

# 川西冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床的 PGE 和 Re-Os 同位素地球化学特征及成矿意义\*

苟体忠<sup>1,2</sup> 钟宏<sup>1\*</sup> 朱维光<sup>1</sup> 漆亮<sup>1</sup> 冷成彪<sup>1,2</sup> 吴孔文<sup>1,2</sup>

GOU T Zhong<sup>1,2</sup>, ZHONG Hong<sup>1\*</sup>, ZHU Wei Guang<sup>1</sup>, QI L iang<sup>1</sup>, LENG Cheng B iao<sup>1,2</sup> and WU Kong Wen<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2009-08-04 收稿, 2010-07-17 改回.

Gou TZ, Zhong H, Zhu WG, Qi L, Leng CB and Wu KW. 2010. Geochemical characteristics of platinum-group elements and Re-Os isotope of the Lengshuqing Cu-Ni sulfide deposit in western Sichuan Province and implications for mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3363–3374

**Abstract** The platinum-group elements (PGE) and Re-Os isotopic geochemistry of copper-nickel sulfides ores from the Lengshuqing deposit is studied using ICP-MS method. The total PGE contents ( $\Sigma$  PGE) of the Lengshuqing ores are quite low, ranging from  $7.91 \times 10^{-9}$  to  $56.9 \times 10^{-9}$ . The Cu/Pd ratios (9460~318040) of the ores are much higher than that of primitive mantle, indicating that their parental magma might have undergone sulfide segregation at an early stage of crystallization. The Pd/Ir ratios (2.57~112) of the ores have a relatively narrow range consistent with magmatic genesis of the deposit. Both ( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ )<sub>i</sub> and  $\gamma_{\text{Os}}(t)$  values are quite variable, ranging from 0.1758 to 0.3620 and +44.0 to +197, respectively, suggesting that abundant crustal material was mixed with the Cu-Ni sulfide ore system during magma ascent and the ore-forming processes.

**Key words** Cu-Ni sulfide deposit; Re-Os isotope; Platinum-group elements; Lengshuqing

**摘要** 采用 ICP-MS 分析方法对冷水箐铜镍硫化物矿床矿石的 PGE 和 Re-Os 同位素地球化学研究表明, 矿石的  $\Sigma$  PGE 较低, 其值变化在  $7.91 \times 10^{-9} \sim 56.9 \times 10^{-9}$  之间。矿石的 Cu/Pd 比值 (9460~318040) 远大于原始地幔的 Cu/Pd 比值, 表明其原始岩浆在早期结晶过程中已经历了硫化物的熔离。矿石的 Pd/Ir 比值 (2.57~112) 变化较小, 指示其大多数矿石属于岩浆型。 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$  比值和  $\gamma_{\text{Os}}(t)$  值变化较大, 其值分别变化在 0.1758~0.3620 之间以及 +44.0~+197 之间, 显示在成矿过程和岩浆侵位期间有较多地壳物质加入到成矿成岩系统。

**关键词** 铜镍硫化物矿床; Re-Os 同位素; 铂族元素; 冷水箐

中图法分类号 P618.41; P618.63

## 1 引言

冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床位于四川盐边县高家村岩体东侧的镁铁质-超镁铁质小杂岩体中, 为一中型 Cu-Ni 矿床。自 1975 年发现以来, 冷水箐矿床受到了地质学家的广泛关

注, 并在该矿床的地质特征、矿床地球化学、成岩和成矿时代等方面取得了一些研究成果 (沈渭洲等, 2003; Zhu *et al.*, 2007)。由于铂族元素 (PGE) 具有特殊的地球化学性质, 其配分模式一般不受热液蚀变的影响 (Barnes *et al.*, 1985), 因此目前已被广泛应用于基性超基性岩的岩石成因和演化及其有关的成矿作用的示踪研究, 取得了许多重要的进展

\* 本文受国家自然科学基金项目 (40873028, 40673031)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-136, KZCX2-YW-111) 和矿床地球化学国家重点实验室专项经费联合资助。

第一作者简介: 苟体忠, 男, 1981 年生, 博士研究生, 同位素地球化学专业, E-mail: gt810110@126.com

\*\* 通讯作者: 钟宏, 男, 1971 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 矿床地球化学、同位素地球化学专业, E-mail: zhonghong@vip.gyig.ac.cn

(Nahrett and Duke, 1980; Nahrett, 1981; Barnes *et al.*, 1985, 1993; Barnes and Nahrett, 1987; Nahrett *et al.*, 2000; Zhong *et al.*, 2006; Tao *et al.*, 2007; 唐冬梅等, 2008; Song *et al.*, 2009a)。同样, Re-Os 同位素被广泛应用于地球科学的多个领域 (Carlson, 2005), 在岩浆硫化物矿床研究中起到了越来越重要的作用, 用于成矿年龄的确定以及成矿岩浆形成和演化过程示踪方面具有突出的优越性 (Lambert *et al.*, 1998)。目前冷水箐 1 号矿体矿石的 PGE 和 Re-Os 同位素研究尚未见报道。本文较系统地分析了冷水箐 1 号矿体中不

同类型矿石的 PGE 和 Re-Os 同位素组成特征, 并据此讨论了其成矿过程。

## 2 地质背景

四川盐边地区冷水箐铜镍硫化物矿床位于高家村镁铁质-超镁铁质杂岩体的东侧 (Zhu *et al.*, 2006, 2007), 是一个含铜镍硫化物矿床的小岩体群 (图 1)。矿区出露地层较为简单, 为中元古代盐边群上亚群 (Zhu *et al.*, 2008)。该地

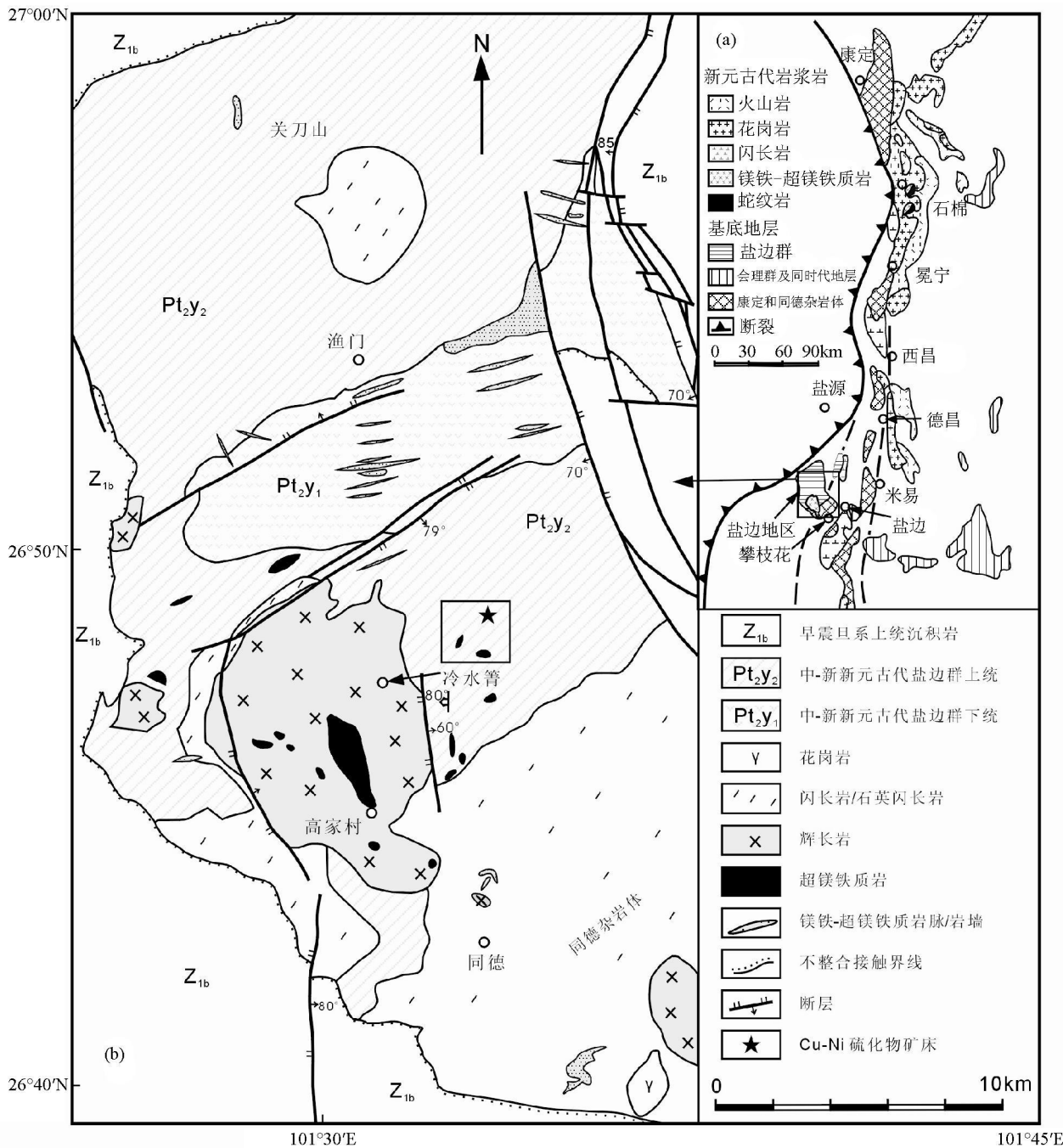


图 1 四川攀西地区 (a) 和盐边地区 (b) 前寒武纪地质简图 (据 Zhu *et al.*, 2007)

