

甘肃省金川超大型铜镍硫化物 矿床富铂钯矿石成因研究

王沪文¹, 汤中立^{1,2}

1. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000; 2. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054

摘要: 金川铜镍硫化物矿床的成因及侵位机制尤其是块状矿石和铂钯富集体成因一直存在较大争议, 本文通过对金川矿石的空间关系、地球化学特征研究, 指出金川矿床遭受构造及热液蚀变作用影响明显, 块状矿石相对富集 Os, Ir, Ru, Rh, 铂钯富集体相对富集 Pt, Pd, Au, Cu。研究认为, 块状矿石是晚期纯硫化物矿浆上升贯入后经单硫化物固溶体结晶堆积而成, 残余熔浆形成初始铂族矿物, 后期矿体遭受热液蚀变及构造剪切-热液作用, 使 Pt, Pd, Cu, Au 进一步富集形成铂钯富集体, 并在有利于成矿的空间聚集成矿。块状矿石与铂钯富集体关系密切, 据此推测 2[#] 矿体、24[#] 矿体深边部裂隙中具有较好的勘探前景。

关键词: 金川; 硫化物矿床; 块状矿石; 铂钯富集体; 矿石成因

中图分类号: P619.201.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)04-0388-08

Pt-Pd Rich Ores Genesis Research of Jinchuan Giant Ni-Cu Sulfide Deposit, in Gansu Province

WANG Lu-wen¹, TANG Zhong-li^{1,2}

1. School of Earth Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. College of Earth Science and Resource Management, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: The Jinchuan deposit understandings of the sulfide ore genesis and the magma intrusion and emplacement history of it remains limited. On the basis of the spatial relationships and the geochemistry of magmatic sulfide ores, this paper suggests that the Jinchuan deposit was affected obviously by tectonization and hydrothermal alterations, and that the massive ores are relatively enriched in Os, Ir, Ru, Rh comparing with other ore-forming elements, whereas Pt-Pd-rich sulfide ores are relatively rich of Pt, Pd, Au, Cu. It is concluded that platinum group minerals (PGMs) are the relic liquid of monosulfide solid solution segregation, and that the massive ore represents the accumulation of monosulfide solid solution, and that the late stage of pure sulfide liquid injection evolves both massive ore and PGM. The ore bodies underwent hydrothermal and tectonic-hydrothermal alterations, thus Pt, Pd, Cu, Au are concentrated in Pt-Pd-rich sulfide ores which have deposited in the certain restricted localities. It is concluded that the Jinchuan deposit was formed as a result of primary magmatic crystallization followed by hydrothermal remobilization, transport, and deposition of PGE. Based on special relationships of massive ores and Pt-Pd-rich zones, we expect that the prospect of seeking new ore bodies in deep and border fractures in the footwalls of orebody-2 and orebody-24 appears to be justified.

Key words: Jinchuan; sulfide deposit; massive ore; Pt-Pd-rich zones; ore genesis

金川铜镍矿床位于甘肃省金昌市,是仅次于俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 矿床和加拿大 Sudbury 矿床的世界第三大在采铜镍硫化物矿床。除富含 Ni、Cu 外,还伴生 Co、Au、PGE 等 17 种金属元素,累计

Cu、Ni 金属储量分别为 354 万和 558 万吨,矿石储量 5.5 亿吨^[1],是我国重要的 Ni、PGE 金属基地。该矿床自 1958 年发现以来,国内外众多学者对其进行了大量研究。但对其矿石成因及侵位机制一直存

收稿日期:2011-08-25 收到,09-27 改回

基金项目:深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-05-01)

第一作者简介:王沪文(1987-),男,硕士研究生,岩石学、矿物学、矿床学专业。E-mail:wanglw09@lzu.cn.

通讯作者:汤中立(1934-),男,中国工程院院士,主要从事岩浆硫化物矿床、区域成矿学、矿产勘查学研究。E-mail:zltang@sohu.com.

在较大争议,对块状硫化物矿石中 PGE 异常的认识^[2,3]还存在分歧,而且对金川重要的矿石类型——铂钯富集体的成因并未有系统研究。本文对块状矿石、铂钯富集体进行空间分布、地球化学等方面的综合研究,以期了解其成因,为金川矿床的成矿演化、进一步找矿勘探提供一些理论依据。

1 区域及矿床地质概况

矿床北临古亚洲造山带,南邻中央造山带(图 1)。中央造山带由其西部的祁连、昆仑古生代造山带和东部的秦岭-大别中生代造山带组成。龙首山隆起于华北克拉通西南缘,其南缘与早古生代祁连造山带相邻,北缘与潮水凹陷盆地相邻^[4,5],分别以两条区域性逆冲断层 F_2 、 F_1 为界。 F_1 下盘含侏罗系—三叠系的陆源碎屑沉积岩及第四系沉积物,说明此断层至第四纪依然在活动。钻孔数据揭示 F_1

下盘新生代和中生代地层总厚度大于 2700 m^[4]。 F_2 向西南倾伏,上盘为寒武-志留系地层^[4]。

在龙首山地体中,新元古代和古生代砾岩、砂岩及灰岩不整合覆盖于古元古代和中元古代变质单元上。古元古代和中元古代变质单元分别命名为白家咀子组和塔马子沟组。白家咀子组由混合岩、片麻岩和大理岩组成,塔马子沟组由片岩、层状大理岩组成。一系列镁铁质-超镁铁质岩侵入到白家咀子组和塔马子沟组中,包括金川、V号异常、毛草泉、东湾异常、青石窑、青井子和藏布台等岩体^[4~6](图 1)。这些镁铁质-超镁铁质岩体均为北西-南东走滑延伸的橄榄岩-辉石岩岩体,倾向南西延深大多数小于 1000 m,其中金川、藏布台、青石窑等岩体为区域上已知的三个最大的镁铁质-超镁铁质侵入体^[7]。大多数岩体都有硫化物矿化作用,但到目前为止,仅发现金川岩体赋含具经济价值的硫化物矿石。

