

四川省会理县青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床成因机制的 Re-Os 同位素证据*

朱飞霖^{1,2} 陶琰^{1**} 胡瑞忠¹ 于宋月¹ 屈文俊³ 杜安道³

ZHU FeiLin^{1,2}, TAO Yan^{1**}, HU RuiZhong¹, YU SongYue¹, QU WenJun³ and DU AnDao³

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

3. 中国地质科学院, 国家地质实验测试中心, 北京 100037

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

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

3. National Research Center of Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2011-05-16 收稿, 2011-07-06 改回.

Zhu FL, Tao Y, Hu RZ, Yu SY, Qu WJ and Du AD. 2011. Re-Os isotopic constraints on the ore-forming mechanism for the Qingkuangshan Ni-Cu-PGE deposit in the Huili County, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9):2655–2664

Abstract The Qingkuangshan Ni-Cu-PGE deposit, located in the Xiaoguanhe area of Huili County, Sichuan Province, is one of the typical Ni-Cu-PGE deposits in the Emeishan Large Igneous Province (ELIP). In this paper, the Re and Os concentrations and Os isotopic compositions of the sulfide ores and associated ultramafic rocks in the Qingkuangshan deposit are studied in detail. The analyses indicate that the sulfide ores and associated ultramafic rocks can be divided into three types on the base of their Os compositions. Olivine websterites have low γ_{Os} values from 15.3 to 40.3. Massive sulfide ores and disseminated sulfide ores have similar γ_{Os} values that range up to about 260. Net-structured sulfide ores have the highest γ_{Os} values up to about 1000. The study shows that the Qingkuangshan Ni-Cu-PGE deposit is formed by multi-stage magma evolution, and that the primary magma was picritic. By model analyzing, the ore-forming mechanism can be concluded as follows: (1) primary magma has undergone lower crustal contamination in a deep magma chamber in the lower crust, and that the segregation of a small quantity of sulfide led to the formation of moderately PGE depleted magma; (2) sulfides in the net-structured sulfide ores originated from a second stage of contamination and sulfide segregation at an $R \approx 1000$ in the lower crust from the moderately PGE depleted magma; (3) the moderately PGE depleted magma underwent the further contamination (on average about 6.7%) and further sulfide segregation ($R \approx 5000$) in the upper crust. The massive sulfide ores represent a higher degree of concentration, while the disseminated sulfide ores represent a lower degree of concentration. The marked observed variations in Os isotopic compositions indicate that the Qingkuangshan Ni-Cu-PGE deposit was formed in a magma conduit system, and that multiple pulses of magma with variable crustal contamination and sulfide segregation were involved in the development of the ore-bearing intrusion.

Key words Ni-Cu-PGE deposits; Qingkuangshan; Re-Os isotope; Emeishan Large Igneous Province

摘要 青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床位于四川会理县小关河地区, 是峨眉山大火成岩省中典型含铂岩浆硫化物矿床之一。本文对该矿床开展了 Re-Os 同位素组成的分析研究。分析结果表明, 不同类型岩石的初始 Os 同位素组成具有明显的不均一性, 主要区分出三种不同 Os 同位素组成的岩矿石类型: 不含硫化物的橄辉岩具低 γ_{Os} , 变化范围从 15.3 到 40.3; 致密块状和浸染状硫化物矿石相近, γ_{Os} 值在 260 左右; 海绵陨铁状矿石具有最高的放射性 Os 同位素组成, γ_{Os} 值在 1000 左右。分析认为, 青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床是多级岩浆房演化的结果, 原始岩浆具有苦橄质岩浆的性质, 成矿岩体中不含硫化物的橄辉岩具有低的

* 本文受国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421005)、国家自然科学基金项目(40973039、40730420)和中科院重要方向项目(KZCX2-YW-Q04-06)联合资助。

第一作者简介: 朱飞霖, 男, 1981 年生, 博士研究生, 地球化学专业, E-mail: zhufeilin2000@163.com

** 通讯作者: 陶琰, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 岩石学和矿床地球化学专业, E-mail: taoyan@vip.gyig.ac.cn

放射性 Os 同位素组成,其母岩浆不是矿石硫化物的直接母体;致密块状和浸染状硫化物矿石与海绵陨铁状矿石也具有不同的放射性 Os 同位素组成,是成矿岩浆演化过程中不同期次岩浆硫化物熔离形成的。模式分析认为:(1)原始岩浆在深部岩浆房受到下地壳混染(约 1.8%),造成少量 Cu、Ni 及 PGE 元素进入熔离硫化物形成 PGE 适度亏损的成矿母岩浆;(2)海绵陨铁状矿石硫化物是 PGE 适度亏损的成矿母岩浆受下地壳二次混染形成的具有很高放射性 Os 同位素组成的岩浆($\gamma\text{Os}_{(t=260\text{Ma})}$ 高达 1000)经二次硫化物熔离($R \approx 1000$)所形成;(3)PGE 适度亏损的成矿母岩浆受上地壳二次混染(约 6.7%),形成具有较高放射性 Os 同位素组成的岩浆($\gamma\text{Os}_{(t=260\text{Ma})}$ 在 260 左右)并发生二次硫化物熔离($R \approx 5000$),部分熔离硫化物积聚成矿浆形成块状硫化物矿石,未得到充分积聚的熔离硫化物形成浸染状硫化物矿石。Os 同位素组成的不均一性表明青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床为岩浆通道系统成矿,是多级岩浆房演化过程中不同期次含矿岩浆在岩浆通道系统中复合的结果。

关键词 Ni-Cu-PGE 矿床;青矿山;Re-Os 同位素;峨眉山大火成岩省

中图法分类号 P597

青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床是一个富硫化物的含铂岩浆硫化物矿床,产出在会理县小关河地区,该地区是峨眉山大火成岩省岩浆硫化物矿床矿化岩体出露最集中的地区之一。这里密集分布着 20 余个岩浆硫化物矿化岩体,主要有力马河、青矿山、杨合伍、核桃树等(图 1),其中青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床代表了峨眉山大火成岩省岩浆硫化物矿床中富硫化物并含铂族元素的一种典型类型。

近年来的研究表明,与大火成岩省有关的岩浆铜镍铂族元素矿床成矿岩体一般被认为是同期有关的玄武岩岩浆演化分异的产物(Naldrett, 1999;Maier *et al.*, 2002;陶琰等, 2007),但成矿机制仍然在探讨中。Re-Os 同位素是岩浆硫化物矿床成矿过程示踪和成矿机制研究的重要手段(Foster *et al.*, 1996;Lambert *et al.*, 2000),并且近年来国内外有关研究取得了积极的成果(杜安道等,1994;Lambert *et al.*, 1998, 2000;蒋少涌等,2000;Ripley *et al.*, 1998, 2001;毛景文和杜安道,2001;毛景文等,2002;王瑞廷等,2003;屈文俊和杜安道,2005;张作衡等,2005;韩春明等,2006;李月臣等,2006;石贵勇等,2006;胡克兵等,2008;陶琰等,2008)。早期的研究认为,作为峨眉山大火成岩省中岩浆硫化物矿床的典型代表,青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床的成矿机制为岩浆深源熔离-矿浆贯入方式成矿(四川省地质局,1960^①;姚家栋,1986);近年来有学者通过对该矿床的铂族元素成矿作用分析认为,该矿床是由经历过早期 PGE 弱亏损的玄武岩岩浆发生大量硫化物熔离形成(Song *et al.*, 2008;宋谢炎等,2009)。本文拟通过对青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床不同岩矿石类型的 Re-Os 同位素组成特征进行分析,进一步探讨其成岩成矿机制。