Fig. 1. Simplified Precambrian geological map of the Panxi area (a), and Yanbian area (b), Sichuan Province (after Zhu *et al.*, 2007)

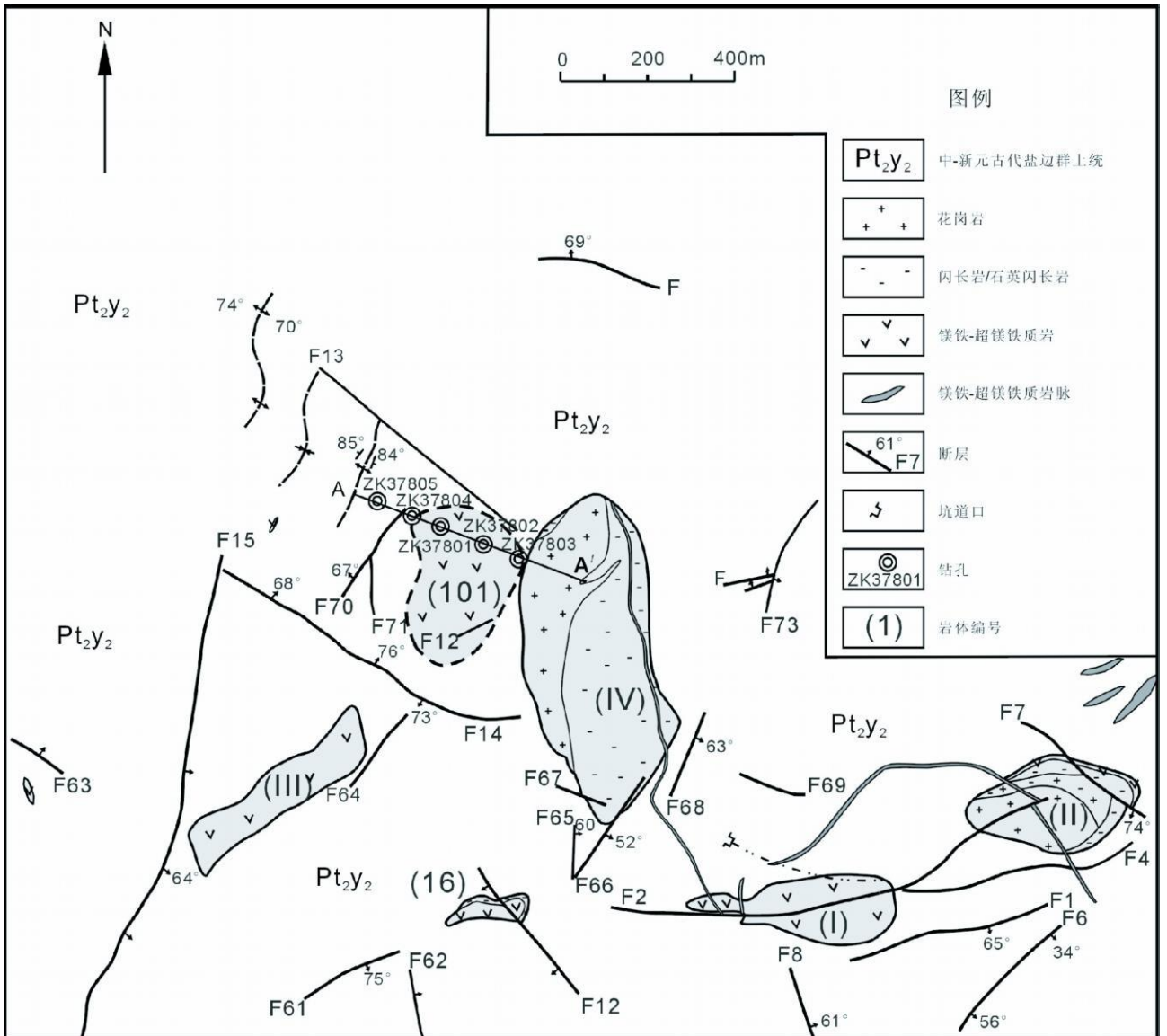


图 2 四川盐边冷水箐铜镍硫化物矿床地质简图 (据朱维光, 2004)

Fig 2 Simplified geological map of the Lengshuiqing Cu-Ni sulfide deposit Yanbian area Sichuan Province (after Zhu 2004)

层经历区域变质作用形成变粒岩、斜长角闪片岩等变质岩类。矿区出露的镁铁质-超镁铁质岩体规模不大, 呈岩株、岩墙产出。I、II、III、IV、16 和 101 号等岩体为同期岩浆侵入活动的产物, 铜镍硫化物赋存于这些岩体中 (图 2)。Zhu *et al.* (2007) 获得该矿床 101 号岩体顶部角闪辉长岩中的角闪石  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  坪年龄为  $821 \pm 15 \text{ Ma}$ , 表明它是新元古代早期岩浆活动的产物。目前在 I、II 号岩体中发现有铜镍硫化物工业矿体, 其探明镍储量  $2 \times 10^4 \text{ t}$ , 矿石平均品位含镍 0.92%、铜 0.31% (朱维光, 2004)。I、II 号岩体的岩浆分异演化特征明显, 含较多的角闪石, 从下部到上部可以分为三个岩相带: 边缘相和角闪二辉橄辉岩岩相 (包括角闪二辉橄辉岩和二辉角闪橄辉岩)、橄辉角闪辉石岩岩相 (包括橄辉角闪辉石岩和少量橄辉辉石角闪岩), 和角闪辉长岩岩相。

岩相带之间没有明显的界线, 呈渐变过渡关系。角闪二辉橄辉岩类由橄辉石 (40% ~ 80%)、单斜辉石 (5% ~ 20%)、斜方辉石 (5% ~ 20%)、角闪石 (5% ~ 15%) 和斜长石 (< 10%) 组成; 橄辉角闪辉石岩类与角闪二辉橄辉岩类区别在于岩石中所含矿物含量不同, 含 20% ~ 35% 橄辉石、5% ~ 15% 单斜辉石、20% ~ 35% 斜方辉石、20% ~ 30% 角闪石和 < 15% 的斜长石。角闪辉长岩类主要由角闪石 (20% ~ 90%)、斜长石 (10% ~ 60%)、辉石 (0 ~ 40%), 其中斜方辉石稍多于单斜辉石) 及少量的石英、磷灰石等组成。矿体主要赋存于岩体底部的边缘相和橄辉岩相中。矿石矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等; 脉石矿物有橄辉石、单斜辉石、斜方辉石、角闪石和斜长石。矿石以浸染状为主, 其次为致密块状。

表 1 PGE分析采用标样标准值与测定值 ( $\times 10^{-9}$ )对比Table 1 Comparison between the recommended and the measured PGE contents ( $\times 10^{-9}$ ) in the standard samples

国际标样		Ir	Ru	Rh	Pt	Pd
WPR-1	测定值	16.0	21.9	14.3	291	237
	推荐值	13.5	22.0	13.4	285	235
UMT-1	测定值	8.1	10.3	9.5	129	106
	推荐值	8.8	10.9	9.5	128	106
	本文平均值 (n=3)	0.170	0.140	0.250	4.11	12.3
WGB-1	Fritsche and Meisel (2004) 平均值 (n=5)	0.200	0.140	0.200	4.75	12.2
	Qi et al. (2004) 平均值 (n=5)	0.230	0.160	0.190	5.74	12.0

### 3 样品与分析方法

本文所用 8 件矿石样品均采自冷水箐 I 号岩体, 包括浸染状和块状矿石两种类型, 其中浸染状矿石以黄铜矿为主, 块状矿石以镍黄铁矿和磁黄铁矿为主。矿石的 Cu、Ni、S 分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。其中, Ni、Cu 分析采用 AAS 测定, S 分析采用重量法测定。

为降低 PGE 分析的空白值及保证代表性, 我们采用改进的 Carius tube 方法, 在温度为 230°C 条件下, 5g 矿石样品用王水溶解。详细的分析方法描述见 Qi et al. (2007)。PGE 前处理过程在中国科学院地球化学研究所完成并用 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRG-e 型等离子质谱测定, 分析精度优于 5%。该方法检出限分别是: Ir  $0.0008 \times 10^{-9}$ , Ru  $0.001 \times 10^{-9}$ , Rh  $0.0006 \times 10^{-9}$ , Pt  $0.004 \times 10^{-9}$ , Pd  $0.009 \times 10^{-9}$ 。全流程空白 Ir Ru Rh  $< 0.003 \times 10^{-9}$ ; Pt Pd  $< 0.02 \times 10^{-9}$ 。对国际标样 WPR-1、UMT-1 和 WGB-1 进行分析测定, 其测定值与推荐值或文献值吻合 (表 1), 表明本次分析结果准确可靠。