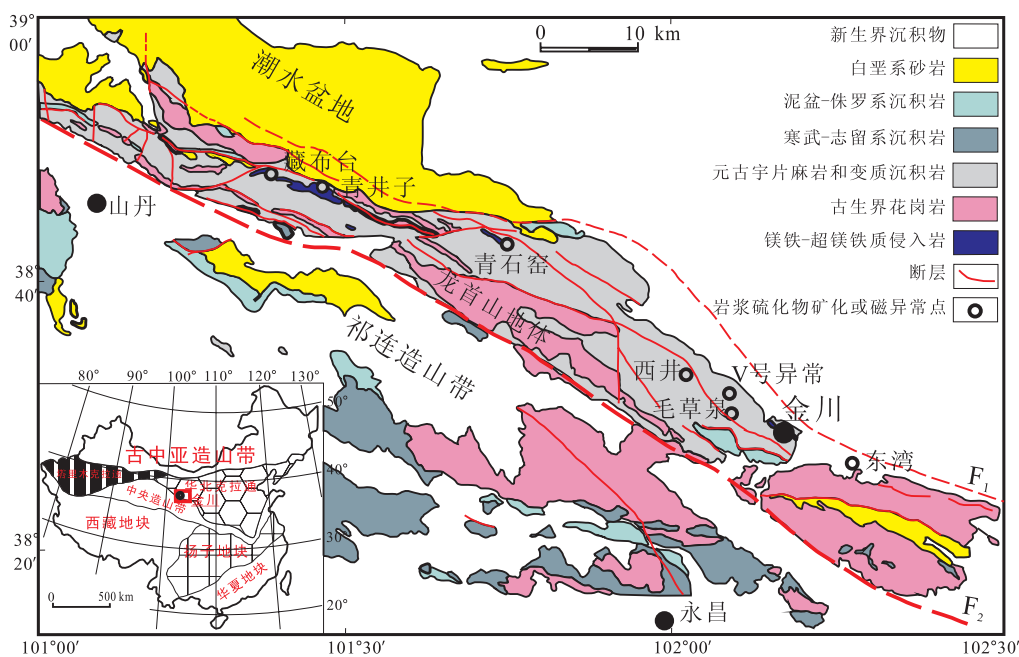


图 1 金川区域地质图(据文献[7]修改)

Fig. 1 Field geological map of Jinchuan (modified from ref. [7])

2 矿石特征

根据矿石结构,金川铜镍(铂族)硫化物矿床可以划分出 4 种类型矿石:①浸染状矿石:以 I 矿区西段和 III 矿区以及 IV 矿区比较发育。规模不等,呈不规则透镜状,规模较大者多产于基性程度较高的含二辉橄榄岩和橄榄二辉岩中,品位一般较低($Ni = 0.3\% \sim 0.99\%$)。硫化物呈半自形至它形粒状,其集合体一般为 1~3 mm 的不规则星点或液滴状均匀充填于橄榄石、辉石等矿物晶间,含量约 5%;主

要金属硫化物矿物为雌黄铁矿(Po)、镍黄铁矿(Pn)和黄铜矿(Cp),其比例为 46:41:13^[3]。②网状矿石:是最重要的矿石类型,主要产于 I 矿区、II 矿区岩体下部纯橄岩和二辉橄榄岩中,呈似板状、透镜状,品位较高($Ni > 1\%$)。具有网状结构,金属硫化物均匀充填在橄榄石堆晶间隙中,含量为 12%~26%。主要金属硫化物矿物成分与前类矿石相同,金属矿物雌黄铁矿(Po)、镍黄铁矿(Pn)和黄铜矿(Cp)比例为 54:31:15^[3]。③块状矿石:在 1[#]、2[#]、24[#] 矿体中均有产出,主要产出于 II 矿区 F_{17} 附近

2# 矿体下部,矿体一般出露厚度或宽度由不足 1 m 到十余 m 不等,块状矿石 90% 以上为金属硫化物, Ni 含量一般为 3.5%~10%。矿石中金属矿物主要为雌黄铁矿(Po)、镍黄铁矿(Pn)和黄铜矿(Cp),其比例为 58:35:7,还有少量紫硫镍矿及黄铁矿^[3]。矿体受岩体构造和其它裂隙控制,贯入于浸染状、网状矿体中或岩体下部接触带及底盘围岩中,呈不规则脉状、扁豆状,膨、缩变化大,尖灭突然。一般靠近块状矿体 Ni 含量高于 Cu,向边部 Cu 含量高于 Ni,表现出 Cu 比 Ni 具有更大的迁移能力。部分矿体切穿辉绿岩脉并含辉绿岩角砾,与其它岩相界线分明。说明其形成较晚,结晶温度低。块状矿体发育部位多有构造裂隙相伴,其形成与构造裂隙性质密切相关。24# 矿体中块状矿石出现地段往往有接触交代型矿石发育,也即周围有围岩捕虏体存在,晚期构造节理对块状矿石,特别是对块状矿体边部影响较大,多见被切错成几厘米至几十厘米不等的矿石碎块分布于破碎蚀变的矿化或不均匀的绿泥石片岩中,甚至挤入其它岩浆矿石或接触交代型矿石中。

④铂钯富集体:多分布于网状矿石中部到底部,如 24# 矿体和 1# 矿体,个别叠加于矿体底部相邻的浸染状贫矿体中,具变海绵陨铁结构。呈透镜状、分支状沿矿体中的韧性剪切挤压带分布,矿石往往交代、蚀变强烈,造岩矿物和金属硫化物呈定向排列或呈星云状、雾状构造,交代结构、碎裂结构、固溶体分离叶片状结构发育,具强烈滑石菱镁矿化,形成滑石碳酸盐型矿石。矿石成分与相邻的网状矿石明显不同,其 Cu、Pt、Pd、Au、Ag、Se、Te 成分明显增加, Cu/(Cu+Ni)、Pt/(Pt+Pd) 比值明显增大,矿石中 Cu 矿物明显增多,主要为方黄铜矿和墨铜矿,稀有、贵金属元素矿物异常富集,如砷铂矿、碲铂矿、碲钯矿、铂钯碲复合物等^[7]。产于 24# 矿体网状富矿体中最大的 Pt(Pd)富集体长 98 m,宽 2~6.5 m,延深达 500 m,Pt 和 Pd 平均含量分别为 6.15×10^{-6} 和 1.83×10^{-6} ,最高含量分别为 81.67×10^{-6} 和 11.8×10^{-6} ^[8]。各类型矿石矿物组合见表 1。空间上超镁铁质岩石、浸染状矿石、网状矿石、块状矿石及铂钯富集体,分布界线清楚,关系明显。

表 1 金川矿床各类型矿石矿物共生组合^[8]Table 1 Mineral assemblages of sulfide ores in the Jinchuan sulfide deposit^[8]

| 矿石类型 | 主要硅酸盐矿物组合 | 主要金属矿物共生组合 | 主要硫化物矿物比例(Po:Pn:Cp) |
|-------|-------------------|-------------------|---------------------|
| 浸染状矿石 | Ol+Cpx+Opx+Pl | Po+Pn+Cp | 46:41:13 |
| 网状矿石 | Ol+Cpx+Opx | Po+Pn+Cp | 54:31:15 |
| 块状矿石 | Ol | Po+Pn+Cp | 58:35:07 |
| 铂钯富集体 | Ol+Cpx+Opx+Pl+Amp | Po+Pn+Cp+Pt/Pd 矿物 | 32:23:45 |

