong-li, Wang Dong-sheng, Ren Xiao-hua. Geochemical characteristics of Platinum group elements of the sulfide nickel ores and related rocks in Jianchaling, Lueyang county, Shannxi province, China and their implication for genesis[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2005, 21(1): 219 – 226 (in Chinese with English abstract).
- [53] Chai Gang, Naldrett A J. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma[J]. *J Petrol*, 1992, 33(2): 277 – 303.
- [54] Roeder P L, Emslie R F. Olivine-liquid equilibrium[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1970, 29(4): 275 – 289.
- [55] Li Chusi, Ripley E M. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits[J]. *Miner Deposita*, 2005, 40(2): 218 – 230.
- [56] Li Chusi, Naldrett A J, Ripley E M. Controls on the Fo and Ni contents of olivine in sulfide-bearing mafic/ultramafic intrusions: Principles, modeling, and examples from Voisey's Bay[J]. *Earth Sci Front*, 2007, 14(5): 177 – 183.
- [57] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Rev Geophys*, 1995, 33(2): 241 – 265.
- [58] Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, Zhang Hongfei, Han Yinwen, Zhao Zidan, Hu Yiken. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62(11): 1959 – 1975.
- [59] Jiang Shao-yong, Yang Jing-hong, Ling Hong-fei, Feng Hong-zhen, Chen Yong-quan, Chen Jian-hua. Re-Os isotopes and PGE geochemistry of black shales and intercalated Ni-Mo polymetallic sulfide bed from the Lower Cambrian Niutitang Formation, South China[J]. *Progr Nat Sci*, 2003, 13(10): 788 – 794.
- [60] Naldrett A J. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. *Miner Deposita*, 1999, 34(3): 227 – 240.