文章编号：1004—5589（2012）03—0493—12

金川镍铜铂硫化物矿床矿石成因
——来自铂族元素地球化学的证据

徐刚[1]，汤中立[1]，钱壮志[1]，焦建刚[1]，魏翔[1]，王硕[2]

1. 长安大学 地球科学与资源学院，西安 710054；2. 吉林大学 地球科学学院，长春 130061

摘要：对金川镍铜铂硫化物矿床Ⅰ、Ⅱ矿区主矿体典型钻孔中的不同类型矿石进行了系统观察和铂族元素分布特征研究。金川矿床中星点状矿石、网状矿石、块状矿石PGE总量依次降低，由西至东24号、1号、2号矿体的PGE总量亦具渐次降低趋势。形成块状矿石的硫化物熔体PGE分异作用较星点状和网状矿石更充分；块状矿石铂族元素分布特征显示其受晚期硫化物熔体分离结晶和单硫化物固溶体（MSS）分离作用控制。研究结果表明：星点状矿石是岩浆分离结晶过程中较快速度冷凝和就地硫化物熔离的结果；而网状矿石可能是硫化物熔体经深部熔离但未经充分的硫化物分离结晶作用贯入的产物；块状矿石成因定量模拟结果排除了R因子控制作用，不同矿体中块状矿石由不同程度的单硫化物固溶体（MSS）分离结晶所形成。

关键词：镍铜铂硫化物矿床；矿石成因；铂族元素；金川

中图分类号：P611.1⁺1　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2012.03.006

Ores genesis in Jinchuan Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit: evidence from geochemistry of platinum group elements

XU Gang[1], TANG Zhong-li[1], QIAN Zhuang-zhi[1], JIAO Jian-gang[1], WEI Xiang[1], WANG Shuo[2]

1. *College of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;*
2. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China*

Abstract: The authors studied the different types of ores in I and II mining areas of Jinchuan Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit, and particularly the distribution pattern of platinum group elements. The ∑PGE in disseminated ores, net-textured ores and massive ores reduced gradually with the same trend in the mining area of orebodies Nos. 24, 1 and 2 from the west to the east. The sulfide melt of massive ores had fuller PGE differentiation than disseminated ores and net-textured ores. The distribution of platinum group elements in massive ores showed that they were controlled by sulfide melt fractional crystallization, and the separation of monosulfide solid solution (MSS). The study showed that the disseminated ores were the results of rapid condensation and the in situ sulfide melting from the magma fractional crystallization. The net-textured ores formed by the sulfide melt fractional crystallization in the deep segregation. The study of quantitative simulation showed that the massive ores in different orebodies formed by the varying degrees of MSS fractional crystallization excluding the role control of R-factor.

Key words: Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit; ore genesis; platinum group elements; Jinchuan

收稿日期：2012-05-02；**改回日期**：2012-07-16

基金项目：深部探测技术与实验研究专项（SinoProbe-05-01）与中央高校基本科研业务费专项资金（CHD2011ZY004）联合资助.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引言

与镁铁-超镁铁质岩浆成矿作用有关以硫化物为主的岩浆 Ni-Cu-(PGE) 硫化矿床，作为典型的岩浆熔离矿床，是赋存 Ni、Cu 及 PGE 的重要矿床类型[1-3]。金川矿床作为世界第三、我国唯一的超大型镍铜(铂)岩浆硫化物矿床，是“小岩体成大矿”的最典型代表，其赋矿镁铁-超镁铁质岩体与中国其他铜镍硫化物矿床镁铁质岩体有一定的相似之处[4,5]。由于其规模之大，成矿过程的特殊性和复杂性一直备受国内外学者的关注，但对其成矿过程及矿床成因还存在较多的争论，关于矿石成因依然存在一些问题没有合理的解释。本次研究对不同类型矿石的钻孔样品进行系统的采集，针对不同主矿体各类型矿石的铂族元素数据，研究其亲铜元素的分布规律，进而为探讨矿床中不同矿体的不同类型矿石成因提供指示信息和证据。

1 地质背景

金川镍铜(铂)硫化物矿床位于龙首山隆起带内(图1a)，呈 NWW-SEE 方向带状展布，古元古代龙首山地层构成龙首山地区的结晶基底，上覆震旦纪碳酸盐岩沉积建造与其不整合接触，缺失早古生代地层。龙首山隆起经历了多期构造叠加，现今的 NWW 向断褶带构造景观主要是加里东期构造及其后的构造形迹。在本区发育有规模大小不等的镁铁-超镁铁质岩体、岩群，断续散布于龙首山隆起两侧(图1b)，受区域构造断裂控制，与构造线平行展布，主要以中、晚元古代为主。对于金川镁铁-超镁铁质岩体的年龄，前人曾采用 K-Ar 法、全岩 Rb-Sr 法、锆石 U-Pb 法、全岩-矿物 Sm-Nd 法及硫化物 Re-Os 法等多种同位素年代学方法对金川岩体的年龄进行了测定[6-13]，至今并未得出一致的测定结果，但金川超镁铁质岩体的成岩成矿年龄趋向为 830 Ma，形成于新元古代。区域地质背景对比研究显示，金川岩体是华北陆块的组成部分，不是华南[14]，可能受到 Rodinia 大陆裂解影响。

