

郝立波,吴超,孙立吉,等.吉林红旗岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素特征及其意义.吉林大学学报:地球科学版,2014,44(2):507-517. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201402109.

Hao Libo, Wu Chao, Sun Liji, et al. Re-Os Isotope Characteristics of Hongqiling Cu-Ni Sulfide Deposit in Jilin Province and Its Significance. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(2): 507-517. doi: 10. 13278/j. cnki. jjuese. 201402109.

吉林红旗岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素特征及其意义

郝立波¹, 吴超¹, 孙立吉², 蒋艳明³, 赵玉岩¹, 陆继龙¹, 李杰⁴

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130021

2. 湖南省国土资源信息中心, 长沙 410000

3. 辽宁省冶金地质勘查局地质勘查研究院, 辽宁鞍山 114002

4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

摘要:吉林红旗岭铜镍硫化物矿床主要由 1 号、2 号及 7 号含矿岩体组成,主要矿石类型为浸染状矿石。其 Re-Os 等时线年龄研究显示:2 号岩体 Re-Os 等时线年龄((215.0±24.0) Ma)与岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄((212.2±2.6) Ma)一致;而 1 号岩体 Re-Os 等时线年龄((237.0±16.0) Ma)则明显老于岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄((216.0±5.0) Ma)。这表明浸染状矿石的 Re-Os 等时线年龄具有一定的不确定性,应慎重使用。浸染状矿石的 Re-Os 等时线年龄偏老原因多被解释为地壳混染引起的 Os 同位素不均一所致,但研究显示:红旗岭 1 号岩体和 2 号岩体均有一定量的地壳物质混入,浸染状矿石的¹⁸⁷Os 与¹⁸⁸Os 初始比值分别为 0.215±0.043 和 0.302±0.089, γ_{Os} 值分别为 67.5~155.8 和 113.9~206.9;且 2 号岩体地壳物质混入量略高于 1 号岩体,混入的壳源 Os 所占比例为 20%~30%。这说明地壳物质混染并非是导致 Os 同位素不均一的主要原因,其主要原因仍需在今后的工作中深入研究;而地壳物质的混入可能是促进熔离成矿的关键因素。

关键词:Re-Os 同位素;等时线年龄;铜镍硫化物矿床;浸染状矿石;红旗岭

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201402109

中图分类号:P578.2;P597

文献标志码:A

Re-Os Isotope Characteristics of Hongqiling Cu-Ni Sulfide Deposit in Jilin Province and Its Significance

Hao Libo¹, Wu Chao¹, Sun Liji², Jiang Yanming³, Zhao Yuyan¹, Lu Jilong¹, Li Jie⁴

1. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130021, China

2. Info Center for National Land & Resources of Hunan Province, Changsha 410000, China

3. The Geological Exploration Institute of Liaoning Metallurgically Geological Exploration Bureau, Anshan 114002, Liaoning, China

4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

收稿日期:2013-07-06

基金项目:国家专项危机矿山接替资源找矿项目(20089941);国家专项深部探测技术与实验研究(SinoProbe-04-05-02);中央高校基本科研业务费专项项目(200903043)

作者简介:郝立波(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事地球化学研究工作,E-mail:haolb@tom.com

通信作者:赵玉岩(1981—),男,副教授,博士,主要从事地球化学研究工作,E-mail:zhaoyuyan@jlu.edu.cn.

Abstract: The Hongqiling copper-nickel sulfide deposit mainly consists of No. 1, No. 2 and No. 7 ore-bearing intrusions. The Re-Os isochron age of No. 2 intrusion ((215.0 ± 24.0) Ma) is consistent with zircon SHRIMP U-Pb age of the intrusion, (212.2 ± 2.6) Ma, but the Re-Os isochron age of No. 1 intrusion ((237.0 ± 16.0) Ma) is greater than zircon SHRIMP U-Pb age of the No. 1 intrusion, (216.0 ± 5.0) Ma. All these data indicate that Re-Os isochron ages of disseminated ores are not completely reliable. The Re-Os isochron age is greater than zircon SHRIMP U-Pb age, which is usually interpreted as crustal contamination inducing heterogeneity of Os isotopic. However, the research shows that No. 1 and No. 2 intrusions are mixed with some of the Earth's crust substance, and the mixing volume of No. 2 intrusion is slightly higher than that of the No. 1 intrusion, which indicate that hybridization of crust materials is not the cause of heterogeneity in initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios, the major reason should be a further research. The initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios of No. 1 and No. 2 intrusions are 0.215 ± 0.043 and 0.302 ± 0.089 , and γ_{Os} values range from 67.5 to 155.8 and 113.9 to 206.9, respectively, which indicate that the ore-forming intrusions interfuse some crustal materials with possibly 20%-30% crustal Os contamination in Hongqiling area, and crustal materials might be the key factor to promote liquation ore formation.

