

甘肃金川铜镍(铂)硫化物矿床 岩浆通道前进方向探讨

刘美玉, 苏尚国, 宋 晨, 蔡 楠

(中国地质大学, 北京 100083)

[摘要] 综合运用地球化学手段,研究了金川铜镍(铂)硫化物矿床铂族元素的空间分布特征,并结合定量结构分析,探讨了岩浆演化过程中的动力学作用过程,讨论了金川镁铁-超镁铁质岩浆的演化历程。研究发现,铂族元素在矿体中的空间分布呈一定规律变化。整体说来,自西向东,Pd/Ir-Ni/Cu在各矿体间呈递减趋势,分析认为造成这种规律的原因是矿石的形成经历了单硫化物固溶体(MSS)的分离结晶作用。通过岩石定量结构分析发现,1号矿体较24号矿体岩石结构成熟度更高,分析认为1号矿体侵位时间早,后期结构调整更为充分。综合地球化学和岩浆动力学方面的信息,最终得出了金川岩浆通道系统在空间上表现为沿矿体走向自北西向南东前进的结论。

[关键词] 金川;Cu-Ni-(PGE);硫化物矿床;岩浆通道成矿系统;前进方向;定量结构分析

[中图分类号] P5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)02-0073-12

1 前言

金川铜镍(铂)硫化物矿床是世界第三大岩浆型镍矿床,目前关于其岩体侵位机制仍存在较大争议,争论的焦点在于其现存位置是岩浆通道还是地壳浅部的终端岩浆房。对于金川铜镍硫化物矿床侵位机制和成矿模型的研究对于指导深部找矿具有重要意义。

苏尚国、汤中立等(2010、2014)提出了“岩浆通道成矿系统”的新成矿模型^[1]。与前人论述的不同点是,该模型认为矿浆就位的时间应是岩浆演化的晚期,并且强调了“矿浆”中含有一定数量的流体成分以及矿体在三维空间成分、结构是有变化的并能据此确定“矿浆”流动的前进方向^[1,2]。

前人对金川岩浆通道前进方向的研究已有丰富成果,闫海卿等认为,金川四个矿区的岩浆具有自西向东运移的特点,IV矿区应处于岩浆通道的前缘位置处^[3]。

本次研究通过综合运用地球化学及定量结构分析等手段,讨论了金川铜镍(铂)硫化物矿床中主要矿体三维成分、结构的变化规律,进一步探讨了金川岩浆通道的前进方向。

2 区域地质概况

金川铜镍(铂)硫化物矿床地处阿拉善地块西南缘的龙首山隆起带,塔里木地台与华北地台相接部位处,南邻祁连早古生代褶皱系的北祁连褶皱带,北依准噶尔晚古生代褶皱系^[4]。

[收稿日期] 2014-12-15

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41272105);中国地质调查局项目(12120114085501);教育部博士学科点基金和国家自然科学基金中俄合作基金联合资助

[作者简介] 刘美玉,1992年出生,女,山东德州市人,硕士研究生,主要从事岩浆作用与岩浆矿床方面的研究工作;

苏尚国,1965年出生,男,湖南长沙市人,教授,主要从事岩浆作用与岩浆矿床方面的研究工作;E-mail:susg@cugb.edu.cn

目前龙首山隆起带的区域构造历史存在较大争议,传统研究认为,龙首山地带自太古宙或中元古代开始就已经成为华北克拉通的一部分;李献华则提出龙首山地带在Rodinia大陆裂解前应是扬子

板块的一部分。另外关于金川超镁铁质侵入体的形成原因,部分研究者认为可能与超级地幔柱的活动有关,部分则认为应与Rodinia大陆裂解前的构造拉伸环境有关^[5]。

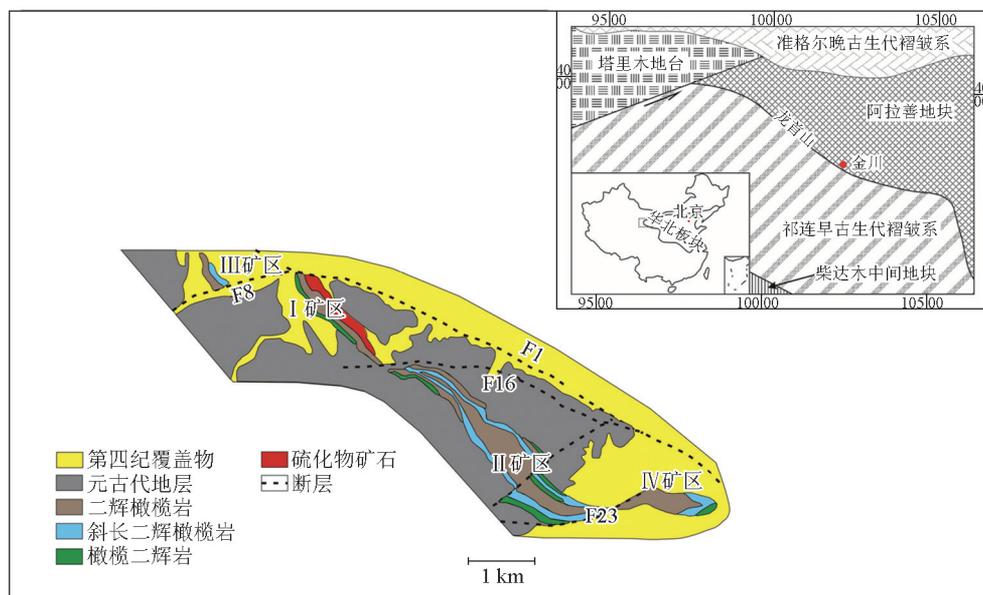


图1 金川地区区域地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Jinchuan ultrabasic rocks

3 矿床地质概况

金川超镁铁质岩体不整合侵位于前长城系白家咀子组的一套大理岩和片麻岩,混合岩中。空间展布呈北西—南东走向,全长约6 300 m,出露面积约1.34 km²。受一系列北东东向的断层影响,矿体自西向东被分割为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ四个矿区,主要矿体为Ⅰ矿区的24号矿体,Ⅱ矿区的1号及2号矿体。另外,最西侧的Ⅲ矿区赋存一富铜的58号矿体^[4]。