2 矿床地质概况

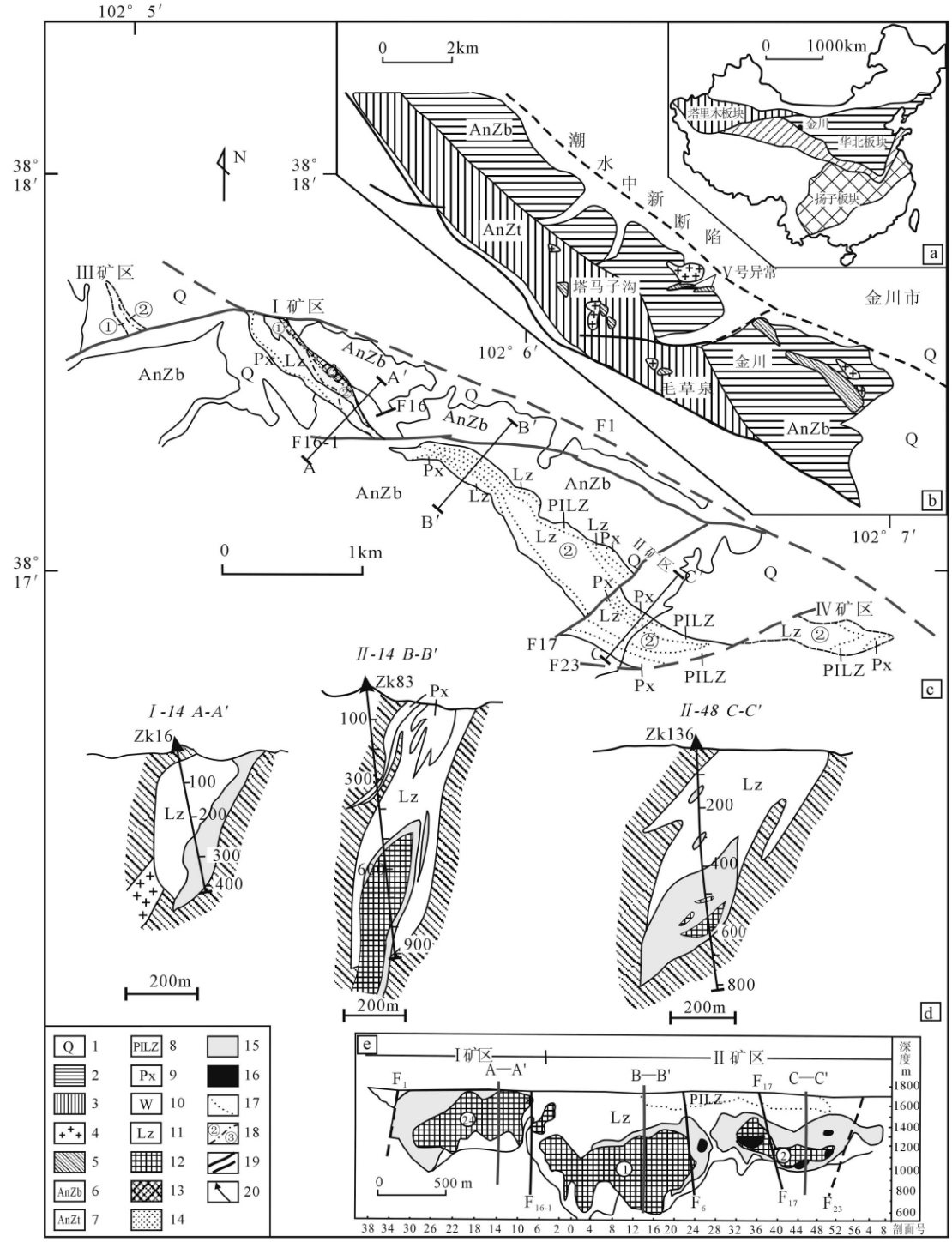
金川含矿超镁铁质岩体总体走向 310°，长 6 500 m，宽 20～527 m，呈 NW 向不规则岩墙状产出，最大延伸 >1 100 m，基岩出露面积仅 1.34 km^2，矿化率高达 47.8%[15]。含矿岩体与围岩接触边缘缺失冷凝边，多见接触交代蚀变和剪切变形。围岩为古元古代龙首山岩群白家咀子组混合花岗岩、片麻岩、大理岩、斜长角闪岩及变粒岩等。岩体空间形态受 NW 向扭张性、NNE 向张压扭性和 NEE 向压扭性断裂控制，后期 NEE 向断裂(F23、F16-1 和 F8)将金川岩体切割成几段，勘探者根据硫化铜镍矿体被发现时间和勘探先后，由西向东依次划分为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ四个矿区(图1c)。其中，Ⅰ矿区岩体中的24号矿体、Ⅱ矿区岩体中西部的1号矿体和东部的2号矿体是金川矿床的3个主矿体(图1d、e)，其 Ni、Cu、PGE 储量占整个矿床储量的90%以上[5]，其余矿体储量不足10%。

金川的矿石类型以海绵陨铁状和浸染状矿石为主，块状矿石仅在Ⅰ矿区中部及Ⅱ矿区东部零星分布，富铜铂钯矿体主要分布在矿体结合部位与局部构造发育地段。矿石金属矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿及黄铜矿，其次为紫硫镍矿、方黄铜矿、磁铁矿及马基诺矿等，以及微量铂族元素组成的砷化物、碲化物等。镍黄铁矿与磁黄铁矿常紧密共生，黄铜矿主要产于其他硫化物之间及边部；在不同矿石类型中磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿之间比例不同[16]。不同主矿体矿石的组构基本相似，都以熔离结构为主，矿石构造以星点状(浸染状)、网状(海绵陨铁状)、半块状构造为主(图2)。

星点状矿石构成的矿体或产在岩体的上部或产在网状矿体的两端或翼部，往往形成一个包围网状矿体的外壳；网状矿石通常以不同规模透镜体或板状体产在矿体的核部(如24号和1号矿体)和下部(如2号矿体)(图1e)。

块状矿石大多分布于Ⅱ号岩体东部2号矿体中，主要产于2号矿体的底部及附近围岩中，且块状矿石多呈脉状、透镜状产出，多沿构造裂隙展布，侵入浸染状、星点状矿石中，有时可见侵入围岩之中。矿体边部往往过渡为角砾状矿石，与其他类型矿石呈突变的接触关系，界限明显，局部可见晚期侵入的矿体切穿辉绿岩脉或含辉绿岩碎块的角砾岩。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

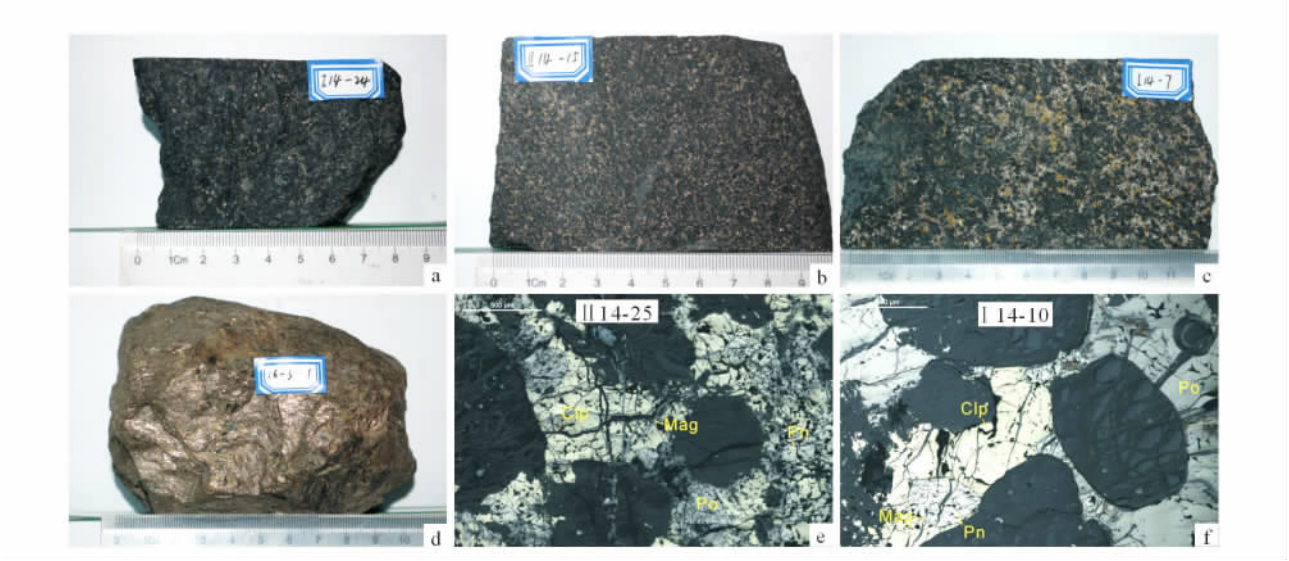


1. 第四系; 2. 龙首山白家咀子组地层 AnZb; 3. 龙首山塔马子沟组地层 AnZt; 4. 花岗岩; 5. 镁铁-超镁铁质岩体; 6. 前震旦系白家咀子组; 7. 前震旦系塔马子沟组; 8. 斜长二辉橄榄岩; 9. 橄榄二辉岩; 10. 二辉岩; 11. 二辉橄榄岩; 12. 网状结构的富矿体; 13. 氧化矿体; 14. 交代矿体; 15. 星点状结构的矿体; 16. 块状硫化物矿体; 17. 侵入体岩相界线; 18. 侵入期次编号及界线; 19. 断层; 20. 钻孔.