Key words: Re-Os isotope; isochron age; Cu-Ni sulfide deposit; disseminated ore; Hongqiling

0 引言

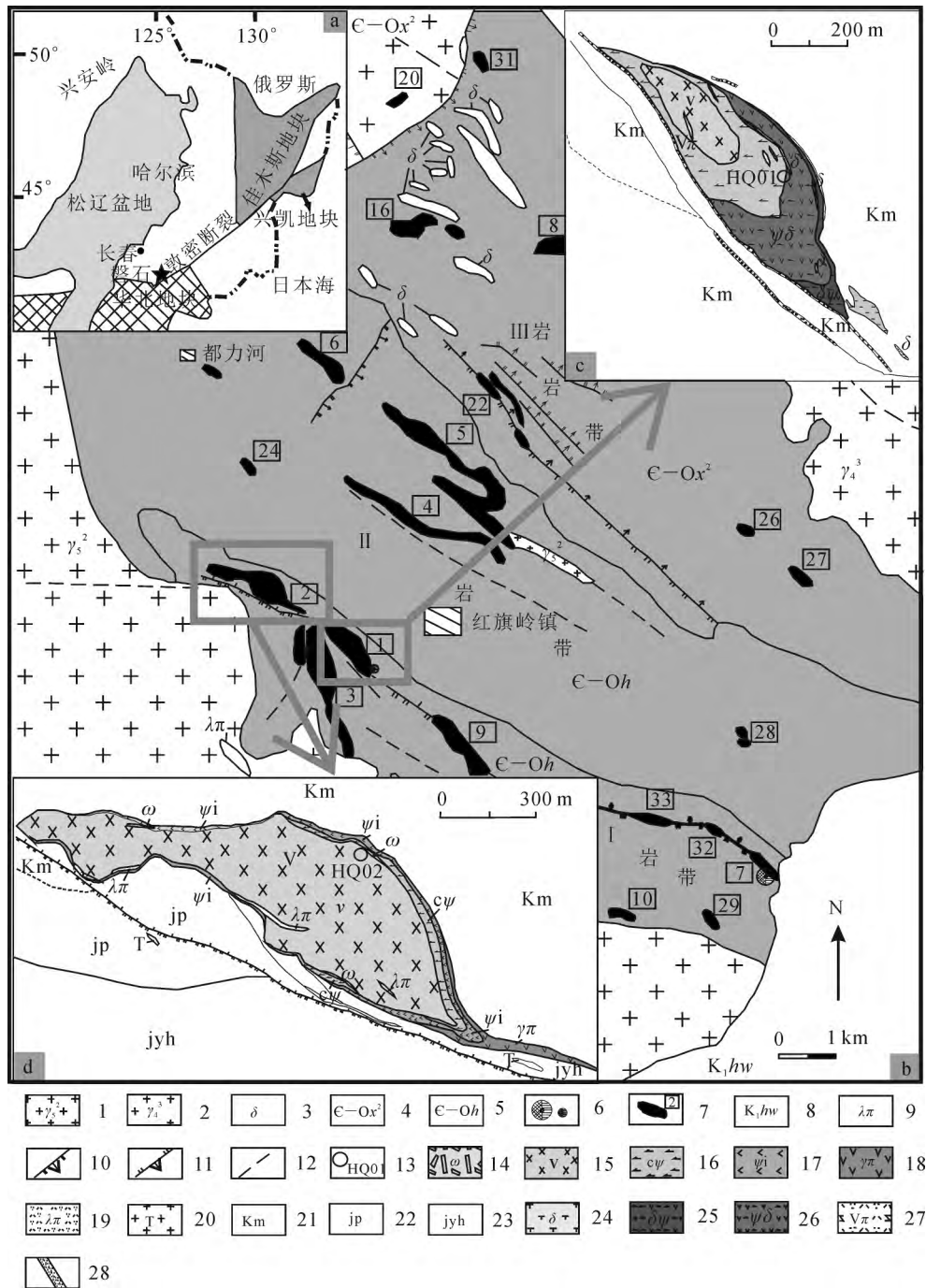
吉林省是中国重要的基性—超基性岩区,现已发现 1 000 余个基性—超基性岩体,可分为 11 个岩带,47 个岩体群。在数量众多的基性—超基性岩体中,赋存了多个铜镍硫化物矿床,诸如磐石红旗岭矿床、蛟河漂河川矿床、和龙长仁矿床、四平山门矿床以及通化赤柏松矿床等。其中红旗岭铜镍硫化物矿床最为典型,其镍储量仅次于甘肃金川镍矿,位居中国镍矿中的第二位。红旗岭铜镍硫化物矿床为典型的岩浆熔离型矿床,以岩体众多、镍储量丰富等特点而被许多地质工作者所关注^[1-7]。但在矿床成矿时代方面仍缺乏有效的数据支持,现今仅 Lü linsu 等^[8]对 7 号矿体的块状矿石进行了 Re-Os 同位素测定,得到了 (208.0 ± 21.0) Ma 的等时线年龄,而对矿区最为普遍的浸染状矿石的 Re-Os 同位素研究尚未见报道。众所周知,红旗岭矿床为岩浆熔离—多次贯入成矿,块状矿石的形成是后期富矿岩浆贯入的产物,其 Re-Os 等时线年龄应为矿床成矿年龄的下限。更重要的是,块状矿石主要见于红旗岭矿床的 7 号和 1 号岩体,而在其他含矿岩体中少见,所以,仅以 7 号岩体的块状矿石的 Re-Os 等时线年龄来确定红旗岭矿床的成矿年龄显然缺乏一定的代表性。笔者选取区内最具代表性的浸染状矿石开展 Re-Os 同位素测定,以进一步确定其成矿年龄,同时探讨红旗岭铜镍硫化物矿床的成矿物质来源、地壳