Re-Os 同位素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室超净化学实验室完成。分析流程采用本实验室所建立流程完成。其简要流程为: 将准确称取的待分析样品通过长颈漏斗加入到 Carius 管底部, 然后置于温度为 -50~-80°C 的盛有乙醇和液氮的保温杯中经过一段时间的冷冻后, 把准确称取  $^{185}\text{Re}$ 、 $^{190}\text{Os}$  稀释剂加入到 Carius 管底部, 再加入 3mL 10mol 的 HCl 和 9mL 16mol 的  $\text{HNO}_3$ 。当管底溶液冷冻后用煤气-氧气火焰将 Carius 管的细颈部分密封。待封闭的 Carius 管回温至室温后, 放入不锈钢套管内, 并置于鼓风烘箱内, 逐渐升温到 230°C, 保温 12h。最后, 在 Carius 管底部冷冻的情况下打开, 并用 20 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。蒸馏温度为 105~110°C, 蒸出的  $\text{OsO}_4$  用 10mL Milli-Q 水吸收并用 ICP-MS 测定。蒸馏后的残液转入 150mL Teflon 烧杯中并蒸干, 再用 2mL 1.5mol 的  $\text{HNO}_3$  溶解并转移到 2mL 离心管中, 离心 3min 将上层清液

转移到 15mL 离心管中, 用 2mL 异戊醇分两次加入并于快速混匀器上振荡 1min 将两次萃取后的有机相转移到另一支离心管中, 然后用 2mL 超纯水洗涤有机相并将有机相转移到原 Teflon 烧杯中并蒸干, 再加几滴 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  和 16mol 的  $\text{HNO}_3$  以除去有机相和残存的  $\text{Os}$  最后用 10mL 4%  $\text{HNO}_3$  溶解并用 ICP-MS 测定。Re、Os 同位素测定采用 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRG-e 等离子质谱测定。对于 Re 选择质量数为 185、187 用 190 监测  $\text{Os}$ 。对于 Os 选择质量数为 186、187、188、189、190、192 用 185 监测 Re。本实验全流程空白 Re 约为  $2 \times 10^{-12}$ ,  $\text{Os}$  约为  $1 \times 10^{-12}$ , 远小于所测样品中的 Re 和  $\text{Os}$  的含量。

### 4 分析结果

#### 4.1 PGE 地球化学特征

8 件矿石样品的 PGE、Cu、Ni、S 数据列于表 2。从表 2 可见, 冷水箐 Cu-N 硫化物矿床的矿石样品的  $\Sigma\text{PGE}$  ( $\text{Os} + \text{Ir} + \text{Ru} + \text{Rh} + \text{Pt} + \text{Pd}$ ) 含量较低, 其变化范围为  $7.91 \times 10^{-9} \sim 56.9 \times 10^{-9}$ , 平均  $25.9 \times 10^{-9}$ 。以镍黄铁矿和磁黄铁矿为主的块状矿石具有相对高的  $\text{Os}$ 、Ir、Ru 和 Rh, 而 Pt 和 Pd 相对较低。以黄铜矿为主的浸染状矿石具有相对低的  $\text{Os}$ 、Ir、Ru 和 Rh (比块状矿石低一个数量级), 而 Pt 和 Pd 相对较高。 $\text{Os}$ 、Ir、Ru、Rh 和 Ni 与 S 呈明显正相关 (图 3a-d、g), 暗示它们的分布可能受硫化物控制。Cu 与 S 无明显相关性 (图 3h), 与黄铜矿含量在样品中变化较大有关。Pt、Pd 与 S 也不具明显的相关性 (图 3e、f), 可能与源区 PGE 特征和岩浆演化过程有关。

Pd/Ir 比值主要用来示踪硫化物矿石的成因。岩浆硫化物矿石具有相对较低的 Pd/Ir 比值, 然而热液硫化物矿石具有高的 Pd/Ir 比值 ( $> 100$ ) (Keays et al., 1982; Keays, 1995)。冷水箐矿石 Pd/Ir 比值变化较大, 但大多数样品的 Pd/Ir 比值  $< 100$  (表 2), 这说明冷水箐矿石应为岩浆成因。同时, 块状矿石的 Pd/Ir 比值小于浸染状矿石的 Pd/Ir 比值 (表 2), 表明不同类型矿石中 PPGE 与 IPGE 的分布可能受不同结晶分异过程的控制。

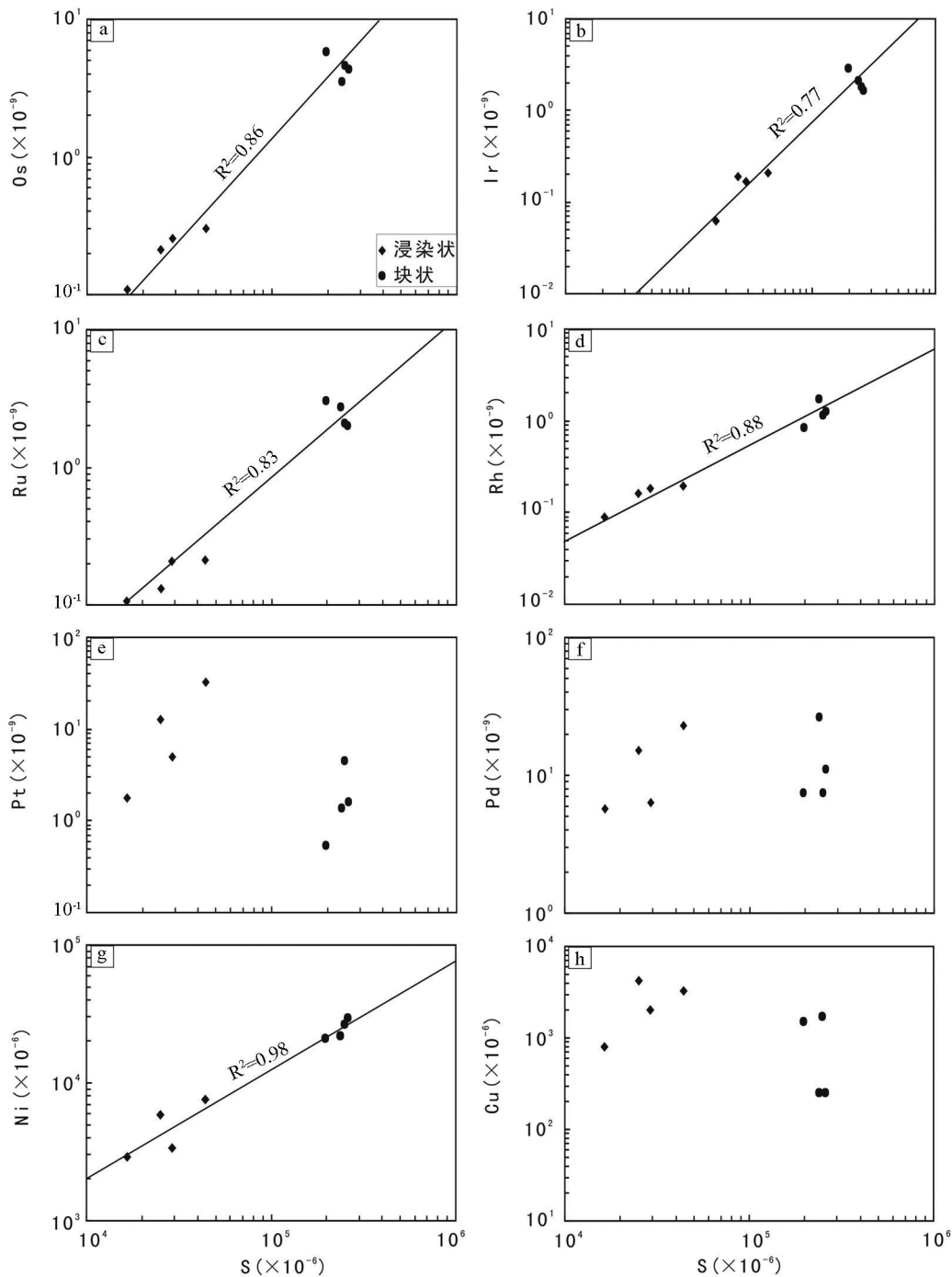


图 3 冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床 S 与 PGE、Cu 和 Ni 相关关系图

Fig 3 Correlation of S vs. PGE, Ni and Cu in the Lengshuiqing Cu-Ni sulfide deposit

为进一步反映 PGE 与其它元素之间的关系, 我们首先对矿石金属含量进行了 100% 硫化物计算。PGE 在 100% 硫化物中的含量采用以下公式计算:

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

式中:  $C_{(100\% \text{ 硫化物})}$  ——元素在 100% 硫化物中的含量

$C_{W_r}$  ——元素在全岩中的含量

S、Cu 和 Ni ——分别对应其全岩分析的含量 (%) (Barnes and Lightfoot 2005)。

计算结果如表 3 所示。计算后矿石的  $\Sigma$  PGE 变化在  $30.9 \times 10^{-9} \sim 492 \times 10^{-9}$  之间, 平均  $178 \times 10^{-9}$ , 比金川矿床矿石的 PGE 含量平均值  $3248 \times 10^{-9}$  (据汤中立和李文渊, 1995 资料计算) 低一个数量级, 比俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 矿床矿石 PGE 含量平均值  $82209 \times 10^{-9}$  (据 Nakret 2004 数据

表 2 冷水箐铜镍硫化物矿床矿石的铜、镍、硫 ( $\times 10^{-6}$ ) 和铂族元素 ( $\times 10^{-9}$ ) 组成Table 2 Cu Ni S ( $\times 10^{-6}$ ) and PGE ( $\times 10^{-9}$ ) compositions of the ores in the Lengshuiqing Cu-Ni sulfide deposit

样品号	LSQ-0813	LSQ-0803	LSQ-0804	LSQ-0805	LSQ-0806	LSQ-0808	LSQ-0809	LSQ-0812
矿石类型	浸染状	浸染状	浸染状	浸染状	块状	块状	块状	块状
Cu	790	2000	4200	3300	250	1700	1500	250
Ni	2900	3400	5900	7500	29400	26500	21300	22000
S	16500	29100	25200	43900	258400	249000	196500	237600
Os	0.116	0.256	0.220	0.307	3.08	3.31	4.89	3.12
Ir	0.063	0.166	0.192	0.207	1.64	1.83	2.93	2.12
Ru	0.106	0.208	0.130	0.210	2.00	2.10	3.07	2.74
Rh	0.090	0.182	0.161	0.196	1.27	1.15	0.835	1.76
Pt	1.77	4.97	12.6	32.9	1.62	4.50	0.548	1.38
Pd	5.77	6.29	15.1	23.1	11.0	7.54	7.52	26.4
$\Sigma$ PGE	7.91	12.1	28.4	56.9	20.6	20.4	19.8	37.5
Pd/Ir	91.4	37.8	78.5	112	6.72	4.11	2.57	12.5
Cu/Pd	137016	318041	278084	142679	22700	225545	199343	9461

表 3 冷水箐铜镍矿床矿石 Cu Ni ( $\times 10^{-6}$ ) 和铂族元素 ( $\times 10^{-9}$ ) 100% 硫化物计算结果Table 3 Concentrations of Cu Ni ( $\times 10^{-6}$ ), and PGE ( $\times 10^{-9}$ ) in recalculated 100% sulfide for the ores from the Lengshuiqing Cu-Ni sulfide deposit

样品号	LSQ-0813	LSQ-0803	LSQ-0804	LSQ-0805	LSQ-0806	LSQ-0808	LSQ-0809	LSQ-0812
矿石类型	浸染状	浸染状	浸染状	浸染状	块状	块状	块状	块状
Os	2.68	3.38	3.24	2.65	4.62	5.16	9.64	5.10
Ir	1.46	2.19	2.83	1.79	2.46	2.86	5.78	3.47
Ru	2.46	2.74	1.92	1.82	3.00	3.27	6.06	4.48
Rh	2.08	2.40	2.37	1.69	1.90	1.79	1.65	2.88
Pt	40.7	65.5	186	284	2.43	7.01	1.08	2.26
Pd	133	82.9	222	200	16.5	11.7	14.8	43.3
Cu	18231	26378	61861	28548	375	2647	2958	409
Ni	66925	44843	86901	64881	44083	41258	42003	36014
$\Sigma$ PGE	183	159	418	492	30.9	31.8	39.0	61.5

计算) 低两个数量级。浸染状矿石相对于块状矿石富集 Pt 和 Pd 而 Os Ir Ru 和 Rh 相对亏损 (表 3)。Ni 与 Pd 呈明显正相关 (图 4a), 暗示镍黄铁矿是 Pd 的赋存相 (Bames *et al.*, 2006)。Cu 与 Pt 呈一定正相关 (图 4b), Os-Ir Ru-Ir 明显正相关 (图 4c, d)。Pd-Ir Pt-Ir 没有相关性 (图 4e, f)。Pt/Pd 比值变化较小, 且大多数样品 Pt/Pd < 1 (图 5a)。Ni/Cu 比值变化较大, 其中浸染状矿石具有较小的 Ni/Cu 比值, 而块状矿石则具有较大的 Ni/Cu 比值 (图 5b), 但总体上所有样品的 Ni/Cu 比值均 > 1, 表明冷水箐矿床是以 Ni 为主的矿床。

冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿石的原始地幔标准化 PGE, Cu, Ni 配分曲线显示两种不同的型式 (图 6): ① 浸染状矿石表

现为 Pt-Pd 配分型, 即 Pt/Pd 相对于 Os Ir Ru 和 Rh 明显富集; ② 块状矿石具有 Os Ir Ru 和 Rh 平坦以及 Pt 亏损的配分模式。

#### 4.2 Re-Os 同位素地球化学特征

对 8 件铜镍硫化物矿石进行的 Re-Os 同位素测定结果列入表 4。由于矿石类型不同, 不同类型矿石的 Re 和 Os 的含量明显不同, 块状矿石的总 Re 和总 Os 含量分别为  $47.6 \times 10^{-9} \sim 164 \times 10^{-9}$  和  $2.74 \times 10^{-9} \sim 4.89 \times 10^{-9}$  之间。浸染状矿石的总 Re 和总 Os 含量分别为  $2.43 \times 10^{-9} \sim 8.63 \times 10^{-9}$  之间和  $0.116 \times 10^{-9} \sim 0.307 \times 10^{-9}$  之间。

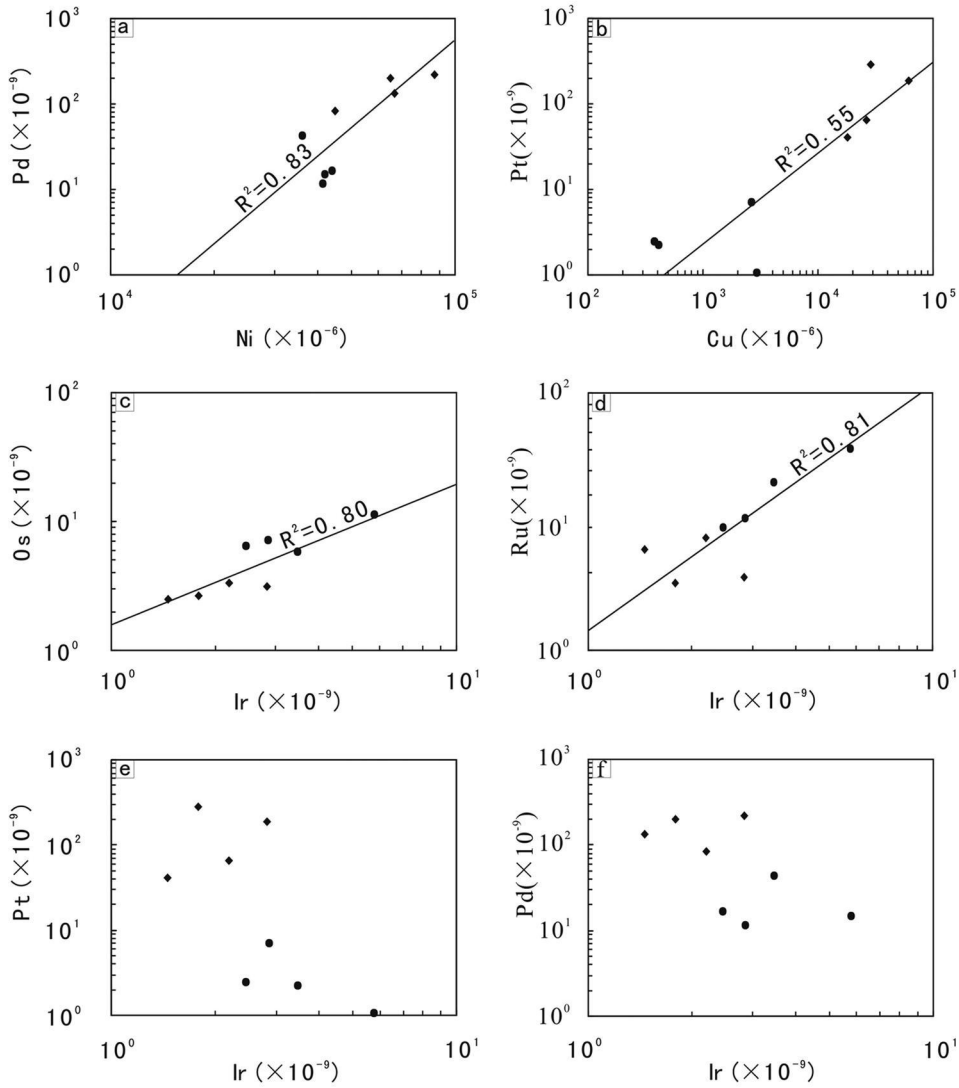


图 4 100% 硫化物的 Ni+Pd, Cu+Pt 以及 Ir 与 Os, Ru, Pt, Pd 之间的相关性

Fig 4 Correlation of Ni vs. Pd, Cu vs. Pt and Ir vs. Os, Ru, Pt, Pd in recalculated 100% sulfide