1 地质概况

青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床位于康滇地轴中段会理县小关河地区,距会理县城约 75km,处于峨眉山大火成岩省岩浆活动内带,其成矿岩体为一小型的镁铁-超镁铁岩侵入体,岩体产出受河口复式背斜与安宁河-易门深断裂次一级南北向断裂的交接部位控制。

矿区断裂构造主要为南北向(F_1)、北东向(F_2)及北西向(F_3)的断层;前者属海西期构造系统,为成矿前构造,是控

制青矿山岩体及矿体产出的主要构造;后两者生成较晚。其中南北向断层(F_1)受北东向断层(F_2)的切割影响,断裂的产状略有变化,在 1750m 中段以上,其走向为 $\text{NW}10^\circ \sim 20^\circ$,倾向 SW,倾角 $70^\circ \sim 88^\circ$,而在 1650m 中段上,走向近于 SN($\text{NW}2^\circ \sim 3^\circ$),倾向 SW,倾角 $64^\circ \sim 71^\circ$;而北西向断层(F_3)又错移了北东向断层(F_2)(图 2)。

矿区露出之地层主要是中元古宙河口群,地层产状一般为 $\text{NW}10^\circ \sim 40^\circ$,倾角为 $50^\circ \sim 80^\circ$,以云母片岩为主,夹透镜状白云大理岩及碳质板岩,自下而上可分为 4 层,分别为石榴子石云母片岩、云母片岩夹石英角岩、云母片岩夹白云质大理岩-硅质板岩-石英岩、黑色碳质千枚岩。新生界陆相红色岩层仅零星分布于断陷盆地和河流两岸低洼槽谷地带,一般不整合地沉积于河口群变质岩系及以海西期、晋宁期为主的各类火成岩之上。

含矿岩体沿南北向断层侵入于河口层中,为大致呈南北向的透镜体,长约 200m,宽 20~50m,大致向西倾斜,倾角近乎直立。剖面上呈漏斗状,渐下逐渐尖灭。含矿岩体的分异现象比较显著,尤以断层上盘岩体表现明显,由岩体的内部向外部,分别产出橄榄岩、橄榄辉石岩(辉石橄榄岩)及辉长岩。其中岩体内部的橄榄岩相为含矿岩体的主体,约占含矿岩体的一半左右。

青矿山矿区矿体主要产出在超镁铁岩相中(包括橄榄岩、辉橄岩及橄辉岩),矿体走向与超镁铁岩一致,约呈南北向的透镜体,在地表两端分别尖灭于 II、III 剖面两侧,长约 150~200m,倾斜向西,倾角为 $60^\circ \sim 88^\circ$,垂向延伸约 150~180m。平面上呈蝌蚪状,北宽南窄,剖面上呈现为漏斗状,并且沿倾斜逐渐尖灭。矿体在深部为北东向断层(F_2)切割,形成上下盘不同矿化程度的两部分,即上富下贫;断层下盘矿体除见少许表内矿体外,大部分为表外矿体,断层上盘矿体呈漏斗状,各部位的产状不尽相同,矿体西侧倾斜甚陡,倾角约 88° ,而东侧则变缓为 50° (图 2)。青矿山矿体以斑点状、浸染状及网脉状(海绵陨铁状)矿石为主,其次为致密块状硫化物矿石(图 3)。海绵陨铁状矿石一般赋存在岩体底部的

① 四川省地质局基础性超基性岩科研队(401 队). 1960. 四川会理青矿山野外工作报告. 4-41

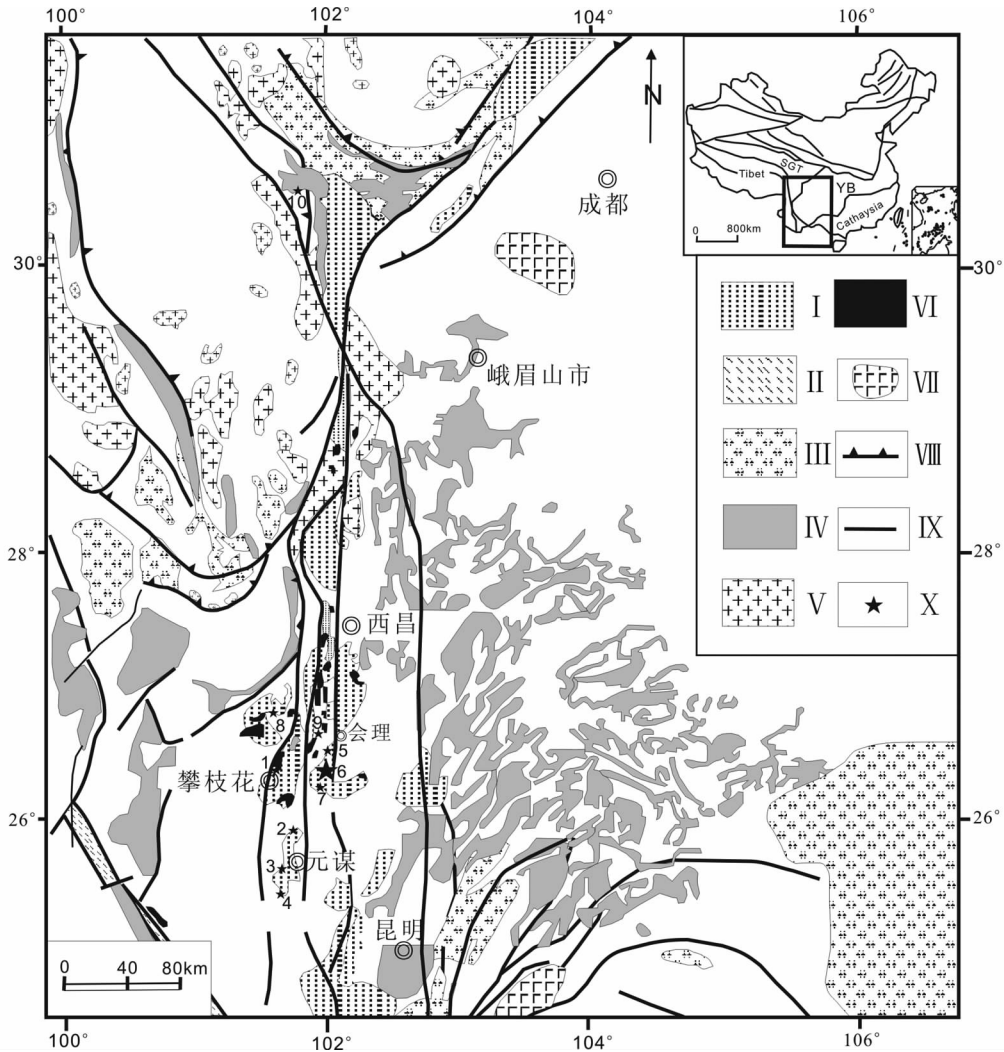


图1 峨眉山大火成岩省及典型岩浆矿床分布图(据 Wang *et al.*, 2005)

I-前寒武纪基底; II-哀牢山变形岩; III-震旦纪及古生代岩体; IV-二叠纪峨眉山溢流玄武岩; V-花岗岩; VI-镁铁质-超镁铁质侵入体; VII-在钻孔中发现的峨眉山玄武岩; VIII-逆掩断层; IX-断层; X-典型矿床. 1-攀枝花 V-Ti 磁铁矿; 2-朱布; 3-猛林沟; 4-安益; 5-力马河; 6-青矿山; 7-核桃树; 8-大槽; 9-红格; 10-杨柳坪

Fig. 1 Regional geological map showing the distributions of the Emeishan Large Igneous Province and associated typical magmatic deposits (modified after Wang *et al.*, 2005)