物质混染及岩浆熔离成矿机理。

1 地质概况

红旗岭铜镍硫化物矿床位于中国东北部吉林省磐石市东南约 40 km,地处兴安—蒙古造山带东部,华北地台与佳木斯板块之交汇处(图 1a)。地理坐标为东经 $126^{\circ}25'13''$,北纬 $42^{\circ}53'48''$ 。矿区面积约为 120 km^2 。矿区出露地层为下古生界呼兰群的黄莺屯组和小三个顶子组,含矿岩体主要侵位于黄莺屯组下段的黑云母片麻岩中。已发现 30 多个镁铁—超镁铁质岩体集中分布在 3 条北西向断裂附近。由西南至东北依次命名为 I、II 和 III 岩带(图 1b)。其中:I 岩带为多岩相的复式岩体;II、III 岩带岩体主要为单一岩相岩体。1 号、7 号、3 号、2 号和 32 号等含矿岩体均分布在 I 岩带。含矿岩体多呈带状、脉状、透镜状,且长轴方向均为北西向,从北西至南东(2 号→1 号→3 号→32 号→7 号岩体),基本呈雁列式分布,具尖灭再现特点。其中:1 号及 7 号岩体赋存有中大型硫化铜镍矿床,2 号、3 号、9 号及 32 号岩体为小型硫化铜镍矿床,其他均为少量矿化岩体及不含矿岩体。红旗岭矿区蚀变较为普遍,主要的蚀变类型有次闪石化、阳起石化、蛇纹石化和黑云母化等。

1 号含矿岩体位于矿区 I 岩带的中部,侵位于黑云母片麻岩中,岩体走向北西 320° ,长 980 m,宽 150~280 m,控制最大深度为 500 m,其地表出露面



1. 燕山期花岗岩;2. 海西期花岗岩;3. 加里东期闪长岩;4. 呼兰群小三个顶子组大理岩;5. 呼兰群黄莺屯组片麻岩;6. 大、中型铜镍矿床;7. 镁铁—超镁铁岩体及编号;8. 砾岩;9. 石英斑岩;10. 正断层;11. 逆断层;12. 推测断层;13. 采样点及样号;14. 闪长伟晶岩;15. 辉长岩相;16. 含长辉岩相;17. 辉岩相;18. 橄辉岩相;19. 石英长石斑岩;20. 花岗岩脉;21. 黑云母片麻岩;22. 角闪片岩;23. 花岗质片麻岩;24. 闪长岩;25. 辉石橄辉岩;26. 橄辉岩;27. 石英霏细岩;28. 破碎带。

图 1 红旗岭地区地质简图(附采样位置)

