

力马河镍矿 Re-Os 同位素研究

陶琰¹⁾, 胡瑞忠¹⁾, 屈文俊²⁾, 杜安道²⁾

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) 中国地质科学院, 国家地质实验测试中心, 北京, 100037

内容摘要:四川力马河镍矿是峨眉山大火成岩省一个重要的岩浆硫化物矿床。本文通过对其主要岩、矿石类型 Re、Os 及其同位素组成的分析, 综合探讨了成矿岩体原始岩浆性质、矿石硫化物成因、成矿机制及 Re-Os 同位素等时线年龄。结果表明, 力马河镍矿不同类型岩石样品初始 Os 同位素组成是不均一的, 富硫化物的网脉状矿石及其选纯硫化物 Os 同位素组成初始值差异较小, 其等时线年龄为 265 ± 35 Ma, 与岩体锆石 SHRIMP 年龄 263 ± 3 Ma 基本相当; 硫化物含量较低的岩、矿石样品间初始 Os 同位素组成差异较大, 其表观等时线年龄大于成矿年龄。分析认为, 岩矿样品初始 Os 同位素组成的不均一是由含较高放射成因 ^{187}Os 丰度的硫化物熔体和含较低放射成因 ^{187}Os 丰度的硅酸盐熔体不同比例混合造成的。混合模型分析表明, 硫化物含量超过 30% 的矿石样品初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 基本接近, 硫化物含量低于 30% 的岩矿石样品初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 随硫化物含量上的不同, 差异很大, 为岩浆硫化物矿床 Re-Os 等时线年龄出现多组年龄解的现象提供了一种可能的解释。成矿岩体中含放射成因 ^{187}Os 丰度最低的岩石样品 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 在 5 左右, Cu/Pd 比值在 7000 左右, 表明是基本没有受到地壳混染及硫化物熔离影响的原始岩浆结晶分异产物, 估计原始岩浆 Os 含量在 1×10^{-9} 左右, 为苦橄质岩浆。矿石硫化物 Re/Os 比值显著高于任何赋矿橄榄岩, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 高达 110 左右, 综合分析揭示了力马河镍矿硫化物为二次熔离成因, 模式分析认为, 矿石硫化物是由原始岩浆经历 $R=2000$ 左右的硫化物熔离后, 其亏损岩浆再经 $R=200$ 左右的硫化物熔离形成, 与二次熔离相对应, 成矿岩浆也经历了两次混染作用, 分别为上、下地壳 7% 左右的混染。

关键词: Re-Os 同位素; 等时线年龄; 岩浆硫化物矿床; 峨眉山大火成岩省; 力马河镍矿

Re-Os 同位素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越来越重要的作用, 用于成矿岩体定年并在成矿岩浆形成演化过程示踪方面具有突出的优越性 (Lambert et al., 1998), 近年来国内外已开展了大量探索, 包括对 Noril'sk、Sudbury、Duluth、Voisey's bay 等著名岩浆硫化物矿床的 Re-Os 同位素研究 (如: Lambert et al., 1998; Ripley et al., 2001; Morgan et al., 2002), 我国对金川、喀拉通克等岩浆硫化物矿床的 Re-Os 同位素研究为界定矿床成矿年龄及认识矿床成因起到了积极地作用 (如: 毛景文等, 2002; 张宗清等, 2004; 屈文俊等, 2005; 张作衡等, 2005; 杨刚等, 2005; 韩春明等, 2006; 石贵勇等, 2006; 李月臣等, 2006; 杨胜洪等, 2007; 王虹等, 2007)。

力马河镍矿是峨眉山大火成岩省一个重要的岩

浆硫化物矿床 (Zhou et al., 2002b, 2008; 胡瑞忠等, 2005; Song et al., 2008), 已开展了一定程度的基础地质地球化学研究 (如: 陶琰等, 2007; Li et al., 2007), 矿石富含硫化物并有多种结构类型的硫化物矿石产出, 是适宜开展 Re-Os 同位素研究的良好对象。本文拟通过对力马河镍矿主要岩、矿石类型 Re、Os 及其同位素组成特征的分析, 综合探讨成矿岩体原始岩浆性质、矿石硫化物成因、成矿机制及 Re、Os 同位素等时线年龄问题。主要集中在两个方面: ① Re-Os 同位素作为一种定年方法在岩浆硫化物矿床定年上的实际应用效果问题; ② Re、Os 及其同位素作为一种示踪手段对力马河镍矿成因方面的指示作用。

1 力马河镍矿简介

力马河镍矿成矿岩体 (以下简称力马河岩体) 位

注: 本文为国家自然科学基金 (编号 40773033, 40572062) 及中国科学院重要方向项目 (编号 KZCX2-YW-111) 资助的成果。

收稿日期: 2007-10-11; 改回日期: 2008-06-01; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 陶琰, 男, 1963 生。副研究员, 博士。主要从事镁铁-超镁铁岩及成矿作用研究。通讯地址: 550002, 贵阳市观水路 46 号。电话: 0851-5891665; Email: taoyan@vip.gyig.ac.cn。

于康滇地轴中段会理县小关河地区前寒武结晶基底出露区,成矿岩体侵位于元古界会理群力马河组石英岩与凤营组灰岩中(图 1)。岩体由不对称环带状分布的超镁铁质的橄榄岩(包括含长辉石橄榄岩和斜长橄榄辉石岩)和镁铁质岩(包括辉长岩和闪长岩)组成,岩体南北向延伸约 900m,东西向宽度最大约 180m、一般 120~140m,向下延伸一般 200~250m,超镁铁岩分布在岩体底部及西侧,镁铁质岩产出在岩体偏东侧的中上部。

岩体产出地区处于峨眉山大火成岩省岩浆活动范围内(图 1A),其锆石 SHRIMP 年龄为 263 ± 3 Ma(Zhou et al., 2008),与峨眉山大火成岩省主要岩浆活动时限 260 ± 3 Ma(Zhou et al., 2002a; Fan et al., 2004; Zhong et al., 2006, 2007; Hou et al., 2006; He et al., 2007)相当,已有研究认为,力马河岩体是峨眉山大火成岩省岩浆活动的产物(Zhou et al., 2002b, 2008; 胡瑞忠等, 2005)。

矿体产出在超镁铁岩中,产状与超镁铁岩一致,

大部分超镁铁岩中都有硫化物矿化,含矿与不含矿的超镁铁岩无明显界限,但工业矿体主要产出在超镁铁岩相的西侧及底部,矿体厚度约占超镁铁岩的 1/2 至 3/4,最厚处有 48 m。矿床成矿元素组合为 Ni-Cu,没有铂族元素的工业富集,原勘探储量有镍品位 1.11% 的矿石量 2.49×10^6 吨。矿石硫化物主要呈浸染状(或称斑点状)、网脉状(或称为陨铁状),局部产出致密块状硫化物矿石。

2 样品分析及结果

2.1 样品

分析样品来自原采矿坑道,样品类型包括斜长橄榄辉岩、浸染状(斑点状)矿石、网脉状(陨铁状)矿石及其选纯硫化物。

斜长橄榄辉岩(简称橄辉岩):为暗黑色块状岩石,造岩矿物组成主要为橄榄石、辉石和斜长石,辉石以单斜辉石为主、含少量斜方辉石;橄榄石含量 40% 左右,含斜长石 20% 左右;辉石含量 30%~40%。