I-Precambrian Basement; II-Ailaoshan deformed rock; III-Sinian and Palaeozoic rocks; IV-Permian Emeishan flood basalts; V-granite; VI-mafic-ultramafic intrusion; VII-Emeishan basalts found in drill holes; VIII-overthrust fault; IX-fault; X-typical deposit. 1-Panzhihua; 2-Zhubu; 3-Monglingou; 4-Anyi; 5-Limahe; 6-Qingkuangshan; 7-Hetaoshu; 8-Dacao; 9-Hongge; 10-Yangliuping

橄榄岩中,并且随着岩体四周辉石量的增加,矿石的硫化物逐渐减少而逐步变贫,浸染状矿石一般与海绵陨铁状矿石相伴而生,分布在海绵陨铁状矿石的附近;致密块状矿体一般受断裂和节理的控制比较明显,呈囊状分布,在裂隙中亦能见不规则分布的致密块状矿石,同时在部分海绵陨铁状矿石的中心核部也能见到较小的致密块状矿石(四川省地质局, 1960;姚家栋,1986)。

2 样品分析及测试

本次分析的样品采自采矿坑道,包括橄辉岩、浸染状矿

石、海绵陨铁状矿石及致密块状矿石。样品分析测试在国家地质实验测试中心完成,采用 Carius 管封闭溶样分解样品(Shirey and Walker, 1995;屈文俊等,2009)。

2.1 样品化学处理流程及测试

2.1.1 分解样品

准确称取待分析样品(硫化物矿石 0.2~0.5g,岩石样品 2g),通过细颈漏斗加入到 Carius 管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶,一般规格容积约 30mL)底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,使成黏稠状(-50~-80℃)。放装好样品的 Carius 管到该保温杯中。用 3mL 10mol·L⁻¹ HCl 通过细颈漏

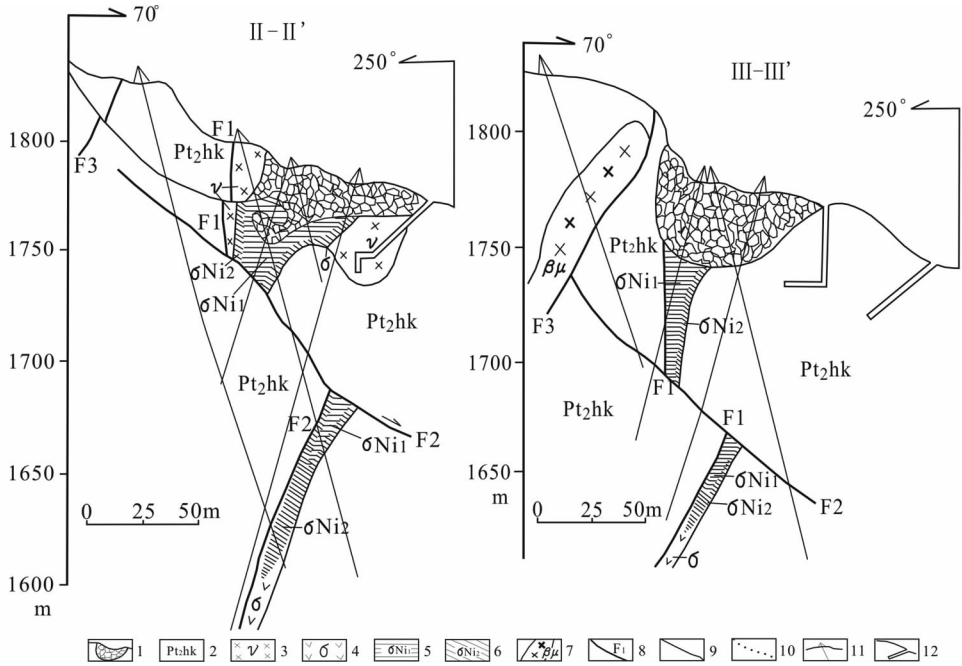


图2 青矿山 Ni-Cu-PGE 岩浆硫化物矿床地质剖面图(据姚家栋,1986)

1-采空区;2-河口群变质岩系;3-辉长岩;4-橄辉岩;5-橄辉岩中表内矿体;6-橄辉岩中表外矿体;7-辉绿岩;8-断层及其编号;9-地质界限;10-过渡地质界限;11-钻孔;12-坑道

Fig.2 The cross-section of the Qingkuangshan Ni-Cu-PGE deposit (modified after Yao, 1986)

1-Goaf;2-metamorphic rock series of the Hekou Group;3-gabbro;4-peridotite;5-economical mineral resource of peridotite ;6-uneconomical mineral resource of peridotite;7-diabase;8-fault and its number;9-geological boundary;10-transitional geological boundary;11-drill hole;12-tunnel

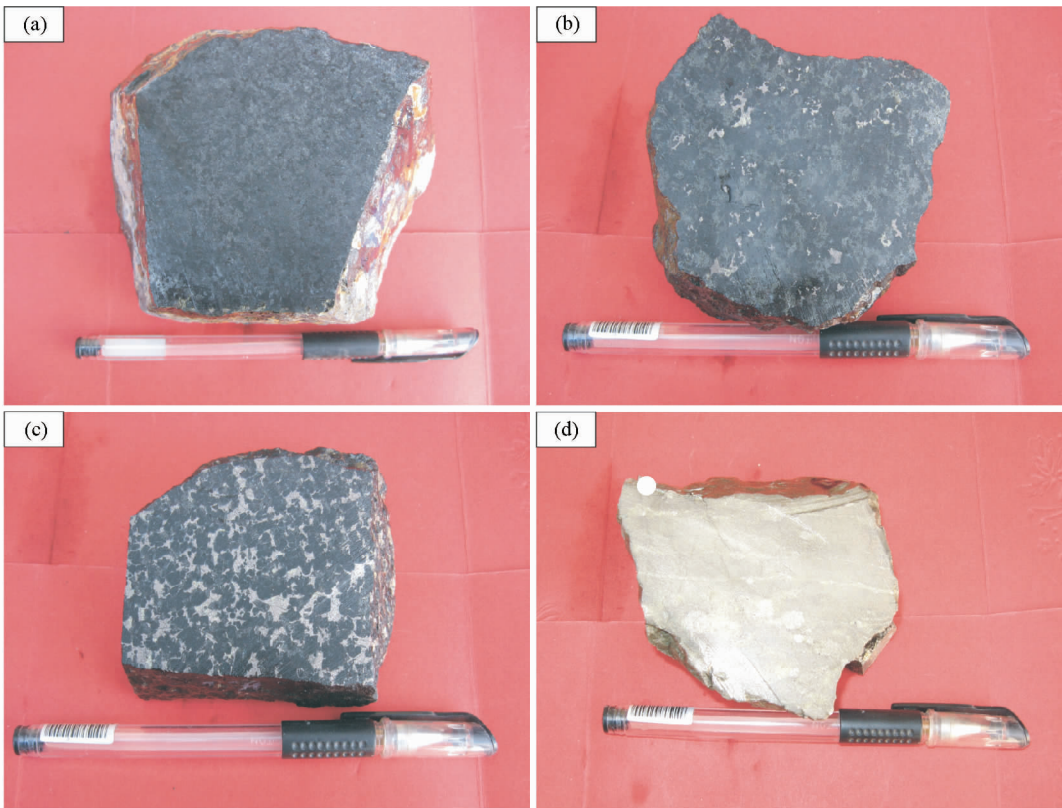


图3 青矿山 Ni-Cu-PGE 岩浆硫化物矿床主要岩矿石照片

(a)-橄辉岩(无矿);(b)-浸染状矿石;(c)-稠密网脉状(海绵陨铁状)矿石;(d)-致密块状矿石

Fig.3 The photographs of main types of ore and rock of the Qingkuangshan Ni-Cu-PGE deposits