金川超镁铁质侵入体的主要岩性为二辉橄榄岩,橄榄二辉岩,含辉橄榄岩等,另有部分纯橄岩赋存于24号、1号、2号矿体的深部,局部地区矿体边部也产出少量的斜长二辉橄榄岩。矿石类型以海绵陨铁状和浸染状矿石为主,另有部分块状矿石位于矿体深部。主要矿石矿物有黄铜矿,镍黄铁矿,磁黄铁矿等,部分镍黄铁矿在近地表处被氧化为紫硫镍矿。在24号矿体与1号矿体相邻位置处赋存一富铜盲矿体,相伴产出大量铂族元素的砷化物,碲化物等。

4 矿石铂族元素地球化学

铂族元素(PGE)地球化学性质对岩浆演化过程十分敏感,是良好的地质过程指示剂。Cu、Ni、Co等元素在硫化物中常有着与PGE相似的物理化学性质,统称为亲铜元素。前人实验研究表明,PGE在硫化物/硅酸盐岩浆中的分配系数高达 $10^4 \sim 10^6$ ^[6,7],Ni、Cu等在两者中的分配系数在 10^2 左右。在硫化物的结晶分离过程中,PGE极易进入硫化物相,从而造成硅酸盐熔体中PGE的显著亏损。

金川铜镍(铂)硫化物矿床的PGE主要分布(见图2)于一二矿区的结合处,向东西两侧品位逐渐降低,向西至2号矿体已基本无矿化。另外,金川矿体PGE分布具有一定程度的分带特征,以1号矿体最为明显,自矿体中心至边部,PPGE含量渐少,IPGE逐渐增多。

58号、24号、1号及2号矿体PGE地幔标准配分曲线见图3。整体显示PPGE富集的左倾曲线特征,IPGE含量较低,分布趋势较为平缓,反映了不同样品具有同源岩浆的特征。再者,整体上,由西到东,PGE含量显示出逐渐降低的趋势。另外,最西侧的58号矿体较其他矿体显示出强烈的低IPGE,富PPGE的特征。

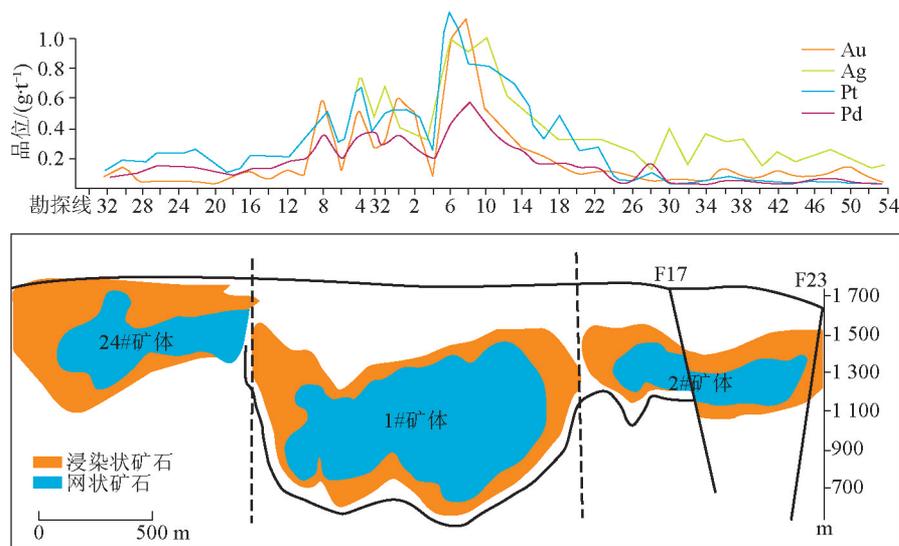


图2 金川铜镍(铂)硫化物矿床主要矿体贵金属含量分布示意图^[8]

Fig. 2 Distribution of main precious metals in Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit^[8]

金川岩体中部分样品发生了不同程度的变质及后期蚀变作用,岩浆后期热液,大气降水或变质流体等均可能引起PGE的活动迁移。如图4所示,在PGE与LITE(Rb,Sr)相关关系图解中,样品点分布散乱,无显著相关关系,暗示流体活动对铂族元素的分布影响程度不大。后期蚀变作用易引起Pd、Ir之间的分离,Ir的热液活动性较弱,而Pd相对活动性更强,图5中显示,各矿体样品PGE之间呈现较为良好的线性关系,同样暗示后期的热液蚀变对样品中PGE的含量虽然可能有一定的影响,但影响程度不大。

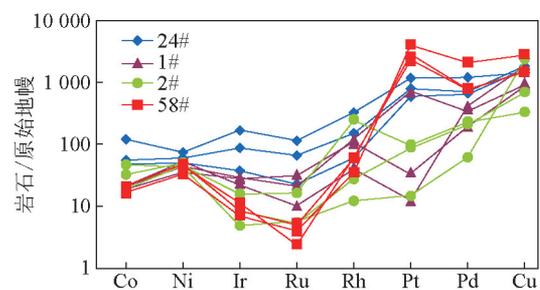


图3 各矿体样品PGE地幔标准化配分曲线

Fig. 3 Primitive mantle-normalized PGE elements patterns of Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit

注:所有数据已100%硫化物化,原始地幔数据引自文献[6]

表1 金川各矿区不同矿体PGE及Cu、Ni、Co数据表

Table 1 Compositions of PGE and Cu, Ni, Co in Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit

样品	S/wt %	Co/ppm	Ni/wt %	Ir/ppb	Ru/ppb	Rh/ppb	Pt/ppb	Pd/ppb	Cu/wt %
JC100922-4A	10.90	668.00	2.84	7.75	7.26	16.04	5 839.05	896.06	1.32
JC100922-4B	10.70	663.00	2.70	10.40	3.49	16.03	4 740.80	833.98	1.33
JC100922-4C	11.20	533.00	2.07	6.93	6.11	9.85	8 646.77	2 441.54	2.53
I-13 ¹	0.57	200.00	8.60	557.00	590.00	308.00	8 458.00	4 829.00	4.60
I-18 ¹	2.23	300.00	8.30	124.00	112.00	55.00	4 299.00	2 581.00	5.00
I-20 ¹	1.26	200.00	9.20	289.00	344.00	138.00	5 762.00	2 756.00	5.60
050713-3 ²	8.48	490.00	2.41	16.68	12.10	8.57	21.01	359.20	1.39
050713-4 ²	7.23	430.00	1.73	18.42	20.38	21.65	960.29	253.71	0.52
050713-5 ²	8.83	450.00	1.70	20.62	36.90	22.88	57.07	183.11	0.61
2-E-3 ¹	7.44	700.00	1.92	3.20	5.70	2.30	21.70	49.30	1.46
2-E-4 ¹	14.50	800.00	3.97	10.20	10.10	9.80	246.30	322.60	0.83
2-E-9 ¹	2.24	300.00	0.49	3.00	5.10	13.50	41.00	52.40	0.06

