

文章编号 10258-7106 (2008) 05-0613-09

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^{*}

赵振华¹, 钱汉东²

(1 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093)

摘 要 文章对金川铜镍硫化物矿床的网状富矿石和星点状贫矿石的稀土元素地球化学特征进行了研究, 结果表明 网状富矿石的稀土元素含量低于星点状矿石, 这可能与矿石中硫化物及橄榄石含量有关 网状富矿石的 δEu 差别大, 结合矿石显微照片的结构特征, 说明其岩浆演化环境比较复杂, 应该处于缓慢冷凝的早期深部熔离成矿作用阶段 而星点状矿石样品的稀土元素标准化分布曲线相似, 结合矿石显微照片的结构特征, 指示其应该形成于快速冷凝的晚期就地熔离成矿作用。此外, 两者的轻、重稀土元素分馏程度相当, 这否定了贫矿岩浆与富矿岩浆之间的演化关系, 揭示了原始岩浆分层后, 各层岩浆是独立演化并成矿的。

关键词 地球化学 金川铜镍硫化物矿床 Q 型聚类分析 稀土元素 深部熔离作用 就地熔离作用

中图分类号: P618.41; P618.63

文献标志码: A

Geochemical REE study of two kinds of ores in Jinchuan copper-nickel sulfide deposit

ZHAO ZhenHua¹ and QIAN HanDong²

(1 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China; 2 Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract

In this paper, the REE content of the network rich ores and the star-like lean ores in the Jinchuan copper-nickel sulfide ore-deposit was studied. The results show that the REE content in the network rich ores is lower than that of the star-like lean ores, which may be attributed to the content of sulfide and olivine. δEu values of the network rich ores vary remarkably. Combined with the micrographs of ores, it is held that network rich ores were formed in a complex environment during the process of early deep liquation. The star-like lean ores have similar chondrite-normalized REE patterns. Combined with the micrographs of ores, it is considered that the star-like lean ores were formed in the process of late in-situ liquation. In addition, the degrees of REE fractionation of the two types of ores are similar to each other, which refutes the view of evolutionary relationship between the poor sulfide magma and rich sulfide magma and also indicates that after the stratification of primary magma, the evolution and metallogenic process of magma of each layer are independent.

Key words: geochemistry, Jinchuan copper-nickel sulfide deposit, Q cluster analysis, REE, deep liquation, in-situ liquation

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(No. 40272025)的资助

第一作者简介 赵振华, 男, 1982 年生, 硕士, 工程师, 矿物岩石专业。

收稿日期 2006-11-13; 改回日期 2008-01-08。张绮玲、李岩编辑。

金川铜镍硫化物矿床位于甘肃省河西走廊中部,含矿超镁铁质岩体基岩面积约为 1.34 km^2 。尽管面积不大,但它却是一个具有重要工业意义的矿床,中国约 85% 的硫化镍金属产于金川矿床(汤中立等,1995),它不但含有丰富的镍、钴、铜金属元素,而且还含多种有用伴生元素,如金、银和铂族等贵金属元素,及硒、碲等可综合利用的分散元素。

前人研究资料表明,金川赋矿岩体是岩浆多次脉动式侵入的产物。关于金川岩体的侵入期次,一般认为有 4 期或 5 期。其主要观点为,来源于上地幔部分熔融的原始岩浆,随构造运动上侵过程中,大约在温度 $1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ 时,于地壳深部岩浆房(可能在 30 km 以下)发生硅酸盐与硫化物熔浆的熔离(汤中立等,1995,2002,2006),称为早期深部熔离作用。研究表明,导致硫化物熔离的首要原因是岩浆中的硫由于一种或多种岩浆作用达到饱和(柴凤梅等,2005)。由于自然重力作用,硫化物熔浆在岩浆房底部沉降,而硅酸盐熔浆则在岩浆房上部聚积。此时随岩浆运动的持续上侵,重力分异作用亦趋明显,在硫化物熔浆中形成了矿浆、富矿岩浆和贫矿岩浆自下而上的分层格局。随着橄榄石、辉石和铬铁矿的结晶分离,当分离岩浆的密度低于上覆围岩的密度时,或者由于地壳拉张造成上覆围岩的应力释放,岩浆又开始底辟上升,由于贫硫化物硅酸盐岩浆密度小,因此其上升速度比密度大的含硫化物岩浆、富硫化物的岩浆和硫化物矿浆要快得多,上侵过程中由于温度、围岩的影响,会产生硫化物的熔离。这样,分层的岩浆分期上侵,分别形成了星点状矿石、网状矿石和块状矿石 3 种主要的矿石类型。这种成矿模式称为“深部熔离-分批贯入”。

已有研究揭示,主要有含矿的纯橄榄岩相和几乎不含矿的辉石橄榄岩相两期岩浆侵入作用(罗照华等,2000),并认为金川矿床实质上是由两个同源侵入体——二辉橄榄岩侵入体和含矿纯橄榄岩侵入体组成。它们起源于同一个岩浆房,在原始岩浆发生深部熔离分层后,沿不同的断裂构造带侵入,各自单独进行分异作用。

前人的这些研究成果,为研究本区提供了很多可靠详实的资料,但在稀土元素特征方面研究较少。基于稀土元素独特的地球化学性质,研究稀土元素在岩浆作用中的地球化学行为,对于解决成岩成矿的理论问题,探讨矿床成因等方面有着重要的意义。本文首先对矿石的稀土元素进行了测试,将所测数

据进行 Q 型聚类分析后,分别对各类矿石的稀土元素特征进行了研究,进而为金川铜镍硫化物矿床的成矿机制提供指示信息和证据。

1 矿床地质概况

金川铜镍硫化物含矿岩体及其所处的镁铁质-超镁铁质岩带,位于阿拉善地块西南缘的龙首山隆起。岩体走向 $\text{NW}50^\circ$,倾向 SW ,倾角 $50 \sim 80^\circ$ 。矿床被 NEE 向压扭性断层错断,从西向东分为 4 段,依次编号为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ矿区(图 1)。含矿超镁铁质岩体大致以 10° 交角不整合侵位于下元古界龙首山群白家咀子岩组中,岩体直接与大理岩、条带状均质混合岩和片麻岩围岩相接触。金川现存岩体长约 6500 m ,宽 $20 \sim 500$ 余米,延深数百米至千余米。岩体东、西两端被第四系覆盖,中部出露地表,上部已遭剥蚀。