(a)-olivine websterite (barren);(b)-disseminated sulfide ore;(c)-net-structured sulfide ore;(d)-massive sulfide ore

斗把准确称取的¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 混合稀释剂转入 Carius 管底部。再依次加入 5mL 16mol·L⁻¹HNO₃ 和 1mL 30% H₂O₂。

当 Carius 管底溶液冻实后,用液化石油气和氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。擦净表面残存的乙醇,放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风机烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 200℃(硫化物矿石)或 230℃(岩石样品),保温 24h。取出,冷却后在底部冻实的情况下,先用细强火焰烧熔 Carius 管细管部分一点,使内部压力得以释放。再用玻璃刀划痕,并用烧热的玻璃棒烫裂划痕部分。

2.1.2 蒸馏分离铼

将待打开的 Carius 管放在冰水浴中回温使内容物完全融化,用约 20mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。把内装 5mL 超纯水的 25mL 比色管,放在冰水浴中,以备吸收蒸馏出的 OsO₄。连接蒸馏装置,加热微沸 30min。所得 OsO₄ 水吸收液可直接用于 ICPMS 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液转入 150mL Teflon 烧杯中待分离铱。

2.1.3 萃取分离 Re

将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。根据样品量加入 4~10mL 5~6mol·L⁻¹ NaOH(如果碱化后沉淀量过多,可适当增加 NaOH 用量),稍微加热,促进样品转为碱性介质。转入 Teflon 离心管中,加入 4~10mL 丙酮,振荡 1min 萃取 Re。在丙酮萃取离心后,将离心管内上清液转入 Teflon 分液漏斗中分相,弃去碱溶液。再加入 2mL 5mol/LNaOH,振荡 1min,弃去碱溶液。转移丙酮相到 Teflon 离心管中,离心。离心后,用滴管直接取上层丙酮相到 150mL 已加有 2mL 水的 Teflon 烧杯中,在电热板上 50℃加热除去丙酮,然后电热板温度升至 120℃加热至干,加数滴浓硝酸和 30% H₂O₂,加热蒸干以除去残存的 Os。用数滴 HNO₃ 溶解残渣,用水转移到小瓶中,稀释到适当体积,备 ICPMS 测定 Re 同位素比值。

2.1.4 质谱测定

采用美国热电公司(Thermo Fisher Scientific)生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪 HR-ICP-MS Element 2 进行测量。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。

2.2 分析结果

Re-Os 同位素测试结果见表 1。其中普 Os 是根据原子量表(Wieser, 2006)和同位素丰度表(Bohlke *et al.*, 2005),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差、待分析样品同位素比值测量误差。置信水平为 95%。

研究表明,青矿山矿床成矿岩体是峨眉山大火成岩省岩浆活动的产物(姚家栋,1986;Xu *et al.*, 2001;Zhou *et al.*, 2002;Song *et al.*, 2006, 2008;宋谢炎等,2005, 2009;官建祥和宋谢炎,2010),故以峨眉山大火成岩省主要岩浆活动时限

表 1 青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床 Re-Os 同位素分析结果

原样名	样品类型	样重(g)	Re($\times 10^{-9}$)		普 Os($\times 10^{-9}$)		¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os		¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os		γ Os ($t=260$ Ma)	Re/Os	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度			
QK09-T8	橄辉岩	2.0095	0.8488	0.0137	0.2204	0.0020	18.63	0.34	0.2566	0.0018	0.1757	40.3	3.85
QK09-T11	橄辉岩	2.0017	0.7414	0.0131	0.2162	0.0024	16.61	0.34	0.2198	0.0040	0.1477	17.9	3.43
QK09-T5	橄辉岩	2.0058	0.7412	0.0109	0.5928	0.0057	6.054	0.106	0.1707	0.0022	0.1444	15.3	1.25
QK09-T1	斜长橄辉岩(稀疏浸染状矿石)	0.5052	7.725	0.102	1.768	0.013	21.12	0.32	0.6370	0.0055	0.5453	335.3	4.37
QK09-T3	舍长橄辉岩(稀疏浸染状矿石)	0.5013	13.99	0.12	5.444	0.040	12.41	0.14	0.5551	0.0031	0.5012	300.1	2.57
QK09-T9-1	舍长橄辉岩(海绵陨铁状矿石)	0.5026	18.37	0.17	0.5283	0.0056	168.0	2.4	2.239	0.030	1.510	1105.2	34.8
QK09-K11	橄辉岩(海绵陨铁状矿石)	0.5038	26.58	0.21	2.800	0.024	45.86	0.54	1.512	0.010	1.313	948.1	9.49
QK09-K9	橄辉岩(海绵陨铁状矿石)	0.2004	113.0	1.9	12.02	0.09	45.41	0.84	1.766	0.008	1.569	1152.4	9.40
QK09-K12	橄辉岩(海绵陨铁状矿石)	0.2028	80.63	1.32	1.504	0.015	259.0	5.0	2.332	0.023	1.208	864.1	53.6
QK09-T4	致密块状硫化物矿石	0.2097	92.31	0.88	45.59	0.37	9.780	0.122	0.4422	0.0031	0.3997	219.1	2.02
QK09-K2	致密块状硫化物矿石	0.1048	160.5	1.5	86.14	0.70	9.001	0.112	0.4478	0.0023	0.4087	226.3	1.86
QK09-K5	致密块状硫化物矿石	0.2025	154.4	1.3	86.57	0.66	8.616	0.100	0.4477	0.0019	0.4103	227.5	1.78
QK09-T9-2	致密块状硫化物矿石	0.2075	452.6	5.8	92.65	0.78	23.60	0.36	1.134	0.008	1.032	723.5	4.89

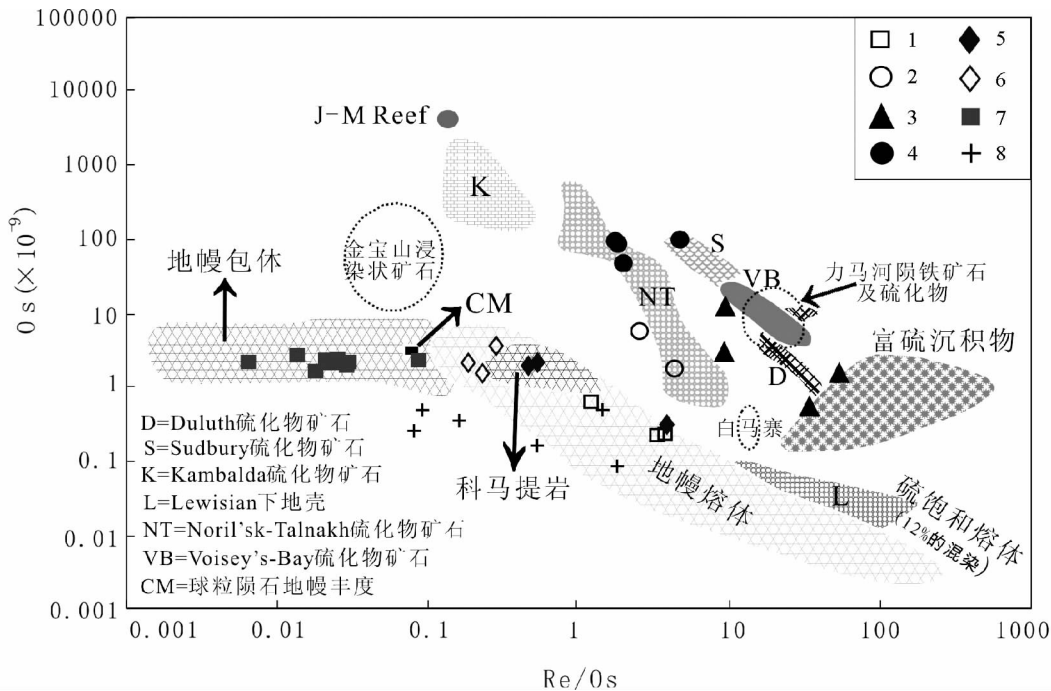


图4 青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床 Re/Os 比值对普通 Os 图解 (据 Lambert *et al.*, 1999)