图 1　金川矿床位置（a，b）、矿区地质图及勘探线剖面图（c，d）、矿体纵断面图（e）（据文献 [17] 修改）

Fig. 1　Map of location (a, b), geological plane and sections (c, d) and vertical projection (e) of Jinchuan deposit

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



a. 星点状矿石; b. 网状矿石; c. 富铜网状矿石; d. 块状矿石; e. 变余海绵陨铁结构; f. 典型海绵陨铁结构

图 2 金川矿床矿石结构构造特征

Fig. 2 Texture and structure characteristics of ores in Jinchuan Ni–Cu–(PGE) deposit

3 样品采集与分析方法

本次研究样品主要针对Ⅰ、Ⅱ矿区的 3 个主矿体的 3 个典型钻孔进行了系统采集，采样点为Ⅰ矿区 14 行勘探线 ZK16 钻孔（24 号矿体）、Ⅱ矿区 14 行 ZK83 钻孔（1 号矿体）和Ⅱ矿区 48 行 ZK136 钻孔（2 号矿体）（图 1d）。矿石样品（28 件）主要为星点状和网状矿石，块状矿石采于Ⅰ矿区 16 行和Ⅱ矿区 35 行坑道穿脉中。所有样品均很新鲜，未受到明显的热液交代作用，均属于岩浆期成因的矿石样品。部分块状矿石样品引用前人数据（9 件）。铂族元素（PGE）测试样品在中国科学院广州地球化学研究所国家重点实验室用锍试金法进行前处理，在西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室结合同位素稀释剂法经电感耦合等离子体质谱仪测定。前处理过程[18,19]为：①焙制镍扣：将 200 目待测样品与一定比例碳酸钠、硼酸钠、硼砂、玻璃粉、硫磺及面粉混合，倒入坩埚中，加人适量^{190}Os 稀释剂，混合均匀后在 ~1 150℃高温炉内熔融，熔融 60 min 待冷却后敲碎坩埚取出镍扣；②粉碎镍扣：机械粉碎镍扣，要尽量减少样品损失和保持样品不受污染；③在水中粉化，用酸溶解后先蒸出 Os，再溶解过滤沉淀中的其他元素；④最后将定容后的样品用 ICP–MS 测定 Os、Ir、Ru、Rh、Pt、Pd 及 Au，选用的同位素是：^{190}Os、^{192}Os、^{193}Ir、^{99}Ru、^{103}Rh、^{195}Pt、^{105}Pd。全流程空白值：Os 和 Ir 为 0.015×10^{-9}、Ru 为 0.05×10^{-9}、Rh 为 0.01×10^{-9}、Pt 为 0.15×10^{-9}、Pd 为 0.3×10^{-9}。所有样品 Ni、Cu 等金属元素分析采用 ICP–MS，在西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。矿石 S 分析采用燃烧碘量法，在中国地质调查局西安地质调查中心测试中心完成，测试数据结果见表 1。

4 矿石铂族元素地球化学

由于金川矿体是由橄榄石堆晶、硫化物熔体及硅酸盐岩浆混合形成“晶粥”贯入成矿的产物[20-22]，矿体中 Cu、Ni 和 PGE 全岩原始数据不能代表岩浆演化分异过程中熔离出硫化物熔体中这些元素的含量，为进一步反映 PGE 与硫化物中其他元素之间的关系，对矿石金属量进行 100% 硫化物计算。计算时，需要对来自硅酸盐的 Ni 进行校正，假定 Ni 在 100% 硅酸盐中为 $1\ 000\times10^{-6}$，该值应在 S 含量 < 0.2% 范围内。由于 S 分析和 Ni 校正的误差，随着贫 S 样品中 S 含量的减少而增大，故 S 含量 < 0.5% 的样品不参加 100% 硫化物计算。样品中硫化物总量用其 S 含量乘以一个系数（2.8）来估算，此值落在该矿床块状矿石中 S 的含量范围

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

内。Ni、Cu、Co、PGE 及 Au 元素在 100% 硫化物中的含量采用以下公式计算[23]:

$$C_{(100\%\text{硫化物})} = C_{Wr} \times 100 / (2.527 \times S + 0.3408 \times Cu + 0.4715 \times Ni) \quad (1)$$

其中，$C_{(100\%\text{硫化物})}$ 为元素 100% 硫化物含量; C_{Wr} 为元素在全岩中的含量 (%); S、Cu 和 Ni 分别对应其全岩分析含量。计算结果见表 2。

表 1　金川铜镍矿床矿石铂族元素含量

Table 1　PGE content of Jinchuan Ni–Cu– (PGE) sulfide deposit

样品号	矿石性质	S	Ni	Cu	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	∑PGE
		/10^{-6}	/10^{-6}	/10^{-6}	/10^{-9}	/10^{-9}	/10^{-9}	/10^{-9}	/10^{-9}	/10^{-9}	
24 矿体											
II14-17	星点状	708	1206	27	0.02	0.01	0.04	0.03	0.20	0.18	0.47
II14－24	星点状	1112	1356	38	0.06	0.02	0.03	0.02	0.78	0.30	1.20
II14-3	星点状	3490	2157	407	0.84	0.63	0.61	0.33	55.02	5.31	62.74
II14-10	网状	33764	20366	15364	6.66	5.55	2.42	5.27	213.00	177.38	410.27
II14-7	网状	55060	20999	27538	29.50	54.06	38.42	26.56	22.14	239.60	410.28
II14-32	块状	58437	30628	20443	28.03	38.44	32.42	23.16	11.24	557.60	690.90
II14-9	块状	56828	35906	12203	35.46	38.56	24.00	22.14	23.30	116.08	259.54
16-5-1	块状	361600	85400	18700		622.00	510.00	137.00	6.40	410.00	1685.00
JC06-802	块状	208850	42304	19717		238.00	91.70	78.70	102.00	1216.00	1726.40
JC06-804	块状	335550	60900	23986		220.00	354.00	123.00	35.80	187.00	919.80
JC06-807	块状	315050	61600	23634		520.00	444.00	191.00	12.80	628.00	1795.80
JC06-809	块状	297450	57000	21204		604.00	496.00	202.00	11.60	731.00	2044.60
1 矿体											
II14-5	星点状	4054	2410	816	1.50	0.81	0.94	0.43	41.80	17.98	63.47
II14-40	星点状	6460	2828	1558	0.87	0.42	0.61	0.36	3.82	5.22	11.30
II14-35	星点状	11661	6962	946	17.21	13.69	12.26	6.25	78.98	74.40	202.80
II14-16	星点状	15454	7660	1519	18.57	14.69	12.07	7.36	90.36	84.80	227.85
II14-19	网状	31825	14437	11109	28.87	25.80	23.80	12.80	33.32	199.84	324.43
II14-30	网状	31208	17065	12733	5.51	5.87	2.59	6.97	139.80	284.80	445.53
II14-25	网状	34954	19236	6712	4.37	3.77	2.16	4.24	686.60	295.40	996.53
II14-26	网状	38276	21760	18172	5.12	4.58	1.97	6.69	96.12	199.76	314.23
II14-15	网状	44013	26320	6685	41.39	67.72	57.56	28.24	20.82	308.80	524.53
2 矿体											
II48-39	星点状	5764	3349	1308	1.73	0.83	1.27	0.62	10.02	15.72	30.19
II48-51	星点状	11474	4435	5723	0.92	0.56	0.68	0.42	4.85	20.26	27.69
II48-32	星点状	5905	4715	668	4.07	2.67	3.53	1.55	12.87	18.74	43.43
II48-59	星点状	26776	8116	8330	3.07	2.18	2.21	2.39	66.44	11.42	87.71
II48-66	网状	22105	11294	2479	2.11	1.10	2.06	0.86	5.12	15.63	26.87
II48-58	网状	37225	14534	5483	11.28	6.52	8.98	3.70	6.54	7.84	44.85
II48-61	网状	31861	14934	5003	2.32	1.32	1.53	1.37	9.16	29.64	45.35
II48-64	网状	31510	18174	4628	8.89	3.04	8.67	5.19	236.44	30.04	292.27
II48-63	网状	44561	23125	7254	20.02	12.08	18.48	6.96	11.43	12.94	81.90
R35U-02	块状	229400	56900	20200		35.90	38.40	18.45	408.00	106.80	608.00
R35U-03	块状	245000	59800	36700		22.90	22.60	12.80	142.00	208.00	408.00
JD04-70	块状	258000	61700	12700		13.20	22.40	13.50	31.00	93.40	173.50
JD04-68	块状	227000	58785	10989		18.60	35.30	15.70	11.70	138.00	219.30
JD04-66	块状	251000	64900	12300		44.10	111.00	23.50	2.20	60.10	240.90
JD04-64	块状	269000	58600	13700		34.40	94.30	21.90	3.00	51.80	205.40
JD04-62	块状	268000	48200	12600		8.56	8.05	13.20	0.51	109.00	139.32