金川超镁铁质岩主要由纯橄榄岩、二辉橄榄岩、含二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩、辉石岩等组成,在诸岩相中,二辉橄榄岩分布最广,占整个岩体的一半以上,其余各岩相呈与岩体走向一致的似层状分布。但由于各矿区地质条件的差异,各岩相分布不尽一致。铜镍硫化物主要呈网状、星点状等赋存于超镁铁质岩石中,局部富集成块状金属硫化物矿石。岩体与围岩(大理岩)接触带或岩体中大理岩捕虏体边缘发育有气液交代的浸染状矿石以及晚期热液叠加的变海绵陨铁状矿石。岩体中的蚀变主要有蛇纹石化、绿泥石化、透闪石化、滑石-碳酸盐化等,蚀变作用较弱。矿床主要金属硫化物包括磁黄铁矿、镍黄铁矿(紫硫镍矿)、黄铜矿、方黄铜矿、马基诺矿和黄铁矿等。

2 样品采集及处理

2.1 样品采集及测试

由于Ⅲ、Ⅳ矿区尚未开采,研究样品主要在Ⅰ、Ⅱ矿区采集。采样地点:Ⅰ矿区龙首矿 906B 和 907B 采场,Ⅱ矿区地下标高 1098 m 矿体,Ⅱ矿区地下 $48 \sim 50$ 行矿体等。除去部分围岩样品,矿石样品(31 块)主要可分为 2 种构造类型,即富硫化物的网状矿石和贫硫化物的星点状矿石。矿石样品的稀土元素定量分析在南京大学内生矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,测试者高剑峰,测试仪器为 Ele-

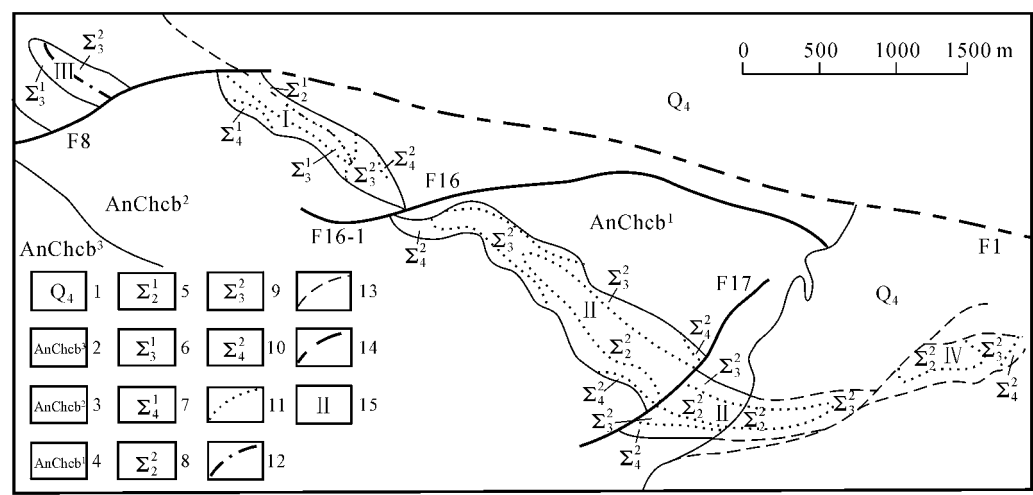


图 1 金川铜镍矿床矿区地质略图(据汤中立等,1995)

1—第四系；2—前长城系龙首山群白家咀子上岩性段；3—前长城系龙首山群白家咀子组中岩性段；4—前长城系龙首山群白家咀子组下岩性段；5—第一期含二辉橄榄岩；6—第一期二辉橄榄岩；7—第一期橄榄二辉岩；8—第二期含二辉橄榄岩；9—第二期二辉橄榄岩；10—第二期橄榄二辉岩；11—侵入体岩相界限；12—侵入期次界限；13—地质实测、推测界限；14—实测、推测断层界限；15—矿区编号

Fig. 1 Geological sketch map of the Jinchuan copper-nickel ore district (after Tang et al. , 1995)

1—Quaternary；2—Upper Baijiazui Formation of Longshoushan Group of pre-Changcheng system；3—Middle Baijiazui Formation of Longshoushan Group of pre-Changcheng system；4—Lower Baijiazui Formation of Longshoushan Group of pre-Changcheng system；5—First stage two-pyroxene-bearing peridotites；6—First stage lherzolites；7—First stage olivine websterites；8—Second stage two-pyroxene-bearing peridotites；9—Second stage lherzolites；10—Second stage olivine websterites；11—Boundary of intrusive lithofacies；12—Boundary of intrusive stage；13—Measured and inferred geological boundaries；14—Measured and inferred faults；15—Serial number of ore area

ment II 高分辨率电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)，误差范围小于 5%。

2.2 样品的 Q 型聚类分析

聚类分析是根据研究对象(样品或变量)的多种特征在数值上可能存在着的相似性程度,将它们聚合为不同点群的一种多元统计分析方法。聚类分析从研究对象本身多个特征的数据作为出发点,考查它们每个研究对象之间的相似性程度,这种相似性度量是综合了多个指标的结果,从而把多变量转化为单变量,并按照其相似性程度由亲到疏把所研究的个体逐次聚合成群。通过分析和计算得出相关的谱系关系图,从而可以进一步揭示出在不同相似水平上个体间的分群关系。聚类分析按其研究对象的不同可分为两类:一类是对样品分类,称 Q 型分析;另一类是对变量分类,称 R 型分析(胡以铿,1991)。