注:Ol-橄榄石,Opx-斜方辉石,Pl-斜长石,Cpx-单斜辉石,Amp-角闪石,Po-雌黄铁矿,Pn-镍黄铁矿,Cp-黄铜矿

3 地球化学特征

研究样品采自金川矿床 I 矿区、II 矿区、III 矿区 1000~1280 m 中段,金川矿区及矿体剖面地质图见图 2。为了更好地探讨硫化物矿石中各元素间的关系,根据 Barnes 和 Lightfoot^[9]的公式进行 100% 硫化物计算,并对其进行原始地幔值^[10,11]标准化处理。样品数据见表 2。在各类型矿石中,随着硫化物的增加,S、Ni、Cu、PGE、Au、Ag 也随之增加。在 (S)=5%~15% 阶段 PGE 金属的富集出现明显的差异,网状矿石与浸染状矿石虽然 S 含量不同,但 PGE 含量相近^[3],但块状矿石、铂钯富集体中却有较大的变化。块状矿石的 Pt、Pd、Cu 含量要比浸染状、网状矿石低得多,Os、Ir、Ru、Rh 等变化不大,(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru+Rh) 较低,且 Pt/Pd 要比浸染状矿石、网状矿石中低得多。铂钯富集体中 S

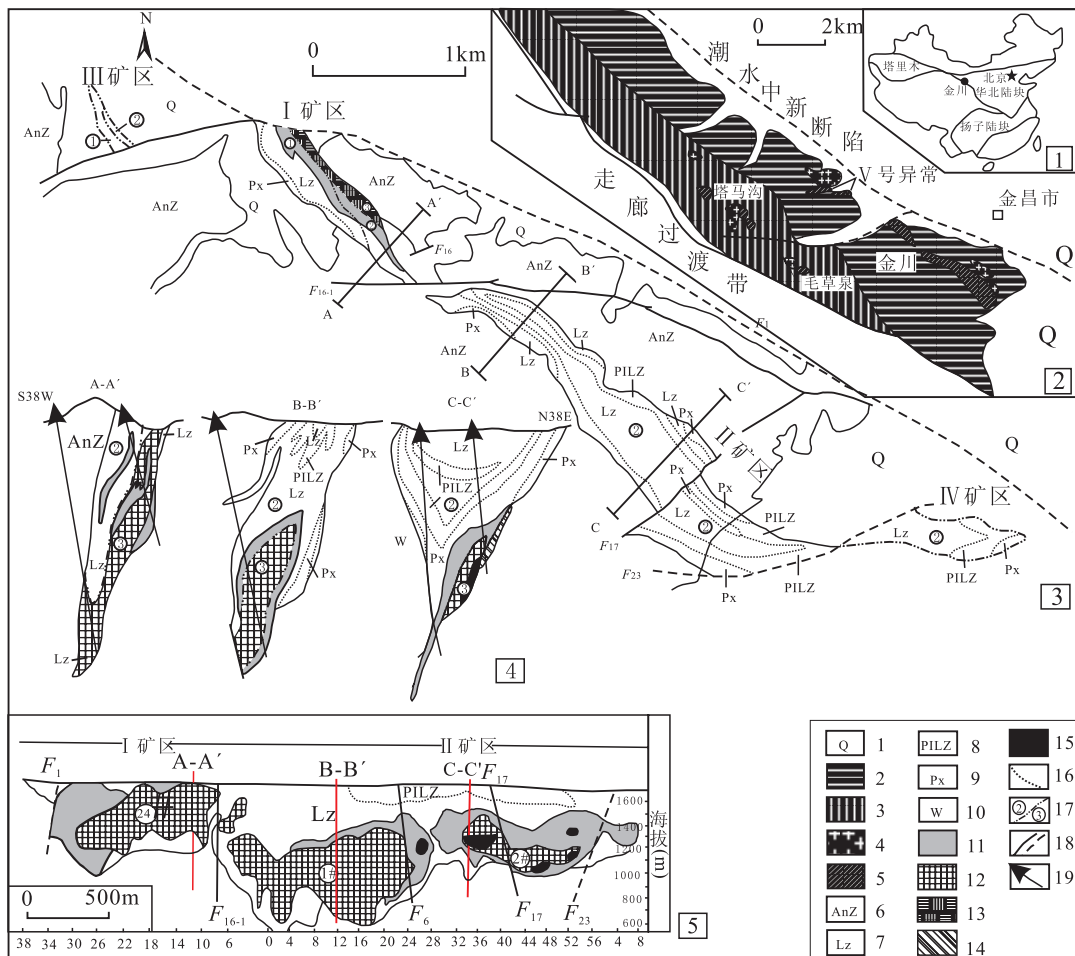
与网状矿石相近,Pt、Pd 及 Cu 出现较大幅度增加,Pt、Pd 及贵金属 Au 含量较高,尤其是在遭受热液蚀变的矿物中,其(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru+Rh) 较高。金川矿床 PGE 含量比 Noril'sk-Talnakh 低,在进入阶段性岩浆房之前,硅酸盐岩浆已进行了微弱的硫化物熔离^[2]。

4 讨 论

4.1 块状硫化物矿石成因

金川矿床中块状硫化物矿石在各含矿主岩体中均有分布,但主要分布于 2# 矿体中下部,多呈脉状产出,侵入于浸染状矿石或网状矿石中,有时可见其侵位于上、下盘围岩中。矿石中 PGE 总体含量低,尤其是 Pt,同时 Pd、Au、Cu 等含量也相对较低,而 Os、Ir、Ru、Rh 相对较高(图 3)。

导致 PGE 分异的因素有硫化物分离结晶作



1-第四系;2-龙首山群白家嘴子组;3-龙首山群塔马子沟组;4-花岗岩;5-镁铁-超镁铁质岩体;6-前寒武系;7-二辉橄榄岩;8-含斜长二辉橄榄岩;9-橄橄榄二辉岩;10-二辉岩;11-浸染状矿;12-海绵陨铁状矿;13-氧化矿;14-接触交代型矿;15-块状矿;16-岩相界线;17-不同阶段岩相界线;18-实测/推测断层;19-钻孔

1-Quaternary; 2-Longshoushan group Baijiazuzi formation; 3-Longshoushan group Tamazigou formation; 4-Granite; 5-mafic-ultramafic rock body; 6-Precambrian; 7-Lherzolite; 8-Plagioclase lherzolite; 9-Olivine websterite; 10-Websterite; 11-disseminated ore; 12-net textured ore; 13-Oxidized ore; 14-Contact metasomatic ore; 15-Massive ore; 16-Lithofacies boundary; 17-Staged lithofacies boundary; 18-Measured/Predicted fault; 19-Drill hole

图2 金川镍铜(铂族)矿床(1,2)平面、(3)剖面、(4)及纵投影图(5)(据文献[7]修改)