注: JD04－样品引自文献 [21], JC06－样品引自文献 [24].

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 金川铜镍矿床矿石铂族元素100%硫化物计算结果

Table 2 PGE_{100} content of Jinchuan Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit

样品号	矿石性质	Ni	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Cu	S	∑PGE
		wt%	/10⁻⁹	/10⁻⁹	/10⁻⁹	/10⁻⁹	/10⁻⁹	/10⁻⁹	wt%	wt%	
24矿体											
II14-17	星点状	8.80	8.37	5.49	17.32	10.56	82.82	76.06	1.13	0.07	201
II14-24	星点状	10.38	16.80	5.49	8.66	5.78	225.86	85.20	1.10	0.11	348
II14-3	星点状	11.69	83.83	63.16	61.55	33.08	5515.62	532.51	4.08	0.35	6290
II14-10	网状	19.43	66.47	55.37	24.16	52.58	2126.60	1770.97	15.34	3.38	4096
II14-7	网状	12.72	186.21	341.24	242.52	167.65	139.75	1512.42	17.38	5.51	2590
II14-32	块状	17.62	165.81	227.35	191.74	136.98	66.49	3297.87	12.09	5.84	4086
II14-9	块状	21.29	215.30	234.13	145.72	134.43	141.47	704.82	7.41	5.68	1576
16-5-1	块状	8.89		647.65	531.03	142.65	6.66	426.90	1.95	37.65	1755
JC06-802	块状	7.56		429.27	165.40	141.95	183.97	2193.24	3.56	20.89	3114
JC06-804	块状	6.88		248.64	400.08	139.01	40.46	211.34	2.71	33.56	1040
JC06-807	块状	7.38		624.08	532.87	229.23	15.36	753.69	2.84	31.51	2155
JC06-809	块状	7.23		768.68	631.24	257.08	14.76	930.31	2.70	29.75	2602
1矿体											
II14-5	星点状	12.19	128.86	69.82	80.97	36.71	3585.46	1542.09	7.00	0.41	5444
II14-40	星点状	10.15	47.79	23.31	33.53	19.68	209.89	287.08	8.57	0.65	621
II14-35	星点状	18.13	520.42	414.05	370.63	189.09	2388.01	2249.53	2.86	1.17	6132
II14-16	星点状	15.52	430.07	340.09	279.51	170.53	2092.53	1963.77	3.52	1.55	5277
II14-19	网状	14.86	317.19	283.47	261.50	140.64	366.09	2195.69	12.21	3.18	3565
II14-30	网状	17.70	60.36	64.29	28.34	76.38	1532.07	3121.13	13.95	3.12	4883
II14-25	网状	18.39	43.86	37.78	21.67	42.49	6887.63	2963.31	6.73	3.50	9997
II14-26	网状	18.44	45.20	40.45	17.39	59.08	849.29	1765.03	16.06	3.83	2776
II14-15	网状	20.21	328.77	537.85	457.15	224.29	165.36	2452.56	5.31	4.40	4166
2矿体											
II48-39	星点状	14.26	104.31	49.91	76.43	37.61	604.18	947.50	7.88	0.58	1820
II48-51	星点状	10.50	27.91	16.83	20.70	12.83	146.87	613.14	17.32	1.15	838
II48-32	星点状	21.48	234.06	153.69	203.43	89.34	741.07	1078.51	3.84	0.59	2500
II48-59	星点状	9.67	41.34	29.38	29.71	32.13	893.88	153.59	11.21	2.68	1180
II48-66	网状	16.70	33.94	17.80	33.15	13.80	82.48	252.01	4.00	2.21	433
II48-58	网状	13.27	109.76	63.39	87.32	36.00	63.66	76.23	5.33	3.72	436
II48-61	网状	15.71	25.98	14.74	17.16	15.37	102.67	332.11	5.61	3.19	508
II48-64	网状	19.23	99.00	33.86	96.60	57.79	2633.80	334.63	5.16	3.15	3256
II48-63	网状	17.66	158.93	95.85	146.66	55.28	90.71	102.68	5.76	4.46	650
R35U-02	块状	9.22		58.53	62.60	30.08	665.14	174.11	3.29	37.40	990
R35U-03	块状	9.02		34.71	34.25	19.40	215.21	315.24	5.56	37.13	619
JD04-70	块状	8.96		19.26	32.68	19.70	45.23	136.27	1.85	25.80	253
JD04-6	块状	9.65		30.74	58.34	25.95	19.34	228.06	1.82	22.70	362
JD04-66	块状	9.66		65.91	165.90	35.12	3.29	89.83	1.84	25.10	360
JD04-64	块状	8.19		48.31	132.43	30.76	4.21	72.75	1.92	26.90	288
JD04-62	块状	6.81		12.15	11.43	18.74	0.72	154.77	1.79	26.8	198

4.1 网状和星点状矿石铂族元素特征

矿床24号、1号和2号主矿体PGE 100%硫化物计算结果的分析表明，由西至东平均∑PGE有逐渐降低趋势，且星点状矿石→网状矿石→块状矿石PGE总体含量亦具有降低趋势；1号、24号矿体星点状和网状矿石∑PGE高于2号矿体同类型矿石约2~4倍。各主矿体网状和星点状矿石具有相似的PGE配分模式，均为Cu、Pt、Pd富集和

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

IPGE（Ir、Os、Ru、Rh）略微亏损且较为平坦的左倾配分模式（图 3 A、B），网状矿石与块状矿石配分曲线呈近似的“解耦”特征；其 Pt、Pd 含量相当，明显高于块状矿石（图 3 B、C），∑PGE、Ni/Cu、Pd/Ir、Pd/Pt、(Pt + Pd) / (Os + Ir + Ru) 等特征值均亦较为相似，其中 Pd/Ir、(Pt + Pd) / (Os + Ir + Ru) 比值明显高于块状矿石（表 3）。两种矿石中 Ir 与 Ru、Rh 相关性良好，Ir 与 Pt、Pd 仅显示弱的正相关；网状矿石部分样品 Ru 显示亏损，Pt、Pd 富集，2 号矿体部分样品出现 Pt 富集 Pd 亏损的“V”字形配分模式（图 3 B）。