1-橄辉岩(无矿);2-浸染状矿石;3-海绵陨铁状矿石;4-致密块状矿石;5-力马河橄辉岩;6-金宝山异剥橄榄岩;7-峨眉山苦橄岩;8-峨眉山玄武岩。金宝山浸染状矿石、力马河陨铁矿石及硫化物分别据 Tao *et al.*, 2007, 2010;白马寨硫化物矿石据 Sun *et al.*, 2008;峨眉山苦橄岩及玄武岩据 Zhang *et al.*, 2008

Fig. 4 Re/Os ratio vs. common Os diagram for the Qingkuangshan Ni-Cu-PGE deposit (after Lambert *et al.*, 1999)

1-olivine websterite (barren); 2-disseminated sulfide ore; 3-net-structured sulfide ore; 4-massive sulfide ore; 5-olivine websterite from Limahe nickel deposit; 6-wehrlite from Jinbaoshan Pt-Pd deposit; 7-Emeishan picrite; 8-Emeishan basalt. Disseminated sulfide ore of the Jinbaoshan deposit and olivine websterite of Limahe deposit from Tao *et al.*, 2007, 2010, respectively; Baimazhai data from Sun *et al.*, 2008; Emeishan data from Zhang *et al.*, 2008

260Ma (± 3 Ma) 进行计算,得到各样品的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})}$ 及 $\gamma\text{Os}_{(t=260\text{Ma})}$ (表1)。通过对青矿山矿床的 Re-Os 同位素分析显示,青矿山各类岩矿石的 Re、Os 含量变化较大,同位素组成上也显示出明显的差异性:其中不含硫化物的橄辉岩的 Re、Os 平均含量分别为 0.7771×10^{-9} 、 0.3431×10^{-9} , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 0.1444 \sim 0.1757$, $\gamma\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 15.3 \sim 40.3$;海绵陨铁状矿石的 Re、Os 平均含量分别为 59.65×10^{-9} 、 4.213×10^{-9} , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 1.208 \sim 1.569$, $\gamma\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 864.1 \sim 1152.4$;浸染状矿石的 Re、Os 平均含量分别为 10.86×10^{-9} 、 3.606×10^{-9} ,致密块状矿石的 Re、Os 平均含量分别为 215.0×10^{-9} 、 77.74×10^{-9} ,二者的同位素组成相近并介于不含硫化物的橄辉岩和海绵陨铁状矿石之间, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 0.3997 \sim 0.5453$, $\gamma\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 219.1 \sim 335.3$ 。

3 讨论

3.1 母岩浆性质

青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床的岩浆硫化物矿石具有较高的 Re/Os 比值 (1.8 ~ 53.6),不同于源自科马提岩岩浆的

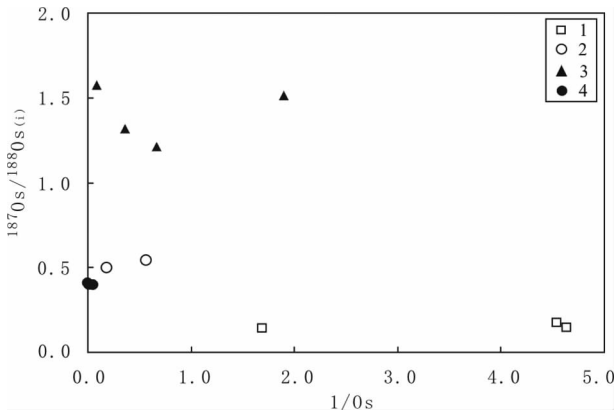
Kambalda 硫化物矿石 (0.12 ~ 0.36) (Foster *et al.*, 1996),而与 Noril'sk-Talnakh 矿床、Voisey's Bay 矿床及 Duluth 杂岩体 Babbif 矿床的硫化物矿石非常相似 (Walker *et al.*, 1994; Arndt *et al.*, 2003; Lambert *et al.*, 1999; Ripley *et al.*, 1998) (图4),说明母岩浆具有玄武质岩浆特征。从青矿山橄辉岩的初始 Os 同位素组成特征上可以看出,其放射成因 ^{187}Os 丰度很低, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 0.1444 \sim 0.1757$, $\gamma\text{Os}_{(t=260\text{Ma})} = 15.3 \sim 40.3$,反映受到地壳混染的影响最小,但是较低的 Os 含量指示其母岩浆发生过硫化物熔离亏损,不是原始岩浆直接结晶分异的堆晶产物。青矿山矿床成矿岩体和力马河镍矿成矿岩体同属会理岩体群,其地球化学特征相似,分析认为有基本相同的原始岩浆,为苦橄质岩浆(姚家栋, 1986; Song *et al.*, 2006, 2008; 宋谢炎等, 2005, 2009; 官建祥和宋谢炎, 2010; 陶琰等, 2007, 2008)。根据力马河镍矿成矿岩体的无铂族元素亏损的橄辉岩 Re、Os 含量分别为 $\text{Re} \approx 0.9 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Os} \approx 1.8 \times 10^{-9}$ (陶琰等, 2008),以橄辉岩含有 40% 的堆晶橄榄石概算,将 Os 视为相容元素 $D_{\text{Os}}^{(\text{Ol}/\text{melt})} = 3$ 、Re 为不相容元素 $D_{\text{Re}}^{(\text{Ol}/\text{melt})} = 0$,可获得原始岩浆 Re、Os 含量分别为 1.5×10^{-9} 、 1×10^{-9} 。

表 2 青矿山岩浆 Ni-Cu-PGE 矿床地壳混染及硫化物熔离拟合

Table 2 Crustal contamination and sulfide segregation of the Qingkuangshan Ni-Cu-PGE deposit

拟合参数	Re ($\times 10^{-9}$)	Os ($\times 10^{-9}$)	$\gamma_{Os}(t=260\text{Ma})$	Re/Os
原始岩浆 ^①	1.5	1	5	1.5
上地壳 ^②	0.4	0.05	1250	8
下地壳 ^③	0.2	0.1	6500	2
熔离分配系数 $D_{\text{(硫化物熔体/硅酸岩浆)}}$ ^④	500	30000		
原始岩浆一次混染(下地壳 $f_{c1} = 1.8\%$)	1.48	0.98	17	1.50
一次熔离硫化物(下地壳 $f_{c1} = 1.8\%$, $R_1 = 510$)	373.7	494.1	17	0.76
一次熔离后适度亏损岩浆(下地壳 $f_{c1} = 1.8\%$, $R_1 = 510$)	0.74	0.01	17	51.15
亏损岩浆演化过程一				
一次熔离后适度亏损岩浆(下地壳 $f_{c1} = 1.8\%$, $R_1 = 510$)	0.74	0.01	17	51.15
适度亏损岩浆二次混染 a(下地壳 $f_{c2a} = 2.6\%$)	0.73	0.02	1018	43.56
适度亏损岩浆二次熔离硫化物(下地壳 $f_{c2a} = 2.6\%$, $R_{2a} = 1050$)	247.6	17.03	1018	14.11
青矿山硫化物代表(具高 Os 初始值)	247.9	18.35	1017	13.51
亏损岩浆演化过程二				
一次熔离后适度亏损岩浆(下地壳 $f_{c1} = 1.8\%$, $R_1 = 510$)	0.74	0.01	17	51.15
适度亏损岩浆二次混染 b(上地壳 $f_{c2b} = 6.7\%$)	0.72	0.02	262	42.58
适度亏损岩浆二次熔离硫化物(上地壳 $f_{c2b} = 6.7\%$, $R_{2b} = 5022$)	328.1	72.90	262	4.50
青矿山硫化物代表(具低 Os 初始值)	328.1	83.07	262	3.95