Fig. 1 Simplified geological map of Hongqiling area

积约为 0.1 km²。岩相由上至下依次为辉长岩、辉长伟晶岩脉(图 1c)。2 号含矿岩体位于 1 号岩体北西侧,长度为 1 700 余 m,中间宽度约 350 m。平面

上似纺锤形,纵剖面呈杯筒形,长轴方向 300° ,倾向NE,倾角约 50° 。岩体侵入于呼兰群黄莺屯组下段的黑云片麻岩和角闪片岩中。岩体延伸较深,在岩体中部具有明显的扭曲现象。岩体两侧向中心倾斜,倾角 $65^{\circ}\sim 85^{\circ}$,并具有上部较缓,下部变陡近于直立的形态特点。岩体具有明显的垂向分带,由上至下依次为辉长岩相、辉石岩相以及辉石橄榄岩岩相。辉长岩相、辉石岩相和辉石橄榄岩相之间为渐变过渡关系。闪长伟晶岩呈脉状和不规则状侵入于早期岩相中,长度从几米至几十米不等,宽度为 $1\sim 3\text{ m}$,为岩体中最后结晶的岩相(图1d)。

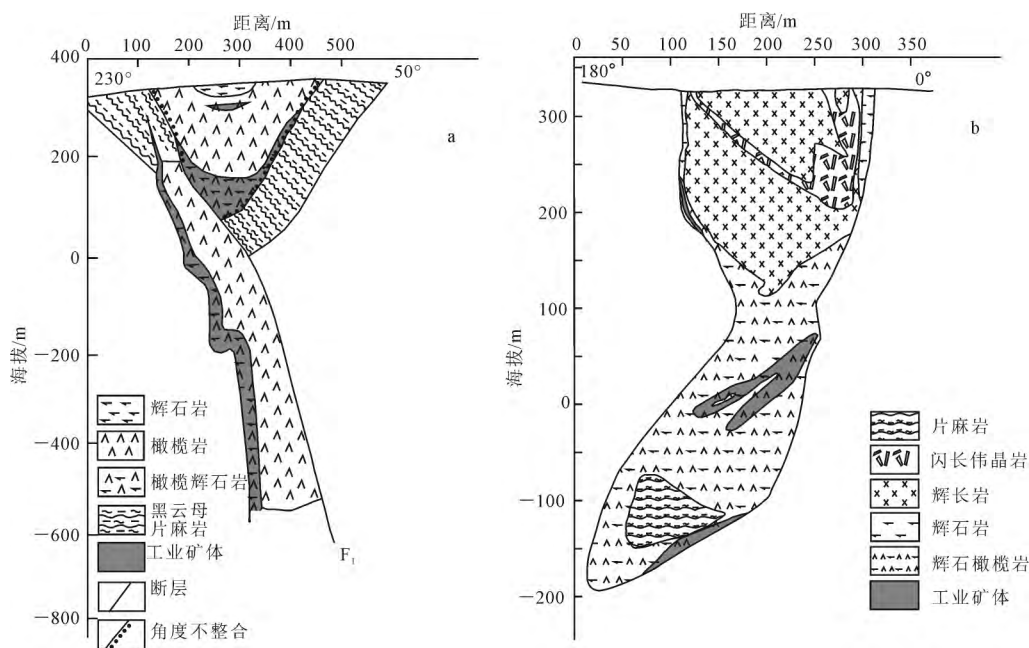
1号岩体的矿体主要位于岩体中下部,呈北西向延长,横剖面呈似层状或盆状,由两翼向中心倾斜。纵剖面由南东到北西埋藏深度由浅到深,为一南东翘起向北西倾没的似层状矿体,矿体主要分布在辉石橄榄岩相中(图2a)。2号岩体中的矿体类型大致分为3种:一种是上悬矿体,位于10线以东,矿体分布于辉石橄榄岩相中,形态为月牙状,规模较小;另一种是细脉状矿体,主要位于岩体上边部与围岩的接触破碎带中,产状较陡直,延深不大;第三种是位于岩体中深部个体稍大的囊状矿体,产状较缓(图2b)。

1号岩体和2号岩体中矿石类型有斑点状、浸染状、海绵陨铁状及致密块状(图3a、b、c、d),矿石结构主要为他形一半自形粒状结构、交代溶蚀结构(图3e、f)。2个岩体的矿石矿物除了常见的镍黄铁矿、磁黄铁矿以及黄铜矿外,另有黄铁矿、红砷镍矿、针镍矿、斑铜矿、磁铁矿及钛铁矿等次要矿石矿物。