对金川铜镍硫化物矿床的 31 个矿石样品的分析测试数据资料,采用 StatSoft 公司的 Statistica 数理统计软件作了 Q 型聚类分析,所选微量元素为 Li、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Mo、Cd、Cs、Ba、REE、Hf、Ta、W、Pb、Bi、Th、U 共 41 个元素(包括 14 个稀土元素和 27 个微量元

素,27 个微量元素数据见赵振华等,2007)。选取的聚类方法为最长距离法(Complete Linkage),距离测度法为欧氏距离(Euclidean distance),计算分析结果见图 2。

从图 2 中可以看出 除去个别零散样品外,研究样品主要可分为 2 个大类。

第一类:JC II -6-A-1、JC II -6-A-2、JC II -9-A-3、JCLS-906B-7、JCLS-906B-3、JC II -9-A-1、JCLS-907B-1、JCLS-907B-3、JCLS-906B-1、JCLS-907B-2、JCLS-906B-2、JCLS-906B-6、JCLS-906B-4、JCLS-906B-5。

第二类:JC II -6-A-3、JC III -48.5H-3、JC II -6-A-5、JC II -23-A-3-2、JC II -6-A-6-1、JC II -6-A-6-2、JC III -48.5H-6、JC III -48.5H-4、JC II -9-A-2、JC II -6-A-4、JC III -48H-9、JC II -23-A-2、JC II -23-A-3-1、JC III -48.5H-5。

其他个别样品包括:JC II -23-A-1、JC III -48H-10、JCLS-906B-8。

第一类样品的最显著的特点就是 Ni 含量高,平均为 $17\,510 \times 10^{-6}$,属于具网状构造富矿石。第二类样品的 Ni 含量 $< 10\,000 \times 10^{-6}$,平均为 $5\,670 \times 10^{-6}$,属于具星点状构造贫矿石。其他个别样品,如

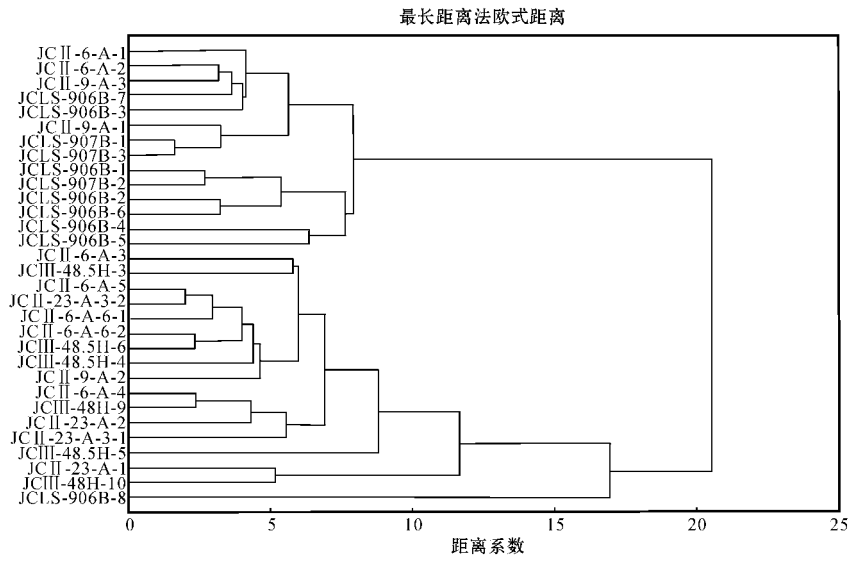


图 2 样品 Q 型聚类分析树状图

Fig. 2 Dendritic plot of Q-cluster analysis of samples

JC II-23-A-1、JC III-48H-10、JCLS-906B-8,则被聚类分析排除在上述两大类之外,且它们之间关系也不密切,因此不具分析意义。

3 两类矿石的矿相学特征

硫化物矿体主要产在岩体的核部和下部,其中,硫化物矿体的核部(或下部)为网状矿石,向两侧(或向上)变为星点状矿石。网状矿石和星点状矿石之间存在两种接触关系:一种是网状矿石与星点状矿石之间存在局部网状矿石。网状矿石位于矿体的中心,向外依次分布有局部网状矿石、星点状矿石,两种矿石呈渐变关系,矿体与岩体也呈渐变。另一种是缺失局部网状构造的矿石。以网状矿石为主体,星点状矿石则分布在其周围或一侧,厚 1 m 至数米,形如外壳,两者界限分明。

富矿石的构造特征主要呈现网状构造(亦称为海绵陨铁构造,图 3),中粗粒结构。岩性为纯橄岩和二辉橄榄岩,无明显蚀变特征。主要硫化物为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿。在矿石的显微照片中,既发现有结晶作用形成的现象(图 5),又有固溶体出溶作用形成的现象(图 6),表明了矿石形成过程的复杂性。