注:1 根据参考文献[10];2 根据参考文献[11];JC样品铂族元素由中国科学院贵阳地球化学研究所测试完成;1 ppm=1 000 ppb=10⁻⁶

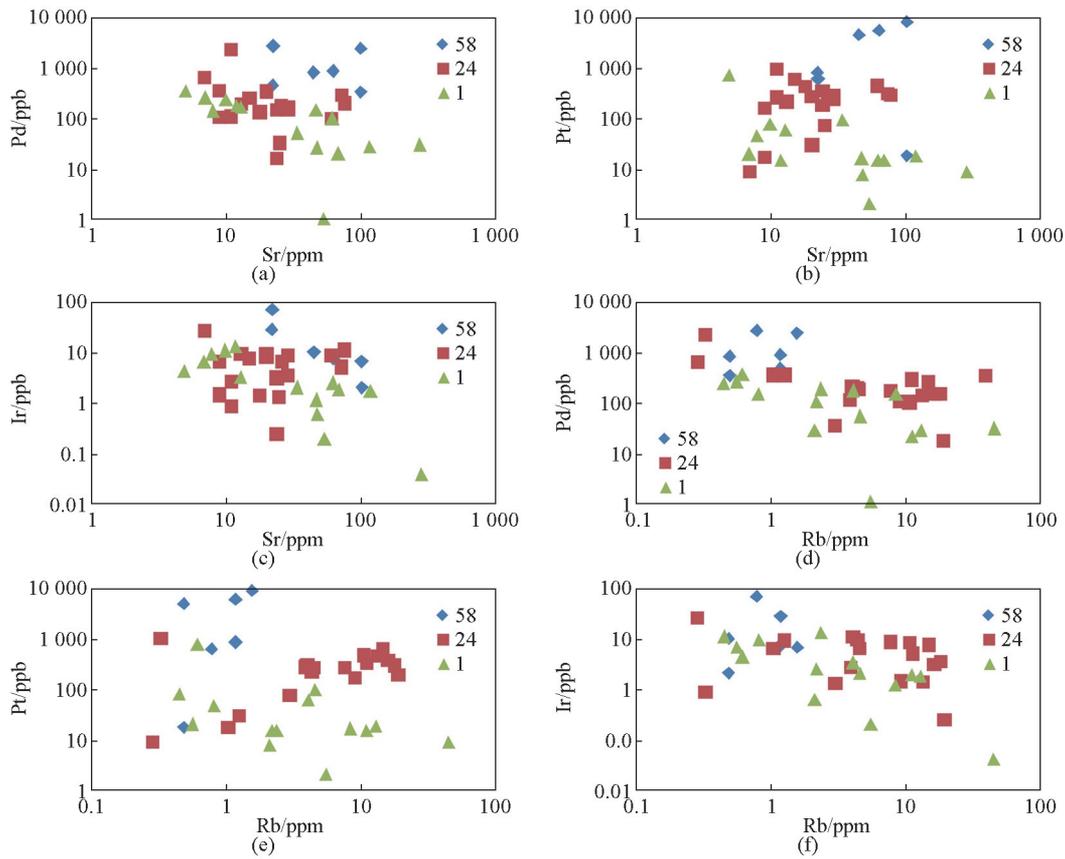


图4 PGE与Rb,Sr相关关系图解

Fig. 4 PGE-Rb, PGE/Sr covariation diagram of Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit

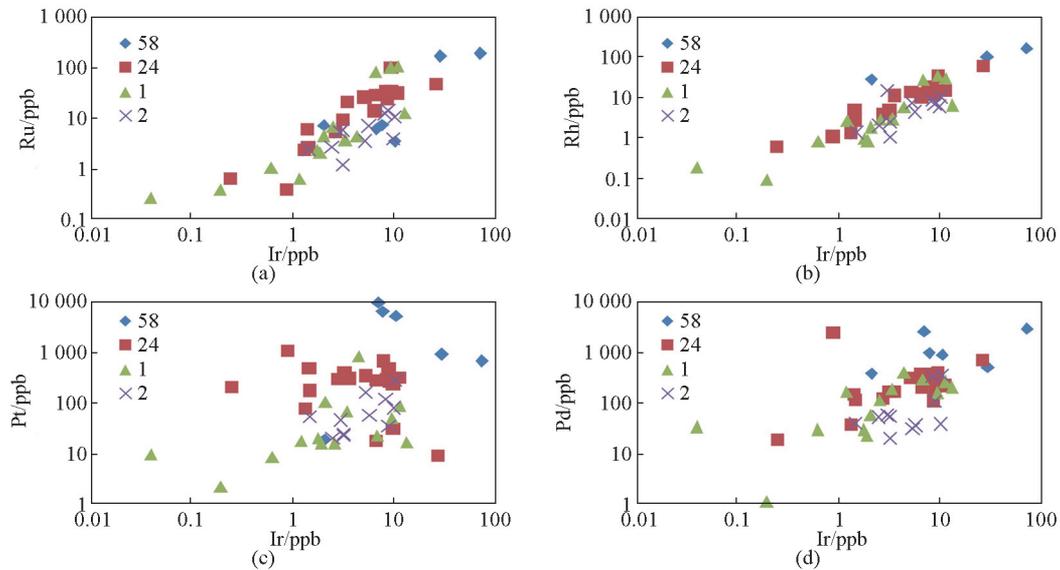


图5 各矿体样品PGE间相关关系图解

Fig. 5 Correlation between platinum group element

在图5中,不同矿体间Ir与Rh,Ru均显示出极好的正相关关系,但Ir与Pd,Pt之间的相关性则在

不同矿体间呈现出显著差异。以Ir-Pt关系图解为例,东部的1、2号矿体样品中,Ir-Pt呈较为明显的正

相关,向西在24号矿体中,相关性减弱,向最西部的58号矿体呈显著的负相关。这种负相关性可以由单硫化物固溶体的结晶分异过程解释。Kullerud等对Fe-Ni-S和Fe-Cu-S体系的硫化物结晶实验结果显示,在S饱和的条件下,硫化物熔浆会先结晶出单硫化物固溶(MSS),Pt、Pd、Cu在MSS/硫化物熔体间的分配系数 $D=0.09\sim 0.2$,远低于IPGE与Ni(约 $3.03\sim 4.3$)在二者间的分配系数。由此,分配系数较高的IPGE与Ni优先进入MSS中,而PPGE和Cu滞留于残余硫化物中,随温度下降,在中间相ISS中富集。随温度持续下降,ISS最终分解为黄铜矿和磁黄铁矿,MSS最终分解为镍黄铁矿和磁黄铁矿,从而造成了IPGE与PPGE,Ni与Cu之间的分离^[12]。