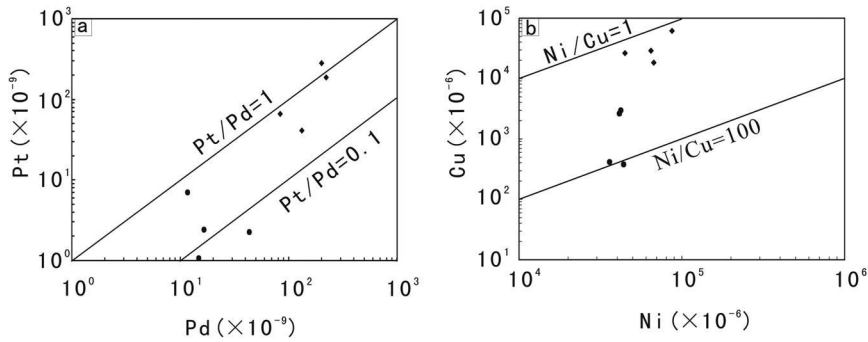


图 5 100% 硫化物的 Pd-Pt (a) 和 Ni-Cu (b) 图解

Fig 5 Plot of Pd vs. Pt (a) and Ni vs. Cu (b) in recalculated 100% sulfide

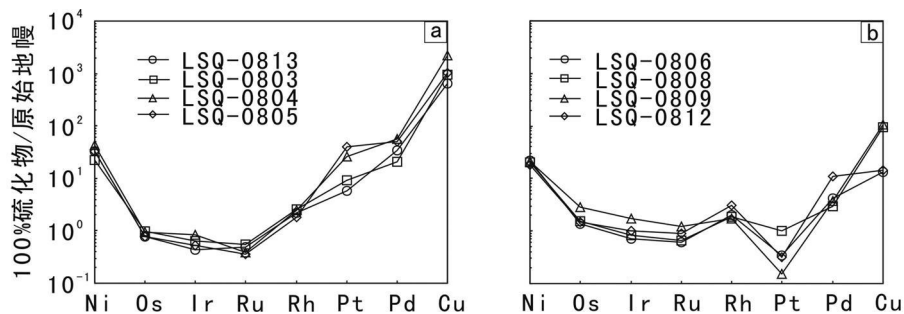


图 6 冷水箐矿床浸染状矿石 (a) 和块状矿石 (b) 的原始地幔标准化 PGE、Cu、Ni 配分型式 (原始地幔 PGE 数据采用 Barnes and Maier, 1999)

Fig. 6 Mantle-normalized PGE, Cu, Ni patterns of the disseminated sulfide ores (a), massive sulfide ores (b) of the Lengshuqing Cu-Ni deposit (primitive mantle data after Barnes and Maier, 1999)

表 4 冷水箐铜镍硫化物矿床矿石 Re-Os 同位素组成

Table 4 Re-Os isotopic data of Cu-Ni sulfide ores from the Lengshuqing deposit

样品号	LSQ-0813	LSQ-0803	LSQ-0804	LSQ-0805	LSQ-0806	LSQ-0807	LSQ-0808	LSQ-0809
矿石类型	浸染状	浸染状	浸染状	浸染状	块状	块状	块状	块状
Re ( $\times 10^{-9}$ )	2.80	2.43	6.65	8.63	162	47.5	164	159
2 $\sigma$	0.03	0.02	0.04	0.06	1	0.4	1	1
总 Os ( $\times 10^{-9}$ )	0.116	0.256	0.220	0.307	3.08	2.74	3.31	4.89
2 $\sigma$	0.002	0.003	0.003	0.002	0.01	0.03	0.02	0.03
Re/Os	24.1	9.50	30.3	28.2	52.6	17.3	49.3	32.6
$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	148	50.8	199	182	476	99.2	427	223
2 $\sigma$	3	0.8	3	2	5	1.5	5	2
$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	2.210	0.9747	2.949	2.751	6.873	1.565	6.248	3.361
2 $\sigma$	0.049	0.0177	0.052	0.032	0.069	0.042	0.066	0.032
$Y_{\text{Os}}$	44.0	125	66.1	98.4	160	63.0	197	137
$(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$	0.1758	0.2749	0.2028	0.2423	0.3173	0.1990	0.3620	0.2887

注: ①  $Y_{\text{Os}}(t)$  计算公式为:  $Y_{\text{Os}}(t) = 100[(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{样品}}(t) / (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{球粒陨石}}(t) - 1]$ , 8.21 亿年球粒陨石的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.09600 + 0.4007[e^{\lambda \cdot 4.56 \times 10^9} - e^{\lambda \cdot 8.21 \times 10^8}] = 0.1221$ . 使用的  $^{187}\text{Re}$  衰变常数为  $\lambda = 1.666 \times 10^{-11}$  (Shirey and Walker, 1998); ② Re/Os 中 Os 为总 Os 含量

## 5 讨论

### 5.1 深部硫化物熔离

前人研究认为,冷水箐岩体的岩浆源于亏损地幔源区,并且原始岩浆发生一定程度富集的高 MgO 苦橄质岩浆 (Zhu *et al.*, 2007),本文据此推断其初始岩浆中 PGE 不应亏损。从形成冷水箐矿床的母岩浆的 PGE 组成角度考虑,可以假定冷水箐的初始岩浆 PGE 含量类似于 PGE 不亏损的峨眉山大火成岩省苦橄岩浆,含有  $5.4 \times 10^{-9}$  Pt,  $4.5 \times 10^{-9}$  Pd,  $1.9 \times 10^{-9}$  Ir,  $1.7 \times 10^{-9}$  Ru,  $0.5 \times 10^{-9}$  Rh 和  $80 \times 10^{-6}$  Cu (Zhang *et al.*, 2005)。再假设各 PGE 在硫化物熔体/硅酸盐熔体中的分配系数分别为  $D(\text{Ir}) = 51000$ ,  $D(\text{Ru}) = 7000$ ,  $D(\text{Pt}) = 16500$ ,  $D(\text{Pd}) = 28000$  (Crocket *et al.*, 1997),  $D(\text{Rh}) = 27000$  (Bezman *et al.*, 1991) 以及 Cu 为 1000 (Francis, 1990)。根据冷水箐浸染状矿石 Cu 平均值 (33755

$\times 10^{-6}$ ), 利用 Campbell and Nakret (1979) 提出的下列公式:

$$C_i^{\text{sul}} = C_i^{\text{sil}} \cdot D_i^* \cdot (R + 1) / (R + D_i)$$

式中:  $C_i^{\text{sul}}$ ——元素 i 在硫化物熔体中的浓度

$C_i^{\text{sil}}$ ——元素 i 在硅酸盐熔体中的浓度

$D_i$ ——元素 i 在硫化物熔体/硅酸盐熔体中的分配系数

R——硅酸盐熔体与硫化物熔体的质量比

由此可以计算出冷水箐矿床的 R 因子为 73Q 以此 R 值可以推算出形成冷水箐矿床的母岩浆中 PGE 含量。计算结果显示,冷水箐矿床母岩浆中含有  $0.21 \times 10^{-9}$  Pt,  $0.22 \times 10^{-9}$  Pd,  $0.003 \times 10^{-9}$  Ir,  $0.003 \times 10^{-9}$  Ru 和  $0.003 \times 10^{-9}$  Rh, 与上述假定的 PGE 不亏损的原始岩浆相比,形成冷水箐矿床的母岩浆中的 PGE 明显亏损。由此可见,成矿母岩浆 PGE 亏损应是冷水箐矿石 PGE 含量总体偏低的主要原因,而 PGE 不亏损的初始岩浆进入地壳后可能在岩浆通道



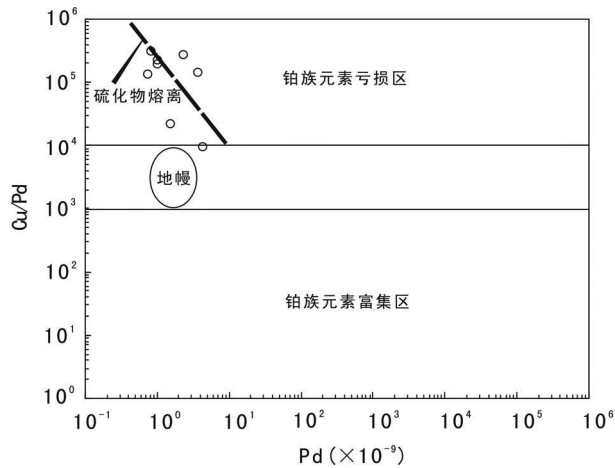


图 7 冷水箐硫化物矿石 Cu/Pd-Pd图 (区域划分据 Barnes and Lightfoot 2005)