注:①参考陶琰等,2008;②据 Esser and Turekian, 1993;Saal *et al.*, 1998;③据 Ripley *et al.*, 1998;Saal *et al.*, 1998;Sproule *et al.*, 2002, 1999;④据 Peach *et al.*, 1990;Hauri and Hart, 1997;Leshner and Stone, 1996;Lambert *et al.*, 1998

图 5 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t)}-1/\text{Os}$ 图解

1-橄辉岩(无矿);2-浸染状矿石;3-海绵陨铁状矿石;4-致密块状矿石

Fig. 5 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t)}-1/\text{Os}$ plot

1-olivine websterite (barren); 2-disseminated sulfide ore; 3-net-structured sulfide ore; 4-massive sulfide ore

3.2 地壳混染及硫化物熔离分析

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 同位素体系是硫化物矿床成矿过程中地壳物质混染的最灵敏和有效的指示剂(Foster *et al.*, 1996; Mathur *et al.*, 1999)。

根据 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t)}-1/\text{Os}$ 图解(图5),并结合表1可见,不同类型岩矿石初始 Os 同位素组成的不均一是明显的,主要区分出3种 Os 同位素组成的岩矿石类型:不含硫化物的

橄辉岩具极低 $\gamma_{Os}(t=260\text{Ma})$,变化范围从15.3到40.3;致密块状和浸染状硫化物矿石相近, $\gamma_{Os}(t=260\text{Ma})$ 值在260左右,海绵陨铁状矿石具有最高的放射性 Os 同位素组成, $\gamma_{Os}(t=260\text{Ma})$ 值在1000左右。

由于 Re、Os 本身的地球化学性质在硫化物熔体与硅酸盐岩浆间的分配系数相差一个数量级以上, $D_{\text{Re}}^{\text{(sulf/melt)}} = 500$, $D_{\text{Os}}^{\text{(sulf/melt)}} = 30000$ (Fleet *et al.*, 1999; Brennan, 2008; Righter *et al.*, 2004),因此,利用岩矿石 Re-Os 含量及 Os 同位素组成的耦合关系能较好的反映成矿岩浆演化过程中硫化物熔离及混染作用过程,Lambert *et al.* (1998, 1999)、Ripley *et al.* (1998)及 Sproule *et al.* (1999)运用 Re-Os 含量及 Os 同位素组成很好的解释岩浆硫化物矿床的成矿过程。陶琰等(2008)也利用该模式对力马河镍矿的矿床成因上给出了合理的解释。

对青矿山镍矿成矿岩浆演化过程的模式分析以前述原始岩浆组成 Re、Os 含量分别为 1.5×10^{-9} 、 1×10^{-9} 为基础,混染源根据目前对幔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 Ripley *et al.*, 1998; Saal *et al.*, 1998; Sproule *et al.*, 2002, 1999),假定其混染源为一般概念意义上的上地壳和下地壳物质,具体拟合参数见表2。

模式分析表明,一次混染熔离不能形成青矿山高放射性同位素组成的矿石。以较低放射成因 ^{187}Os 丰度的上地壳为混染源(Re、Os、 γ_{Os} 分别为0.4、0.05、1250),要造成原始岩浆混染成 $\gamma_{Os}(t=260\text{Ma})$ 达到15左右的岩浆,则混染程度需要14.3%,而对更高放射性 Os 同位素组成的岩石,混染程度分别需要17.3% ($\gamma_{Os} = 17.9$)、36.9% ($\gamma_{Os} = 40.3$),形成矿石

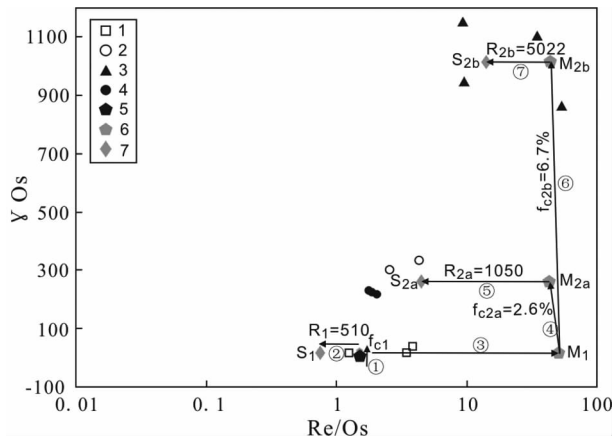


图6 Re/Os- γ Os 图解:多阶段地壳混染及硫化物熔离模拟

1-橄辉岩(无矿);2-浸染状矿石;3-海绵陨铁状矿石;4-致密块状矿石;5-原始岩浆(同表2);6-亏损岩浆;7-熔离硫化物. ①-下地壳混染(第一次混染);②-硫化物熔离丢失(第一次熔离);③-熔离后形成适度亏损岩浆(第一次熔离);④-适度亏损岩浆下地壳二次混染;⑤-下地壳二次混染硫化物熔离;⑥-适度亏损岩浆上地壳二次混染;⑦-上地壳二次混染硫化物熔离. f_{c1} -下地壳混染比例; f_{c2a} , f_{c2b} -分别为下、上地壳混染比例; R_1 , R_{2a} , R_{2b} -硫化物熔离比例; M_1 -第一次熔离后适度亏损岩浆; M_{2a} , M_{2b} -地壳混染后岩浆

Fig. 6 Re/Os ratio vs. γ Os for multi-stages of crustal contamination and sulfide segregation

1-olivine websterite (barren); 2-disseminated sulfide ore; 3-net-structured sulfide ore; 4-massive sulfide ore; 5-primary magma (same as Table 2); 6-depletion magma; 7-sulfide melt. ①-contamination in the lower crust (1st contamination); ②-sulfides segregation of the contaminated magma (1st sulfide segregation); ③-formation of PGE moderate depleted magma due to the 1st sulfide segregation; ④-2nd contamination in the lower crust; ⑤-2nd sulfide segregation after the 2nd contamination in the lower crust; ⑥-2nd contamination in upper crust; ⑦-2nd sulfide segregation after the 2nd contamination in the upper crust. f_{c1} -fraction of lower crust contamination; f_{c2a} , f_{c2b} -fraction of the 2nd contamination in the lower and upper crust respectively; R_1 , R_{2a} , R_{2b} -fraction of segregated sulfide; M_1 -PGE moderate depleted magma; M_{2a} , M_{2b} -formation of magma due to crust contamination

的高放射性 Os 同位素组成则至少需要混染程度达到 80.6% (γ Os = 219)。另外,即使以 γ Os($t=260$ Ma) 高达 6500 的下地壳 (Re、Os 分别为 0.2、0.1) 为混染源,要形成青矿山高放射性同位素组成的矿石,混染程度也需要 25% ~ 70% (γ Os = 219 ~ 1152)。这样高程度的地壳混染又保持幔源镁铁质岩浆成因属性是不可能的。

分析认为青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床的岩浆硫化物矿石的形成需有二次岩浆混染及相应的熔离过程(图6):

第一次混染及熔离:原始岩浆在深部岩浆房受到下地壳的高放射性成因的¹⁸⁷Os 的混染源混染(约 1.8%),使得 γ Os

达到 17 左右,并发生一定程度硫化物熔离作用 ($R \approx 510$; R 为硅酸盐熔浆/硫化物熔浆的比值, Campbell and Naldrett, 1979),形成 PGE 适度亏损的岩浆,接着适度亏损的成矿母岩浆又经过不同的混染演化过程成矿。