4.2　块状矿石铂族元素特征

块状矿石铂族配分模式与网状、星点状矿石明显不同，表现为 Ir、Rh 轻微正异常，Pt 强烈负异常。2 号矿体与 24 号矿体配分趋势相似（图 3 C），2 号矿体块状矿 PGE 总量较低，比 24 号低一个数

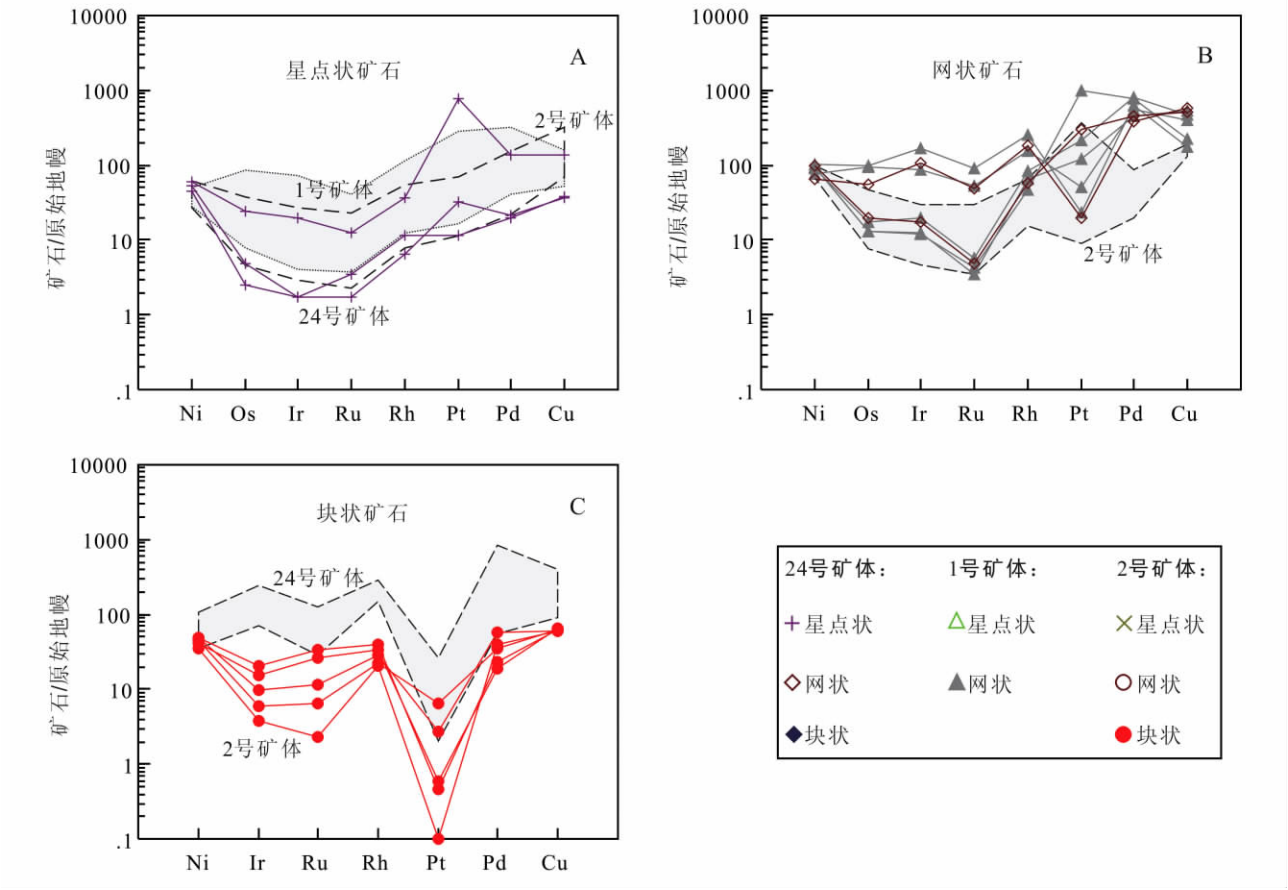


图 3　金川矿床Ⅰ、Ⅱ矿区矿石铂族元素原始地幔标准化图（原始地幔标准值据文献 [25]）

Fig. 3　PGE primitive mantle normalized patterns of ores in I and II mining areas of Jinchuan Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit

表 3　金川主矿体铂族元素特征值对比

Table 3　Characteristic values of PGE in Jinchuan ore deposit

矿体	矿石类型	∑PGE/ $\times 10^{-9}$	Ni/Cu	Pd/Ir	Pd/Pt	Pt/Pt*	Ni/(Ni + Cu)	(Pt + Pd) / (Os + Ir + Ru)	Cu/Pd/ $\times 10^3$	Ni/Pd/ $\times 10^3$
24 号	网状及星点状	2704. 82	4. 42	14. 84	2. 61	3. 27	0. 70	14. 60	111. 16	557. 67
1 号		4762. 19	2. 65	25. 39	3. 23	1. 50	0. 67	20. 73	67. 78	107. 29
2 号		1291. 30	2. 79	12. 94	1. 79	1. 29	0. 68	6. 36	319. 22	702. 37
24 号	块状	2428. 80	2. 38	4. 32	30. 63	0. 05	0. 70	2. 15	58. 82	148. 49
2 号		292	5	6	55	0. 07	1	3	160	744

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量级（表 3），Pt 亏损更强烈，Pd/Pt、(Pt + Pd) / (Os + Ir + Ru) 比值明显较低；24 号矿体块状矿中 Ir、Ru、Rh 的含量明显较高，而 2 号矿体块状矿石中 IPGE 含量与星点状和网状相近（图 4 A、B）；24 号矿体和 2 号矿体块状矿石中 Ir 与 Pt、Pd 呈明显的负相关（图 4 C），其特征与星点状、网状矿石相反；2 号、24 号矿体中块状矿石 Pd/Ir 比值介于 1 ~ 10，Pt/Pd 比值很小，为 0.01 ~ 0.2（图 4 D、E）；不同矿石类型中 Cu 与 Pd 相关性较弱（图 4 F）。