Fig 7 Cu/Pd vs Pd for samples from the Lengshuiqing sulfide ores (after Barnes and Lightfoot 2005)

发生过深部硫化物熔离, 因而导致冷水箐母岩浆 PGE 的亏损。

Cu/Pd比值常被用于研究 Cu-Ni硫化物矿床中硫化物熔离时间的早晚 (Barnes *et al.*, 1993; Mair *et al.*, 1996)。由于 Pd在硫化物和硅酸盐间的分配系数 (17000) (Fleet *et al.*, 1996) 远高于 Cu 的分配系数 (1383) (Peach *et al.*, 1990), 因此 Pd强烈富集于硫化物。在岩浆产生和演化过程中, 如果 S 不饱和, 则硫化物不能从岩浆中熔离, Pd将富集在硫化物液滴中, 从而使得岩浆 Pd比 Cu更富, 这使得岩浆 Cu/Pd比值低于原始地幔。相反, 如果岩浆 S 饱和, 硫化物从岩浆中熔离并带出大多数 Pd 残余岩浆将具有比原始地幔更高的 Cu/Pd比值。早期形成的硫化物矿物强烈富集 PGE, 造成残余岩浆亏损 PGE, 所以晚期形成的硫化物矿物将贫 PGE (Naldrett and Wilson, 1990)。冷水箐矿石具有较高的 Cu/Pd比值, 其比值变化在 9460~ 318040 之间, 平均 166610。所有样品的 Cu/Pd比值均大于原始地幔 (6300) (Barnes *et al.*, 1988), 也大于金川 Cu-Ni硫化物矿床的 Cu/Pd比值 (50000) (Wang *et al.*, 2004), 而与白马寨矿床矿石的 Cu/Pd比值 (145000) 接近 (Sun *et al.*, 2008)。在 Cu/Pd-Pd图 (图 7) 上, 所有矿石样品 Cu/Pd比值均高于原始地幔并且 Pd相对于 Cu亏损。所有这些特征都表明冷水箐的成矿母岩浆曾经历 S饱和, 少量富含 PGE 的硫化物有可能滞留于上升通道中, 残余岩浆由此明显亏损 PGE, 造成冷水箐 I号岩体中 PGE含量较低。

5.2 Pt负异常的解释

在原始地幔标准化 PGE、Cu、Ni 配分图上, 冷水箐块状矿石的 Pt 亏损 (图 6)。这种情况与金川 2# 矿体 (Song *et al.*, 2009b) 类似。Song *et al.* (2009b) 的研究认为, Pt 的亏

损可能是由于硫化物结晶分异之前经历了 Pt-Fe合金析出的历史。但对于 I号岩体这一规模很小的岩体, 在较小范围内形成的矿石, 如果母岩浆中 Pt 亏损, 那么浸染状和块状矿石都应表现出 Pt 亏损特征。因此这一原因不能很好解释块状矿石的 Pt 亏损。由于 Pt 多以合金形式存在, 块状矿石形成时间略晚于浸染状矿石, 早期样品形成时可能有少量 Pt 形成合金分离出去, 这可能是导致块状矿石 Pt 的亏损的主要原因。这一推测也与经 100% 硫化物计算后块状矿石的 PGE 含量明显低于浸染状矿石的事实一致。

5.3 地壳混染

地壳混染是岩浆硫化物矿床成矿的关键因素之一 (Naldrett 2004)。Re-Os同位素体系可以有效地示踪硫化物矿床成矿过程中地壳物质混染程度 (Foster *et al.*, 1996; Mathur *et al.*, 1999)。镁铁质岩浆在上升过程中及其在地壳岩浆房中与地壳物质, 尤其是与含硫化物的地壳发生反应, 可使其组分发生变化。由于地壳相对富 Re (Hauri and Hart 1997), 混入越多地壳物质则产生的放射成因 Os 含量就越高, 相应地 <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os 初始值也发生变化 (Mao and Du 2002; Shirey and Walker 1998)。地壳的 <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os 比值 (0.2~ 10) (Shirey and Walker 1998) 远大于地幔 (0.11~ 0.15) (Meiselet *et al.*, 1996; Shirey and Walker 1998), 因此很容易区别这两种不同来源的 Os。

以 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄 (821 ± 1M a) (Zhu *et al.*, 2007) 作为成矿年龄, 计算得到各样品的初始 Os 同位素组成如表 4 所示。冷水箐矿石的 (<sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os) 变化在 0.1758~ 0.3620 之间, 平均 0.2579 明显高于 821M a 球粒陨石或地幔的 <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>O 比值 (0.1221) (Shirey and Walker 1998), 这暗示冷水箐矿床在成矿过程中可能受到了地壳物质不同程度的混染。

为了探讨 Os 同位素组成随地质时代的变化规律, Walker *et al.* (1989, 1994) 提出利用参数  $\gamma_{Os}(t)$  来进行对比研究。由于地壳物质 Re/Os 的比值较高, 地壳物质的加入会使地质体  $\gamma_{Os}(t)$  趋向高正值, 而 Re 的亏损会导致  $\gamma_{Os}(t)$  趋向低值甚至负值 (Walker *et al.*, 1994)。为更好地反映地壳物质的混染程度, 本文统计了世界上一些典型的岩浆硫化物矿床的 Re/Os 和  $\gamma_{Os}$  数据 (图 8)。Norilsk 矿床的岩浆被认为主要为幔源 (Walker *et al.*, 1994); 加拿大 Sudbury 矿床的岩浆被认为是典型的壳源为主甚至可能完全来源于地壳 (Morgan *et al.*, 2002); 美国 Duluth 矿床地壳 Os 的贡献 > 35% (Ripley, 1999); 俄罗斯 Pechenga 矿床的壳源 Os < 10% (Walker *et al.*, 1997); 白马寨矿床中地壳 Os 的贡献为 30% (Sun *et al.*, 2008); 力马河矿床的岩浆经历了 8% ~ 15% 的地壳物质的混染 (Zhang *et al.*, 2009a); 加拿大 Labrador Voisey's Bay 矿床 (Lambert *et al.*, 2000)、喀拉通克和黄山东矿床 (Zhang *et al.*, 2008) 也有明显的地壳物质加入。

冷水箐矿石的  $\gamma_{Os}(t)$  值变化在 + 44.0 ~ + 197 之间 (表 4), 平均 + 111 在 Re/Os- $\gamma_{Os}$  关系图上 (图 8), 其 Os 同

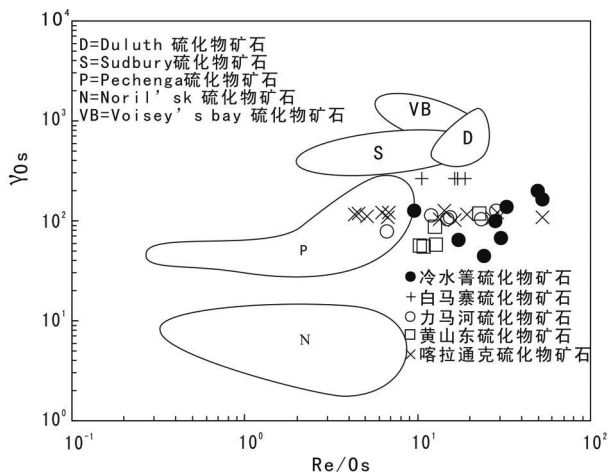


图 8 冷水箐硫化物矿石  $Y_{0s}$ -Re/Os关系图

数据来源: Noril'sk (Walker et al., 1994); Voisey's Bay (Lambert et al., 2000); Duluth (Ripley, 1999); Sudbury (Morgan et al., 2002); Pechenga (Walker et al., 1997); 力马河 (陶琰等, 2008); 白马寨 (Sun et al., 2008); 黄山东和喀拉通克 (Zhang et al., 2008)

Fig 8 Re/Os ratio vs.  $Y_{0s}$  diagram for the Lengshuiqing sulfide ores

Data source Noril'sk (Walker et al., 1994); Voisey's Bay (Lambert et al., 2000); Duluth (Ripley, 1999); Sudbury (Morgan et al., 2002); Pechenga (Walker et al., 1997); Limahong (Tao et al., 2008); Baishan (Sun et al., 2008); Huangshandong and Kalatongke (Zhang et al., 2008)

元素组成与喀拉通克、黄山东、力马河矿床十分相似, 主要介于白马寨矿床和 Pechenga矿床之间。由此, 我们可以估计冷水箐矿床矿石可能混染了较多的地壳物质。Zhu et al. (2007) 通过对冷水箐矿床的微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素的研究, 同样证实了形成该矿床的原始岩浆遭受了不同程度的地壳混染作用 (5% ~ 27%)。