Fig. 2 Location(1,2), plan(3), cross section(4) and longitudinal section(5) of the Jinchuan sulfide deposit (modified from ref. [7])

用、早期 Fe-Pt 合金的分离以及气、热液蚀变作用^[16]。金川岩体中铬铁矿普遍存在,通常被橄榄石包裹,是最早结晶的矿物^[6],因铬铁矿的结晶分离可能导致 Fe-Pt 合金从岩浆中分离,这种 Pt 亏损的岩浆发生硫化物熔离而形成 Pt 负异常的块状矿石^[2]。如果是这种机制的话,那么所有矿石中都应该有明显的 Pt 负异常,而实际上金川矿床中只有少部分其它类型矿石具有弱的 Pt 负异常^[2]。说明该机制并不是 Pt 强烈负异常的原因。

导致 Pt 异常的另外一种可能是硫化物分离结晶作用。在 Pechenga 矿床中,块状硫化物成分的变

化比浸染状硫化物大,一些块状硫化物富集 Os、Ir、Ru、Rh,亏损 Pt、Pd、Ag、Au、Cu、Sb、As、Se。这是由于在硫化物熔体的结晶作用中单硫化物固溶体(Mss)的堆晶所致^[13]。苏尚国^[3]等认为块状矿石是由于单硫化物固溶体(Mss)结晶形成,并进行了数值模拟。Su 等^[13]研究显示,根据 PGE、Cu、Ni、Au 等地球化学性质,在 Mss 结晶时,由于 Pt、Pd 等分配系数较大,有可能造成 Mss 中 Pt、Pd 低,Os、Ir、Ru、Rh 相对较高。但是金川矿床的块状矿石中 PGE、Ni、Cu、Ag 等变化情况要复杂得多,大多数样品是 Pt 极低而 Pd、Cu 等变化较小。由 Su 等^[13]研

表 2 金川矿床 Ni、Cu、Au、PGE 等元素含量
Table 2 Concentrations of Ni, Cu, Au and PGE in Jinchuan Ore Deposit

| 样号 | 矿石类型 | Ni | Cu | Co | Os | Ir | Ru | Rh | Pt | Pd | Au | S | 资料来源 |
|-----------|------------|--------|--------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|---------|------|
| 050715-1 | 网状矿石 2 | 0.71 | 0.56 | 0.026 | | 4.69 | 5.38 | 1.39 | 0.82 | 15.67 | | 4.25 | |
| JC02-3 | 网状矿石 2 | 1.93 | 1.45 | 0.08 | | 60.9 | 54.6 | 24.8 | 24.6 | 170.5 | | 7.42 | |
| JC02-5 | 网状矿石 2 | 1.9 | 0.67 | 0.07 | | 22.9 | 11.3 | 17.8 | 12.9 | 66.6 | | 9.53 | [13] |
| JC02-7 | 网状矿石 2 | 0.48 | 0.07 | 0.02 | | 0.35 | 0.55 | 0.21 | 2.28 | 1.44 | | 2.22 | |
| JC02-6 | 网状矿石 2 | 1.1 | 0.33 | 0.04 | | 2.15 | 2.68 | 1.13 | 73.1 | 23.8 | | 6.22 | |
| JC-32 | 网状矿石 2 | 1.7616 | 0.4466 | | | 6 | 6.1 | 3.3 | 20 | 28 | | 10.149 | |
| JC-34 | 网状矿石 2 | 0.7979 | 0.1777 | | | 44 | 28 | 14 | 47 | 57 | | 3.3069 | |
| JC-54 | 网状矿石 2 | 0.5511 | 0.8231 | | | 2.9 | 3.3 | 1.5 | 79 | 15 | | 3.3356 | |
| JZ-11 | 网状矿石 2 | 2.0718 | 4.4588 | | | 19 | 17 | 7 | 7.1 | 42 | | 15.5317 | |
| JC-30 | 网状矿石 24 | 1.622 | 0.4886 | | | 7.6 | 20 | 15 | 336 | 268 | | 5.6075 | |
| JC-35 | 网状矿石 24 | 1.8088 | 1.8552 | | | 13 | 19 | 17 | 37 | 222 | | 8.4554 | [14] |
| JC-38 | 网状矿石 24 | 1.916 | 1.4388 | | | 17 | 20 | 16 | 37 | 219 | | 8.0771 | |
| JC-39 | 网状矿石 24 | 2.4222 | 1.0415 | | | 110 | 122 | 44 | 33 | 318 | | 12.3005 | |
| JC-40 | 网状矿石 24 | 1.9734 | 1.1286 | | | 12 | 31 | 15 | 9 | 168 | | 10.9022 | |
| JC-49 | 块状矿石 24 | 6.5388 | 1.5742 | | | 89 | 260 | 237 | 55 | 532 | | 29.5089 | |
| JZ-15 | 块状矿石 2 | 5.0778 | 2.8086 | | | 8.1 | 4.5 | 7.6 | 19 | 46 | | 33.2632 | |
| JC02-4 | 块状矿石 2 | 8.25 | 3.2 | 0.08 | | 100 | 125 | 54.3 | 16.6 | 208 | | 35.5 | [13] |
| JD04-70 | 块状矿石 2 | 6.17 | 1.27 | | | 13.2 | 22.4 | 13.5 | 31 | 93.4 | | 25.8 | |
| JD04-69 | 块状矿石 2 | 5.4334 | 1.2546 | | | 42 | 112 | 23.1 | 5.5 | 91.9 | | 23.4 | |
| JD04-68 | 块状矿石 2 | 5.8787 | 1.0989 | | | 18.6 | 35.3 | 15.7 | 11.7 | 138 | | 22.7 | |
| JD04-67 | 块状矿石 2 | 6.01 | 1.42 | | | 12.2 | 13.7 | 12.3 | 0.81 | 48 | | 27.8 | [2] |