贫矿石的构造主要呈现星点状构造(图 4),部分矿石局部为网状,中细粒结构。岩性为含二辉橄榄岩和二辉橄榄岩,无明显蚀变特征。主要硫化物为

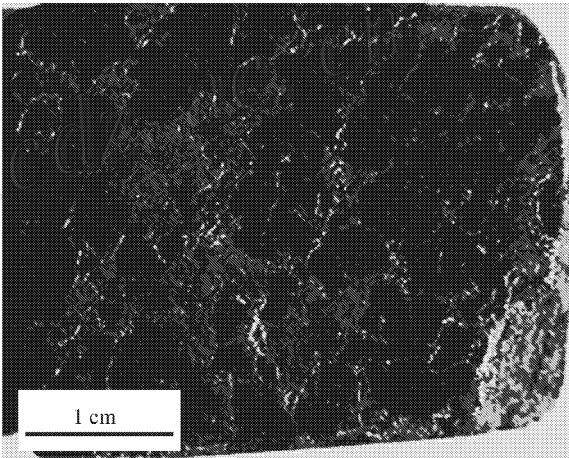


图 3 富矿石的网状构造
Fig. 3 Network structure of rich ores

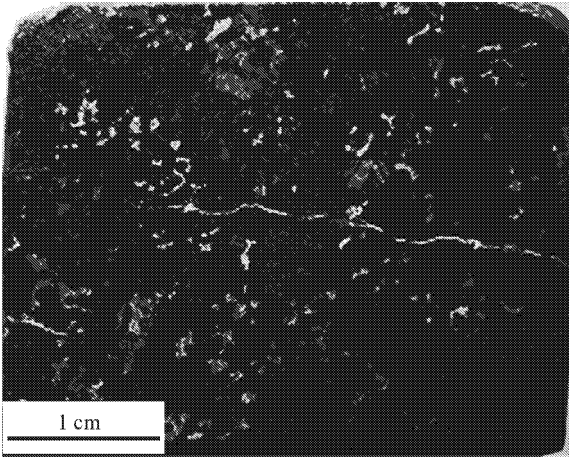


图 4 贫矿石的星点状构造
Fig. 4 Star-like structure of lean ores

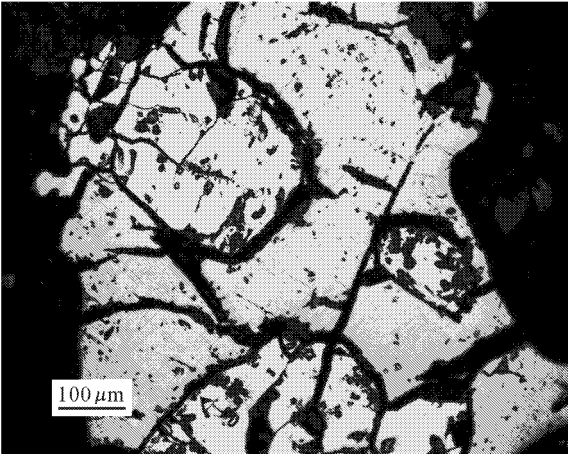


图 5 镍黄铁矿在磁黄铁矿中呈半自形晶粒结构(单偏光)
Fig. 5 Subhedral texture of pentlandite embraced in pyrrhotite

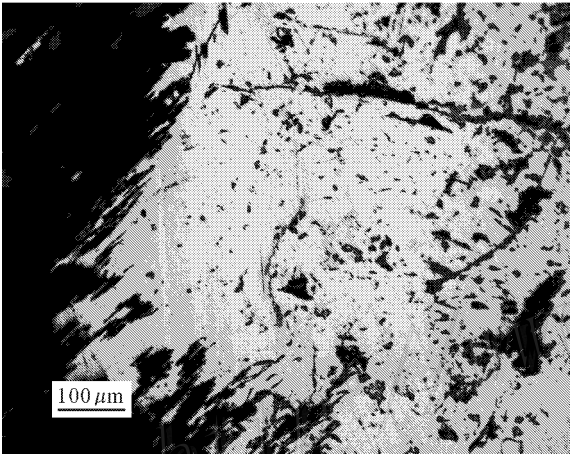


图 6 黄铜矿从磁黄铁矿中呈条带状定向出溶(单偏光)
Fig. 6 Striped exsolution of chalcopyrite from pyrrhotite

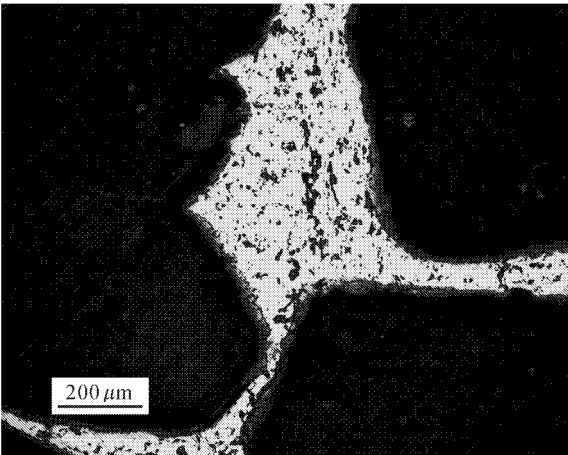


图 7 磁黄铁矿呈他形充填在硅酸盐矿物颗粒间(单偏光)
Fig. 7 Xenomorphic texture of pyrrhotite filling in the space between silicate minerals

磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿。在矿石显微照片中,硫化物矿物呈他形充填在硅酸盐矿物之间空隙(见图 7),表明硫化物矿物应是晚期形成的。

3 稀土元素地球化学

3.1 网状富矿石稀土元素特征

从网状富矿石样品的稀土元素分析结果(表 1)可以看出:① ΣREE 含量很低,在 $1.048 \times 10^{-6} \sim 15.628 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 5.724×10^{-6} ,这个数值甚至低于上地幔的稀土元素总量 12.655×10^{-6} (黎彤,1976)。这一现象在其他铜镍硫化物矿床中也有发现,据唐红松等(1998)研究,在白马寨和喀拉通克铜镍硫化物矿床中,块状硫化物矿石的 ΣREE 值也非常低,分别为 0.69×10^{-6} 和 1.42×10^{-6} ,仅是其成矿母岩的 $1/67$ 和 $1/79$;② LREE 富集,除有 3 个样品 LREE/HREE 比值较大外,大部分样品的 LREE/HREE 比值在 $3.73 \sim 6.98$ 之间,明显富集轻稀土元素,这从 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值也能看出来;③ δCe 基本无异常, δEu 异常差别较大,从 0.35 到 1.92。 δEu 与 Al_2O_3 含量呈一定的负相关性(图 8),相关系数 -0.61,指示 δEu 异常与斜长石的晶出有较为密切的关系。

利用球粒陨石(Boynton,1984)对样品的稀土元素进行标准化,绘制了网状富矿石样品 REE 标准化分布模式(图 9)。从图中可以直观地看出网状富矿石稀土元素的分布特点,曲线向右倾斜。 Eu 正、负异常以及无异常皆有,显示了成矿过程以及成矿作用环境的复杂性。