另一方面, 引起硫化物不混熔的原因有多种, 如温度、压力、氧逸度和 S 逸度的改变等 (MacLean, 1969)。但后来发现在岩浆演化过程中由于地壳混染作用或岩浆中有地壳硫的加入可以导致硫化物饱和及不混熔硫化物形成 (Lambert et al., 1998; Bames et al., 2001)。同时富 Si 的地壳物质中 Si 的加入也会改变镁铁质岩浆中 S 的溶解度而引起 Cu-Ni 等的富集成矿 (Irvine, 1975)。由于形成冷水箐矿床的岩浆中有不少地壳来源的 Os 混入, 因此可以推测地壳物质的混入可能是引起本区镁铁质岩浆发生硫化物不混熔作用而导致成矿的重要原因。我国有很多的铜镍硫化物矿床的硫化物熔离都被认为是地壳物质混染的结果, 如云南的白马寨矿床 (Wang et al., 2006)、四川的力马河矿床 (Zhang et al., 2009a) 和新疆的喀拉通克矿床 (Zhang et al., 2009b) 和新疆哈密的黄山矿床 (傅飘儿等, 2009)。

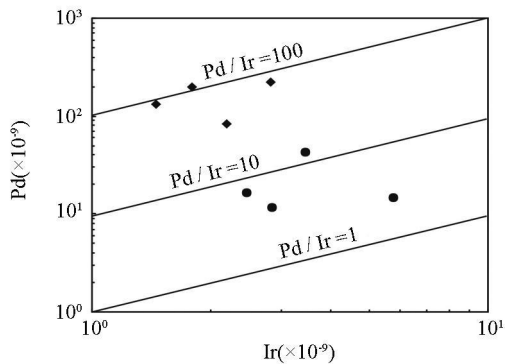


图 9 100% 硫化物矿石的 Ir-Pd图解

Fig 9 Plot of Ir vs. Pd in recalculated 100% sulfide

## 6 成矿过程探讨

在 100% 硫化物的基础上, 冷水箐浸染状矿石相对富集 Pt 和 Pd 而 Os, Ir, Ru 和 Rh 相对亏损。这与经单硫化物固熔体结晶分异后残余硫化物熔体的特征是一致的。由于在单硫化物固熔体中 Os, Ir, Ru 和 Rh 是相容元素, 而 Pt 和 Pd 是不相容元素, 因此单硫化物固熔体的结晶分异导致了残余硫化物熔体中 Os, Ir, Ru, Rh 亏损和 Pt, Pd 富集。在 Ir-Pt 和 Ir-Pd 图上 (图 4e, f), 浸染状矿石呈现出 Pt 和 Pd 随 Ir 含量增加而升高的趋势, 而块状矿石则表现出相反的趋势。同时, 浸染状矿石有相对较高的 Pd/Ir 比值, 而块状矿石有相对低的 Pd/Ir 比值 (图 9), 暗示浸染状矿石和块状矿石的 Ir 和 Pt, Pd 分异程度不同。总体上, 所有矿石样品均具有低 Os, Ir, Ru 的特征, 这可能反映了形成矿石的岩浆经历了橄榄石、铬铁矿等矿物的分离结晶作用。朱维光 (2004) 的研究也表明 Cu-Ni 硫化物结晶是在橄榄石和辉石的结晶之后发生的。

综上所述, 冷水箐矿床矿石的成矿作用可能经历了以下演化过程: ① 由上地幔产生的 PGE 不亏损的苦橄质玄武岩浆, 在构造动力的驱动下沿深大断裂上侵到地壳, 由于岩浆上升过程中发生橄榄石、辉石等矿物的分离结晶或混染了少量上地壳物质, 原始岩浆硫化物达到饱和, 少量的硫化物熔离并滞留在上升通道中, 从而使得成矿母岩浆亏损 PGE。② 岩浆上升到地壳浅部岩浆房后, 由于混染了较多富 Si 的上地壳物质以及橄榄石、辉石等矿物的大量堆积使岩浆中 S 的溶解度较快降低, 导致岩浆中的 S 达到饱和而使得大量的硫化物从岩浆中熔离出来, 由硫化物熔体的结晶分异作用形成了浸染状矿石和块状矿石。

## 7 结论

(1) 冷水箐硫化物矿石的  $\Sigma$ PGE 较低, 其值变化范围为  $7.91 \times 10^{-9} \sim 56.9 \times 10^{-9}$ , 平均  $25.5 \times 10^{-9}$ 。Cu/Pd 比值在 9461 ~ 318041 之间变化, 平均 166610, 远高于原始地幔的 Cu/Pd 比值, 这些特征显示岩浆在上升通道中曾发生过硫化

物熔离作用。

(2) 基于 PGE 不亏损的初始岩浆推算结果, 冷水管矿床母岩浆中的 PGE 明显亏损, 而深部硫化物熔离可能是导致冷水管矿床母岩浆 PGE 亏损的主要原因。

(3) 冷水管不同类型矿石的 ( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ )<sub>i</sub> 比值为 0.1758~0.3620, 平均 0.2579,  $\chi_{\text{Os}}(t)$  值为 +44.0~+197, 平均 +111, 显示在岩浆侵位期间和成矿过程中有较多地壳物质加入到成岩成矿系统。

(4) 冷水管矿床的成矿作用经历了如下过程: PGE 不亏损原始岩浆形成 $\rightarrow$ 岩浆通道少量地壳物质混染或橄榄石、铬铁矿等矿物分离结晶 $\rightarrow$ 少量硫化物熔离 $\rightarrow$ 成矿母岩浆 PGE 亏损 $\rightarrow$ 浅部岩浆房中较多上地壳物质混染及橄榄石、铬铁矿等矿物的堆晶作用 $\rightarrow$ 硫化物大量熔离形成浸染状和块状矿石。

致谢 承蒙两位审稿人提出建设性修改意见, 在此谨致谢意。

## References

Bames SJ, Naldrett AJ and Gorton MP. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical Geology*, 53(3-4): 303-323

Bames SJ and Naldrett AJ. 1987. Fractionation of the platinum-group elements and gold in some komatiites of the Abitibi greenstone belt, northern Ontario. *Economic Geology*, 82(1): 165-183

Bames SJ, Boyd R, Komelussen A *et al.* 1988. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper. Examples from Norway. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 113-143

Bames SJ, Couture JF, Sawyer EW *et al.* 1993. Nickel-copper occurrences in the Bellevue-Angliers Belt of the Pontiac Subprovince and the use of Cu-Pd ratios in interpreting platinum-group element distributions. *Economic Geology*, 88(6): 1402-1418

Bames SJ and Maier WD. 1999. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids. *Dynamical Processes in Magmatic Ore Deposits and Their Application to Mineral Exploration*. Geological Association of Canada Short Course Notes 13: 69-106

Bames SJ, Meezhik VA and Sokolov SV. 2001. The composition and mode of formation of the Pechenga nickel deposits, Kola Peninsula, northwestern Russia. *Canadian Mineralogist*, 39(2): 447-471

Bames SJ and Lightfoot PC. 2005. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents. *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*, 34: 179-214

Bames SJ, Cox RA and Zientek ML. 2006. Platinum-group element, gold, silver and base metal distribution in compositionally zoned sulfide droplets from the Medvezky Creek Mine, Noril'sk, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(2): 187-200

Beznen NI, Brugmann GE and Naldrett AJ. 1991. Mechanism of concentration of platinum-group elements: Partitioning between silicate and sulfide melts. *International Geologic Review*, 33: 784-792

Campbell H and Naldrett AJ. 1979. The influence of silicate-sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides. *Economic Geology*, 74(6): 1503-1506

Carlson RW. 2005. Application of the Pt-Re-Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology. *Lithos*, 82(3-4): 249

- 272

Crocket JH, Fleet ME and Stone WE. 1997. Implications of composition for experimental partitioning of platinum-group elements and gold between sulfide liquid and basalt melt: The significance of nickel content. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4139-4149

Fleet ME, Crocket JH and Stone WE. 1996. Partitioning of platinum-group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2397-2412

Foster JG, Lambert DD, Frick LR *et al.* 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archean nickel ores from uncontaminated komatiites. *Nature*, 382(6593): 703-706

Francis RD. 1990. Sulfide globules in mid-ocean ridge basalts (MORB), and the effect of oxygen abundance in Fe-SO liquids on the ability of those liquids to partition metals from MORB and komatiite magmas. *Chemical Geology*, 85(3-4): 199-213

Fritsche J and Meisel T. 2004. Determination of anthropogenic input of Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Ru, and Pt in soils along Austrian motorways by isotope dilution ICP-MS. *Science of the Total Environment*, 325(1-3): 145-154

Fu PE, Hu PQ, Zhang MJ *et al.* 2009. Metallogenic magnetism of Huangshan Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang. *Geochimica*, 38(5): 432-448 (in Chinese with English abstract)