| JD04-66 | 块状矿石 2 | 6.49 | 1.23 | | | 44.1 | 111 | 23.5 | 2.2 | 60.1 | | 25.1 | |
| JD04-65 | 块状矿石 2 | 6.7707 | 1.9316 | | | 11.1 | 22.4 | 14 | 8 | 233 | | 26.2 | |
| JD04-64 | 块状矿石 2 | 5.86 | 1.37 | | | 34.4 | 94.3 | 21.9 | 3 | 51.8 | | 26.9 | |
| JD04-63 | 块状矿石 2 | 5.86 | 1.22 | | | 40.7 | 113 | 19.4 | 1.6 | 102 | | 23.9 | |
| JD04-62 | 块状矿石 2 | 4.82 | 1.26 | | | 8.56 | 8.05 | 13.2 | 0.51 | 109 | | 26.8 | [2] |
| JD04-61 | 块状矿石 2 | 1.77 | 6.26 | | | 13.6 | 29.6 | 14.9 | 8.2 | 123 | | 23.9 | |
| L07U-14 | PtPd24 | 2.26 | 3.71 | | 2.77 | 1.06 | 1.54 | 0.92 | 3318 | 1175 | | 7.6817 | |
| L11U-03 | Pt 矿化体 24 | 0.5229 | 0.646 | | 29.6 | 17.4 | 16.2 | 10 | 324 | 73.4 | | 7.6817 | |
| LZK104-16 | Pd 矿化体 24 | 2.44 | 1.65 | | 33.1 | 23 | 23.3 | 14.8 | 49.3 | 113 | | 7.6817 | 本 |
| Y22U-05 | PtPd 矿化体 1 | 1.53 | 1.32 | | 41.5 | 32 | 26.7 | 21.4 | 260 | 197 | | 7.6817 | 文 |
| YZK66-11 | Pd 矿化体 1 | 2.35 | 0.6384 | | 13.7 | 11.7 | 15.2 | 5.75 | 12.3 | 144 | | 7.6817 | |
| R35U-02 | Pt 矿化体 2 | 5.69 | 2.02 | | 40.3 | 35.9 | 38.5 | 18.5 | 408 | 107 | | 7.6817 | |
| R35U-03 | Pd 矿化体 2 | 5.98 | 3.67 | | 22.7 | 22.9 | 22.6 | 12.8 | 142 | 208 | | 7.6817 | |
| 6B-G1 | 富 Cu 矿体 24 | 1.76 | 3.85 | | 1 | 1.2 | 1 | | 2100 | 970 | 1880 | 8.65 | |
| 6B-G2 | 富 Cu 矿体 24 | | | | 2 | 1.5 | 1 | | 1900 | 340 | 1380 | | |
| 6B-G3 | 富 Cu 矿体 24 | | | | 1 | 1.1 | 1 | | 2690 | 450 | 2000 | | |
| 6B-G4 | 富 Cu 矿体 24 | | | | 1 | 1.2 | 1 | | 460 | 300 | 1630 | | |
| 6B-G5 | 富 Cu 矿体 24 | | | | 18 | 26 | 8 | | 1240 | 280 | 2550 | | [1] |
| 7B-G1 | 富 Cu 矿体 24 | | | | 20 | 28 | 16 | | 180 | 200 | 1610 | | |
| 7B-G2 | 富 Cu 矿体 24 | | | | 7 | 11 | 2 | | 580 | 360 | 1300 | | |
| 7B-G3 | 富 Cu 矿体 24 | | | | 2 | 1 | 1 | | 1460 | 320 | 340 | | |
| II-3 | PtPd | 1.66 | 0.67 | 0.05 | 104 | 98 | 100 | 32 | 290 | 160 | 100 | 7.05 | |
| II-5 | PtPd | 2.06 | 0.78 | 0.05 | 20 | 24 | 18 | 14 | 170 | 340 | 200 | 7.71 | |
| Lb-452 | PtPd | 1.79 | 0.62 | 0.03 | 60 | 70 | 50 | 36 | 20 | 180 | 240 | 6.4 | |
| Lb-426 | PtPd | 2.88 | 0.79 | 0.07 | 78 | 90 | 48 | 26 | 20 | 140 | 280 | 10.15 | |
| II-7 | PtPdCu | 2.11 | 2.25 | 0.05 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1540 | 460 | 300 | 7.44 | |
| II-8 | PtPdCu | 1.59 | 3.14 | 0.04 | 1 | 3 | 1 | 1 | 390 | 470 | 1200 | 6.79 | |
| II-13 | PtPdCu | 2.01 | 1.91 | 0.06 | 8 | 7 | 5 | 4 | 660 | 330 | 390 | 8.65 | |
| Lb-154 | PtPdCu | 0.87 | 3.24 | 0.02 | 6 | 8 | 3 | 1 | 4020 | 339 | 1971 | 5.92 | |
| Lb-162 | PtPdCu | 2.76 | 1.29 | 0.05 | 5 | 6 | 8 | 11 | 10630 | 264 | 395 | 8.53 | |
| Lb-166 | PtPdCu | 0.92 | 3.38 | 0.02 | 3 | 3 | 3 | 7 | 5735 | 446 | 455 | 7.28 | |
| II-9 | PtPdCu | 1.73 | 3.13 | 0.04 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3070 | 480 | 400 | 7.61 | |