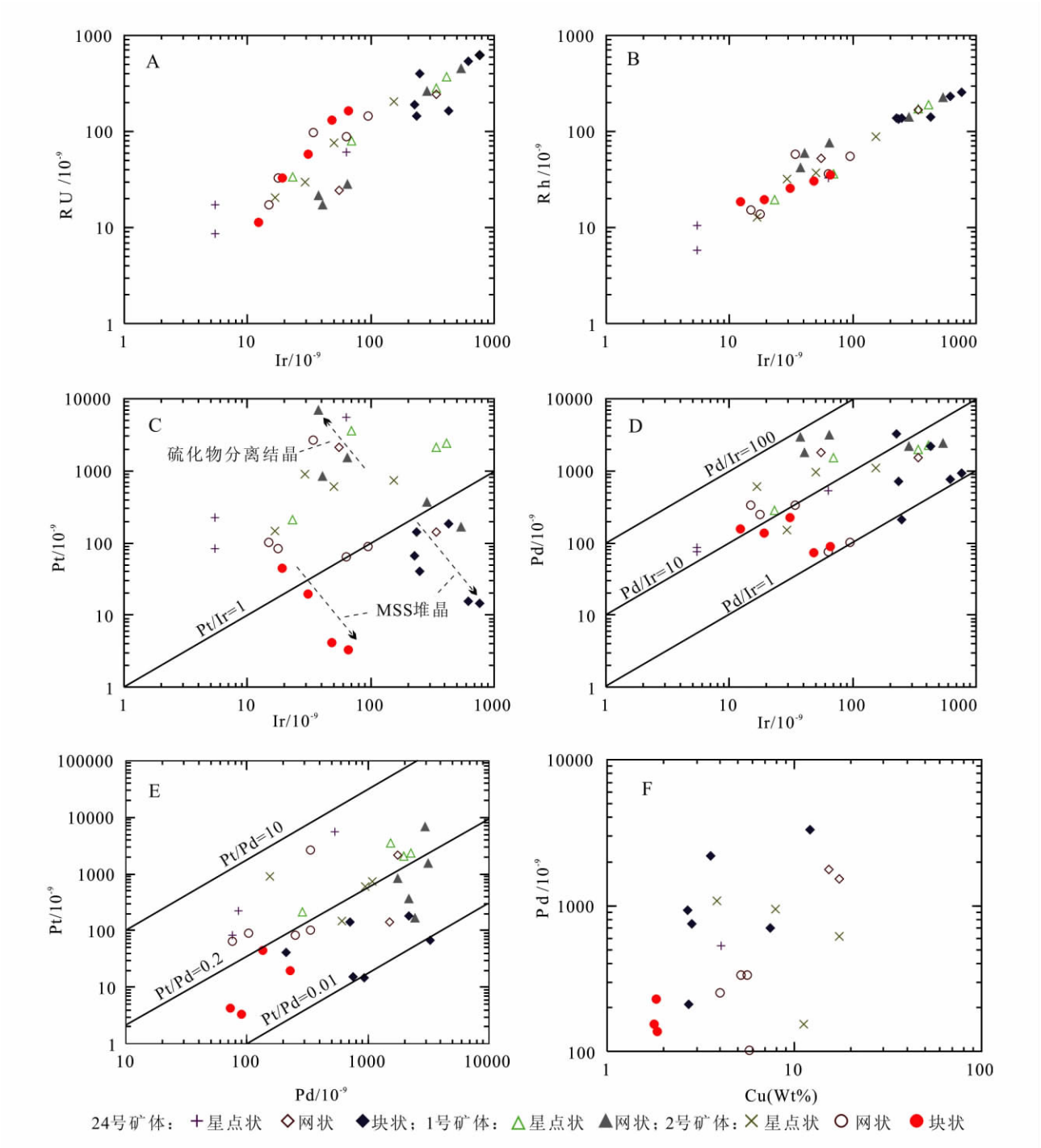


图 4 金川矿床矿石 Ir 与 Ru、Rh、Pt 和 Pd 以及 Pt 与 Pd，Cu 与 Pd 相关图

Fig. 4 Diagram of PGE and Cu–Pd correlations in Jinchuan ores

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5　讨论

5.1　星点状和网状矿石成因

硫化物分离结晶作用会导致众多典型岩浆铜镍硫化物矿床中的块状矿石和网状矿石的亲铜元素成分发生变化。如 Noril'k 地区 Oktabr'sky 矿床中富 Cu 的矿石同样富 Pt 和 Pd，被认为是硫化物熔体结晶分离作用导致的[26]；Bushveld 矿区底部块状矿石富 Os、Ir、Ru、Rh 是硫化物固熔体分离结晶出单硫化物固溶体最后固结的结果[27]。

硫化物熔体从岩浆中熔离出后由于重力作用聚集在一起，随着温度降低硫化物发生分离结晶。硫化物首先分离结晶出单硫化物固溶体（MSS），由于 IPGE 在 MSS 中为相容元素（$D^{Mss/Sul}>1$），而 Cu 和 PPGE 为不相容元素（$D^{Mss/Sul}<1$），因此，单硫化物固溶体的分离结晶过程导致 IPGE 在 MSS 中富集以及 Cu 和 PPGE 在残余硫化物熔体中富集，从而造成硫化物中 IPGE 与 PPGE 以及 Ni 与 Cu 发生分异，MSS 中 Pd/Ir 比值减小，而残余岩浆结晶形成的硫化物中 Pd/Ir 比值增大[26,28]。

星点状和网状矿石的较高 Pd/Ir、(Pt + Pd) / (Os + Ir + Ru) 比值，Ir 与 Pt、Pd 的正相关关系，均与块状矿石特征相反，显示前者 IPGE 与 PPGE 分异不明显，而块状矿石的硫化物熔体的 PGE 经历了较充分的分异作用；网状矿石与块状矿石 PGE 配分模式的“解耦”特征及块状矿石中 Ir 与 Pt、Pd 呈明显的负相关，均暗示了矿体可能经历了硫化物熔体的分离结晶作用和 MSS 堆晶作用。24 号矿体块状矿石 Ir、Ru、Rh 的含量明显较高，这可能是因为早期熔离出的硫化物熔体不断提取了后期新补充的岩浆中的 PGE，或是硫化物熔体较高程度的分离结晶所导致。

这两类矿石各自地质特征、稀土元素特征[29]及 PGE 特征，均显示星点状、网状矿石中 IPGE 与 PPGE 分异不明显。星点状矿石可能是岩浆分离结晶过程中较快速度冷凝和就地硫化物熔离的结果，而网状矿石可能是硫化物熔体经深部熔离但未经充分的硫化物分离结晶作用贯入的结果。

5.2　块状矿石成因

块状矿石中较低的 PGE 总量，Ir 与 Pt、Pd 明显的负相关性，Pt、Pd 的极低含量，这种特征在 2 号矿体块状矿石中表现更为明显，Pt 更强烈的亏损。

造成块状矿石特殊的铂族元素特征是由 R 因子控制，还是单硫化物固溶体（MSS）的结晶分离作用造成？通过数学模拟计算进行讨论。

如果是硫化物熔离作用中 R 因子控制铂族金属含量，则根据公式（2）[30]：

$$C_{sul}^{i}=C_{0}^{i}\text{硫}*(R+1)/(R+D^{i}) \quad (2)$$

其中，C_{sul}^{i} 为元素 i 在硫化物熔体中的含量；C_{0}^{i}硫为原始岩浆成分；D^{i} 为元素 i 在硫化物熔体与硅酸盐熔体中的分配系数；R 为硅酸盐熔体与硫化物熔体的质量比。因为 *PGE* 在硫化物熔体与硅酸盐熔体之间的分配系数 D^{i} 很大（$D^{Ir}=2.6\sim3.1\times10^{4}$，$D^{Pt}=1.0\pm0.4\times10^{4}$，$D^{Pd}=1.7\sim5.5\times10^{4}$）[31,32]，$D>>R$，故式（2）简化为:

$$C_{sul}^{i}=C_{0}^{i}\text{硫}*(R+1) \quad (3)$$

金川岩体母岩浆具高镁特征，结合前人研究以及岩体的 LREE 富集现象，其与高程度部分熔融的大陆溢流玄武岩浆相似，可以认为金川岩体原始岩浆成分具有高的 Pd 和 Pt 丰度和中等的 Ir、Ru 和 Rh 含量[21]。所以设定金川岩体的原始岩浆成分与原始地幔高程度部分熔融的苦橄质岩浆成分一致，即 Pt、Pd 和 Ir 的含量依次为 10.86×10^{-9}、9.54×10^{-9}和 0.76×10^{-9}[23]。