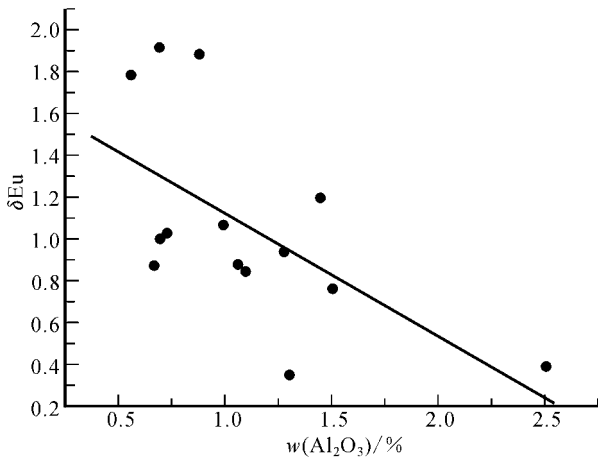


图 8 网状富矿石 $\delta\text{Eu}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图
Fig. 8 $\delta\text{Eu}-\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram for network structure ores

表 1 金川铜镍矿网状富矿石稀土元素含量 ($w_B/10^{-6}$)

Table 1 REE content of the network rich ores from the Jinchuan copper-nickel deposit ($w_B/10^{-6}$)

	JCH-6 -A-1	JCH-6 -A-2	JCH-9 -A-1	JCH-9 -A-3	JCLS- 906B-1	JCLS- 906B-2	JCLS- 906B-3	JCLS- 906B-4	JCLS- 906B-5	JCLS- 906B-6	JCLS- 906B-7	JCLS- 907B-1	JCLS- 907B-2	JCLS- 907B-3	球粒 陨石
La	0.897	0.487	0.199	1.333	1.860	1.133	0.785	1.717	3.313	0.675	0.425	0.737	2.476	0.690	0.310
Ce	1.934	0.998	0.368	2.541	3.111	2.098	1.610	3.076	6.101	1.251	0.784	1.318	4.332	1.172	0.808
Pr	0.275	0.122	0.041	0.345	0.325	0.238	0.212	0.352	0.711	0.139	0.099	0.166	0.507	0.130	0.122
Nd	1.036	0.425	0.174	1.235	1.138	0.826	0.709	1.298	3.131	0.702	0.412	0.572	2.447	0.482	0.600
Sm	0.300	0.087	0.051	0.256	0.252	0.120	0.137	0.256	0.794	0.185	0.099	0.114	0.587	0.113	0.195
Eu	0.064	0.055	0.014	0.102	0.085	0.060	0.081	0.075	0.082	0.056	0.030	0.041	0.066	0.035	0.074
Gd	0.218	0.086	0.036	0.260	0.362	0.087	0.123	0.177	0.518	0.172	0.108	0.135	0.544	0.135	0.259
Tb	0.048	0.012	0.007	0.049	0.053	0.015	0.019	0.022	0.065	0.025	0.018	0.022	0.080	0.021	0.047
Dy	0.281	0.093	0.039	0.249	0.330	0.104	0.125	0.162	0.421	0.176	0.133	0.118	0.393	0.113	0.322
Ho	0.061	0.020	0.010	0.054	0.056	0.022	0.028	0.035	0.073	0.031	0.026	0.023	0.075	0.022	0.072
Er	0.143	0.082	0.039	0.153	0.139	0.067	0.098	0.106	0.202	0.088	0.092	0.069	0.179	0.065	0.210
Tm	0.023	0.013	0.006	0.023	0.023	0.013	0.015	0.016	0.028	0.013	0.013	0.012	0.029	0.013	0.032
Yb	0.160	0.104	0.053	0.148	0.138	0.097	0.099	0.088	0.167	0.079	0.093	0.087	0.169	0.093	0.209
Lu	0.023	0.016	0.011	0.020	0.020	0.016	0.018	0.013	0.024	0.011	0.014	0.014	0.024	0.014	0.032
ΣREE	5.464	2.602	1.048	6.768	7.892	4.898	4.058	7.392	15.628	3.603	2.345	3.430	11.908	3.098	3.292
LREE/HREE	4.70	5.10	4.22	6.08	6.04	10.60	6.73	10.94	9.44	5.04	3.73	6.13	6.98	5.52	
(La/Yb) _N	3.77	3.16	2.52	6.07	9.10	7.84	5.33	13.15	13.34	5.75	3.10	5.69	9.90	5.02	
(La/Sm) _N	1.88	3.51	2.47	3.27	4.64	5.93	3.61	4.22	2.62	2.30	2.70	4.08	2.65	3.83	
(Gd/Yb) _N	1.10	0.67	0.55	1.42	2.12	0.72	1.00	1.63	2.50	1.76	0.94	1.25	2.60	1.18	
δEu*	0.76	1.92	1.03	1.20	0.85	1.79	1.89	1.07	0.39	0.94	0.88	1.00	0.35	0.87	
δCe*	0.94	0.99	0.98	0.90	0.96	0.97	0.95	0.95	0.96	0.98	0.92	0.91	0.93	0.94	

测试者 南京大学内生矿床成矿机制研究国家重点实验室高剑峰; 测试仪器 Element II 高分辨率电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 误差范围 <5%。* 单位为 1。

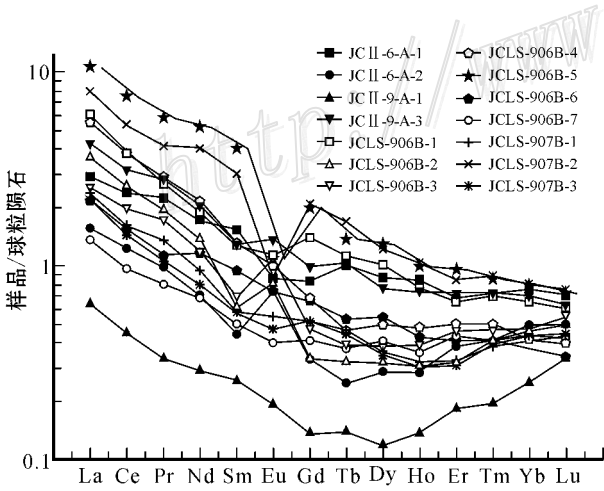


图 9 金川铜镍矿网状富矿石稀土元素标准化分布模式
Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of the network rich ores from the Jinchuan copper-nickel deposit