注:矿石类型后数字 1 为 1# 号矿体, 2 为 2# 矿体, 24 为 24# 矿体; Ni、Cu、Co、S 单位为 %(wt), 其余为 $\times 10^{-9}$

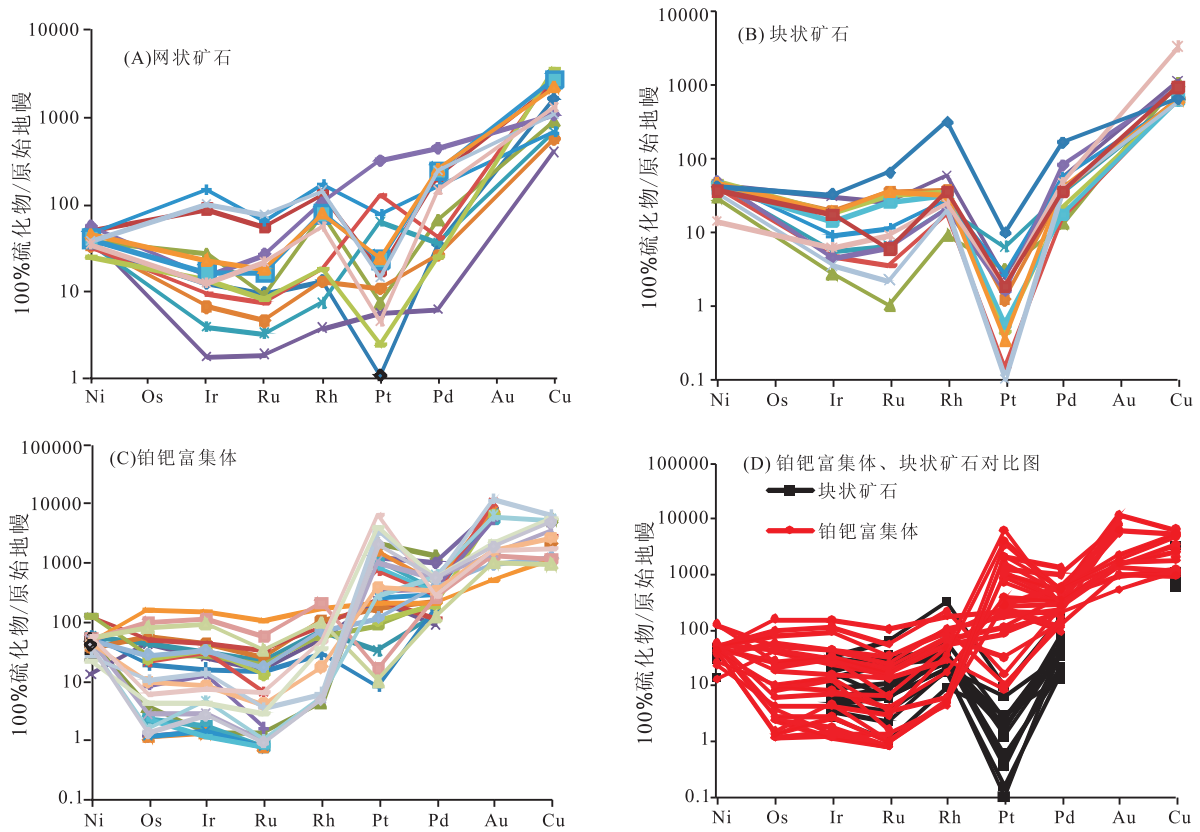


图3 金川矿床不同类型矿石 PGE、Ni、Cu、Au 原始地幔标准化图
Fig. 3 Mantle-normalized plots of different types of sulfide ores

究显示, $D_{Pt} \approx D_{Pd}$, 所以在 Mss 结晶时, Pt、Pd 地球化学行为应该类似, 因此, 硫化物分离结晶作用难以引起 Pt、Pd 较大分异。金川矿床却是例外, 所以其块状矿石在 Mss 结晶后应该经历了其它的地质过程, 矿石中 Pt、Pd、Au 等组分发生改变。用硫化物熔离时“R”因子很小来解释金川矿床块状矿石 Pt 异常是行不通的, 因为通过模拟计算表明, 当 R 值很小时 ($R=10$, 实际地质过程中难以发生), 熔离出的 Pt 含量与块状矿石中的 Pt 相一致, 但是 Ni 和其它 PGE 含量远远低于样品中的含量^[28], 而且 Pt 和 Pd 具有相似的硫化物/硅酸盐岩浆分配系数, 硫化物熔离时 R 因子的变化难以导致二者如此明显的分异, 最主要是金川矿床后期遭受了热液蚀变作用, 导致其矿质成分发生了变化, 现在样品所测得成矿元素的含量不是矿床刚形成时矿石中成矿元素的含量。岩浆后期热液作用也可能导致矿石中 PGE 含量的改变, 因为岩浆后期热液蚀变作用时 IPGE 通常为强不活泼元素, 而 PPGE 为弱的活泼元素。因此, 当热液活动导致 PGE 重新活化时, 块状矿石中的 Pt 被单独析出而发生迁移, 也就是说热液活动导致 Pt 重新活化迁移而不影响其它 PGE。

比较可信的解释是硫化物从岩浆中熔离后, 后期新鲜岩浆持续补充使得硫化物熔体中的 PGE 不断富集。随着温度下降, 由于形成块状矿石的硫化物熔体中的 PGE 总量远远高于形成浸染状矿石和海绵陨铁状矿石中 PGE 的总量, 在硫化物熔体结晶晚期阶段 ($<500^{\circ}\text{C}$), Pt 主要形成铂族矿物 (PGM), 而不是赋存于硫化物中, 如铋碲铂矿 (PtBiTe)^[13], 铋碲铂矿 (PtBiTe) 易被后期热液蚀变作用活化再迁移, 也可能遭受变质作用而重熔再结晶而从块状矿石中移出。Pt 的 PGM 活化再迁移或者重熔再结晶作用导致块状矿石出现 Pt 负异常。

4.2 铂钯富集体成因

金川岩体及硫化物矿石中热液蚀变作用明显, 已有较多研究^[6,7,15,29~32]。Yang^[15] 对铂族矿物 (PGE) 进行了详尽的研究, 认为有 3 种类型: 岩浆作用期的 PGM, 出现于热液蚀变带的 PGM、形成于剪切变形-热液蚀变作用的 PGM。含铂钯矿物 (砷铂矿、碲铂矿、碲钯矿、黄碲钯矿、方砷钯矿、斜砷钯矿) 主要赋存于第二、三类矿石中。Ripley 等^[32] 用矿物学和 H、O、S 稳定同位素方法研究了蚀变作用对金川岩体及其矿物的影响, 认为金川矿床至少遭受两

期蚀变作用,早期有演化海水或变质流体的参与,与金川岩体形成时的裂谷构造背景一致,晚期是在岩体形成后与大量大气水发生反应或者是演化海水、变质流体、大气水混合物的参与。高亚林等^[1]认为,富 Cu 矿体与 Pt、Pd 富集体关系密切,可能是同一种矿体,富 Cu 矿体有元素的分配性,相对富集 Cu、Pt、Pd、Au,而富 Fe 硫化物富集 Os、Ir、Rh、Ru^[9]。苏尚国等^[3]认为金川的岩浆活动有 5 期,侵位顺序依次为:超镁铁质岩浆侵位、浸染状硫化物矿浆侵位、网状硫化物矿浆侵位、块状硫化物矿浆侵位以及铂钯富集体侵位。汤中立等^[33]则认为金川含矿超镁铁岩体的侵位序列为:不含矿岩浆、浸染状硫化物矿浆、网状硫化物矿浆、纯硫化物矿浆。作者认为铂钯富集体这一期岩浆侵位活动意味着在深部已发生了大量的单硫化物固溶体的结晶作用,那么其整个岩浆体系的结晶程度也较大,在深部已发生如此大规模结晶作用,是不可能上侵成岩成矿的。所以铂钯富集体是在金川矿床现存空间形成的。富 Cu 熔体要在 900℃ 以下才会完全固化,在科马提质和辉长质母岩中,硅酸盐岩石的固化温度要比这个温度高^[9]。因此富 Cu 硫化物液体会沿围岩和已凝固的镁铁质侵入体间的接触带迁移。如果变形作用发生在富铜硫化物液体固化之前,硫化物液体会迁移至围岩的膨胀构造部位。在这种情况下,含矿细脉代表了分离硫化物液体。在 Noril'sk、Cape Smith 矿床中,这些含矿细脉富集相对于单硫化物固溶体(Mss)的不相容元素(Cu、Pd、Pt、Ag、As、Sb)且亏损相对 Mss 的相容元素(IPGE),这可能代表了分离的富 Cu 液体^[9]。金川矿床的富铂钯矿石与其它类型矿石相比,各元素间相对富集 Pt、Pd、Au、Ag(图 3),说明其很可能是硫化物熔体经单硫化物固溶体结晶后残余的硫化物熔体固结形成。铂钯富集体尤其富集 Pt(图 3C),而金川块状矿石以及部分网状矿石明显亏损 Pt,这二者之间有何关系?