由此,作Pd/Ir、Pt/Ir与Ni/Cu比值相关关系图解,结果如图6所示。以Pd/Ir-Ni/Cu图解为例,图中可得如下信息:a.整体自西向东Ni/Cu比值逐渐升高;b.自西向东Pd/Ir比值逐渐降低;c. Pd/Ir-Ni/Cu呈一定程度负相关性,该负相关程度在最东部2号矿体处减弱。

由上述MSS的分离结晶作用分析金川矿体中PGE的迁移过程,携液态硫化物的岩浆上侵过程中,随温度降低,发生硫化物的结晶分离作用,先结晶出的单硫化物固溶体中优先萃取Ni和IPGE,而残余平衡硫化物熔浆中相对富集Cu和PPGE。硫化物上侵过程中,岩浆通道前缘和边缘部位温度下降最快,在此类位置迅速结晶,形成的矿石相对富集Ni和IPGE,而在通道中心部位,尤其是靠近岩浆通道口附近,温度下降较慢,结晶速率较缓,相对富

集残余硫化物熔浆,结晶形成的矿石中相对富集PPGE及Cu。

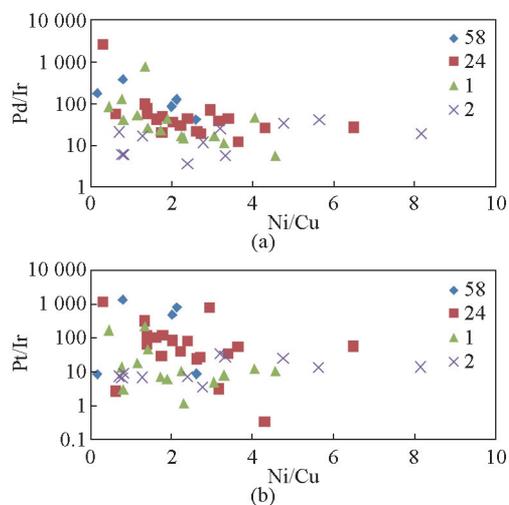


图6 Pd/Ir、Pt/Ir与Ni/Cu比值相关关系图解
Fig. 6 Pd/Ir-Ni/Cu and Pt/Ir-Ni/Cu diagram for Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit

图6中表述信息表明,自东向西,Pd-Ir,Ni-Cu分异程度渐增,这暗示越向东,越靠近岩浆通道系统的前缘位置处,而相对富集Cu和PPGE的58号矿体应当处于岩浆通道系统的后缘处。2号矿体Pd/Ir-Ni/Cu间的低相关性应由其极低的PGE含量造成。由此推断,岩浆通道成矿系统的前进方向应为沿走向自西向东前进。

表2 金川各矿体PGE及主要LITE(Rb,Sr)数据表

Table 2 Compositions of PGE and LITE in Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit

样品	Ir/ppb	Ru/ppb	Rh/ppb	Pt/ppb	Pd/ppb	Rb/ppm	Sr/ppm
58号矿体							
JC100922-4A	7.75	7.26	16.04	5 839.05	896.06	1.2	63.1
JC100922-4B	10.40	3.49	16.03	4 740.80	833.98	0.5	45.1
JC100922-4C	6.93	6.11	9.85	8 646.77	2 441.54	1.6	101.5
JC100922-5	2.10	7.12	27.26	17.68	344.22	0.5	102.0
JC100922-6	71.78	185.96	159.72	617.36	2 761.56	0.8	22.4
JC100922-7	29.08	161.17	99.78	843.66	468.03	1.2	22.2
24号矿体							
JC121012-1	2.72	5.29	3.65	264.10	110.27	3.98	11
JC121012-2	1.44	5.80	4.74	431.24	135.30	13.8	18
JC121012-3	3.18	9.24	4.78	354.88	150.14	16.6	24
JC121012-4	1.46	2.64	2.59	161.37	105.73	9.44	9

续表

样品	Ir/ppb	Ru/ppb	Rh/ppb	Pt/ppb	Pd/ppb	Rb/ppm	Sr/ppm
JC121012-12	1.32	2.34	1.26	71.24	33.82	3.07	25
JC121012-5	7.69	27.62	13.25	608.34	260.71	15.3	15
JC121012-6	3.55	20.26	10.46	277.56	151.48	18.5	29
JC121012-7	5.21	25.75	12.87	309.28	290.97	11.5	73
JC121012-8	8.87	30.52	13.07	247.43	171.94	7.9	29
JC121012-9	11.09	30.79	13.98	286.30	204.00	4.14	76
JC121012-10	9.55	34.32	13.70	215.77	199.70	4.5	13
JC121012-11	6.66	28.35	11.81	249.20	186.67	4.66	26
JC121015-1	8.38	33.47	17.94	268.57	344.39	40.3	20
JC121015-2	8.67	23.29	10.87	439.56	100.88	11	61
JC121015-3	9.53	96.53	31.73	28.99	354.59	1.29	20
JC121015-4	0.25	0.63	0.59	183.71	16.92	19.8	24
JC121015-5	6.53	13.74	9.79	16.65	353.48	1.07	9
JC121015-6	0.89	0.38	1.03	941	2 270	0.335	11
JC121014-1	26.27	45.53	55.00	8.71	661.24	0.294	7
1号矿体							
ZK130723-3	0.04	0.27	0.19	8.76	30.97	46.3	281
ZK130723-9	0.63	1.04	0.81	7.65	27.4	2.15	48
ZK130722-2	0.20	0.39	0.09	2.05	1.05	5.62	54
ZK130722-3	3.36	3.78	2.88	60.53	174.33	4.15	13
ZK130722-4	11.17	104.14	28.61	76.93	242.50	0.454	10
ZK130722-5	6.72	83.35	26.66	20.13	267.46	0.567	7
ZK130722-6	9.39	102.64	32.72	45.82	147.27	0.822	8
ZK130722-7	4.38	4.47	5.62	726.65	359.44	0.62	5
ZK130722-8	2.08	4.52	1.83	94.06	53.03	4.66	34
ZK130723-4	1.78	2.35	0.93	18.29	27.78	13.2	118
ZK130723-5	1.91	2.06	0.83	14.70	21.02	11.3	69
ZK130723-6	2.55	6.87	2.74	14.77	105.33	2.22	62
ZK130723-7	13.03	12.78	6.23	14.94	189.29	2.4	12
ZK130723-8	1.21	0.65	2.57	16.23	150.76	8.58	47
2号矿体							
2-E-3	3.2	5.7	2.3	21.7	49.3		
2-E-4	10.2	10.1	9.8	246.3	322.6		
2-E-7	2.5	2.6	1.9	18.3	48		
2-E-9	3	5.1	13.5	41	52.4		
II-16	3.2	1.2	1	20.4	18.1		
II-17	1.5	2.4	1.3	49	35.3		
II-19	8.3	11.6	7.8	106.6	309.3		
II-21	10	3.8	5.6	71	34.6		
II-22	8.8	13.5	6.4	30.9	98.2		
II-23	5.3	3.5	6.9	145.2	28.4		
II-26	5.7	6.7	4.1	50.9	32.6		