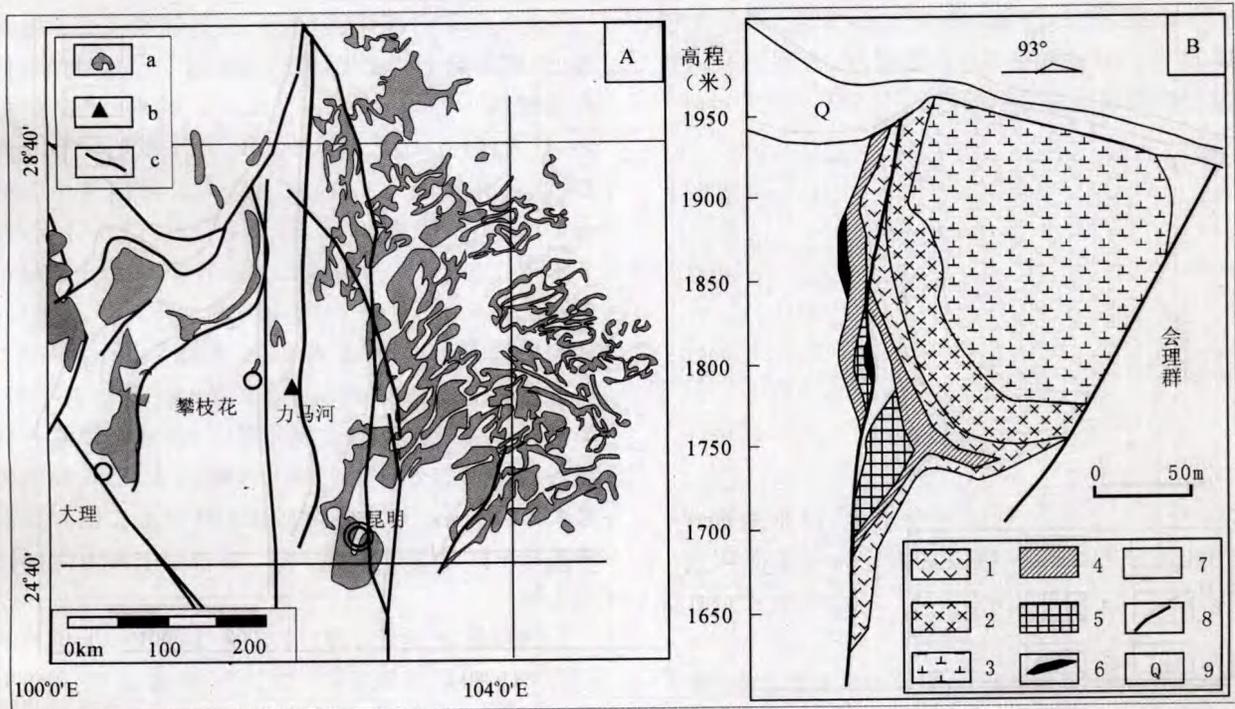


图 1 A. 力马河镍矿产出位置(底图据 Xu et al., 2004); B. 力马河镍矿代表性剖面(1# 线勘探线), 据桂林冶金地质研究所等(1974)

Fig. 1 A. Location of the Limahe nickel deposit(based on Xu et al., 2004); B. The cross section 1# of the Limahe nickel deposit(modified from Guilin Institute of Geology, 1974)

a—玄武岩;b—力马河镍矿产出位置;c—断裂;1—橄榄岩;2—辉长岩;3—闪长岩;4—浸染状矿石;5—网脉状矿石;
6—块状硫化物矿石;7—会理群;8—断裂;9—风化层

a—Basalt;b—location of the Limahe nickel deposit;c—fault;1—peridotite;2—gabbro;3—diorite;4—disseminated sulfide ore;
5—net sulfide ore;6—massive sulfide ore;7—Huili group;8—fault;9—Quaternary

岩石结构主要为包橄结构,橄榄石被单斜辉石包嵌,橄榄石、辉石部分蛇纹石化;斜长石呈晶间充填形态,成分上为基性的培长石($An=70$ 左右)。

浸染状矿石:硫化物以斑点状形式产出在辉橄岩中,硫化物斑点一般2~5mm,个别可达10mm,呈液滴状或球状。**网脉状矿石:**它形硫化物包围橄榄石,并常连接起来使橄榄石成孤岛状,矿石含硫化物60%左右。两类矿石中硫化物组成基本相同:黄铜矿10%左右、磁黄铁矿约70%、镍黄铁矿约20%。选纯硫化物:采用浮选工艺从网脉状矿石中分选出硫化物,纯度99%以上。

样品基本的成矿元素组成特征列于表1。在成矿元素组成上,斜长橄辉岩可以区分出铂族元素亏损和无亏损的两种,无铂族元素亏损的斜长橄辉岩Cu/Pd比值与地幔(Cu/Pd在7000左右)相当,是未经硫化物熔离的原始岩浆分异堆晶产物;另一种铂族元素亏损的橄辉岩Cu/Pd比值在100000左右,显著高于地幔比值,为硫化物熔离亏损后的岩浆分异堆晶产物。所有矿石及其硫化物均具有很高的Cu/Pd比值(表1、图2),在400000以上,高于地幔组成的Cu/Pd比值1~2个数量级,表现力马河镍矿硫化物铂族元素亏损的性质特点。

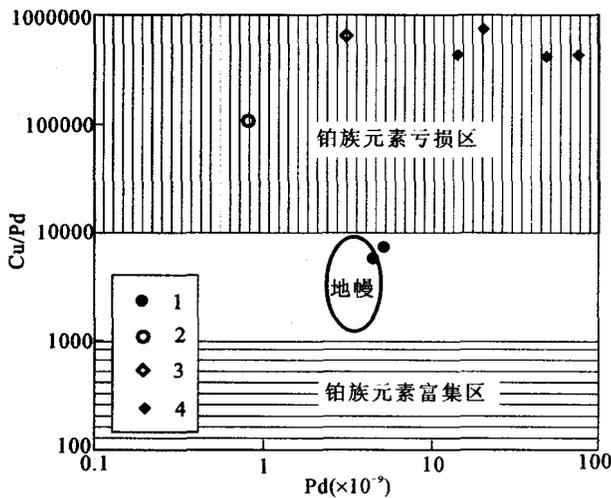


图2 力马河镍矿岩矿石Cu/Pd-Pd图,铂族元素富集与亏损区域划分据Barnes and Lightfoot(2005)

Fig. 2 Cu/Pd vs. Pd for samples from the Limahe nickel deposit(based on Barnes and Lightfoot., 2005)

- 1—橄辉岩(PGE无亏损); 2—橄辉岩(PGE亏损);
- 3—浸染状矿石; 4—网脉状矿石及其选纯硫化物
- 1—Olivine websterite (PGE undepleted); 2—olivine websterite (PGE depleted); 3—disseminated sulfide ore; 4—net sulfide ore and separated sulfides

2.2 Re-Os 同位素分析方法

样品分析在国家地质实验中心 Re-Os 同位素实验室完成,分析步骤如下:

(1) 分解样品: 准确称取待分析样品,通过长细颈漏斗加入到 Carius 管底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,调节温度到摄氏-50~-80℃。放装好样的 Carius 管到该保温杯中,通过长细颈漏斗把准确称取的¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底部,再加入 4 mL 10 mol/L HCl, 4mL 16 mol/L HNO₃。当管底溶液冰冻后,用丙烷氧气火焰加热封好 carius 管的细颈部分。放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 230℃,保温 12h。在底部冷冻的情况下,打开 Carius 管,并用 40 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

(2) 蒸馏分离铱: 于 105~110℃蒸馏 50 min,用 10 mL 水吸收蒸出的 OsO₄。用于 ICPMS(等离体质谱仪测定)测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液倒入 150 mL Teflon 烧杯中待分离铱。

(3) 萃取分离铱: 将第一次蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干。重复两次以降低酸度。加入 10 mL 5 mol/L NaOH,稍微加热,转为碱性介质。转入 50mL 聚丙烯离心管中,离心,取上清液转入 120 mL Teflon 分液漏斗中。加入 10 mL 丙酮,振荡 5min. 萃取 Re。静止分相,弃去水相。加 2 mL 5 mol/L NaOH 溶液到分液漏斗中,振荡 2 min,洗去丙酮相中的杂质。弃去水相,排丙酮到 150 mL 已加有 2mL 水的 Teflon 烧杯中。在电热板上 50℃加热以蒸发丙酮。加热溶液至干。加数滴浓硝酸和 30%过氧化氢,加热蒸干以除去残存的铱。用数毫升稀 HNO₃溶解残渣,稀释到硝酸浓度为 2%,备 ICPMS 测定 Re 同位素比值。如含铱溶液中盐量超过 1 mg/mL,需采用阳离子交换柱除去钠。

(4) 质谱测定: 采用美国 TJA 公司生产的 TJA PQ ExCell ICPMS 测定同位素比值。对于 Re: 选择质量数 185、187,用 190 监测 Os; 对于 Os: 选择质量数为 186、187、188、189、190、192; 用 185 监测 Re。

2.3 分析结果

分析结果列于表 1 中。普 Os 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度,通过¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 测量比计算得出。Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误

表 1 力马河镍矿 Re-Os 同位素分析结果及样品成矿元素组成特征
Table 1 Re-Os isotopic composition of the samples from the Limahe deposit