4.3 块状矿石与铂钯富集体的关系

金川 24[#] 矿体中块状矿石发育部位多有构造裂隙相伴出现,出现地段往往有接触交代型矿石出现,铂钯富集体受构造活动、热液蚀变影响明显,在空间上与块状矿石具有一定联系。从图 3 中各元素的变化趋势来看,大多数铂钯富集体各元素间相对更富集 Pt、Pd、Cu、Au,而块状矿石各元素间则相对更富 Os、Ir、Ru、Rh。在硅酸盐矿物结晶作用的晚期大多数体系的硫化物相是熔融体^[34]。在这些相中硫化物和铂族矿物代表了低温相重结晶作用和高温相出溶的产物,例如富 Fe-Ni 单硫化物固溶体和富 Cu-

Fe 中间固溶体^[34]。由于硫化物的可塑性要比硅酸盐大得多,所以块状矿石层易发生变形作用,这导致其沿断裂面发生活化作用以及由于围岩的运动而引起变形作用,块状矿石在变形作用和变质作用过程中比网状矿石、浸染状矿石更易受到破坏。而一部分 PGM 是由岩浆作用形成,其余为热液蚀变、构造活动-蚀变形成的^[15]。由此可以推论,块状矿石熔体(矿浆)晚期沿裂隙上侵入经由 Mss 结晶堆积而成,由于 PGE 地球化学性质的差异,Os、Ir、Ru、Rh 优先进入 Mss,而 Pt、Pd 优先保留于残留硫化物熔体中,故 Mss 相对于其它类型的矿石亏损 Pt、Pd,而 PGM 则由硫化物矿浆经 Mss 结晶后的残余熔浆固结形成。块状矿石受原生构造及裂隙所控制,在后期由于热液蚀变作用及构造应力的影响,蚀变流体进入裂隙中与 Mss 及部分其它类型矿石发生反应,由于 Pt、Pd、Cu、Au 等元素地球化学性质较活泼,故使得部分热液及构造活动——热液成因 PGM 更富 Pt、Pd、Cu、Au,形成铂钯富集体并在利于成矿的空间聚集成矿,同时导致部分网状矿石也亏损 Pt、Pd、Cu、Au(图 3A)。

上述块状矿石与铂钯富集体间的关系,尤其是成因上的联系,可以推测发育块状矿体的 2[#] 矿体或其下盘围岩裂隙中应有铂钯富集体;而 24[#] 矿体富含富 Cu、Pt、Pd 矿体,其深部可能富集大量块状矿体;1[#] 矿体中部局部发育铂钯富集体,1[#] 矿体深部及围岩裂隙中可能存在大量块状矿体。

5 结 论

(1)金川含矿超镁铁岩体的侵位序列为不含矿岩浆、浸染状硫化物矿浆、网状硫化物矿浆、纯硫化物矿浆;

(2)金川矿床形成过程中,块状硫化物矿石是晚期硫化物矿浆贯入后经单硫化物固溶体(Mss)结晶堆积而成,Mss 结晶后残余熔浆冷凝过程中有 PGM 结晶,岩浆期后遭受热液蚀变作用、构造应力作用、构造活化-热液作用使得 PGM 进一步富集 Pt、Pd、Au、Cu 形成铂钯富集体,在利于成矿的空间聚集成矿;

(3)据块状矿石与铂钯富集体之间强烈的相关性,推测 1 号矿体深部存在块状硫化物矿体,2[#] 矿体深部及其下盘围岩裂隙中存在 Pt、Pd、Cu 富集体,24[#] 矿体深部具有良好的块状矿石找矿前景。

参考文献 (References):

- [1] 高亚林,汤中立,宋谢炎,田毓龙,孟远志. 金川铜镍矿床隐伏富铜矿体成因研究及其深部找矿意义[J]. 岩石学报, 2009,

- 25(12): 3379—3395.
- Gao Yalin, Tang Zhongli, Song Xieyan, Tian Yulong, Meng Yuanzhi. Study on genesis of the concealed Cu-rich ore body in the Jinchuan Cu-Ni deposits and its prospecting in depth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12):3379—3395. (in Chinese with English abstract)
- [2] Song X Y, Keays R R, Zhou M F, Qi L, Ihlenfeld C, Xiao J F. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2009, 73:404—424.
- [3] 苏尚国, 汤中立, 周岱. 金川含矿超镁铁岩侵入体侵位序列[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2):118—126.
- Su Shangguo, Tang Zhongli, Zhou Dai. Emplacement sequence in the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 118—126. (in Chinese with English abstract)
- [4] 甘肃省地质矿产局第六地质队. 白家咀子硫化铜镍矿床地质[M]. 北京:地质出版社, 1984.
- Sixth geological unit geological survey of Gansu province. *Geology of the Baijiazuizi Cu-Ni sulfide deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984. (in Chinese)
- [5] 汤中立, 白云来, 徐章华, 李文渊, 李奋齐, 闫海卿, 黄承雄, 王志恒. 华北古陆西南缘(龙首山-祁连山)成矿系统及成矿构造动力学[M]. 北京:地质出版社, 2002.
- Tang Zhongli, Bai Yunlai, Xu Zhanghua, Li Wenyuan, Li Fengqi, Yan Haiqin, Huang Chenxiong, Wang Zhihen. *Metallogenic systems and metalotectonic dynamics in the southwest margin (the Longshoushan mountains and the Qilianshan mountains) of North China paleocontinent*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [6] Barnes S J, Tang Z L. Chrome spinel from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit. Gansu Province, People's Republic of China [J]. *Econ. Geol.*, 1999, 94:343—356.
- [7] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京:地质出版社, 1995.
- Tang Zhongli, Li Wenyuan. *Mineralisation model and geology of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit bearing PGE*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [8] 高亚林. 金川矿区地质特征、时空演化及深边部找矿研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2009.
- Gao Yalin. *Study on geological characteristics, temporal and spatial evolution, prospecting in the depth and border of Jinchuan Deposit*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [9] Barnes S J, Lightfoot P C. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents[J]. *Econ. Geol.*, 2005, 100: 179—213.
- [10] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chem. Geol.*, 1995, 120:223—253.
- [11] Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu, and the noble metals in silicate and sulphide liquids[J]. *Geol. Assoc. Canada Short Course Notes*, 1999, 13:69—106.
- [12] Taylor S R, McLennan S M. *The continental crust: Its composition and evolution*[A]. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985:312.
- [13] Su S G, Li C, Zhou M F, Ripley E M, Qi L. Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China [J]. *Miner. Deposita*, 2008, 43:609—622.
- [14] Song X Y, Zhou M F, Wang C Y, Qi L, Zhang C J. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Northwest China[J]. *International Geology Review*, 2006, 48:1113—1132.
- [15] Yang X Z, Ishihara S, Zhao D H. Genesis of the Jinchuan PGE deposit, China: Evidence from fluid inclusions, mineralogy and geochemistry of precious elements[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2006, 86:109—128.
- [16] 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列猛. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J]. *地学前缘*, 2009, 16(4):287—305.
- Song Xieyan, Hu Ruizhong, Chen Liemeng. Geochemical natures of copper, nickel and PGE and their significance for the study of origin and evolution of mantle-derived magmas and magmatic sulfide deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4):287—305. (in Chinese with English abstract)
- [17] Barnes S J, Melezhik V A, Sokolov S V. The composition and mode of formation of the Pechenga Nickel deposits, Kola Peninsula, northwestern Russia[J]. *Can. Mineral.*, 2001, 39:447—471.
- [18] Wolf R, Anders E. Moon and earth: Compositional differences inferred from siderophiles, volatiles, and alkalis in basalts [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1980, 44(12): 2111—2124.
- [19] Klock W, Palme H, Tobschall H J. Trace elements in natural metallic iron from Disko Island, Greenland[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 93(3):273—282.
- [20] Borisov A, Palme H. Solubilities of noble metals in Fe-containing silicate melts as derived from experiments in Fe-free systems[J]. *Am. Mineral.*, 2000, 85(11-12):1665—1673.
- [21] Puchtel I S, Humayun M. Platinum group element fractionation in a komatiitic basalt lava lake[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, 65(17):2979—2993.
- [22] Righter K, Campbell A J, Humayun M, *et al.* Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir, and Au between Cr-bearing spinel, olivine, pyroxene and silicate melts[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, 68(4):867—880.
- [23] Peach C L, Mathez E A, Keays R R. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB: Implications for partial melting[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, 54(12):3379—3389.