注:2号矿体数据引自参考文献[10];其他矿体铂族元素与微量元素由中国科学院贵阳地球化学研究所测试完成

5 定量化结构分析

5.1 晶体粒度分布

Randolf和Larson在化学工业领域建立起的晶体粒度分布理论(CSD)^[13],被Marsh引用到岩浆系统的研究中,并随后被应用于火成岩和变质岩的研究工作中^[14,15]。这种方法具体来说是做矿物晶体数量密度与粒度的半对数图像。通常来说,随晶体粒度的增加,各种粒度晶体的数量密度与之通常呈现出一种对数线性关系。这种分布呈现在图上时,斜率总为负值,代表的是生长速率与平均时间的乘积,而Y轴上的截距代表成核密度。由此可以计算出一系列有物理意义的计算参数,用于计量影响CSD变化的具体物理作用过程,例如晶体的堆积,分离过程,岩浆的混合作用或者变质岩的退火作用等^[15],具有实际的应用价值。

本文中的CSD图像成像使用的是二维岩石薄片法^[16]。本次研究中,分别选取24号矿体1260 m平面与1号矿体钻孔样品薄片各四件绘制橄榄石颗粒的CSD曲线,绘图结果如图7所示。

所有样品的CSD数据列在表3中。图7a为经典半对数CSD曲线(C型CSD),图7b为F型CSD曲线。图7a中,所有样品都具有负的斜率,在0~2.5 mm粒度范围内达到最大晶体密度,最大晶体粒

度可达2 cm左右。图中显示非常明显的一点是,24号矿体样品具有较稳定的斜率,呈较好的线性关系,而1号矿体样品的CSD曲线则表现出小颗粒处晶体密度的急剧下降和大颗粒晶体处晶体密度的相对增长,即小颗粒的缺失和大颗粒的增加。F型CSD曲线中,两个矿体样品的CSD曲线均呈现与一般岩浆岩近似的弯曲曲线特征。

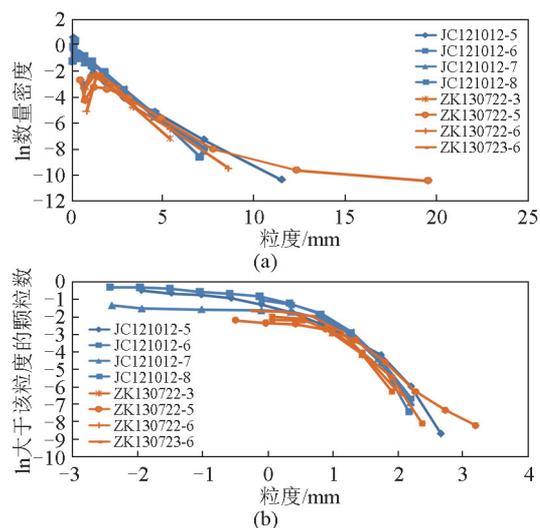


图7 金川二辉橄榄岩橄榄石晶体CSD图解

Fig. 7 CSD patterns of olivine crystals for Jinchuan ultrabasic rocks

表3 金川超基性岩体定量化岩石结构参数

Table 3 Quantitative textural analysis parameters of Jinchuan ultrabasic rocks

样品号	JC121012-5	JC121012-6	JC121012-7	JC121012-8	ZK130722-3	ZK130722-5	ZK130722-6	ZK130723-6
数目/ <i>n</i>	324.00	421.00	258.00	380.00	298.00	163.00	229.00	264.00
总面积/mm ²	393.39	367.10	357.60	443.67	580.90	501.34	584.60	391.07
平均粒度/mm	1.21	0.87	1.39	1.17	1.95	3.08	2.55	1.48
面积/%	53.95	55.78	45.55	58.17	46.19	62.83	60.84	46.28
<i>R</i>	1.05	1.16	1.09	1.27	1.36	1.22	1.37	1.30
孔隙率/%	46.05	44.22	54.45	41.83	53.81	37.17	39.16	53.72
截距	-0.59	0.04	-0.70	-0.30	-0.71	-2.62	-1.05	-0.50
1σ	0.11	0.12	0.17	0.13	0.17	0.15	0.18	0.18
斜率	-1.02	-1.20	-1.01	-1.05	-1.18	-0.50	-1.01	-1.13
1σ	0.04	0.05	0.06	0.05	0.07	0.03	0.06	0.07
最大粒度/mm	6.10	3.96	4.86	4.97	4.78	10.20	6.39	4.71