2 样品采集与测试方法

本次测试的浸染状矿石多数为稀疏浸染状,主要产自1号岩体和2号岩体的辉石橄榄岩相和橄辉岩相。浸染状矿石的矿石矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿。磁黄铁矿,体积分数为金属矿物的 $20\%\sim 50\%$,以他形粒状集合体呈团块状分布在脉石矿物中;镍黄铁矿占金属矿物的 $40\%\sim 50\%$,以粒状集合体呈浸染状或斑杂状分布在磁黄铁矿内部或脉石当中;黄铜矿占金属矿物的 10% 左右,以他形粒状呈细脉浸染状分布在磁黄铁矿边缘及脉石中。矿石结构为他形粒状结晶结构、交代溶蚀结构,矿石构造为浸染状构造。

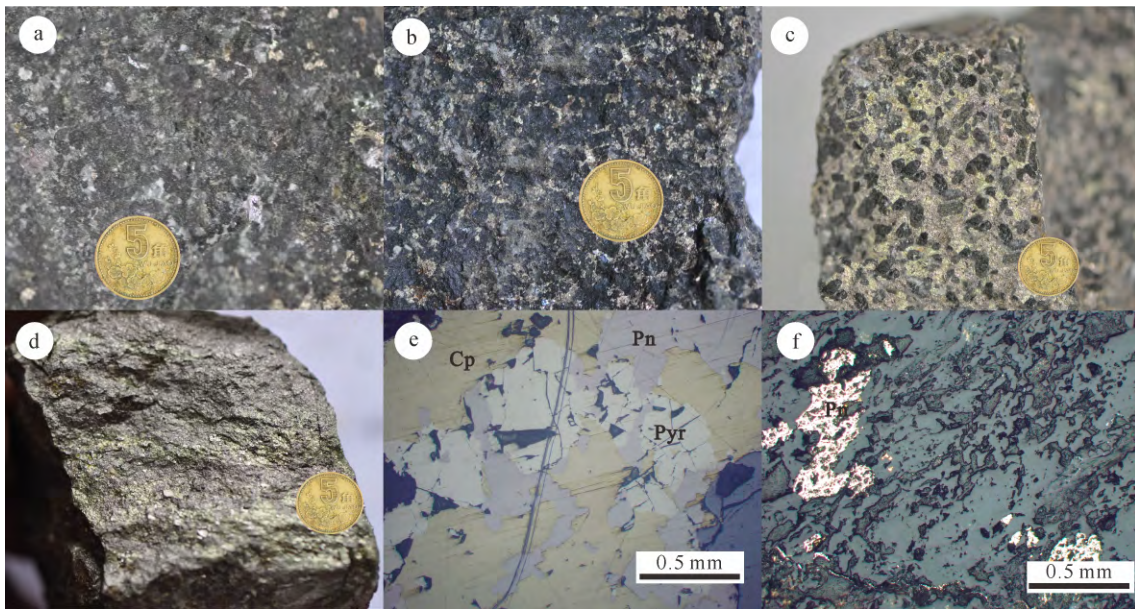
Re-Os组成在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室采用同位素稀释-ICP MS质谱法测定,具体的分析测试流程如下。



a. 1号岩体;b. 2号岩体。

图2 红旗岭矿床1号岩体、2号岩体典型剖面图

Fig. 2 Cross sections of No. 1 and No. 2 intrusions in Hongqiling deposit



a. 斑点状矿石; b. 浸染状矿石; c. 海绵陨铁状矿石; d. 致密块状矿石; e. 他形一半自形粒状结构; f. 交代溶蚀结构。Pn. 镍黄铁矿; Cp. 黄铜矿; Pyr. 磁黄铁矿。

图 3 红旗岭镍矿 1 号、2 号岩体主要矿石特征

Fig. 3 Main ore types of No. 1 and No. 2 intrusions in Hongqiling deposit

准确称取 1~2 g 样品于 Carius 管中,加入适量的¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 稀释剂,在冷冻的条件下分别加入 2.5 mL 浓 HCl 和 7.5 mL 浓 HNO₃。将封闭的 Carius 管在 240 °C 加热 24~48 h。待分解并冷却后,将 Carius 管打开,离心,将上部清液转移至 30 mL PFA 瓶中,用 4 mL 冰冷的 CCl₄ 萃取 3 遍,合并 CCl₄ 并加入 4 mL 浓 HBr,在红外灯下使 OsO₄ 与 HBr 完全反应,这时 OsO₄ 被还原成 OsBr₆²⁻,反萃取至 HBr 相,分离出该相,并在 130 °C 加热蒸干。最后 Os 用微蒸馏法进行纯化。Re 采用 AG1X8 阴离子树脂进行分离和纯化。