根据设定的原始岩浆成分由（3）式进行简单的模拟计算：只有当 R 值很小时（R 约为 5 ~ 10，实际地质过程 R 不可能如此小），熔离出的 Pt 含量与矿状矿石中的 Pt 一致，但 Ir 和 Pd 等其他 PGE 含量远低于样品中含量。另外，2 号和 24 号矿体中块状矿石 Ir 和 Pt 不具有正相关关系（图 4 C），相反为负相关。因此，R 因子不是 2 号和 24 号矿体块状矿石铂族元素分布特征的主要控制因素。

单硫化物固溶体（MSS）的分离结晶作用可以根据 Rayleigh 分馏公式来进行定量计算得到 MSS 以及残余硫化物熔体中的亲铜元素的含量。

某种微量元素在分离结晶相中的含量相对于初始熔体的富集或亏损的程度是:

$$Mss^{i}/C_{0}^{i}\text{硫}=D^{i}*F^{(Di-1)} \quad (4)$$

其中，Mss^{i} 为单硫化物固溶体中元素 i 的含量；C_{0}^{i}硫为元素 i 在硫化物熔浆中的含量；F 为残余熔体的分数；D^{i} 为元素 i 在单硫化物固溶体与硫化物熔体之间的分配系数。

各主矿体不同类型矿石中 PGE 元素含量见表 2，模拟选取的参数[33]是：$D^{Ir}=10$，$D^{Pt}=0.12$，

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

初始硫化物熔浆中 Ir 含量为 0.2×10^{-6}，Pt 含量[34]为 1×10^{-6}。模拟计算结果见表 4、图 5。

表 4 金川主矿体硫化物熔体分离结晶过程模拟计算结果

Table 4 Simulation results for sulfide melt fractional crystallization in Jinchuan deposit

$M_{SS}^{i}/C_{0}^{i}=D^{i}*F^{(Di-1)}$	Ir ($\times10^{-6}$)	Pt ($\times10^{-6}$)
DMSS/Sul	10	0.12
F	MSS 中金属元素含量	
0.90	0.7748	0.1317
0.85	0.4632	0.1384
0.81	0.3002	0.1444
0.80	0.2684	0.1460
0.75	0.1502	0.1546
0.71	0.0917	0.1622
0.60	0.0202	0.1881
典型富 Pt、Pd 网状矿石		
24 号矿体 I14－10	0.0554	2.1266
2 号矿体 II48－64	0.0338	2.6338
1 号矿体 6 行块状特富矿石		
6B－G1	0.0012	2.10
6B－G2	0.0015	1.90
6B－G3	0.0011	2.69

注：6 行特富块状矿石数据引自文献[35]。

块状矿石 Ir–Pt 的分布与模拟结果 MSS 中 PGE 元素含量变化曲线较为相似（图 5），模拟计算得到的 Ir–Pt 相关图表明 2 号矿体块状矿石主要由 30% ～40% 分离结晶后的 MSS 堆晶形成，而 24 号矿体块状矿石由 10% ～25% 分离结晶后的 MSS 冷却固结形成，吻合块状矿石 PGE 原始地幔配分模式中相对富 IPGE 而贫 PPGE 特征。

另外，1 号矿体 6 行块状、特富块状矿石落于残余液相附近，表明固溶体结晶分离后富集 Cu、Pt 和 Pd 的残余硫化物熔体（部分贯入到岩体的原生裂隙或围岩中），形成此类富铜和铂、钯的块状矿石和脉状矿石；而部分富 Cu 和 Pt、Pd 的网状矿石也落于残余液相附近，表明部分富 Cu 和 Pt、Pd 的网状矿石也可能与 MSS 分离结晶后残余硫化物熔体固结形成有关。

因此，我们可以认为块状矿石可能是硫化物矿浆经单硫化物固溶体结晶后，单硫化物固溶体堆晶而成的产物。

5.3 矿石形成过程

首先高含量的 Pd 和 Pt 以及中等含量的 Ir、Ru、Rh 的原始岩浆[21]，在深部岩浆房中由于橄榄石、

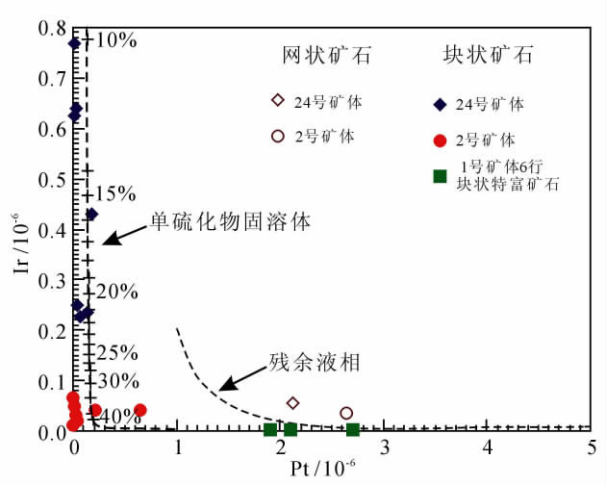


图 5 金川矿床矿石成因模拟 Pt–Ir 相关图（图中数字标记代表分离结晶出的 MSS 占硫化物熔体百分比）

Fig. 5 Simulation diagram of Pt–Ir correlations in Jinchuan ores

铬铁矿及辉石等的分离结晶作用，以及少量地壳物质的混染，导致了岩浆中的硫化物达到过饱和而发生硫化物熔离作用，硫化物熔离造成了金川矿床母岩浆 PGE 的亏损；在以后的演化过程中，含少量硫化物熔体的母岩浆首先向上侵位，发生进一步的结晶分异作用，形成各类星点状和网状矿石。而经深部熔离形成的硫化物熔体，相对滞后，由于构造脉动上升侵位贯入到构造破碎带，从而早期形成星点状和网状矿石被破碎、改造形成角砾状矿石。与此同时，随着温度的降低，硫化物熔体结晶最先形成单硫化物固溶体和少量残余的硫化物液体，单硫化物固溶体分离堆晶形成块状矿石，而残余富集 Cu、Pt 和 Pd 的硫化物熔体/液体则形成富铜和铂、钯的特富块状矿石以及部分富 Cu 和 Pt、Pd 的网状矿石。

6 结论

（1）星点状矿石可能是岩浆分离结晶过程中较快速度冷凝和就地硫化物熔离的结果，而网状矿石可能是硫化物熔体经深部熔离但未经充分的硫化物分离结晶作用贯入的产物。

（2）2 号矿体块状矿石主要由 30% ～40% 分离结晶后的 MSS 堆晶形成，24 号矿体块状矿石由 10% ～25% 分离结晶后的 MSS 冷却固结形成；富铜和铂、钯的特富块状矿石和脉状矿石可能与固溶

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

体结晶分离后富集 Cu、Pt 和 Pd 的残余硫化物熔体固结形成有关。

参考文献:

[1] 汤中立，杨杰东，徐士进，等. 金川含矿超镁铁岩的 Sm-Nb 法定年 [J]. 科学通报，1992，37 (10)：918-920.
TANG Zhong-li，YANG Jie-dong，XU Shi-jin，et al. The Sm—Nd age of ultrabasic ore-bearing rock in Jinchuan [J]. Chinese Science Bulletin，1992，37 (10)：918-920.

[2] Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits [M]. New York：Oxford University Press，1989：1-186.

[3] Naldrett A J. Magmatic sulfide deposit：geology，geochemistry and exploration [M]. New York：Springer-Berlin Heidelberg，2004：1-727.