样品编号	矿石类型	样品名称	成矿元素组成特征 ^①					Re-Os 同位素分析结果 ^②						Re-Os 同位素特征参数 ^③		
			Ni ($\mu\text{g/g}$)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Pd (ng/g)	Cu/Pd	样重(g)	Os (ng/g)	Re (ng/g)	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ($t=260\text{Ma}$)	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ($t=260\text{Ma}$)	γ_{Os}	Re/Os	
LMU5	非矿化岩石 (PGE 无亏损)	橄辉岩	970	26	4.57	5696	0.5001	1.938(16)	1.049(27)	2.588(69)	0.1468(46)	0.1356	7.72	0.54		
LMU4	非矿化岩石 (PGE 无亏损)	橄辉岩	930	38	5.22	7280	0.5025	1.730(16)	0.8564(278)	2.367(80)	0.1423(34)	0.1320	4.91	0.50		
LMU4 *	非矿化岩石 (PGE 无亏损)	橄辉岩					0.5020	1.838(16)	0.896(24)	2.332(66)	0.1442(106)	0.1341	6.54	0.49		
LMU3	非矿化岩石 (PGE 亏损)	橄辉岩	580	88	0.83	106024	1.000	0.2614(29)	1.007(32)	18.43(61)	0.2436(171)	0.1636	30.0	3.85		
LMU3 *	非矿化岩石 (PGE 亏损)	橄辉岩					2.001	0.2634(22)	1.055(11)	19.16(26)	0.2583(97)	0.1755	39.4	4.01		
LMS4	浸染状矿石	浸染状矿石	4.51×10^3	2.06×10^3	3.16	651899	0.4020	2.392(19)	15.87(66)	31.73(34)	0.3601(45)	0.2224	76.7	6.63		
LMK3	网脉状矿石	网脉状矿石	29.1×10^3	15.6×10^3	20.7	753623	0.2000	5.160(40)	147.2(1.1)	136.3(1.4)	0.8732(228)	0.2817	123.9	28.5		
LMK6	网脉状矿石	网脉状矿石	20.0×10^3	6.1×10^3	14.1	432624	0.4011	12.47(11)	149.4(1.6)	57.28(81)	0.5154(58)	0.2667	112.0	12.0		
LMK7-s	网脉状矿石	选纯硫化物	23.8×10^3	21.1×10^3	49.3	427992	0.2040	5.475(44)	127.7(1.7)	112.1(1.7)	0.7407(79)	0.2538	101.7	23.3		
LMK9-s1	网脉状矿石	选纯硫化物					0.2000	15.63(18)	239.3(2.3)	73.61(1.10)	0.5785(182)	0.2590	105.8	15.3		
LMK9-s2	网脉状矿石	选纯硫化物	22.3×10^3	32.8×10^3	76.5	428758	0.2000	13.88(11)	205.7(2.3)	71.27(97)	0.5641(72)	0.2547	102.4	14.8		

注: * 平行样; ①部分数据据陶琰等(2007); ②括号内数字的误差为 1σ , 与最后一位数字对齐; ③ γ_{Os} 按 260 Ma 计算, 采用衰变常数 $\lambda^{187\text{Re}} = 1.666 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$ (据 Smohar, 1996), 现在球粒陨石储集库采用: $(^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})_{\text{CHUR now}} = 0.3972$, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{CHUR now}} = 0.12757$ (据 Walker, 1989); 其球粒陨石 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (260Ma) = 0.125846.

差、待分析样品同位素比值测量误差,置信水平95%。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的不确定度包括质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差,置信水平95%。

以峨眉山大火成岩省一般认可的岩浆活动时限260Ma($\pm 3\text{Ma}$)作为岩体同位素衰变计数年龄,计算得到各样品的初始同位素组成 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})}$ 及 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 如表1所示,各类样品 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 有显著差异,初始Os同位素组成存在不均一性。

网脉状矿石及其选纯硫化物:Re、Os及初始Os同位素组成含放射成因 ^{187}Os 丰度显著高于不含矿的橄辉岩,Re、Os含量分别为 $127 \times 10^{-9} \sim 239 \times 10^{-9}$ 、 $5.2 \times 10^{-9} \sim 15.6 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 0.2547 \sim 0.2817$, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 在102~124,Re、Os组成上类同于Voisay's bay及Duluth这类铂族元素亏损的岩浆硫化物矿床的硫化物(图3)、Re高Os低,与J-M reef、金宝山铂钯矿等富铂族元素矿床明显不同。

非含矿橄辉岩Re、Os及初始Os同位素组成含

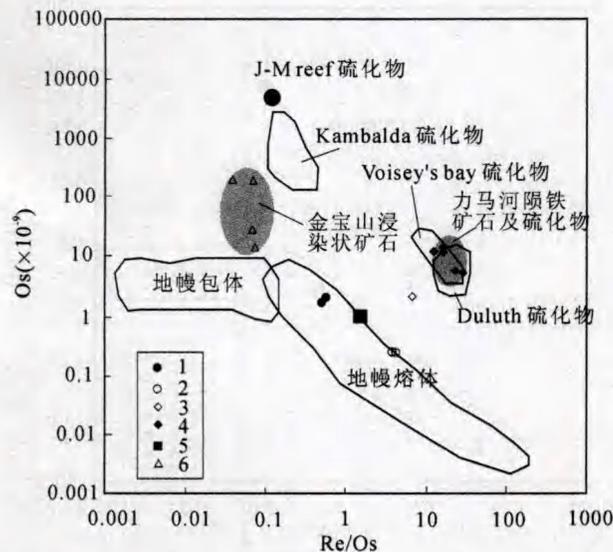


图3 力马河镍矿Re/Os-Os关系图. 底图据 Lambert et al(1998)

Fig. 3 Re/Os ratio vs. common Os diagram for the Limahe nickel deposit (based on Lambert, et al., 1998)

1—橄辉岩(PGE 无亏损);2—橄辉岩(PGE 亏损);3—浸染状矿石;4—网脉状矿石及其选纯硫化物;5—原始岩浆;6—金宝山浸染状矿石(据 Tao et al., 2007)

1—Olivine websterite (PGE undepleted); 2—olivine websterite (PGE depleted); 3—diseminated sulfide ore; 4—net sulfide ore and separated sulfides; 5—primary magma; 6—diseminated sulfide ore in Jinbaoshan deposit from Tao et al(2007)

放射成因 ^{187}Os 丰度明显低于网脉状矿石及其选纯硫化物。其中,无铂族元素亏损的橄辉岩:Os含量较高,Re含量在 0.9×10^{-9} 左右,Os含量在 1.8×10^{-9} 左右,Re/Os比值最低,约0.5;根据Cu/Pd比值特征,认为是未发生硫化物熔离分异的原始岩浆结晶分异的产物;在初始Os同位素组成特征上,含放射成因 ^{187}Os 丰度最低, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 0.1320 \sim 0.1356$, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma}) = 4.9 \sim 7.7$,与地幔组成相近,反映基本上未受到地壳混染影响。铂族元素亏损的橄辉岩:Os含量很低,Re含量在 1.0×10^{-9} 左右,Os含量在 0.26×10^{-9} 左右,Re/Os比值较高,在4左右;较高的Cu/Pd比值特征反映经历过硫化物熔离亏损;Os同位素组成初值表明受到过一定程度的地壳混染, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 0.17$ 左右, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma}) = 30 \sim 40$ 。

浸染状矿石Re、Os含量分别为 15.87×10^{-9} 、 2.392×10^{-9} , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 0.2224$, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma}) = 76.7$,介于网脉状矿石与非含矿橄辉岩之间,反映其Re、Os含量及Os同位素组成受矿石中硫化物含量制约。

3 讨论

3.1 “等时线年龄”

力马河镍矿岩矿石样品Re-Os同位素等时线效果如图4所示,出现两条斜率不同的等时线。非含矿岩石样品和含少量浸染状硫化物的矿化样品构成的“等时线”斜率较大,“等时线年龄”为427Ma,与锆石SHRIMP年龄 $263 \pm 3\text{Ma}$ 相差很远。按一般认为峨眉山大火成岩省岩浆活动260Ma($\pm 3\text{Ma}$)计算,各样品具有差异很大的初始同位素组成,其等时线只是一种表观等时线,其表观等时线年龄大于成矿实际年龄。网脉状矿石及其硫化物样品具有基本相近的初始同位素组成,采用isoplot3程序(Ludwig, 2003)计算、等时线年龄为 $265 \pm 35\text{Ma}$,与力马河岩体锆石SHRIMP年龄 $263 \pm 3\text{Ma}$ (Zhou et al., 2008)基本相当,反映了成岩成矿年龄。

镁铁-超镁铁岩及岩浆硫化物矿床成矿岩体是运用Re-Os同位素等时线法定年的适用对象,国内外研究已有一些获得良好定年效果的实例(如:Allegre et al., 1999; Morgan et al., 2002; Gangopadhyay & Walker, 2003; 李月臣等, 2006),但也存在一些定年效果不理想或出现多组年龄解的复杂情形,反映了矿床在成因或成矿机制、矿石矿物组成上的一些特性(Ripley et al., 1999; Cohen et