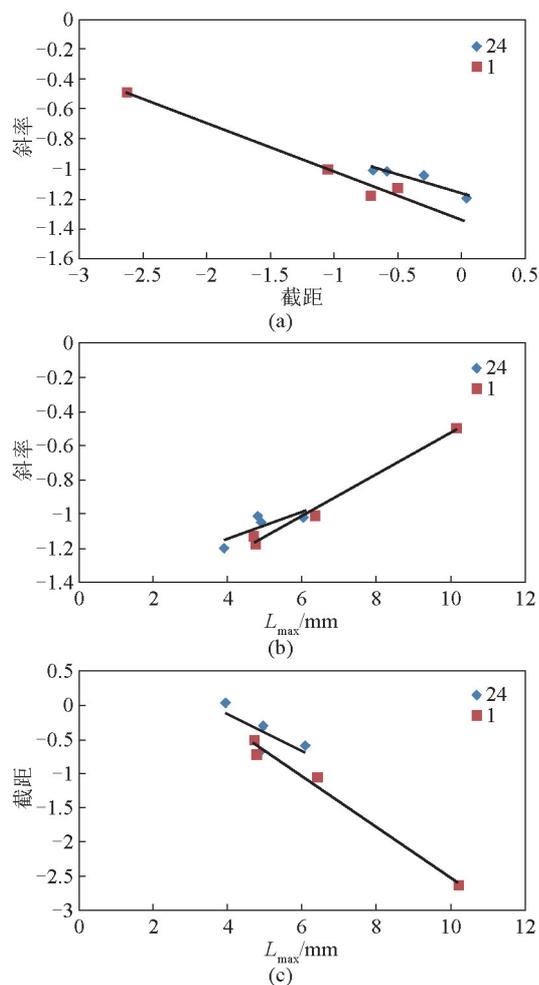


图8 晶体粒度分布基本参数图解
Fig. 8 Correlation between several basic parameters of CSD

Marsh用CSD的斜率与最大粒度和截距的关系来区分和确定开放体系和封闭体系中晶体的成核和生长过程^[17]。由此做图8所示三者间的相关关系图。需要说明, L_{\max} (最大粒度)选择为每个薄片中最 大的4个橄榄石颗粒的平均值^[18]。图8中表明,8件样品的CSD斜率与截距均显示显著负相关,而斜率与最大粒度呈显著的正相关性,这可能暗示CSD曲线是在一种相对封闭的体系条件下形成的^[17]。

5.2 晶体的空间展布

Jerram等人将园艺学中描述植物二维分布的方法引入到描述晶体空间展布的工作中。将晶体

看做质点分布,那么晶体间最短相邻距离的观测值 r_A 和预测值 r_B 的比 R 可以表示为

$$R = \frac{r_A}{r_B} = \frac{2\sqrt{\rho} \sum r}{N} \quad (1)$$

式(1)中, r 为任意两个晶体间的最短距离; N 为测量的晶体数; ρ 为观测区内晶体颗粒的分布密度。当 $R=1$ 代表随机分布, $R=0$ 代表最大聚集程度,六边形有序排列分布会产生最大的 R 值, $R=2.149$ 。由此可见, $R<1$ 代表聚集分布, $R>1$ 代表有序分布^[19]。

通常作 R 值与孔隙率的相关图解,可以判别岩石结构的分布特征,并可根据特殊分布特征判断引起 R 值和孔隙率变化趋势的物理过程(机械挤压,颗粒分选和过度生长过程)。

图9中的RSDL是计算机模拟的一条随机分布的直线,数据点落在直线之上表示为有序分布,落在曲线之下表示为聚集分布。样品数据投图结果表明,所有样品橄榄石均为聚集分布^[20]。因数据点较少,图8中未显示出造成此种空间分布的主导物理过程,仅显示可能受微弱程度的机械压缩过程的影响。故选取两件薄片进行更为详细的微区分析。在薄片内分别划分7~8个面积相近的矩形区域,自左向右分析每一区域内的橄榄石颗粒特征,分别作 R 与CSD曲线斜率和橄榄石颗粒纵横比(AR)的相关图解,得图10,需要注意, AR 值取每区域中最大40颗粒的长轴/短轴的平均值,数据见表4。

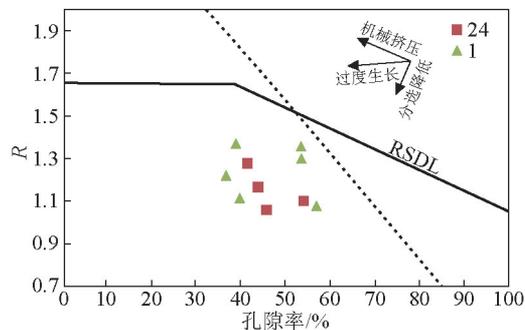


图9 金川二辉橄榄岩橄榄石晶体空间展布特征图
Fig. 9 The spatial distribution pattern of olivine for Jinchuan ultrabasic rocks

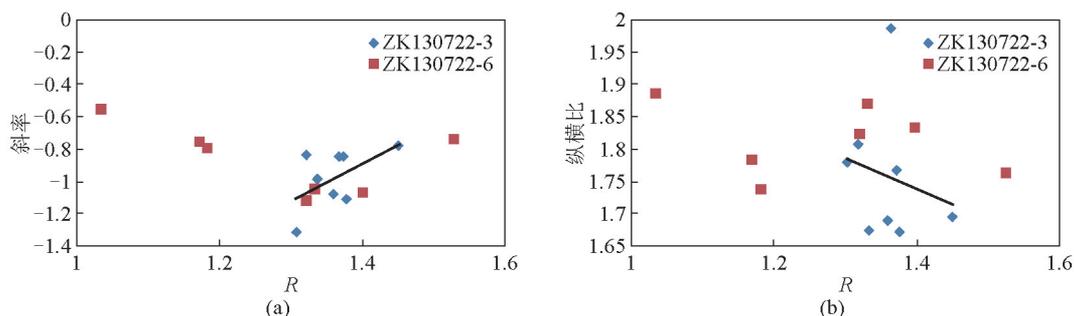


图10 金川二辉橄榄岩中橄榄石颗粒空间分布与斜率和纵横比关系图解
Fig. 10 Slope- R and AR - R diagram of Jinchuan ultrabasic rocks

一般说来,机械压缩过程会使 AR 与 R 值之间呈现一定程度的负相关性,而粒度的分选过程则会造成CSD斜率和 R 值之间一定程度的正相关特征^[21]。图10中,样品22-6的 R 值与 AR 及CSD斜率间无显

著相关性趋势;样品22-3CSD斜率与 R 值之间呈一定程度正相关, AR 与 R 值间显示一定程度负相关趋势,反应样品可能经历了一定程度的分选和机械压缩过程,这与金川岩体橄榄石的堆晶成因相一致。

表4 样品微区分析定量化结构参数表

Table 4 Quantitative textural analysis parameters of different partitions in one sample