3.2 星点状贫矿石稀土元素特征

从星点状贫矿石样品稀土元素分析结果(表 2)可以看出:① ΣREE 含量相对网状富矿石较高,在 $9.771 \times 10^{-6} \sim 18.990 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 14.847×10^{-6} 。② LREE 富集,除一个样品的 LREE/HREE 比值为 8.69,其他比值都在 3.43~6.87 之

间,明显富集轻稀土元素,这一点与网状富矿石特征相似。③ δCe 基本无异常,δEu 异常不明显,除样品 JCⅢ-48.5H-4 的 δEu 为 1.76 外,其余样品 Eu 的正、负异常都不明显,平均为 1.07。δEu 与 Al_2O_3 含量的相关系数仅 0.13,无相关性(见图 10),这与富矿石截然不同。

利用球粒陨石(Boynton,1984)对样品的稀土元素进行标准化,绘制了星点状贫矿石 REE 标准化分布模式(图 11)。图中,稀土元素配分曲线明显右倾,显示轻稀土元素富集。除了样品 JCⅢ-48.5H-4 有较大的 Eu 正异常外,其他样品的 Eu 异常不明显,且它们的稀土元素配分曲线模式几乎一致,相差极微,可能指示了它们成矿环境的相似性及单一性(亨德森,1998)。

4 地质意义

近年来的研究(Craig et al.,1981)表明,岩浆铜镍硫化物矿床中的主要硫化物,主要不是岩浆直接结晶的产物,而是由一种叫作单硫化物固溶体(monosulphide solid solution,简称 mss)的相分解而形

表 2 金川铜镍矿星点状贫矿石稀土元素含量 ($w_B/10^{-6}$)

Table 2 REE content of the star-like lean ores from the Jinchuan copper-nickel deposit ($w_B/10^{-6}$)

	JCH-6 -A-3	JCH-6 -A-4	JCH-6 -A-5	JCH-6 -A-6-1	JCH-6 -A-6-2	JCH-9 -A-2	JCH-23 -A-2	JCH-23 -A-3-1	JCH-23 -A-3-2	JCIII-48.5 H-3	JCIII-48.5 H-4	JCIII-48.5 H-5	JCIII-48.5 H-6	JCIII-48 H-9
La	1.829	2.909	3.452	3.846	1.788	3.150	2.671	1.521	3.513	2.344	2.472	2.883	1.674	2.867
Ce	3.460	5.810	6.753	6.860	3.665	7.522	6.705	3.580	7.461	4.410	4.968	5.558	3.694	5.978
Pr	0.448	0.796	0.870	0.815	0.501	0.991	0.886	0.558	0.919	0.637	0.623	0.715	0.505	0.808
Nd	1.800	3.117	3.376	2.948	1.861	3.541	3.580	2.525	3.537	2.699	2.268	2.932	1.953	3.198
Sm	0.361	0.830	0.713	0.644	0.497	0.630	0.753	0.588	0.666	0.663	0.451	0.674	0.484	0.769
Eu	0.133	0.273	0.259	0.275	0.196	0.258	0.312	0.185	0.250	0.201	0.276	0.194	0.221	0.257
Gd	0.422	0.804	0.784	0.618	0.595	0.564	0.729	0.707	0.776	0.649	0.505	0.789	0.590	0.873
Tb	0.083	0.124	0.117	0.109	0.100	0.085	0.103	0.121	0.117	0.097	0.082	0.110	0.096	0.119
Dy	0.479	0.828	0.786	0.574	0.600	0.514	0.674	0.721	0.697	0.592	0.523	0.674	0.542	0.684
Ho	0.093	0.165	0.143	0.130	0.122	0.107	0.143	0.154	0.163	0.116	0.105	0.133	0.115	0.138
Er	0.275	0.456	0.424	0.362	0.348	0.269	0.400	0.406	0.394	0.326	0.318	0.396	0.312	0.414
Tm	0.049	0.064	0.066	0.061	0.052	0.042	0.063	0.063	0.063	0.049	0.047	0.058	0.049	0.063
Yb	0.291	0.427	0.408	0.335	0.359	0.235	0.392	0.380	0.379	0.299	0.290	0.360	0.277	0.437
Lu	0.048	0.066	0.063	0.048	0.057	0.035	0.065	0.059	0.055	0.045	0.048	0.059	0.043	0.064
ΣREE	9.771	16.668	18.213	17.626	10.739	17.943	17.477	11.568	18.990	13.126	12.975	15.535	10.555	16.670
LREE/HREE*	4.61	4.68	5.53	6.87	3.81	8.69	5.80	3.43	6.18	5.04	5.77	5.02	4.22	4.97
(La/Yb) _N	4.24	4.59	5.70	7.74	3.36	9.02	4.59	2.70	6.25	5.30	5.74	5.40	4.07	4.43
(La/Sm) _N	3.19	2.20	3.05	3.76	2.26	3.14	2.23	1.63	3.32	2.23	3.45	2.69	2.18	2.35
(Gd/Yb) _N	1.17	1.52	1.55	1.49	1.34	1.93	1.50	1.50	1.65	1.75	1.41	1.77	1.72	1.62
δEu*	1.04	1.01	1.05	1.32	1.09	1.31	1.28	0.87	1.06	0.93	1.76	0.81	1.25	0.95
δCe*	0.92	0.92	0.94	0.93	0.93	1.03	1.05	0.94	1.00	0.87	0.96	0.93	0.97	0.95

测试者：南京大学内生矿床成矿机制研究国家重点实验室高剑峰；测试仪器：Element II 高分辨率电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS)；误差范围：<5%。* 单位为 1。