第二次混染及熔离:区分出 2 种不同过程。

过程一:PGE 适度亏损岩浆在演化过程中再次受到下地壳混染(约 2.6%), γ Os 达到 1018 左右,并发生二次硫化物熔离 ($R \approx 1000$),形成具有很高放射性 Os 同位素组成的海绵陨铁状矿石硫化物。

过程二:PGE 适度亏损岩浆直接上侵到上地壳,受较低放射成因¹⁸⁷Os 丰度的平均上地壳的混染(约为 6.7%),使得 γ Os 达到 262 左右,并发生硫化物熔离 ($R \approx 5000$),将能使形成的硫化物熔体的 Re、Os 分别能达到 328.1×10^{-9} 、 72.90×10^{-9} ,与青矿山低 γ Os($t=260$ Ma) 的硫化物矿石 Re、Os 组成基本一致。

3.3 成岩成矿机制分析

青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床岩、矿石初始 Os 同位素组成的不均一,分析认为是多级岩浆房演化的结果,成矿岩体中不含矿的橄辉岩具有低的放射性 Os 同位素组成,其母岩浆不是矿石硫化物的直接母体;致密块状和浸染状硫化物矿石与海绵陨铁状矿石也具有不同的放射性 Os 同位素组成,是成矿岩浆演化过程中不同期次形成的熔离硫化物。Os 同位素组成的不均一表明青矿山矿床为岩浆通道系统成矿,是多级岩浆房演化过程中不同期次含矿岩浆在岩浆通道系统中复合造成的。

通过对 Re-Os 及其同位素组成的综合分析,成岩成矿机制概述如下:(1)具有苦橄质性质的原始岩浆在深部岩浆房受到下地壳混染(约 1.8%),造成少量 Cu、Ni 及 PGE 这些成矿元素进入到熔离硫化物,形成适度亏损的成矿母岩浆;(2)适度亏损的成矿母岩浆在受下地壳二次混染时,形成具有很高放射性 Os 同位素组成的岩浆 (γ Os($t=260$ Ma) 高达 1000) 并经二次硫化物熔离 ($R \approx 1000$) 形成海绵陨铁状矿石硫化物;(3)适度亏损的成矿母岩浆在上地壳经历二次混染(约 6.7%),形成具有较高放射性 Os 同位素组成的岩浆 (γ Os($t=260$ Ma) 在 260 左右) 并发生二次硫化物熔离 ($R \approx 5000$),部分熔离硫化物积聚成矿浆形成块状硫化物矿石,未能充分积聚的熔离硫化物形成浸染状硫化物矿石;(4)适度亏损的成矿母岩浆携带熔离形成的硫化物向浅部岩浆房运移,在合适的位置发生堆积冷凝成岩成矿。

4 结论

(1)青矿山成矿岩体橄辉岩 Re、Os 含量特征指示其原始岩浆具苦橄质岩浆成因属性,估算原始岩浆 Re、Os 含量分别为 1.5×10^{-9} 、 1×10^{-9} ;

(2)青矿山不同类型岩矿石的 Os 同位素组成不均一,主

要区分出 3 种不同 Os 同位素组成的岩矿石类型, 反映不同程度壳源物质混染的影响; 模式分析表明, 青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床的岩浆硫化物矿石形成过程存在多阶段地壳混染及多次硫化物熔离, 并可以识别出下地壳混染作用的影响。

(3) 综合分析认为, 各类岩矿石 Os 同位素组成的不均一是由于青矿山 Ni-Cu-PGE 矿床为岩浆通道系统成矿, 矿床是多级岩浆房演化过程中不同期次含矿岩浆在岩浆通道系统中复合的结果。

致谢 审稿人提出了十分宝贵的修改意见, 使本文得以改进, 在此谨致谢意。

References

- Arndt NT, Czamanske G, Walker RJ, Chauvel C and Fedorenko V. 2003. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits. *Economic Geology*, 98(3): 495–515
- Bohlke JK, de Laeter JR, De Bièvre P, Hidaka H, Peiser HS, Rosman KJR and Taylor PDP. 2005. Isotopic compositions of the elements, 2001. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 34(1): 57–67
- Brenan JM. 2008. Re-Os fractionation by sulfide melt-silicate melt partitioning: A new spin. *Chemical Geology*, 248: 140–165
- Campbell IH and Naldrett AJ. 1979. The influence of silicate; Sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides. *Economic Geology*, 74(6): 1503–1506
- Du AD, He HL, Yin NW, Zou XQ, Sun YL, Sun DZ, Chen SZ and Qu WJ. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339–347 (in Chinese with English abstract)
- Esser BK and Turekian KK. 1993. The osmium isotopic composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(13): 3093–3104
- Fleet ME, Crocket JH, Liu M and Stone WE. 1999. Laboratory partitioning of platinum group elements (PGE) and gold with application of magmatic sulfide-PGE deposits. *Lithos*, 47: 127–142
- Foster JG, Lambert DD, Frick LR and Maas R. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites. *Nature*, 382: 703–706
- Guan JX and Song XY. 2010. Platinum-group elements as ore potentiality tracers of a few small mafic-ultramafic intrusions in Panxi area, Sichuan Province. *Mineral Deposits*, 29(2): 207–217 (in Chinese with English abstract)
- Han CM, Xiao WJ, Zhao GC, Qu WJ, Mao QG and Du AD. 2006. Re-Os isotopic analysis of the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit, northern Xinjiang, NW China, and its geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 163–170 (in Chinese with English abstract)
- Hauri EH and Hart SR. 1997. Rhenium abundances and systematics in oceanic basalts. *Chemical Geology*, 139: 185–205
- Hu KB, Yao SZ, Qu WJ, Du AD and Ao SJ. 2008. Re-Os isotopic analysis of the Hulu Cu-Ni sulfide deposit magmatic ore system, Esat Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2359–2370 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SY, Yang JH, Zhao KD and Yu JM. 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 36(6): 669–677 (in Chinese with English abstract)
- Klügel A, Hansteen TH and Galipp K. 2005. Magma storage and underplating beneath Cumbre Vieja volcano, La Palma (Canary Islands). *Earth and Planetary Science Letters*, 236: 211–226
- Lambert DD, Foster JG, Frick LR, Ripley EM and Zientek ML. 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, Foster JG, Frick LR, Li C and Naldrett AJ. 1999. Re-Os isotopic systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic ore system, Labrador, Canada. *Lithos*, 47: 69–88
- Lambert DD, Frick LR, Foster JG, Li CS and Naldrett AJ. 2000. Re-Os isotope systematic 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
- Leshner CM and Stone WE. 1996. Exploration geochemistry of komatiites. In: Wyman DA (ed.). *Trance Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulfide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 153–204
- Li YC, Zhao GC, Qu WJ, Pan CZ, Mao QG and Du AD. 2006. Re-Os isotopic dating of the Xiangshan deposit, East Tianshan, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 245–251 (in Chinese with English abstract)
- Maier WD, Marsh JS, Barnes SJ and Dodd DC. 2002. The distribution of platinum group elements in the Insizwa Lobe, Mount Ayliff complex, South Africa: Implications for Ni-Cu-PGE sulfide exploration in the Karoo igneous province. *Economic Geology*, 97(6): 1293–1306
- Mao JW and Du AD. 2001. 982Ma Re-Os isotopic age of Cu-Ni sulphide deposit and its geological implication from Baotan area, Guangxi Province, China. *Science in China (Series D)*, 31(12): 992–998 (in Chinese)
- Mao JW, Yang JM, Qu WJ, Du AD, Wang ZL and Han CM. 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance. *Mineral Deposits*, 21(4): 323–330 (in Chinese with English abstract)
- Mathur R, Ruiz J and Tornos 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
- Naldrett AJ. 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*, 34: 227–240
- Naldrett AJ. 2004. *Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*. Berlin: Springer, 727
- Peach CL, Mathez EA and Keays RR. 1990. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements deduced from MORB: Implications for partial melting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(12): 3379–3389
- Qu WJ and Du AD. 2005. A method for Re-Os dating of copper-nickel sulfide ores and examples of its application. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(Suppl.): 140–142 (in Chinese with English abstract)
- Qu WJ, Du AD and Li C. 2009. High-precise determination of osmium isotopic ratio in the Jinchuan copper-nickel sulfide ore samples. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 219–222 (in Chinese with English abstract)
- Righter K, Campbell AJ, Humayun M and Hervig RL. 2004. Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir and Au between Cr-bearing spinel, olivine, pyroxene and silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(4): 867–880
- Ripley EM, Lambert DD and Frick LR. 1998. 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(19–20): 3349–3365
- Ripley EM, Park YR, Lambert DD and Frick LR. 2001. Re-Os isotopic variations in carbonaceous pelites hosting the Duluth Complex: Implications for metamorphic and metasomatic processes associated with mafic magma chambers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(17): 2965–2978
- Saal AE, Rudnick RL, Ravizza GE and Hart SR. 1998. Re-Os isotope evidence for the composition, formation and age of the lower continental crust. *Nature*, 393: 58–61
- Shi GY, Sun XM, Wang SW, Xiong DX, Qu WJ and Du AD. 2006. Re-Os isotopic dating and its geological implication of Baimazhai Cu-Ni sulphide deposit, Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2451–2456 (in Chinese with English abstract)
- Shirey SB and Walker RJ. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry*, 67(13): 2136