样品号	数目/ n	总面积/ mm^2	平均粒度/ mm	面积/%	R	AR	斜率
ZK130722-3-1	72.00	109.08	1.52	37.99	1.31	1.78	-1.32
ZK130722-3-2	68.00	123.99	1.82	44.99	1.37	1.77	-0.86
ZK130722-3-3	64.00	137.52	2.15	48.05	1.45	1.70	-0.78
ZK130722-3-4	60.00	109.03	1.82	37.38	1.36	1.69	-1.09
ZK130722-3-5	52.00	167.43	3.22	36.23	1.34	1.68	-1.00
ZK130722-3-6	54.00	117.37	2.17	41.10	1.38	1.67	-1.12
ZK130722-3-7	73.00	289.47	3.97	54.12	1.32	1.80	-0.84
ZK130722-3-8	83.00	236.45	2.85	48.37	1.37	1.98	-0.86
ZK130722-6-1	59.00	111.22	1.89	46.60	1.33	1.87	-1.06
ZK130722-6-2	61.00	117.29	1.92	53.07	1.40	1.83	-1.08
ZK130722-6-3	48.00	207.28	4.32	68.05	1.19	1.74	-0.81
ZK130722-6-4	57.00	238.35	4.18	70.69	1.04	1.88	-0.56
ZK130722-6-5	57.00	114.92	2.02	55.07	1.32	1.82	-1.13
ZK130722-6-6	48.00	228.70	4.76	74.04	1.17	1.78	-0.77
ZK130722-6-7	48.00	127.72	2.66	65.67	1.53	1.76	-0.75

6 讨论

24号,1号矿体样品的定量化结构分析结果与野外勘察结果显示,金川岩体系橄榄石堆晶成因的超镁铁质岩体,堆晶过程中,橄榄石颗粒可能经历了一定程度的机械变形和分选作用过程。1号矿体样品较24号矿体样品的CSD曲线显示出小颗粒的显著亏损和大颗粒的显著增加,造成这种分布的原因可以由岩石结构粗化(即Ostwald成熟过程)过程

来解释。小颗粒具有较大的比表面积,晶体越小,表面能越高;反之,晶体越大,比表面积越小,表面能越低。自然界中的自发的物理化学过程多向降低体系总能量的方向进行。因此,当岩浆就位后,在相对较为封闭的环境体系中,成核速率基本降至0,由于小颗粒的大量存在,使得体系处于一种不稳定的高能状态,为使系统能量达到最低,系统将发生自身的结构调整,即低于某个粒径的小颗粒的溶解和高于某个粒径的大颗粒的再生长过程。这个

过程中温度一般需维持在晶体颗粒的液相线附近,且需维持一个较小的过冷度。这个过程将最终造成小颗粒的骤减和大粒径处斜率的平缓^[14, 16, 22-24]。深成岩的结晶过程就是这样一个典型的结构调整和平衡过程,岩浆在侵入地壳后经缓慢的冷却结晶,这个过程中成核作用已经完成,在此过程中没有新的晶体形成,但是在近于平衡的状态下,低于某个特定粒度值的晶体会被大晶体不断吸收,整个过程的体积和晶体总质量不发生变化。

那么,造成不同矿体间晶体分布差异的原因是什么,又可以反映怎样的地质作用过程呢?

首先考虑不同矿体间侵位时间的差异,由样品的CSD图解可以了解到,24号矿体样品在小颗粒处也出现一定的亏损,但程度远不如1号矿体明显。由于岩浆的结晶作用必然伴随后期结构的成熟化,因此这可能暗示了1号矿体较24号矿体侵位更早,经历了更为漫长的后期结构调整过程。CSD研究结果证明,矿石的形成应在一个较为封闭的环境体系中,显然硫化物的就地熔离不符合这一成矿条件,结合矿区铂族元素地球化学性质的研究,可以进行如下成矿过程的推测:在岩浆演化的晚期,地壳浅部岩浆房中已发生完硫化物的熔离作用,由于密度差异,自上而下硫化物含量逐渐升高。在某次地质作用过程中,由于构造超高压作用,最上部的不含硅酸盐岩浆首先沿岩浆通道上侵,形成不含矿的超镁铁侵入岩,而后分别为少矿-富矿-矿浆依次上侵。硫化物结晶形成的富Ni和IPGE的MSS最早侵位在岩浆通道的前缘位置,残余熔浆富Cu和PPGE则在岩浆通道的中心和后缘位置处聚集。岩浆较早侵位的岩浆通道前缘位置处,岩浆冷却速率较快,岩体经历了更为漫长的后期结构调整和成熟化过程。

综合上述金川铜镍硫化物矿床PGE的分布特征与定量化结构分析的结果可以总结得出金川岩浆通道系统的前进方向。即自最西部的58号矿体沿走向向东途经24号,1号矿体至最东部的2号矿体,也就是岩浆通道的前缘位置处。

一般而言,硫化物密度极高,岩浆房中若发生硫化物的聚集作用,其将在岩浆房底部大量堆积,密度增高,粘度增大,极难发生硫化物的上侵,偶然的地质构造高压成矿难以解释如此大规模硫化物的上侵作用。罗照华提出的熔体流的概念为解决这一问题提供了很好的思路^[25-27]。苏尚国等认为,

在岩浆的上升体系中,大规模的流体活动发挥了极为重要的作用。流体的加入可以有效地降低岩浆的密度,使其以与硅酸盐岩浆相似的密度沿岩浆通道上侵就位,结晶成矿。在岩浆就位的后期,由于大规模的去气作用,流体大量逸失,但是流体活动的痕迹仍可保存于岩体之中。寻找流体活动的痕迹成为解决这一问题的重要途径。本项目组在此问题的研究中已获得较大程度的进展,在各矿体中均寻找到大量流体自生矿物,称之为流体晶^[28,29],为金川硫化物矿浆上升过程中流体的广泛作用提供佐证。

7 结语

1)Pd/Ir-Ni/Cu在不同矿体间的空间变化暗示单硫化物固溶体的分离结晶作用是造成金川铜镍(铂)硫化物矿床铂族元素分异的主要制约因素。

2)晶体粒度分布研究证明,1号矿体较24号矿体经历了更为完整的结构调整成熟化过程,推测1号矿体较24号矿体侵位更早,相对处于岩浆通道系统的前缘位置处。

3)晶体空间分布研究证明,金川超镁铁质岩体在橄榄石的堆晶过程中发生了一定程度的机械变形和粒度分选作用。

4)自西向东,在58号、24号、1号、2号矿体间,PGE含量逐渐降低,Ni/Cu比值渐增,结合CSD研究成果认为2号矿体侵位时间最早,58号矿体侵位时间最晚,金川岩浆通道系统在空间上表现为沿矿体走向自北西方向向南东方向的前进趋势。