Os 同位素组成测定是在 Triton 型热电离质谱仪(美国 Thermo-Fisher 仪器公司)上完成的。采用二次电子倍增器(SEM)动态跳峰方式测定 OsO₃⁻ (质量数分别为 233, 235, 236, 237, 238, 240)。分析结果脱机处理:首先采用逐级剥氧法以等概率模型进行氧校正;然后通过¹⁹²Os/¹⁸⁸Os=3.082 71 校正仪器的质量分馏;最后计算扣除稀释剂对样品¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 同位素比值的贡献。Re 含量测量在 Xseries-2 型电感耦合等离子体质谱(美国 Thermo-Fisher 仪器公司)上完成。全流程的 Os 空白值为 0.3~0.8 pg, Re 空白值为 5~14 pg,对测量结果的影

响可以忽略。

3 Re-Os 同位素测试结果

14 件浸染状矿石的 Re-Os 同位素测试结果列于表 1。1 号岩体的浸染状矿石 $w(\text{Re})$ 为 $(0.634 \sim 22.632) \times 10^{-9}$, $w(\text{Os})$ 为 $(0.029 \sim 2.581) \times 10^{-9}$ 。2 号岩体的浸染状矿石 $w(\text{Re})$ 为 $(0.310 \sim 5.102) \times 10^{-9}$, $w(\text{Os})$ 为 $(0.004 \sim 0.556) \times 10^{-9}$ 。上述 2 个岩体的浸染状矿石 Re、Os 质量分数明显低于 7 号岩体块状矿石 ($w(\text{Re}) = (80.66 \pm 0.7) \times 10^{-9} \sim (178.60 \pm 1.5) \times 10^{-9}$, $w(\text{Os}) = (2.074 4 \pm 0.019) \times 10^{-9} \sim (8.378 1 \pm 0.066 8) \times 10^{-9}$ ^[8])。使用的衰变常数(λ)为 $1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$,应用 Ludwig 的 ISOPLOT 程序求得 1 号矿体的浸染状矿石的等时线年龄为 $(237 \pm 16) \text{ Ma}$, 初始¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 为 (0.215 ± 0.043) , 平均权重方差(MSWD)为 3.9, 8 个测试点基本落在同一等时线上,拟合较好。2 号矿体的浸染状矿石的等时线年龄为 $(215 \pm 24) \text{ Ma}$, 初始¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 为 (0.302 ± 0.089) , 平均权重方差(MSWD)为 11.5, 6 个测试点基本落在同一等时线上,拟合也相对较好(图 4)。

γ_{Os} 值是利用 Walker^[9] 所给出的公式进行计算

所得,具体的计算公式和所用数据如下: $\gamma_{Os}(t) = 100[(^{187}Os/^{188}Os)_{\text{样品}}(t)/(^{187}Os/^{188}Os)_{\text{球粒陨石}}(t) - 1]$ 。其中: $(^{187}Os/^{188}Os)_{\text{样品}}(t) = (^{187}Os/^{188}Os)_{\text{样品}} - (^{187}Re/^{188}Os)_{\text{样品}} \times (e^{\lambda t} - 1)$; $(^{187}Os/^{188}Os)_{\text{球粒陨石}}(t) = (^{187}Os/^{188}Os)_i + (^{187}Re/^{188}Os)(e^{\lambda T} - e^{\lambda t})$ 。式中: $(^{187}Os/^{188}Os)_i$ 为 0.095 31; $^{187}Re/^{188}Os$ 为 0.401 86; T 为地球形成年龄 4.558×10^9 a; t 为样品形成的年龄;使用的 ^{187}Re 衰变常数为 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} a^{-1}$ 。运用公式得出 $^{187}Os/^{188}Os$ 球粒陨石 (216.0 Ma) = 0.125 57, $^{187}Os/^{188}Os$ 球粒陨石 (212.0 Ma) = 0.125 59, 其中, 216.0 Ma 和 212.0 Ma 分别为 1 号岩体和 2 号岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄。最终计算所得 1 号岩体和 2 号岩体浸染状矿石的 γ_{Os} 值分别为 67.5~155.8 和 113.9~206.9。