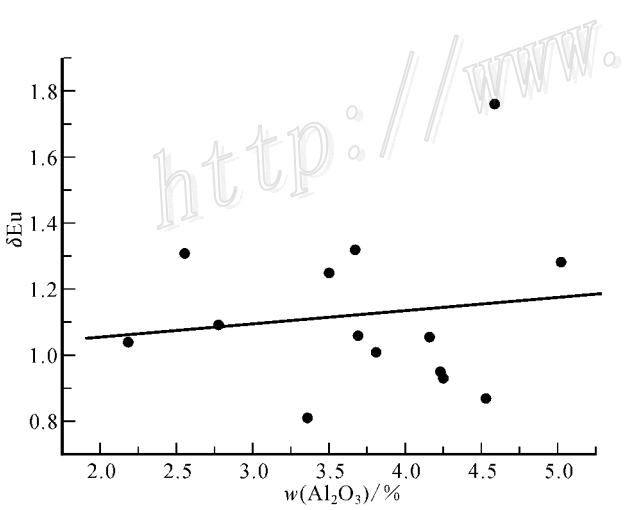


图 10 星点状贫矿石 $\delta\text{Eu}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图

Fig. 10 $\delta\text{Eu}-\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of star-like lean ores

成的,这种单硫化物固溶体,是指具有不同 Ni/Fe 比值、成分为 $[\text{Fe}, \text{Ni}]_{1-x}\text{S}$ 的硫化物。Kullerud 等 (1969) 的实验相图表明在 $500\sim 1\,100^\circ\text{C}$ 的温度范围内, $\text{Fe}-\text{Ni}-\text{Cu}-\text{S}$ 体系熔体内存在一个均匀的稳定固相。mss 在温度降到 600°C 上下后不断出溶,生成黄铜矿、镍黄铁矿和黄铁矿等。同时,金川铜镍硫化物矿床岩浆中,辉石、斜长石的结晶温度大约为 $1\,100^\circ\text{C}$

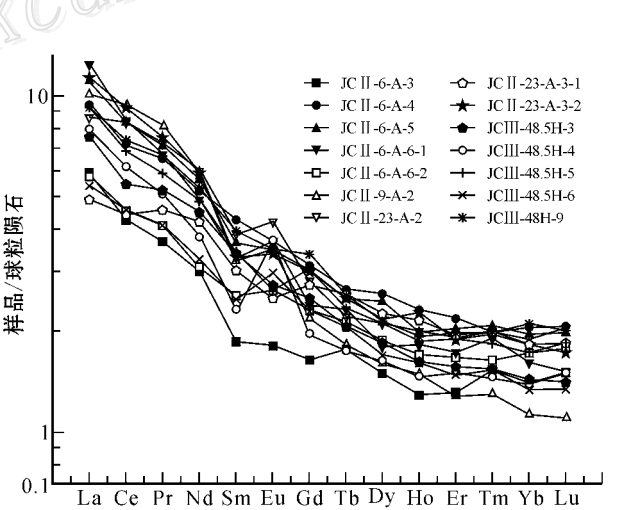


图 11 金川铜镍矿星点状贫矿石稀土元素标准化分布模式

Fig. 11 Chondrite-normalized REE patterns of the star-like rich ores from the Jinchuan copper-nickel deposit

(汤中立等,1995)。因此,如果岩浆处于一个缓慢冷凝的环境下时,单硫化物固溶体与辉石、斜长石应该是在同阶段晶出。金川原始岩浆在经历早期深部熔离作用并形成分层格局后,在富矿岩浆中,或许就存在单硫化物固溶体与辉石、斜长石同阶段晶出的过程。

通过对金川铜镍矿网状富矿石和星点状贫矿石稀土元素特征的研究,可以得到以下有关成矿作用的信息:

(1) 网状矿石和星点状矿石的成矿作用方式不同。

首先,表现在 ΣREE 上,网状富矿石的稀土元素含量低于星点状贫矿石。根据前面对成矿机制的描述得知,在岩浆演化的早期,发生硅酸盐和硫化物熔浆的熔离,硫化物液滴在岩浆房底部聚积,由于稀土元素对硫化物是不相容元素,故底层的矿浆及富矿岩浆后期上侵贯入所形成的富矿石中,稀土元素含量就特别低,而上层贫矿岩浆所形成的贫矿石中的稀土元素含量则相对较高。此外,橄榄石的含量可能也影响着矿石中 ΣREE 的丰度。橄榄石的稀土元素含量较多数中性和基性岩中其他矿物低1~2个数量级,所以它往往起‘稀释剂’的作用。本文网状矿石岩性主要为纯橄岩和二辉橄岩,而星点状矿石岩性主要为含二辉橄岩和二辉橄岩,可能岩性上的差别也是导致网状富矿石的稀土元素含量低于星点状贫矿石的一个原因。

其次,表现在稀土元素配分曲线上,网状富矿石的稀土元素配分曲线中相互间 δEu 差异较大,而星点状贫矿石除了个别样品,其稀土元素配分曲线基本一致, δEu 相差极微。两类矿石在稀土元素配分曲线上的差别,可能是由周围环境的不同而引起的。按照 Stolper 等(1980)和 Sparks 等(1980)提出的熔浆的上升受其密度及地壳密度约束的机制,在原始岩浆形成分层格局后,底部岩浆由于密度较大,故相对难上升,所以其在深部处于缓慢冷凝固环境,且晶出方式多样(见图5、图6),或许这种复杂的环境导致了矿石中 δEu 差异较大,同时 δEu 与斜长石的晶出关系密切,而最上部的贫矿岩浆由于密度小,只要有合适的通道就会上侵,上侵过程中(或者进入上部新的岩浆房中),迅速冷凝,熔离作用进行的不够完善,金属硫化物晶出速度较快,造成稀土元素特征相互差别不明显, δEu 受造岩矿物晶出的影响不大。成矿过程的差别,在两类矿石的照片的岩相学特征亦能表现出来,在图3和图4中,富矿石中的硫化物集合体均匀地、连续地紧密充填在橄榄石、辉石等造岩矿物间,反映了岩浆冷凝的稳、缓环境;而贫矿石中的硫化物以不同大小、不同形态、不均匀地分布在早结晶的硅酸盐矿物之间,反映了一个晚期快速冷凝的环境。