致谢

谨以此文献给汤中立院士。祝汤院士健康长寿、青春永驻。在成文过程中罗照华老师、刘翠老师、杨宗峰老师,长安大学的焦建刚老师、闫海卿老师及金川有色金属公司的田玉山高工、高亚林高工等提供了大量支持和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 苏尚国,汤中立. 岩浆通道成矿系统的理论与实践[C]//第十届全国矿床会议论文集,2010.
- [2] 苏尚国,汤中立,罗照华,等. 岩浆通道成矿系统[J]. 岩石学报,2014(11):3120-3130.
- [3] 闫海卿,王强,胡彦强,等. 金川铜镍硫化物岩浆矿床前锋岩浆与岩浆通道[J]. 中国地质,2013(3):807-819.
- [4] 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.
- [5] 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 depos-

- it: Associated with the ~825 Ma south China mantle plume [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6. doi: 10.1029/2005GC 001006.
- [6] Fleet M E, Stone W E, Crocket J H. Partitioning of palladium, iridium, and platinum between sulfide liquid and basalt melt: Effects of melt composition, concentration, and oxygen fugacity [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(9): 2545–2554.
- [7] 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]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(13): 2397–2412.
- [8] 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.
- [9] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle compositions and processes [M]. In: Saunders A D and Norry MJ (eds.), 1989.
- [10] Chai G, Naldrett A J. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China [J]. *Economic Geology*, 1992, 87(6): 1475–1495.
- [11] Su S, Li C. 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.
- [12] Kullerud G. The Fe-Ni-S system [J]. *Ann. Rep. Geophys. Lab*, 1963, 67: 4055–4061.
- [13] Randolph A D, Larson M A. *Theory of Particulate Processes* [M]. New York: Academic Press, 1971.
- [14] Cashman K V, Marsh B D. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II: Makaopuhi lava lake [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 99(3): 292–305.
- [15] Marsh B D. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 99(3): 277–291.
- [16] 杨宗锋, 罗照华, 卢欣祥. 定量化火成岩结构分析与岩浆固结的动力学过程 [J]. *地学前缘*, 2010(1): 246–266.
- [17] Marsh B D. On the interpretation of crystal size distributions in magmatic systems [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(4): 553–599.
- [18] Boorma S, Boudreau A, Kruger F J. The lower zone-critical zone transition of the Bushveld complex: A quantitative textural study [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(6): 1209–1235.
- [19] Jerram D A, Cheadle M J, Hunter R H. The spatial distribution of grains and crystals in rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 125(1): 60–74.
- [20] Jerram D A, Cheadle M J, Philpotts A R. Quantifying the building blocks of igneous rocks: Are clustered crystal frameworks the foundation [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(11): 2033–2051.
- [21] 杨宗锋. 火成岩系统广义量化结构分析及其意义 [D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [22] Higgins M D. *Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [23] 王河锦. 确定岩石中矿物成核速度、成核密度、体生长速度和结晶时间的CSD理论 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1990, 9(4): 331–340.
- [24] Voorhees P W. Ostwald ripening of 22 phase mixtures [J]. *Annual Review of Materials Science*, 1992, 22: 197–215.
- [25] 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 透岩浆流体成矿作用导论 [M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [26] 罗照华. 流体-熔体强相互作用的成矿功能 [C]// 第五届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文集, 2011.
- [27] 罗照华, 卢欣祥. 成矿系统的核心: 流体的行为 [C]// 中国矿物岩石地球化学学会第13届学术年会论文集, 2011.
- [28] 罗照华, 杨宗锋, 代耕, 等. 火成岩的晶体群与成因矿物学展望 [J]. *中国地质*, 2013(1): 176–181.
- [29] 罗照华. 超临界流体晶: 成因和意义 [C]// 中国地球物理2013第四分会场论文集, 2013.

Moving direction of magmatic conduit metallogenic system in Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit

Liu Meiyu, Su Shangguo, Song Chen, Cai Nan
(China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

[Abstract] By the using of geochemical methods and quantitative textural analysis, This paper studied the spatial distribution characteristics of platinum group elements in Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, discussed the dynamic behavior in the process of magma evolution, and the evolution of Jinchuan mafic-ultramafic magma. This study found that the spatial distribution of the platinum group elements showing a certain regular changes between four continuous ore bodies. Overall, there are a significant decrease in the value of Pd/Ir-Ni/Cu between the four ore bodies from west to east. Through the analysis, the cause which effected the distribution is that the monosulfide solid solution (MSS) has experienced a process of crystallization differentia-

tion during crystal fractionation. On the other hand, through quantitative textural analysis, found that the structure of No. 1 ore body is much more mature than No. 1 ore body, which suggested that the emplacement of the former one is much more earlier than the latter one. Integrated geochemical and magma dynamics information, finally obtained the conclusion that the moving direction of Jinchuan magma conduit system is along the strike of the intrusions from northeast to southeast.

[Key words] Jinchuan; Cu-Ni-(PGE); sulfide deposit; magma conduit metallogenic system; moving direction; quantitative textural analysis

(上接49页)

The roles of volatiles in mineralizations of magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits—Implications for potential metallogenic mechanism of super-large scale magmatic deposits in small magma

Zhang Mingjie¹, Tang Qingyan¹, Li Wenyuan^{1,2},
Yu Ming¹, Hu Peiqing¹, Li Jianping¹

(1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China)

[Abstract] The resources of nickel and platinum group element (PGE) are contributed by super-large scale magmatic Ni-PGE sulfide deposits in the world. In this paper, on the basis of the behaviors of Ni, Cu and PGE in the processes of partial melting, magma crystallization and sulfide segregation etc. mantle magmatic events, we summarized the types and scales of ore-forming magma, the gathering way of ore-forming metal elements, the controlling factors of sulfur saturation and the immiscibility of the sulfide liquid phase during the magmatism of Ni-Cu-PGE sulfide deposits, and discussed the role of volatiles in the transport and enrichment of ore-forming metals. It is concluded that the high degree of partial melting (i.e., magma with high Mg content) in mantle is crucial to gather the huge amounts of Ni and PGE from mantle sulfide and olivine into ore-forming magma, and the sulfide segregation will form super-large scale Ni-PGE sulfide deposits in a large scale layered (or conduit) intrusion. It is inferred that the supercritical fluid (volatile) in mantle can carry and aggregate a large number of Ni-PGE metals from a large volume of mantle, and make a great contribution to the formation of Ni-PGE sulfide deposits. It is possible to be the metallogenic mechanism of magmatic Ni-PGE sulfide deposits by small mantle derived magma (i.e., small intrusion).

[Key words] volatile; small intrusion; mantle-derived magma; super-large scale magmatic deposits; mineralizations