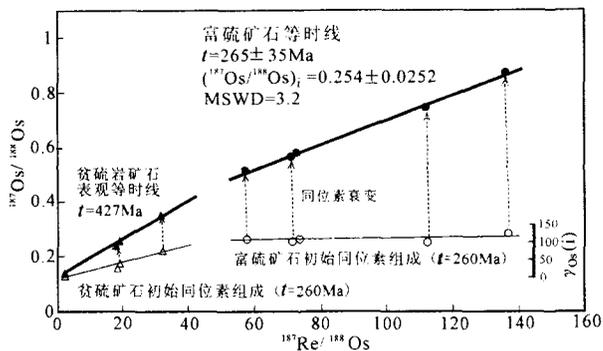


图 4 力马河镍矿 Re-Os 等时线及样品初始同位素组成的不均一性

Fig. 4 Re-Os isochrones and heterogeneity in the initial Os isotope composition for the Limahe deposit

al., 2000)。金川镍矿是出现多组年龄解的典型实例(闫海卿等, 2005; 杨刚等, 2005; 杨胜洪等, 2007), 杨胜洪等(2007)根据不同结构类型矿石可能同位素均一化程度上不同作出了一种解释, 认为块状硫化物矿石由于同位素组成能够高度均一化, 其等时线年龄可以反映成矿年龄, 浸染状矿石因均一化程度较低而构成大于实际成矿年龄的表观等时线。

根据对力马河镍矿 Re-Os 同位素组成特征的分析, 我们认为, 出现不一致等时线年龄的原因是岩矿石样品成因上的混合构成。力马河镍矿不同类型岩矿石初始 Os 同位素组成的不均一是明显的(图 4), 可以区分出具有高 $\gamma_{Os}(i)$ 值的富硫化物的矿石样品和较低 $\gamma_{Os}(i)$ 值的岩石样品, 岩矿石形成于具有不同初始 Os 同位素组成的硫化物熔体和硅酸盐熔体混合, 这种混合在成岩成矿机制上可以理解为侵位岩浆由混染程度较高的硫化物熔体和混染程度较低的新注入岩浆的混合。Horan et al(2001)曾根据 Stillwater 岩体橄榄岩相带 Os 同位素组成的变化提出两种岩浆混合成因的解释。根据力马河镍矿 Re-Os 同位素组成, 可以考虑为三元混合, 三元混合的 Os 同位素组成变化模式分析如图 5 所示, A 代表硫化物熔体的组成, B 代表混合到成岩成矿体系中的未受混染的原始岩浆, C 代表早期熔离亏损的岩浆, 由于硫化物熔体具有比硅酸盐岩浆高很多的 Os 含量, 混合物 Os 同位素组成受硫化物含量的强烈影响, 当硫化物含量超过 30% 后, 混合物(矿石)的 Os 同位素组成只在很小的范围内变化, 即硫化物含量超过 30% 的矿石的初始 Os 同位素组成基本接近, 其同位素等时线能够较好的反映成岩成矿年

龄。在硫化物含量较低的情况下, 混合物(岩矿石) $\gamma_{Os}(i)$ 值随硫化物含量不同、差异很大, 一般硫化物含量越多, $\gamma_{Os}(i)$ 越高, 因此, 在硫化物含量低于 30% 时, 不同硫化物含量的岩矿石样品间初始同位素组成上存在显著差异, 其同位素等时线仅仅只是一种表观等时线, 其中, 含硫化物较多的样品叠加了较高的初始 $\gamma_{Os}(i)$ 的分量, 等时线年龄一般大于真实年龄。

真实的成矿体系可能具有更复杂的单元构成, 但硫化物含量对混合物的决定性影响总是非常显著的, 一般, 含有较多熔离硫化物的矿石样品具有基本相近的初始 Os 同位素组成, 因而, 可以构成有成岩成矿年龄意义的等时线。

无矿橄辉岩及浸染状矿石样品间初始同位素组成差异较大, 不能构成有成岩成矿年龄意义的等时线, 但为什么或是否能构成有一定相关性的线性关系, 还有待于进一步探讨。初步分析认为, 如果岩矿石仅由两种不同初始同位素组成的相按不同比例混合(如硫化物熔体和单一的硅酸盐熔体), 则初始同位素组成 $^{187}Os/^{188}Os(i)$ 必然构成对 $^{187}Re/^{188}Os$ 的线

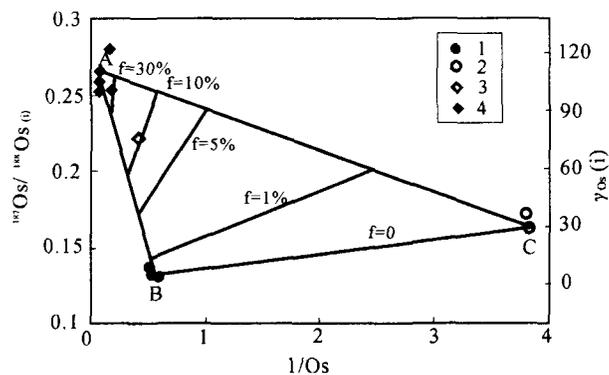


图 5 $^{187}Os/^{188}Os(i)-1/Os$: 力马河镍矿三元混合模型及其同位素组成

Fig. 5 $^{187}Os/^{188}Os(i)-1/Os$ plot: mixing of 3 components in isotopic composition for the Limahe deposit

A—熔离硫化物($Os = 15 \times 10^{-9}$, $^{187}Os/^{188}Os(i) = 0.266$); B—原始岩浆结晶分异形成的橄辉岩($Os = 1.8 \times 10^{-9}$, $^{187}Os/^{188}Os(i) = 0.132$); C—混染与熔离亏损岩浆结晶分异形成的橄辉岩($Os = 0.26 \times 10^{-9}$, $^{187}Os/^{188}Os(i) = 0.163$); 1—橄辉岩(PGE 无亏损); 2—橄辉岩(PGE 亏损); 3—浸染状矿石; 4—网脉状矿石及其选纯硫化物
A—Sulfide melt; B—barren peridotite accumulated from primary magma; C—barren peridotite accumulated from daughter magma after contamination and sulfide segregation; 1—olivine websterite (PGE undepleted); 2—olivine websterite (PGE depleted); 3—diseminated sulfide ore; 4—net sulfide ore and separated sulfides

性关系,并表现为比成矿年龄大的表观等时线,但如果成矿岩体由多个具有不同初始同位素组成的相混合,则不一定能够成具有线性相关的表观等时线,但就力马河现有样品的分析结果,所区分出的三个端元相初始同位素组成 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(i)}$ 构成对 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 的相互关系大致在一条直线上,因此,三相之间任意比例的混合也会在这一直线上并表现为线性相关的表观等时线。

根据上面的分析,可以得到一般性的经验认识:在局部矿化地段选取富含硫化物的矿石样品或从中分选不同种类硫化物进行组合,可使样品初始同位素组成的不均一性降低到最小程度,从而可以获得良好的具有成岩成矿年龄意义的等时线。

3.2 Re、Os 及同位素组成特征对岩浆成因的指示

无铂族元素亏损的橄辉岩被认为是未发生硫化物熔离分异的原始岩浆结晶分异的产物,以含有40%的橄榄石概算,把Os视为相容元素 $D_{Os}(Ol/melt)=3$ 、Re为不相容元素 $D_{Re}(Ol/melt)=0$,根据岩石Re、Os含量($Re \approx 0.9 \times 10^{-9}$ 、 $Os \approx 1.8 \times 10^{-9}$),估计原始岩浆Re、Os含量分别为 1.5×10^{-9} 、 1×10^{-9} ,其Os含量明显高于一般玄武岩(图6),并与峨眉山苦橄岩相当(钟宏等,2006),反映原始岩浆较高的部分熔融程度,原始岩浆性质上大致相当于苦橄质岩浆。

根据无铂族元素亏损的橄辉岩Os同位素组成 $\gamma_{Os}(260\text{Ma})=4.91\sim 7.72$,结合其Nd同位素的组成 $\epsilon_{Nd}(260\text{Ma})=0.665\text{‰}\sim -1.664\text{‰}$ (陶琰未刊资料),力马河岩体母岩浆耦合的同位素组成在地幔柱岩浆范围之内(图7)、并可与峨眉山玄武岩的Nd-Os同位素组成对比(图7),反映力马河岩体的地幔柱成因及与峨眉山玄武岩在成因上的一致性。