-2141

- Song XY, Zhang CJ, Hu RZ, Zhong H, Zhou MF, Ma RZ and Li YG. 2005. Genetic links of magmatic deposits in the Emeishan Large igneous Province with dynamics of mantle plume. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(4): 35–44 (in Chinese with English abstract)
- Song XY, Zhou MF, Keays RR, Cao ZM, Sun M and Qi L. 2006. Geochemistry of the Emeishan flood basalts at Yangliuping, Sichuan, SW China: Implications for sulfide segregation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 53–74
- Song XY, Zhou MF, Tao Y and Xiao JF. 2008. Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology*, 253: 38–49
- Song XY, Hu RZ and Chen LM. 2009. Geochemical natures of copper, nickel and PGE and their significance for the study of origin and evolution of mantle-derived magmas and magmatic sulfide deposits. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 287–305 (in Chinese with English abstract)
- Sproule RA, Lambert DD and Hoatson DM. 1999. Re-Os isotopic constraints on the genesis of the Sally Malay Ni-Cu-Co deposit, East Kimberley, Western Australia. *Lithos*, 47: 89–106
- Sproule RA, Lambert DD and Hoatson DM. 2002. Decoupling of the Sm-Nd and Re-Os isotopic systems in sulphide-saturated magmas in the Halls Creek Orogen, Western Australia. *Journal of Petrology*, 43(2): 375–402
- Sun XM, Wang SW, Sun WD, Shi GY, Sun YL, Xiong DX, Qu WJ and Du AD. 2008. PGE geochemistry and Re-Os dating of massive sulfide ores from the Baimazhai Cu-Ni deposit, Yunnan Province, China. *Lithos*, 105: 12–24
- Tao Y, Li CS, Hu RZ, Ripley EM, Du AD and Zhong H. 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: 321–337
- Tao Y, Hu RZ, Qi L and Luo TY. 2007. Geochemical characteristics and metallogenesis of the Limahe mafic-ultramafic intrusion, Sichuan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2785–2800 (in Chinese with English abstract)
- Tao Y, Hu RZ, Qu WJ and Du AD. 2008. Re-Os isotope study of sulfide and olivine pyroxenite in the Limahe nickel deposit, Sichuan province. *Acta Geologica Sinica*, 82(9): 1292–1304 (in Chinese with English abstract)
- Tao Y, Li C, Hu RZ, Ripley EM, Qi L, Qu WJ and Du AD. 2010. Re-Os isotopic constraints on the genesis of the Limahe Ni-Cu deposit in the Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 119: 137–146
- Walker RJ, Morgan JW, Horan MF, Czamanske GK, Krogstad EJ, Fedorenko VA and Kunilov VE. 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
- Wang CY, Zhou MF and Zhao DG. 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
- Wang RT, He Y, Wang DS and Liu MW. 2003. Re-Os isotope age and its application to the Jianchaling nickel-copper sulfide deposit, Lueyang, Shaanxi Province. *Geological Review*, 49(2): 205–211 (in Chinese with English abstract)
- Wieser ME. 2006. Atomic weights of the elements 2005 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 78(11): 2051–2066
- Xu YG, Chung SL, John BM and Wu GY. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145–168
- Yao JD. 1986. On the Genesis of Cu-(Pt)-Ni Sulfide Deposits in Xichang Region. Chongqing: Chongqing Publishing House, 34–37 (in Chinese)
- Zhang ZC, Zhi XC, Chen L, Saunders AD and Reichow MK. 2008. Re-Os isotopic compositions of picrites from the Emeishan flood basalt province, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 276: 30–39
- Zhang ZH, Chai FM, Du AD, Zhang ZC, Yan SH, Yang JM, Qu WJ and Wang ZL. 2005. Re-Os dating and ore-forming material tracing of the Karatungk Cu-Ni sulfide deposit in northern Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 323–330 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Malpas J, Song XY, Robinson PT, Sun M, Kennedy AK, Leshner CM and Keays RR. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 113–122

附中文参考文献

- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究. *地质学报*, 68(4): 339–347
- 官建祥, 宋谢炎. 2010. 四川攀西地区几个小型镁铁-超镁铁岩体含矿性的铂族元素示踪. *矿床地质*, 29(2): 207–217
- 韩春明, 肖文交, 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): 163–170
- 胡克兵, 姚书振, 屈文俊, 杜安道, 敖松坚. 2008. 新疆东天山葫芦铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素物质来源示踪研究. *岩石学报*, 24(10): 2359–2370
- 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 于际民. 2000. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究. *南京大学学报(自然科学)*, 36(6): 669–677
- 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): 245–251
- 毛景文, 杜安道. 2001. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982Ma Re-Os 同位素年龄及其地质意义. *中国科学(D辑)*, 31(12): 992–998
- 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(增刊): 140–142
- 屈文俊, 杜安道, 李超. 2009. 金川铜镍硫化物样品中钨同位素比值的高精度分析. *岩矿测试*, 28(3): 219–222
- 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): 2451–2456
- 宋谢炎, 张成江, 胡瑞忠, 钟宏, 周美夫, 马润则, 李佑国. 2005. 峨眉火成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系. *矿物岩石*, 25(4): 35–44
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈烈钰. 2009. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化及岩浆硫化物矿床研究中的意义. *地学前缘*, 16(4): 287–305
- 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 罗泰义. 2007. 四川力马河镁铁-超镁铁岩体的地球化学特征及成岩成矿分析. *岩石学报*, 23(11): 2785–2800
- 陶琰, 胡瑞忠, 屈文俊, 杜安道. 2008. 力马河镍矿 Re-Os 同位素研究. *地质学报*, 82(9): 1292–1304
- 王瑞廷, 赫英, 王东生, 刘民武. 2003. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. *地质评论*, 49(2): 205–211
- 姚家栋. 1986. 西昌地区硫化物铜(铂)镍矿床成因. 重庆: 重庆出版社, 34–37
- 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): 323–330