Hauri EH and Hart SR. 1997. Rhenium abundances and systematics in oceanic basalts. *Chemical Geology*, 139(1-4): 185-205

Irvine TN. 1975. Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusions-II. Origin of chromite layers and similar deposits of other magmatic ores. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(6-7): 991-1008

Keays RR, Nickel EH, Groves DJ *et al.* 1982. Iridium and palladium as discriminants of volcanic-exhalative, hydrothermal and magmatic nickel sulfide mineralization. *Economic Geology*, 77(6): 1535-1547

Keays RR. 1995. The role of komatiitic and picritic magnetism and S-saturation in the formation of ore deposits. *Lithos*, 34(1-3): 1-18

Lambert DD, Foster JG, Frick LR *et al.* 1998. Geodynamics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits: New insights from the Re-Os isotope system. *Economic Geology*, 93(2): 121-136

Lambert DD, Frick LR, Foster JG *et al.* 2000. Re-Os isotope systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic sulfide system, Labrador, Canada: II. Implications for parental magma chemistry, ore genesis and metal redistribution. *Economic Geology*, 95(4): 867-888

Maclellan WH. 1969. Liquidus phase relations in the FeS-FeO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SO<sub>2</sub> system, and their application in geology. *Economic Geology*, 64(8): 865-884

Maier WD, Bames SJ, DeKlerk WJ *et al.* 1996. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld Complex: Implications for platinum-group element exploration. *Economic Geology*, 91(6): 1151-1158

Mao JW and Du AD. 2002. The 982Ma Re-Os age of copper-nickel sulfide ores in the Baotou area, Guangxi and its geological significance. *Science in China (Series D)*, 45(10): 911-920

Mathur R, Ruiz J and Tomos F. 1999. Age and sources of the ore at Tharsis and Rio Tinto, Iberian pyrite belt, from Re-Os isotopes. *Mineralium Deposita*, 34(8): 790-793

Meisel T, Walker RJ and Morgan JW. 1996. The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle. *Nature*, 383: 517-520

Morgan JW, Walker RJ, Horan MF *et al.* 2002.  $^{190}\text{Pt}$ - $^{186}\text{Os}$  and  $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$  systematics of the Sudbury igneous complex, Ontario. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(2): 273-290

Naldrett AJ and Duke JM. 1980. Platinum metals in magmatic sulfide ores. *Science*, 208(4451): 1417-1424

Naldrett AJ. 1981. Nickel sulfide deposits: Classification, composition and genesis. *Economic Geology 75<sup>th</sup> Anniversary Volume*, 628-685

Naldrett AJ and Wilson AH. 1990. Horizontal and vertical variations in noble metal distribution in the Great Dyke of Zimbabwe: A model for PGE mineralization by fractional segregation of sulfide. *Chemical*

- Geology, 88: 279–300
- Naldrett AJ, Asif M, Krstic S *et al.* 2000. The composition of mineralization at the Voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit with special reference to platinum-group elements. *Economic Geology*, 95(4): 845–865
- Naldrett AJ. 2004. *Magmatic Sulfide Deposits*. *Geology, Geochemistry and Exploration*. Berlin Heidelberg New York: Springer
- Peach CL, Mathez EA and Keays RR. 1990. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB: Implications for partial melting. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54: 3379–3389
- Qi L, Zhou MF and Wang CY. 2004. Determination of low concentrations of platinum group elements in geological samples by ID-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 19(10): 1335–1339
- Qi L, Zhou MF, Wang CY *et al.* 2007. Evaluation of a technique for determining Re and PGEs in geological samples by ICP-MS coupled with a modified Carius tube digestion. *Geochemical Journal* 41: 407–414
- Ripley EM. 1999. Re-Os, Sm-Nd and Pb isotopic constraints on mantle and crustal contributions to magmatic sulfide mineralization in the Duluth complex. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62: 3349–3365
- Shen WZ, Gao JF, Xu SJ *et al.* 2003. Formation age and geochemical characteristics of the Lengshuiqing body, Yunnan, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica* 19(1): 27–37 (in Chinese with English abstract)
- Shirey SB and Walker RJ. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 26: 423–500
- Song XY, Keays RR, Xiao L *et al.* 2009a. Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Chemical Geology*, 262(3–4): 246–261
- Song XY, Keays RR, Zhou MF *et al.* 2009b. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73(2): 404–424
- Sun XM, Wang SW, Sun WD *et al.* 2008. PGE geochemistry and Re-Os dating of massive sulfide ores from the Baizhai Ni-Cu deposit, Yunnan Province, China. *Lithos* 105(1–2): 12–24
- Tang DM, Qin KZ, Liu BG *et al.* 2008. The major types, metallogenesis of platinum-group element deposits and some prospects. *Acta Petrologica Sinica* 24(3): 569–588 (in Chinese with English abstract)
- Tang ZL and Li WY. 1995. *Geological Comparison and Metallogenetic Mode of Jinchuan Ni-Cu (Pt) Sulfide Ore Deposit*. Beijing: Geological Publishing House, 1–209 (in Chinese)
- Tao Y, Li CS, Hu RZ *et al.* 2007. Petrogenesis of the Pt-Pd mineralized Jinbaoshan ultramafic intrusion in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 153(3): 321–337
- Tao Y, Hu RZ, Qu WJ *et al.* 2008. Re-Os isotope study of sulfide and olivine pyroxenite in the Linhe nickel deposit, Sichuan Province. *Acta Geologica Sinica* 82(9): 1291–1304 (in Chinese with English abstract)
- Walker RJ, Carlson RW, Shirey SB *et al.* 1989. Os, Sr, Nd and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53: 1583–1595
- Walker RJ, Morgan JW, Horan MF *et al.* 1994. Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type ore-bearing intrusions, Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58(19): 4179–4197
- Walker RJ, Morgan JW, Hanks EJ *et al.* 1997. Re-Os systematics of Early Proterozoic ferropirites, Pechenga Complex, northwest Russia: Evidence for ancient <sup>187</sup>Os-enriched plumes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61(15): 3145–3160
- Wang CY, Zhou MF and Keays RR. 2006. Geochemistry constraints on the origin of the Permian Baizhai mafic-ultramafic intrusion, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(3): 309–321
- Wang RT, Mao JW, He Y *et al.* 2004. Geochemical characteristics of platinum-group elements in Jinchuan super large sulfide copper-nickel deposit. *Geochimica et Metallurgica* 8: 279–286
- Zhang ZC, Mao JW, Mahoney JJ *et al.* 2005. Platinum group elements in the Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implications for mantle sources. *Geochemical Journal* 39(4): 371–382
- Zhang ZC, Mao JW, Saunders AD *et al.* 2009a. Petrogenetic modeling of three mafic-ultramafic layered intrusions in the Emeishan Large Igneous Province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints. *Lithos* 113: 369–392
- Zhang ZC, Mao JW, Chai FM *et al.* 2009b. Geochemistry of the Permian Kalabogke mafic intrusions, northern Xinjiang, Northwest China: Implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. *Economic Geology* 104(2): 185–203
- Zhang ZH, Mao JW, Du AD *et al.* 2008. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences* 32: 204–217
- Zhong H, Zhu W, Qi L *et al.* 2006. Platinum-group element (PGE) geochemistry of the Emeishan basalts in the Pan-Xi area, SW China. *Chinese Science Bulletin* 51(7): 845–854
- Zhu WG. 2004. *Geochemical characteristics and tectonic setting of Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks in western margin of the Yangtze craton: Exemplified by the Gaojiacun complex and Lengshuiqing No. 101 complex*. Ph.D. Thesis, Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English summary)
- Zhu WG, Zhong H, Deng HL *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb age geochemistry, and Nd-Sr isotopes of the Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex, Southwest China. *International Geology Review*, 48(7): 650–668
- Zhu WG, Zhong H, Li XH *et al.* 2007. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Neoproterozoic Lengshuiqing Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complex, SW China. *Precambrian Research*, 155(1–2): 98–124
- Zhu WG, Zhong H, Li XH *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yunnan area, SW China. *Precambrian Research*, 164: 66–85

#### 附中中文参考文献

- 傅飘儿, 胡沛青, 张铭杰等. 2009. 新疆黄山铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程. *地球化学*, 38(5): 432–448
- 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进等. 2003. 四川盐边冷水箐岩体的形成时代和地球化学特征. *岩石学报*, 19(1): 27–37
- 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. 北京: 地质出版社, 1–209
- 唐冬梅, 秦克章, 刘秉光等. 2008. 铂族元素矿床的主要类型、成矿作用及研究展望. *岩石学报*, 24(3): 569–588
- 陶琰, 胡瑞忠, 屈文俊等. 2008. 力马河镍矿 Re-Os 同位素研究. *地质学报*, 28(9): 1291–1304
- 朱维光. 2004. 扬子地块西缘新元古代镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征及其地质背景: 以盐边高家村杂岩体和冷水箐 101 号杂岩体为例. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所