3.3 硫化物成因

峨眉山大火成岩省发育众多的岩浆铜镍铂族元素矿床及矿点,在成矿元素组成上可以区分出三种主要类型:以铂族元素成矿为主的富铂岩浆硫化物矿床,如宝山山铂钯矿(陶琰等,2004; Tao et al., 2007; Wang et al., 2005);含较高铂族元素的含铂岩浆硫化物矿床,如杨柳坪铜镍铂矿床(王登红等, 2000; Song et al., 2003);基本上没有铂族元素工业富集的贫铂岩浆硫化物矿床,代表性矿床有白马寨镍矿(Wang et al., 2006; 王生伟等, 2006, 2007)及本文研究的力马河镍矿。力马河镍矿作为贫铂岩浆硫化物矿床的代表性矿床之一,分析其铂族元素亏损的原因有助于系统认识峨眉山大火成岩省铜镍

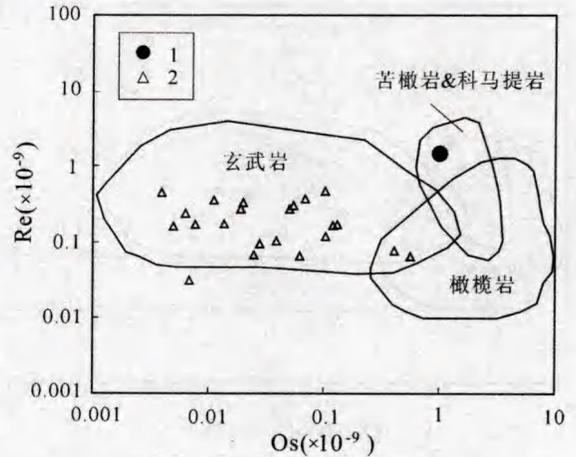


图6 力马河镍矿成矿岩体原始岩浆Re-Os组成,不同岩石类型分区据 Carlson (2005)

Fig. 6 Re vs. Os diagram for the primary magma of the Limahe intrusion, variety of terrestrial rock types based on Carlson (2005)

1—力马河岩体原始岩浆;2—峨眉山玄武岩(据 Xu et al., 2007)
1—Primary magma of the Limahe intrusion; 2—Emeishan flood basalts from Xu et al (2007)

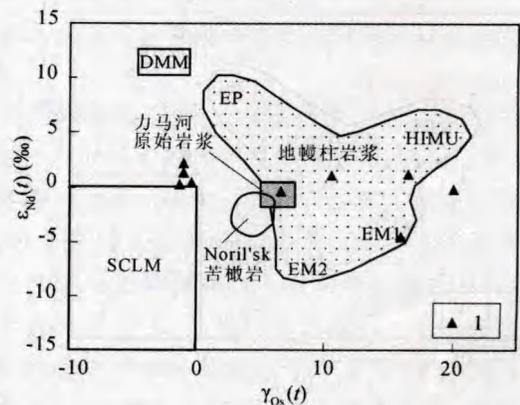


图7 力马河岩体原始岩浆 $\gamma_{Os}(t)-\epsilon_{Nd}(t)$ 组成,地幔端元类型及 Noril'sk 苦橄岩同位素组成据 Shirey & Walker(1998)

Fig. 7 $\gamma_{Os}(t)-\epsilon_{Nd}(t)$ diagram for the primary magma of Limahe intrusion (Based on Shirey & Walker, 1998)

1—峨眉山玄武岩(据 Xu et al., 2007)
1—Emeishan flood basalts (after Xu et al., 2007)

铂族元素的成矿作用。

力马河镍矿矿石及硫化物均具有很高的Cu/Pd比值(图2,表1),高于地幔比值1~2数量级,体现了铂族元素亏损的成因特点。铂族元素具有比铜镍对硫化物(熔体)更强的亲合性,在硫化物熔体与硅酸盐熔体间的分配系数比铜镍高1~2个数量级(Peach et al., 1990),因此,岩浆硫化物的富集作用

应该优先富集铂族元素,而不是造成熔离硫化物铂族元素的亏损。对这类铂族元素亏损的岩浆硫化物,成因上主要有两种可能的解释,一种解释是已经历硫化物熔离后的亏损岩浆的二次熔离(Theriault et al., 1997; Barnes et al., 2005),另一种可能的原因是原始岩浆本身就是低程度熔融或特殊条件下形成的铂族元素亏损的岩浆(Barnes et al., 2005)。

力马河镍矿具有原始岩浆成因性质的橄辉岩具有很高的 Os 含量,推算原始岩浆 Os 含量在 1×10^{-9} 左右,应为高程度熔融成因,不可能是低熔亏损成因。对力马河镍矿铂族元素地球化学研究的结果表明以二次熔离成矿可以得到较好的解释(陶琰等, 2007; Song et al., 2008)。下面的分析表明,力马河镍矿岩矿石的 Re、Os 组成提供了其硫化物为二次熔离成因的新证据。

Os 比 Re 有更强的亲硫性,熔离硫化物的 Re/Os 比值将比母源岩浆低,更低于熔离残余硅酸盐熔体(熔离残余硅酸盐熔体的 Re/Os 比值会比母源岩浆更高)。但力马河硫化物矿石具有很高的 Re/Os 比值,而且,力马河镍矿硫化物比不含矿的硅酸盐岩石的 Re/Os 比值更高,含较多硫化物的网脉状矿石比含少量硫化物的浸染状矿石 Re/Os 比值高,表现出含硫化物越多、Re/Os 比值越高。这种在 Re/Os 比值上硫化物高于硅酸盐岩石的现象反映两者不是直接的熔离关系,下面的模式分析认为:硫化物为二次熔离成因。

表 2 两阶段硫化物熔离模式拟合

Table 2 Re-Os concentration in 2 stages of sulfide segregation

	Re ($\times 10^{-9}$)	Os ($\times 10^{-9}$)	Re/Os
原始岩浆 ^①	1.5	1	1.5
熔离分配系数 D ^②	500	30000	
一次熔离硫化物(R ₁ =2000)	600	1876	0.32
一次熔离硫化物(R ₁ =20000)	732	12000	0.06
一次熔离后亏损岩浆(R ₁ =2000)	1.2	0.06	19.3
二次熔离硫化物(R ₁ =2000, R ₂ =200)	172	12	14.4
二次熔离硫化物(R ₁ =2000, R ₂ =300)	226	17.9	12.6
力马河硫化物(代表性组成)	200	15	13.3

注: ① 根据代表原始岩浆结晶分异成因的橄辉岩以含有 40% 的橄辉石概算,把 Os 视为相容元素: $D_{Os}(\text{oliv}/\text{melt}) = 3$ 、Re 为不相容元素: $D_{Re}(\text{oliv}/\text{melt}) = 0$, 估计原始浆组成。② 参考 Peach et al (1990); Hauri & Hart(1997); Leshner & Stone(1996); Lambert et al(1998)。数值上为无量纲值。

在 Re/Os 比值特征上,二次熔离的模式可描述为:早期硫化物熔离导致形成铂族元素亏损的残余岩浆,获得很高 Re/Os 比值,再次发生硫化物熔离,形

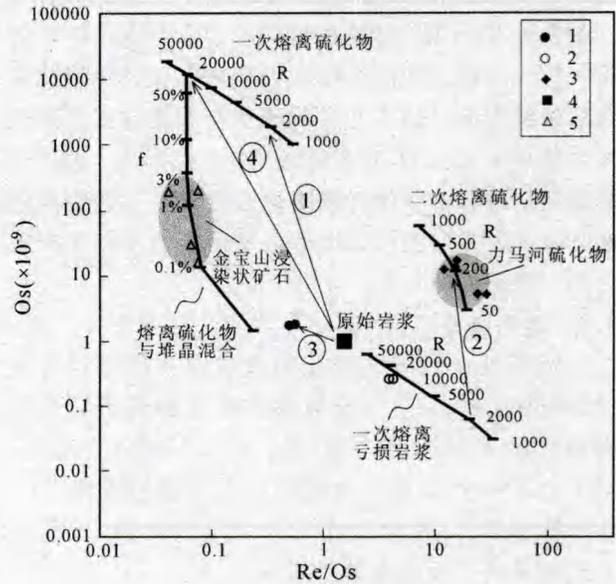


图 8 两阶段硫化物熔离模式拟合 Os-Re/Os

Fig. 8 Common Os vs. Re/Os ratio for 2 stages of sulfide segregation.