表 1 红旗岭 1 号、2 号岩体浸染状矿石 Re、Os 质量分数和 Os 同位素组成分析结果

Table 1 Rhenium and osmium concentrations and isotopic composition of disseminated ores from No. 1 and No. 2 intrusions in Hongqiling deposit

样品号	样品质量/g	样品简述	$w(Re)/10^{-9}$	2σ	$w(Os)/10^{-9}$	2σ	$^{187}Re/^{188}Os$	2σ	$^{187}Os/^{188}Os$	2σ	γ_{Os}
HQ01-1	1.032	辉石橄榄岩(稀疏浸染状)	1.804	0.022 1	0.029	0.000 14	350.26	4.597 8	1.572 3	0.009 1	146.6
HQ01-2	1.011	辉石橄榄岩(稀疏浸染状)	3.741	0.046 5	0.069	0.000 21	306.94	3.924 8	1.427 7	0.004 8	155.8
HQ01-3	1.205	细粒橄榄岩(稀疏浸染状)	0.634	0.004 2	0.015	0.000 05	227.63	1.693 4	1.125 5	0.006 3	142.8
HQ01-4	1.405	细粒含长橄榄岩(稀疏浸染状)	0.697	0.005 5	0.018	0.000 10	214.16	2.109 6	1.039 3	0.008 5	112.8
HQ01-5	1.221	含长橄榄岩(稀疏浸染状)	1.123	0.011 7	0.039	0.000 14	151.46	1.672 1	0.806 0	0.005 5	107.0
HQ01-6	1.037	橄榄辉石岩(浸染状)	7.062	0.157 1	0.367	0.001 53	98.80	2.236 0	0.635 8	0.000 8	122.7
HQ01-7	1.254	细粒橄榄岩(浸染状)	22.632	0.599 5	2.581	0.201 54	43.55	3.591 7	0.367 3	0.001 5	67.5
HQ01-8	1.112	橄榄辉石岩(浸染状)	6.835	0.066 1	0.245	0.000 80	146.39	1.495 9	0.808 9	0.001 8	123.9
HQ02-1	1.230	橄榄辉石岩(浸染状)	5.102	0.068 4	0.556	0.006 02	46.15	0.795 5	0.464 4	0.001 3	139.8
HQ02-2	1.303	橄榄辉石岩(浸染状)	4.313	0.038 7	0.196	0.000 85	114.38	1.141 5	0.731 6	0.002 9	160.3
HQ02-3	1.233	辉石橄榄岩(稀疏浸染状)	0.560	0.003 1	0.012	0.000 03	261.95	1.563 6	1.295 6	0.006 5	193.6
HQ02-4	1.221	辉石橄榄岩(稀疏浸染状)	0.407	0.002 5	0.004	0.000 01	744.82	5.384 4	3.020 8	0.022 6	206.9
HQ02-5	1.011	含长橄榄岩(稀疏浸染状)	0.310	0.002 2	0.004	0.000 02	410.43	3.306 6	1.720 8	0.014 8	113.9
HQ02-6	1.210	辉石橄榄岩(稀疏浸染状)	0.561	0.004 4	0.017	0.000 05	180.32	1.517 5	0.906 7	0.004 5	113.9

注: HQ01 采自 1 号岩体; HQ02 采自 2 号岩体。

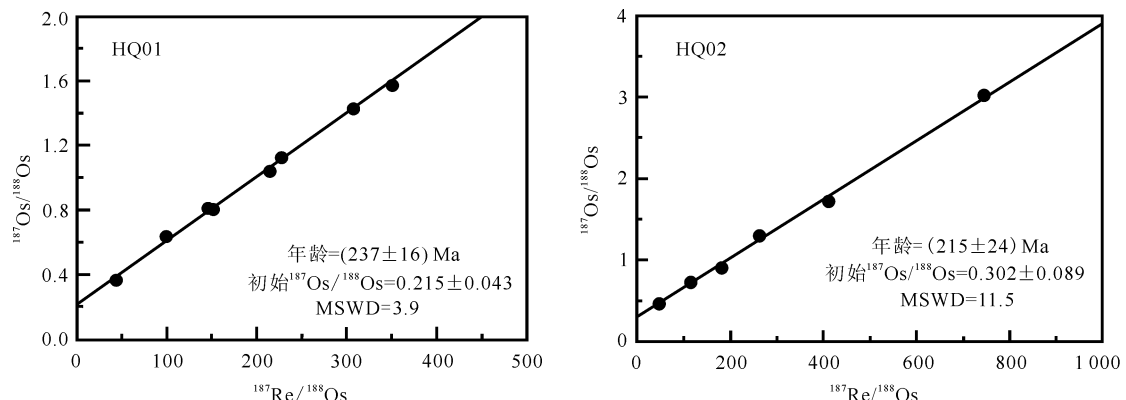


图 4 红旗岭 1 号岩体、2 号岩体浸染状矿石的 Re-Os 等时线图

Fig. 4 Re-Os isochrones of disseminated ores from No. 1 and No. 2 intrusions in Hongqiling deposit