研究资料表明,富矿石主要形成于早期深部熔离作用,而贫矿石主要形成于晚期就地熔离作用(汤中立等,1995;赵振华等,2007),本文中贫、富矿石稀土元素特征的差别也正是其不同成矿过程的表现。

(2) 网状富矿石和星点状贫矿石的岩浆虽是同源的,但它们的演化是相对独立的。

虽然富矿石和贫矿石的 ΣREE 和 δEu 存在差异,但是配分曲线形态相似,反映了同源的特点。此外,从轻、重稀土元素之间的分馏可以看出,网状富矿石和星点状贫矿石的轻、重稀土元素比值大体相当,同时,采集的样品都是新鲜且无明显蚀变的,因此可以排除一个可能:贫矿岩浆并不是原始岩浆演化的末期产物,否则,星点状贫矿石的轻稀土元素分馏应该比网状富矿石的大得多。所以,可以得出:贫矿岩浆仅仅是原始岩浆分层格局的一部分,在原始岩浆形成分层后,各层岩浆进行着独立的演化和结晶,分别形成了各种结构类型的金属硫化物矿石。这对于认清岩浆演化与成矿的关系,提供了一条至关重要的信息。

5 结 论

金川铜镍硫化物矿床的稀土元素特征表明:贫矿石与富矿石的稀土元素特征差别是由不同的成矿作用造成的,早期深部熔离作用和晚期就地熔离作用对于矿床的形成都有着不同程度的影响,并各自形成了相应结构类型的矿石。对于岩浆分层与演化的关系,应该是先分层,后演化;相对于岩浆演化的时间,分层应该是迅速的。因此,金川铜镍硫化物矿床中各种类型的矿石,虽然是同源的,但其母岩浆的演化互不干扰,矿石成因各不相同。

References

- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements [J]. meteorite studies. *Deu Geochem.*, (2): 63-114.
- Chai F M, Zhang Z C, Mao J W, Dong L H and Zhang Z H. 2005. Discussion on some problems concerning magmatic copper-nickel-PGE sulfide deposits [J]. *Mineral Deposits*, 24 (3): 325-335 (in Chinese with English abstract).
- Craig J R and Vaughan D J. 1981. Ore microscopy and ore petrography [M]. New York: John Wiley & Sons. 1-406.
- Henderson P. 1989. Tian F and Shi L, translated. Rare earth element geochemistry [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 181-182 (in Chinese).

- Kullerud G, Yund R A and Moh G H. 1969. Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S and Fe-Ni-S system : in magmatic ore deposits [J]. Econ. Geol. Monogr. ,4 :323-343.
- Li T. 1976. Chemical elements abundances in the earth and it 's major shells[J]. Geochemica, (3) :167-174(in Chinese with English abstract).
- Luo Z H, Marakushev A A, Paniakh H H and Su S G. 2000. The origin of copper-nickel sulfide deposits-Exemplified by Norilsk(Russia) and Jinchuan(China) [J]. Mineral Deposits, 19 (4) :330-339(in Chinese with English abstract).
- Sparks R S, Meyer P and Sigursson H. 1980. Density variation amount mid-ocean ridge basalts : Implications for magma mixing and the scarcity of primitive lavas [J]. Earth Plant. Sci. Lett. , 46 :419-430.
- Stolper E and Walker D. 1980. Melt density and the average composition of basalt [J]. Contrib. Min. Petrol. , 74 :7-12.
- Tang H S and Liu Y X. 1998. Geochemical characteristic of REE of corpper-nickel sulfide deposits in China[J]. Mineral Resources and Geology, 12(66) :225-229(in Chinese with English abstract).
- Tang Z L and Li W Y. 1995. The metallogenic pattern and geology comparison of Jinchuan copper-nickel(PGE) sulfide ore-deposit[M]. Beijing :Geol. Pub. House. 113-179(in Chinese).
- Tang Z L, Bai Y L, Xu Z H, Li W Y, Li F Q, Yan H Q, Huang C X and Wang Z H. 2002. Metallogenic systems and metallotectonic dynamics in the Southwest Margin(The LongShoushan Mountains and the QiLianshan mountains) of North China Paleocentinent [M]. Beijing :Geol. Pub. House. 265-266(in Chinese).
- Tang Z L, Yan H Q, Jiao J G and Li X H. 2006. New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small intrusive bodies [J]. Mineral Deposits, 25(1) :1-9(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Qian H D and Huang S. 2007. Application of multivariate statistic analysis to two kinds of ores in Jinchuan copper-nickel sulfide deposit [J]. Geological Journal of China Universities, 13(1) :127-136(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Qian H D and Huang S. 2007. Application of multivariate statistic analysis to two kinds of ores in Jinchuan copper-nickel sulfide deposit [J]. Geological Journal of China Universities, 13(1) :127-136(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 董连慧, 张作衡. 2005. 岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床研究的几个问题探讨 [J]. 矿床地质, 24(3) :325-335.
- 亨德森 P, 编. 田 丰, 施 焱, 译. 1989. 稀土元素地球化学 [M]. 北京 :地质出版社. 181-182.
- 胡以铿. 1991. 地球化学中的多元分析 [M]. 武汉 :中国地质大学出版社. 19-20.
- 黎 彤. 1976. 化学元素的地球丰度 [J]. 地球化学, (3) :167-174.
- 罗照华, 马拉库舍夫 A A, 潘妮娅 H H, 苏尚国. 2000. 铜镍硫化物矿床的成因——以诺里尔斯克(俄罗斯)和金川(中国)为例 [J]. 矿床地质, 19(4) :330-339.
- 唐红松, 刘月星. 1998. 我国铜镍硫化物矿床的稀土元素地球化学特征 [J]. 矿产与地质, 12(6) :225-229.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 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. 113-179.
- 汤中立, 白云来, 许章华, 李文渊, 李奋齐, 闫海卿, 黄承熊, 王志恒. 2002. 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. 265-266.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 李小龙. 2006. 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, 25(1) :1-9.
- 赵振华, 钱汉东, 黄 晟. 2007. 多元统计分析在金川铜镍矿床两类矿石中的应用 [J]. 高校地质学报, 13(1) :127-136.