①—一次熔离(R=2000),拟合力马河原始岩浆早期熔离硫化物(丢失);②—二次熔离(R=200),拟合力马河硫化物;③—结晶分异(堆晶);④—一次熔离(R=20000),大致拟合金宝山硫化物;R—硫化物熔离参数(岩浆量/硫化物);f—硫化物含量;1—橄辉岩(PGE 无亏损);2—橄辉岩(PGE 亏损);3—网脉状矿石及其纯硫化物;4—原始岩浆;5—金宝山浸染状矿石(据 Tao et al., 2007)

①—1st sulfide segregation (R = 2000): formation of the lost sulfide for the Limahe deposit; ②—2nd sulfide segregation (R = 200): formation of the sulfide in the Limahe deposit; ③—crystal accumulation; ④—1st sulfide segregation (R = 20000): formation of the sulfide in the Jinbaoshan deposit; R—R-factor (magma/sulfide mass ratio); f—weight fraction of sulfides in the mixtures; 1—olivine websterite (PGE undepleted); 2—olivine websterite (PGE depleted); 3—net sulfide ore and separated sulfides; 4—primary magma; 5—disseminated sulfide ore of the Jinbaoshan Pt-Pd deposit from Tao et al(2007)

成有较高 Re/Os 比值的硫化物,如图 8 所示,模式计算参数及部分模式计算结果如表 2 所列,表中 R 为熔离参数(与单位熔离硫化物平衡的岩浆量)、下标 1、2 分别代表第一次熔离和第二次熔离。这一模式分析中没有考虑混染作用的效果,根据对混染作用的拟合分析(图 9)可以看出,在混染程度不是很高的情况下,混染对成矿系统在 Re/Os 比值及 Os 含量上的影响并不大。图 8 中同时给出了以铂族元素矿化为主的金宝山铂钯矿矿石组成进行对比,并假定他们在原始岩浆的组成上并没有很大差异。金宝山矿石的组成落在 R=20000 左右的第一次熔离硫化物与原始岩浆

结晶分异物的不同比例组合线上,矿石中硫化物含量一般低于3%,模式计算能很好的拟合金宝山矿石的实际构成。模式计算表明,力马河镍矿硫化物形成于母岩浆经历 $R=2000$ 左右的硫化物熔离亏损后的残余岩浆再由 $R=200$ 左右的硫化物熔离形成。模式分析的结果暗示在深部岩浆演化过程中有早期熔离硫化物的丢失并可能形成类似金宝山式的富铂矿床或含铂岩浆硫化物矿床。

3.4 地壳混染示踪

地壳混染是岩浆硫化物成矿的关键因素之一(Naldrett, 2004)。力马河镍矿硫化物具有较高的初始放射成因 ^{187}Os 丰度, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})=100\sim 120$,由于任何类型的地幔储集库含放射成因 ^{187}Os 丰度都很低,高放射成因 ^{187}Os 丰度的初始Os同位素组成反映了地壳混染的结果。

根据对原始岩浆组成的估计及岩矿石Re-Os同位素组成,混染作用的拟合分析如图9所示,拟合计算参数及部分拟合计算结果如表3所列。考虑到峨眉山大火成岩省典型一次熔离形成的金宝山铂钯矿初始Os组成 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})=20\sim 30$,力马河镍矿本身也存在初始Os组成 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 在30左右的熔离亏损岩浆,拟合分析与二次熔离相对应,也运用了两次混染作用,第一次混染形成 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 达到30左右,同时发生第一次硫化物熔离,其熔离亏损后的残余岩浆再次受混染, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 达到110左右。

对力马河镍矿成矿岩浆演化过程中的混染源还缺乏确切的限定,根据目前对慢源岩浆演化系统的研究(Klügel et al., 2005)及有关地壳的Re-Os

同位素组成资料(参考Saal et al., 1998, Ripley, et al., 1999; Sproule et al., 1999, 2002),拟合分析中,假定第一次混染作用发生在下地壳,其混染源的Re、Os、 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 分别为 0.2×10^{-9} 、 0.1×10^{-9} 、6500,第二次混染作用在上地壳中,其混染源的Re、Os、 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 分别为 0.4×10^{-9} 、 0.05×10^{-9} 、1250。

在拟合分析中考虑高放射成因 ^{187}Os 丰度的混染源(下地壳)混染的一个理由是:如果以较低放射成因 ^{187}Os 丰度的平均上地壳成分为混染源(Re、Os、 γ_{Os} 分别为0.4、0.05、1250),要造成有较高Os含量的原始岩浆混染成 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 达到30左右的岩浆,则混染程度需要高达30%,显然是不恰当的,因此,第一次混染的混染源应该是具有更高的放射成因 ^{187}Os 丰度。认为存在两次混染及二次熔离的另一个原因是,即使以 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 高达6500的混染源(Re、Os分别为0.2、0.1)对有较高Os含量的原始岩浆一次性混染成 $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 达到110左右的岩浆,则混染程度也需要达到25%左右(图9),这样高的地壳混染程度对整个成矿岩浆体系也显得不恰当。因此,以具有较高放射成因 ^{187}Os 丰度的混染源对原始岩浆混染后熔离并形成铂族元素亏损岩浆,再次受到混染和熔离形成力马河镍矿是比较合理的解释。

根据模式拟合分析认为,原始岩浆在深部地壳受含高放射成因 ^{187}Os 丰度的混染源混染, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 达到30左右,并发生硫化物熔离作用,其熔离亏损岩浆在演化过程中再次受到地壳混染, $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ 达到110左右,并发生二次硫化物熔

表3 力马河Re-Os同位素组成:两阶段地壳混染及硫化物熔离拟合

Table 3 Re-Os isotopic composition: model for 2 stages of crustal contamination and sulfide segregation

		Re($\times 10^{-9}$)	Os($\times 10^{-9}$)	$\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$	Re/Os
拟合参数	原始岩浆 ^①	1.5	1	5	1.5
	下地壳 ^②	0.2	0.1	6500	2
	上地壳 ^③	0.4	0.05	1250	8
	熔离分配系数 $D_{\text{硫化物/岩浆}}$ ^④	500	30000		
拟合效果	岩浆一次混染(下地壳, $f_{c1}=7\%$)	1.41	0.93	29	1.51
	一次熔离硫化物($R_1=20000, f_{c1}=7\%$)	687	11202	29	0.06
	金宝山硫化物(代表性组成)	250	6000	22	0.04
	一次熔离硫化物($R_1=2000, f_{c1}=7\%$)	564	1751	29	0.32
	一次熔离后亏损岩浆($R_1=2000, f_{c1}=7\%$)	1.13	0.058	29	19.3
	亏损岩浆二次混染(上地壳, $f_{c2}=7.6\%$)	1.07	0.057	110	18.7
	亏损岩浆二次熔离硫化物($R_1=2000, R_2=300, f_{c1}=7\%, f_{c2}=7.6\%$)	202	17	110	11.8
	亏损岩浆二次熔离硫化物($R_1=2000, R_2=200, f_{c1}=7\%, f_{c2}=7.6\%$)	154	11.5	110	13.5
	力马河硫化物(代表性组成)	200	15	110	13.3

注:①、②同表2;③参考Ripley, et al(1999); Saal et al(1998), Sproule et al(2002, 1999);④参考Esser and Turekian(1993), Saal et al(1998)。

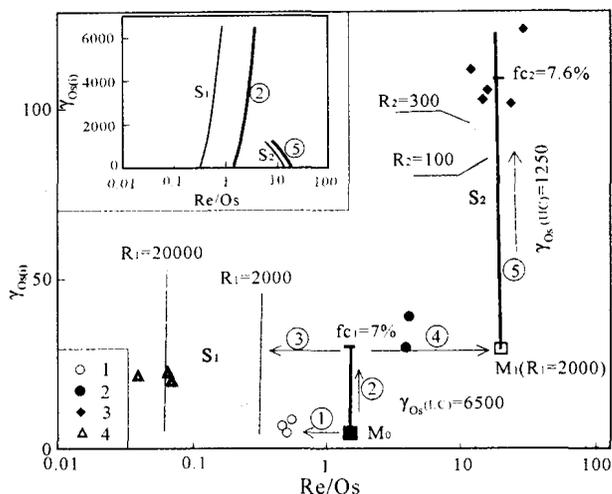


图 9 $\gamma_{Os}(t=260\text{Ma})$ -Re/Os: 力马河两阶段地壳混染及硫化物熔离

Fig. 9 $\gamma_{Os}(t=260\text{Ma})$ vs. Re/Os ratio for 2 stages of crustal contamination and sulfide segregation

①—结晶分异形成堆晶相;②—下地壳混染(第一次混染);③—硫化物熔离(第一次熔离);④—熔离亏损岩浆(第一次熔离);⑤—亏损岩浆上地壳混染(第二次混染); M_0 —原始岩浆; M_1 —熔离亏损岩浆(第一次熔离); S_1 —熔离硫化物(第一次熔离); S_2 —熔离硫化物(第二次熔离);LC—下地壳;UC—上地壳; fc_1 —下地壳混染比例; fc_2 —上地壳混染比例;1—橄辉岩(PGE 无亏损);2—橄辉岩(PGE 亏损);3—网脉状矿石及其选纯硫化物;4—金宝山浸染状矿石(据 Tao et al., 2007)