- abstract)
- [5] 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
Ren Zhanli. A study of tectonic thermal evolution in sedimentary basin of northern China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [6] 费宝生. 二连裂谷盆地群油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
Fei Baosheng. Petroleum geology of Erlian rift basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [7] 王雁举, 姜东华. 二连盆地侏罗系石油地质特征及综合评价[R]. 1996: 1—18.
Wang Yanju, Jiang Donghua. The Jurassic oil geological characteristics and comprehensive evaluation in Erlian Basin[R]. 1996: 1—18. (in Chinese)
- [8] 黄第藩, 陶国立, 王铁冠. 酒东盆地石油地球化学综合研究和远景评价[R]. 1990.
Huang Difan, Tao Guoli, Wang Tieguan. The oil geochemical comprehensive research and prospect evaluation of Jiudong Basin[R]. 1990. (in Chinese)
- [9] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰. 低熟油形成机理与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Wang Tieguan, Zhong Ningning, Hou Dujie. Immature oil formation mechanism and distribution[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [10] 钟宁宁, 包建平, 黄光辉. 华北地区上古生界烃源岩及演化研究[R]. 1996.
Zhong Ningning, Bao Jianping, Huang Guanghui. A study of upper-Paleozoic source rock in North China and its evolution [R]. 1996. (in Chinese)
- [11] 方朝合, 张枝焕, 王义风, 刘人和, 拜文华. 苏北盆地溱潼凹陷第三系烃源岩地球化学特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(06): 1—5.
Fang Chaohe, Zhang Zhihuan, Wang Yifeng, Liu Renhe, Bai Wenhua. Geochemical characteristics of the lower tertiary source rock in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Journal of Xi'an Petroleum University(Natural Science Edition), 2008, 23(6): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭立言, 顾信章. 热解技术在我国生油岩研究中的应用[J]. 石油学报, 1986, 7(2): 13—19.
Wu Liyan, Gu Xinzhang. The application of pyrolysis technique in source rock research[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(2): 13—19. (in Chinese with English abstract)
- [13] Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments- II [J]. Organic Geochemistry, 1987, 11: 513—527.
- [14] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. Organic Geochemistry, 1997, 27(5/6): 213—250.
- [15] Ten Haven H L, De Leeuw I W, Rullkötter A. Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator[J]. Nature, 1987, 330: 641—643.
- [16] Mackenzie A S, Hoffmann C F, Maxwell J R. Molecular parameters of maturation in the toarcian shales, paris basin, France: Part-Changes in aromatic steroid hydrocarbons[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1981, 45(8): 1345—1355.

(上接第 395 页)

- [24] Bezmen N I, Asif M, Brumann G E, *et al.* Distribution of Pd, Rh, Ru, Ir, Os, and Au between sulfide and silicate metals[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 58(4): 1251—1260.
- [25] Fleet M E, Crocket J H, Stone W E. Partitioning of platinum-group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1996, 60(13):2397—2412.
- [26] Fleet M E, Chrysosoulis S L, Stone W E, *et al.* Partitioning of platinum-group elements and Au in the Fe-Ni-Cu-S system; Experiments on the fractional crystallization of sulfide melt[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1993, 115(1):36—44.
- [27] Barnes S J, Makovicky E, Makovicky M, *et al.* Partition coefficients for Ni, Cu, Pd, Pt, Rh and Ir between monosulfide solid solution and sulphide liquid and the implications for the formation of compositionally zoned Ni-Cu sulphide bodies by fractional crystallization of sulphide liquid[J]. Can. J. Earth Sci., 1997,34:366—374.
- [28] 陈列锰, 宋谢炎. 甘肃金川超大型 Ni-Cu-(PGE) 矿床的块状矿石 Pt 负异常成因机制[C]. 矿床地质(增刊), 2010, 29: 853—854.
Chen Liemeng, Song Xieyan. Pt negative anomaly genetic mechanism of massive ore in Jinchuan giant Ni-Cu-(PGE) deposit, Gansu [C]. Mineral Deposits (suppl.), 2010, 29: 853—854. (in Chinese with English abstract)
- [29] Chai G, Naldrett A J. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma [J]. J. Petrol., 1992, 33:277—304.
- [30] De wall S A, Xu Z H, Li C, Mouri H. Emplacement of viscous mushes in the Jinchuan ultramafic intrusion, Western China[J]. Can. Mineral., 2004, 42:371—392.
- [31] Li C, Xu Z, De Waal S A, Ripley E M, Maier W D. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implication for ore genesis[J]. Miner Deposita, 2004, 39:159—172.
- [32] Ripley E M, Sarkar A, Li C. Mineralogic and stable isotope studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Ni-Cu deposit, China[J]. Econ. Geol., 2005,100:1349—1361.
- [33] 汤中立. 金川硫化铜镍矿床成矿模式[J]. 现代地质, 1990, 4(4):55—64.
Tang Zhongli. Minerogenetic model of the Jinchuan copper and nickel sulfide deposit[J]. Geoscience, 1990, 4(4): 55—64. (in Chinese with English abstract)
- [34] Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits; Geology, geochemistry, and exploration[M]. Berlin: Springer, 2004: 727.