[4] 梁树能，李光辉，孙景贵，等. 黑龙江五星铜镍、铂钯矿床镁铁质杂岩的元素地球化学特征与岩石成因 [J]. 世界地质，2009，28 (1)：28-36.
LIANG Shu-neng，LI Guang-hui，SUN Jing-gui. et al. Element geochemical characteristics and petrogenesis of mafic complex rocks in the Cu—Ni and Pt—Pd deposit of Wuxing in Heilongjiang [J]. Global Geology，2009，28 (1)：28-36.

[5] 李丽，杨永强，王育习. 甘肃北山地区怪石山含铜镍矿化镁铁质-超镁铁质杂岩体的地球化学特征及成因机制 [J]. 世界地质，2010，29 (1)：16-27.
LI Li，YANG Yong-qiang，WANG Yu-xi. Geochemical characteristics and petrogenesis of Guaishishan copper-nickelm ineralized mafic-ultramafic complex in Beishan region of Gansu [J]. Global Geology，2010，29 (1)：16-27.

[6] 汤中立. 金川铜镍硫化物矿床的偏在性 [J]. 甘肃地质科技情报，1995 (1/2)：15-22.
TANG Zhong-li. Magmatic mineralization preferentiality of the Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit [J]. Acta Geologica Gansu，1995 (1/2)：15-22.

[7] 张宗清，杜安道，唐索寒，等. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征 [J]. 地质学报，2004，78 (3)：359-365.
ZHANG Zong-qing，DU An-dao，TANG Suo-han，et al. Age of the Jinchuan copper-nickel deposit and isotopic geochemical feature of its source [J]. Acta Geologica Sinica，2004，78 (3)：359-365.

[8] 李献华，苏犁，宋彪，等. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 科学通报，2004，49 (4)：401，402.
LI Xian-hua，SU Li，SONG Biao，et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinchuan ultramafic intrusion and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin，2004，49 (4)：401，402.

[9] Su S G，Geng K，Tang Z L，et al. Mineralization characteristics of platinum group elements in Jinchuan Cu—Ni—PGE deposit [C] //Meeting the Global Challenge. Beijing：China Land Publishing House，2005：35-39.

[10] Keays R R，Lightfoot P C. Formation of Ni—Cu—platinum group element sulfide mineralization in the Sudbury impact melt sheet [J]. Miner Petrol，2004，82：217-258.

[11] Li C S，Ripley E M. Formation of giant Ni—Cu sulfide deposits in dynamic magma conduits [C] //Mineral Deposit Research：Meeting the Global Challenge，Beijing，2005：27，28.

[12] Li C S，Ripley E M. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits [J]. Mineral Deposita，2005，40 (2)：218-230.

[13] Yang G，Du A D，Lu J R，et al. Re—Os (ICP—MS) dating of the massive sulfide ores from the Jinchuan Ni—Cu—PGE deposit [J]. Science China (Ser. D)，2005，48 (10)：1672-1677.

[14] Li X H，Su L，Chung S L，et al. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni—Cu sulfide deposit：associated with the 825 Ma south China mantle plume? [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems，2005，6：1-16.

[15] 汤中立，闫海卿，焦建刚，等. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用 [J]. 矿床地质，2006，25 (1)：1-8.
TANG Zhong-li，YAN Hai-qing，JIAO Jian-gang，et al. New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small intrusive bodies [J]. Mineral Deposits，2006，25 (1)：1-8.

[16] 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，1995：113-179.
TANG Zhong-li，LI Wen-yuan. The metallogenetic model and geological contrast on the Jinchuan platinum-bearing Ni—Cu sulfide deposit [M]. Beijing：Geological Publishing House，1995：113-179.

[17] 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制 [J]. 地质学报，1996，36 (3)：237-243.
TANG Zhong-li. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in China [J]. Acta Geologica

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Sinica, 1996, 36 (3): 237-243.

[18] Sun Y L, Guan X Y, Du A D. Determination of platinum group elements by inductively coupled plasma-mass spectrometry combined with nickel sulfide fire assay and tellurium coprecipitation [J]. Spectrochimica Acta, 1998, 53: 1463-1467.

[19] Sun Y L, Sun M. Nickel sulfide fire assay improved for pre-oncentration of platinum groupelements in geological samples: a practical means of ultra-trace analysis combined with inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. The Analyst, 2005, 130: 664-669.

[20] De Waal S A, Xu Z H, Li C S, et al. Emplacement of vicious mushes in the Jinchuan ultramafic intrusion, western China [J]. Canadian Mineralogist, 2004, 42: 371-392.

[21] Song X Y, Keays R R, Zhou M F, et al. 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.

[22] 李士彬, 宋谢炎, 胡瑞忠, 等. 甘肃金川Ⅱ号岩体岩相学特征及分离结晶过程探讨 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (10): 2553-2560.
LI Shi-bin, SONG Xie-yan, HU Rui-zhong, et al. Petrographic features of segment Ⅱ of the Jinchuan intrusion, Gansu, and its fractional crystallization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (10): 2553-2560.

[23] Barnes S J, Lightfoot P C. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processses affecting their copper and platinum - group element contents [C]. Econ Geol 100th Anniversary Volume, 2005: 179-213.

[24] 陈列锰. 金川Ⅰ号岩体及其铜镍硫化物矿床特征和成因: 博士学位论文 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
CHEN Lie-meng. Features and genesis of segment Ⅰ and its hosted Ni-Cu sulfide deposits of the Jinchuan intrusion, Gansu Province: PhD dissertation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Scineces, 2009.

[25] McDonough W W, Sun S S. The composition of the Earth [J]. Chemical Geology, 1995, 120: 223-253.

[26] Barnes S J, Makovicky E, Karup-Moller S, et al. Partition coefficients for Ni, Cu, Pd, Pt, Rh and Ir between monosulfide solid solution and sulfide liquid and the implication for the formation of composition ally zoned Ni—Cu sulfide bodies by fractional crystallization of sulfidel-iquid [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1997, 34: 366-374.

[27] Barnes S J, Maier W. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids [J]. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 1999, 13: 69-106.

[28] 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 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 Xie-yan, HU Rui-zhong, CHEN Lie-meng. 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.

[29] 赵振华, 钱汉东. 金川铜镍硫化物矿床两类矿石的稀土元素地球化学特征研究 [J]. 矿床地质, 2008, 27 (5): 613-621.
ZHAO Zhen-hua, QIAN Han-dong. Geochemical REE study of two kinds of ores in Jinchuan copper-nickel sulfide deposit [J]. Mineral Deposits, 2008, 27 (5): 613-621.

[30] Campbell I H, Naldrett A J. The influence of silicate: sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides [J]. Economic Geology, 1979, 74: 1503-1505.

[31] Fleet M E, Crocket J H, Stone W E. Partition of platinum group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60 (13): 2397-2412.

[32] 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]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58 (4): 1251-1260.

[33] Bockrath C, Ballhaus C, Holzheid A. Fractionation of the platinum-group elements during mantle melting [J]. Science, 2004, 305: 1951-1953.

[34] 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 Shang-guo, TANG Zhong-li, ZHOU Dai. Emplacement sequence in the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (2): 118-126.

[35] 高亚林. 金川矿区地质特征、时空演化及深边部找矿研究: 博士学位论文 [D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
GAO Ya-lin. Study on geological characteristics, temporal and spatial evolution, prospecting in the depth and border of Jinchuan deposit: PhD dissertation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net