①—crystal accumulation; ②—1st contamination in lower crust; ③—sulfides segregation of the contaminated magma(1st sulfide segregation); ④—formation of depleted magma due to the 1st sulfide segregation; ⑤—2nd contamination in upper crust; M_0 —primary magma; M_1 —depleted magma; S_1 —1st segregated sulfide; S_2 —2nd segregated sulfide; LC—lower crust; UC—upper crust; fc_1 —fraction of lower crust contamination; fc_2 —fraction of upper crust contamination; 1—olivine websterite (PGE undepleted); 2—olivine websterite (PGE depleted); 3—net sulfide ore and separated sulfides; 4—disseminated sulfide ore of the Jinbaoshan deposit from Tao et al.(2007)

离,形成为力马河镍矿的硫化物,矿石硫化物 Re/Os 比值的部分变化可能与硫化物的结晶分异有关(Barnes and Lightfoot, 2005)。两次混染可能分别发生在上、下地壳,估计混染程度都大约在 7% 左右。

3.5 成矿机制讨论

力马河镍矿成矿岩体很小,却富集了超过 2 万吨的金属镍,据勘查资料,按岩体总重量分配,岩体单位金属镍达到 0.48 公斤/吨(桂林冶金地质研究所等,1974),成矿物质远远大于成矿岩体自身体积的任何原始岩浆所能供给的量,若以苦橄岩岩浆 $Ni=300 \times 10^{-6}$ 作为可能的原始岩浆,岩体所含的金

属镍是同岩体体积的原始岩浆可能提供金属镍的 16 倍以上。

这种现象在岩浆硫化物矿床中比较普遍,因此,硫化物富集成矿的机制受到广泛关注。汤中立等(1995)通过对金川等矿床的研究提出了“小岩体成大矿”的概念,并建立了“深部熔离-贯入”的成矿模式;近年来对金川镍矿的研究进一步表明在成矿岩浆演化中存在多级岩浆房过程——深部岩浆熔离形成含矿晶粥、在岩浆通道中积聚成矿(Li et al., 2004; De Waal et al., 2004)。

早年地质研究认为力马河镍矿以硫化物岩浆贯入方式成矿(姚家栋,1986)。Re-Os 及其同位素组成特征提供了对成矿机制研究更确切的地球化学依据,并有助于对成矿岩浆演化过程更深入的认识。力马河岩体初始 Os 同位素组成不均一,被认为是由不同初始同位素组成的硫化物熔体和硅酸盐岩浆不同比例混合造成的(混染程度较高的硫化物熔体与混染程度较低的岩浆混合);在 Re/Os 比值上硫化物矿石总是显著高于硅酸盐岩石,与直接熔离的情况刚好相反,说明存在二次熔离。因此,我们认为力马河镍矿是多级岩浆房演化的结果,第二次熔离的硫化物在深部岩浆房积聚,然后被后期混染程度较低的岩浆混合,携带到上一级岩浆房(或岩浆通道)中成岩、成矿。

4 结论

(1) 力马河镍矿岩石同位素组成不均一,其原因是由初始同位素组成不同的硫化物熔体和硅酸盐熔体不同比例混合造成的。

(2) 力马河镍矿 Re-Os 同位素组成的混合模型分析表明,硫化物含量超过 30% 的矿石及其硫化物 Os 同位素初始值差异较小,可以构成有成矿年龄意义的等时线,在实际效果上,力马河镍矿网脉状矿石等时线年龄 265 ± 35 Ma,与锆石 SHRIMP 年龄 263 ± 3 Ma 相当。无矿橄辉岩及浸染状矿石样品间初始同位素组成差异较大,其表观等时线年龄大于成矿年龄。

(3) 力马河镍矿为二次熔离成矿,模式分析认为,矿石硫化物由原始岩浆经历 $R=2000$ 左右的硫化物熔离后、其亏损岩浆再经 $R=200$ 左右的硫化物熔离形成,与二次熔离相对应,成矿岩浆也经历了两次混染作用,分别为上、下地壳 7% 左右的混染。

致谢:承蒙审稿人提出建设性修改意见,在此谨致谢意。

参 考 文 献

- 桂林冶金地质研究所, 四川冶金地质勘探公司 601 队, 四川冶金局 901 矿. 1974. 力马河硫化物铜镍矿床研究. 地质科学院地质矿产所编: 铜镍钴铂地质矿产专集(第二集). 北京: 地质出版社. 51~95.
- 韩春明, 肖文文, 赵国春, 屈文俊, 毛启贵, 杜安道. 2006. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究及其地质意义. 岩石学报, 22(1): 0163~70.
- 胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 等. 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例. 地学前缘, 12(1): 42~54.
- 李月臣, 赵国春, 屈文俊, 潘成泽, 毛启贵, 杜安道. 2006. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定. 岩石学报, 22(1): 0245~51.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义. 矿床地质, 21(4): 323~330.
- 屈文俊, 杜安道. 2005. 铜镍硫化物的 Re-Os 同位素定年方法及应用实例. 地球学报, 26(Supl): 140~142.
- 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 熊德信, 屈文俊, 杜安道. 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义. 岩石学报, 22(10): 2451~56.
- 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, 1~280.
- 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 罗泰义. 2007. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成矿分析. 岩石学报, 23(11): 2785~00.
- 陶琰, 罗泰义, 高振敏, 朱丹. 2004. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系-以云南金宝山超镁铁岩为例. 地质论评, 50(1): 9~15.
- 王登红, 楚莹石, 罗辅勋, 卢治安, 唐志铎. 2000. 四川杨柳坪 Cu-Ni-PGE 富矿体的成因及意义. 地球学报, 21(3): 260~265.
- 王虹, 屈文俊, 李华芹, 陈世平. 2007. 哈密地区新发现铜镍硫化物矿床成矿时代的测定及讨论. 地质学报, 81(4): 526~530.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 翟伟. 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学及其对矿床成因的制约. 地质学报, 80(9): 1474~1486.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 翟伟. 2007. 云南金宝山和白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学的差异及其成因意义. 地质学报, 81(1): 1~16.
- 闫海卿, 苏尚国, 焦建刚, 汤华. 2005. 金川 Cu-Ni(PGE)岩浆硫化物矿床成矿时代研究. 地学前缘, 12(2): 309~315.
- 杨刚, 杜安道, 卢纪仁, 屈文俊, 陈江峰. 2005. 金川 Ni-Cu-PGE 矿床块状硫化物矿石的 Re-Os(ICP-MS)定年. 中国科学(D辑), 35(3): 241~245.
- 杨胜洪, 陈江峰, 屈文俊, 杨刚, 杜安道. 2007. 金川铜镍硫化物矿床的 Re-Os“年龄”及其意义. 地球化学, 36(1): 27~36.
- 姚家栋. 1986. 西昌地区硫化铜(铂)镍矿床成因. 重庆: 重庆出版社, 143p.
- 张宗清, 杜安道, 唐索寒, 等. 2004. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征. 地质学报, 78(3): 359~365.
- 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 张招崇, 闫升好, 杨建民, 屈文俊, 王志良. 2005. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪. 岩石矿物学杂志, 24(4): 285~293.
- 钟宏, 朱维光, 漆亮, 周美夫, 宋谢炎, 张贻. 2006. 攀西地区峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征. 科学通报, 51(11): 1297~1304.
- Allegre C J, Birck, J L, Capmas F, Courtillot V. 1999. Age of the Deccan traps using ^{187}Re - ^{187}Os systematics. Earth Planet. Sci. Lett., 170: 197~204.
- Barnes S J, Lightfoot P C. 2005. Formation of magmatic nickelsulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents. Econ. Geol., 100: 179~213.
- Carlson R W. 2005. Application of the Pt-Re-Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology Lithos, 82(3-4): 249~272.
- Cohen A S, Burnham O M, Hawkesworth C J. 2000. Pre-emplacment Re-Os ages from ultramafic inclusions in the sublayer of the Sudbury Igneous Complex, Ontario. Chem. Geol., 165: 37~46.
- De Waal S A, Xu Z H, Li C, Mouri H. 2004. Emplacement of viscous mushes in the Jinchuan Ultramafic Intrusion, western China. Can Mineral, 42: 371~392.
- Esser B K, Turekian K K. 1993. The osmium isotopic composition of the continental crust. Geochim. Cosmochim. Acta., 57: 3093~3104.
- Fan W M, Wang Y J, Peng T P, Miao L C, Guo F. 2004. Ar-Ar and U-Pb geochronology of Late Paleozoic basalts in west Guangxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism. Chinese Science Bulletin, 49: 2318~2327.
- Gangopadhyay A, Walker R J. 2003. Re-Os systematics of the ca. 2.7-Ga komatiites from Alexo, Ontario, Canada. Chem. Geol. 196(1-4): 147~162.
- Hauri E K, Hart S R. 1997. Rhenium abundances and systematics in oceanic basalts. Chem. Geol. 139: 185~205.
- He B, Xu Y G, Huang X L, Luo Z Y, Shi Y R, Yang Q J, Yu S Y. 2007. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section. Earth Planet. Sci. Lett., 255: 306~323.
- Horan M F, Morgan J W, Walker R J, Cooper R W. 2001. Re-Os isotopic constraints on magma mixing in the Peridotite Zone of the Stillwater Complex, Montana, USA. Contrib. Mineral. Petrol., 141: 446~57.
- Hou Z Q, Chen W, Lu J R. 2006. Eruption of the Continental Flood Basalts at -259 Ma in the Emeishan Large Igneous Province, SW China: Evidence from Laser Microprobe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating. Acta Geologica Sinica, 80(4): 514~521.
- Klügel A, Hansteen T H, Galipp K. 2005. Magma storage and underplating beneath Cumbre Vieja volcano, La Palma (Canary Islands). Earth Planet. Sci. Lett., 236: 211~226.
- Lambert D D, Frick L R, Foster J G, Ripley E M, Zientek M L. 1998. Geodynamics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits: New insights from the Re-Os isotope system. Econ. Geol., 93:

- 121~136.
- Leshner C M, Stone W E. 1996. Exploration geochemistry of komatiites. In: Wyman D A. Ed. , Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulfide exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes, vol. 12: 153~204.
- Li C, Xu Z, Xu Z H, Waal S A, Ripley E M, Maire W D. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 39: 159~172.
- Li Y, Zhang Z C, Ai Y, Zhao L. 2007. Geochemical characteristics of Limahe intrusion in Pan-Xi district (SW China): relation to Emeishan basalts and constrain on ore genesis. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, Goldschmidt Conference Abstracts: A576.
- Ludwig K R. 2003. User 's Manual for isoplot 3. 00-A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 4.
- Morgan J W, Walker R J, Horan M F, Beary E S, Naldrett A J. 2002. ^{190}Pt - ^{186}Os and ^{187}Re - ^{187}Os systematics of the Sudbury Igneous Complex, Ontario. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 66(2):273~290.
- Naldrett A J. 2004. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. Springer, 727p.
- Peach C L, Mathez E A, Keays R R. 1990. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements deduced from MORB; implications for partial melting. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 54, 3379~3389.
- Ripley E M, Lambert D D, Frick L R. 1999. Re-Os, Sm-Nd, and Pb isotopic constraints on mantle and crustal contributions to magmatic sulfide mineralization in the Duluth Complex. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 62: 3349~3365.
- Ripley E M, Park Y R, Lambert D D, Frick L R. 2001. Re-Os isotopic variations in carbonaceous pelites hosting the Duluth Complex: Implications for metamorphic and metasomatic processes associated with mafic magma chambers. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 65(17):2965~2978.
- Saal A E, Rudnick R L, Ravizza G E, Hart S R. 1998. Re-Os isotope evidence for the composition, formation and age of the lower continental crust. *Nature*, 393(7): 58~61.
- Shirey S B, Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 26: 423~500.
- Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. *Science*, 271: 1099~1102.
- Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, Sun M, Wang Y L. 2003. Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China. *Mineralium Deposita*, 38: 831~843.
- Song X Y, Zhou M F, Tao Y, Xiao J F. 2008. Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology*, 253(1-2):38~49.
- Sproule R A, Lambert D D, Hoatson D M. 1999. Re-Os isotopic constrains on the genesis of the Sally Malay Ni-Cu-Co deposit, East Kimberley, Western Australia. *Lithos*, 47:89~106.
- Sproule R A, Lambert D D, Hoatson D M. 2002. Decoupling of the Sm-Nd and Re-Os Isotopic systems in sulphide-saturated magmas in the Halls Creek Orogen, Western Australia. *J. Petrology*, 43(2): 375~402.
- Tao Y, Li C, Hu R Z, Ripley E M, Du A D, Zhong H. 2007. Petrogenesis of the Pt-Pd mineralized Jinbaoshan ultramafic intrusion in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Contrib. Miner. Petrol.*, 153: 321~337.
- Theriault R D, Barnes S J, Severson M J. 1997. The influence of contry-rock assimilation and silicate to sulfide ratios(R factor) on the genesis of the Dunka Road Cu-Ni-Platinum-group element deposit, Duluth Complex, Minnesota. *Canadian Journal Earth Sciences*, 34: 375~388.
- Walker R J, Morgan J W. 1989. Rhenium-osmium systematics of carbonaceous chondrites. *Science*, 243: 19~522.
- Wang C Y, Zhou M F, Keays R R. 2006. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai maficultramafic intrusion, SW China. *Contrib. Miner. Petrol.*, 152:309~321.
- Wang C Y, Zhou M F, Zhao D. 2005. Mineral chemistry of chromite from the Permian Jinbaoshan Pt-Pd-sulphide-bearing ultramafic intrusion in SW China, with petrogenetic implications. *Lithos*, 83: 47~66.
- Xu J F, Suzuki K, Xu Y G, Mei H J, Li J. 2007. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts; Insights into the source of a large igneous province. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 71:2104~2119.
- Xu Y G, He B, Chung S L, Menzies M A, Frey F A. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. *Geology*, 32: 917~920.
- Zhong H, Zhu W G. 2006. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China. *Mineralium Deposita*, 41: 599~606.
- Zhong H, Zhu W G, Chu Z Y, He D F, Song X Y. 2007. Shrimp U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chem. Geol.*, 236: 112~133.
- Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, Wang C Y, Kennedy A K. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 103(3-4): 352~368.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, Robinson P T, Sun M, Kennedy A K, Leshner C M, Keays R R. 2002a. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupean mass extinction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 196: 113~122.
- Zhou M F, Yang Z X, Song X Y, Leshner C M, Keays R R. 2002b. Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China. In the

geology, geochemistry, mineralogy, mineral beneficiation of the platinum-group elements. Edited by Cabri L. J. Canadian

Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special Volume 54: 619~636.

Re-Os Isotope Study of Sulfide and Olivine Pyroxenite in the Limahe Nickle Deposit, Sichuan Province

TAO Yan¹⁾, HU Ruizhong¹⁾, QU Wenjun²⁾, DU Andao²⁾

1) *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002;* 2) *Chinese Academy of Geological Sciences, National Research Center for Geo Analysis, Beijing, 100037*

Abstract

The Limahe nickel deposit is one of the important PGE-poor Ni-Cu deposit in the Emeishan Large Igneous Province. This paper mainly analyzes Re-Os isotopic composition of various ore and rocks from the Limahe nickel deposit, discusses source magma, genesis of sulphide, ore-forming mechanism and Re-Os isochron. The results show that different rock and rock types of the Limahe deposit are of different initial Os isotopic compositions. The differences of initial Os isotopic composition between sulfide-rich veinlet ores and their ssextracted sulfide are small and their isochron of 265 ± 35 Ma is agreement to the zircon SHRIMP age of 263 ± 3 Ma from the rock. Initial radiogenic Os concentrations between sulfide-poor ore and rock are distinctly different, and its isochron age is larger than metallogenic age. The analysis shows that heterogeneity of initial Os isotopic composition in the ore samples is attributed to the mixture of sulfide melt containing high radiogenic ^{187}Os and silicate melt containing low radiogenic ^{187}Os at a different proportion. Mixed modeling suggests that the ore samples containing more than 30 % of sulfide have similar initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios, whilst the samples containing less than 30 % of sulfide have big difference in the initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ depending on the contents of sulfide, providing a possible explanation for several sets of Re-Os isochron ages of the magmatic sulfide deposits. Radigenetic ore-forming rock samples with least abundance of ^{187}Os has a $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ value of 5 and Cu/Pd ratio of 7000, indicating that they were the products of original magmatic crystallization without any crustal contamination and sulfide exsolution. It was estimated that the Os content in primary magma is about 1×10^{-9} , suggesting a picritic magma in origin. Re/Os ratio of sulfide in the ores is higher than those of any ore-hosted peridotite, with $\gamma_{\text{Os}}(t=260\text{Ma})$ up to 110. Comprehensive study reveals that the Limahe deposit originated from a daughter magma which exsolved from deep magma. Model analysis indicates that sulfide in the deposit originated from two exsolution of primary magma, correspondingly, ore-forming magma had also experienced two contaminations in the lower and upper crusts in proportion of about 7%.

Key words: Re-Os isotope; isochron; magmatic sulfide deposit; Emeishan Large Igneous Province; Limahe nickel deposit