4 讨论

4.1 浸染状矿石 Re-Os 等时线年龄

一般认为,由于 Re-Os 同位素体系封闭性较好,受后期改造很弱,应能比较准确地测定成矿时代。Re-Os 定年早期的研究对象为辉钼矿,随着近年来测试技术的进步,一些含有极微量 Re、Os 的硫化物也被许多学者用于 Re-Os 定年,Re-Os 同位素体系也被认为是铜镍硫化物矿床定年的重要手段^[10-12],虽然 Re-Os 同位素定年在铜镍硫化物矿床得到广泛应用,但也存在诸多争议^[13-14]。

本次选用新一代具有高精度、高灵敏度的热电离质谱仪 TRITON 对 1 号岩体和 2 号岩体的浸染状矿石进行 Re-Os 同位素测定,获得 1 号岩体浸染状矿石的等时线年龄为 (237.0 ± 16.0) Ma,该年龄与张广良等^[15]运用高精度锆石 SHRIMP U-Pb 所获得的辉长岩年龄 (216.0 ± 5.0) Ma 相比明显偏老。红旗岭矿床为典型的岩浆熔离型矿床,若将本次获得的 1 号岩体浸染状矿石的 Re-Os 等时线作为其成矿年龄,显然与客观事实相悖。在前人的研究工作中也曾出现过类似情况,如:Horan 等^[16]所获得的美国 Stillwater 矿床橄榄岩带的 H 单元铬铁矿的 Re-Os 等时线年龄(约为 2 900.0 Ma)明显比矿床形成年龄(2 700.0 Ma 左右)偏大;Yang 等^[17]所获得金川镍矿浸染状矿石的 Re-Os 等时线年龄 $((1 126.0 \pm 96.0)$ Ma)同样大于其岩体的形成年龄(约 837.0 Ma);李华芹等^[18]所获得的新疆坡北 10 号岩体浸染状矿石 Re-Os 等时线年龄 $((413.0 \pm 20.0)$ Ma)也明显大于其岩体形成时代 $((289 \pm 13)$ Ma)。而 2 号岩体浸染状矿石的 Re-Os 等时线年龄 $((215.0 \pm 24.0)$ Ma)则与其岩体中辉长岩的高精度锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $((212.2 \pm 2.6)$ Ma)较为接近,也与前人对 7 号岩体块状矿石的 Re-Os 等时线年龄 $((208.0 \pm 21.0)$ Ma)在误差范围内一致。上述年龄对比可以发现,浸染状矿石的 Re-Os 等时线年龄与对应岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄并不总是一致的,并且相同的矿石类型也可能给出不同的等时线年龄,有些可能与岩体的形成年龄较为接近,另外一些则与岩体的形成年龄具有一定的偏差。之所以浸染状矿石 Re-Os 同位素年龄会出现“假等时线年龄”,前人的研究中多数将其归结于地壳物质混染所引起的 Os 同位素不均一^[14,18]。而本次研究发现,1 号、2 号岩体浸染状矿石的初始¹⁸⁷

Os/¹⁸⁸Os 值分别为 0.215 ± 0.043 和 0.302 ± 0.089 , γ_{Os} 值分别为 67.5~155.8 和 113.9~206.9,表明均遭受了一定程度的地壳混染,并且 2 号岩体 γ_{Os} 值反映其地壳物质加入更多,但 2 号岩体的 Re-Os 等时线年龄却与其岩体的年龄更为接近。因此,地壳物质混染可能并非是导致 Re-Os 同位素出现假等时线年龄的根本原因。在本次测试样品中:1 号岩体浸染状矿石的 Ni 的平均品位为 0.24%,最高可达 0.65%,S 的平均质量分数为 0.51%,最大值为 1.28%;2 号岩体浸染状矿石的 Ni 的平均品位为 0.11%,最大值为 0.31%,S 的平均质量分数为 0.21%,最大值为 0.71%。结合光片和薄片的鉴定显示:1 号岩体浸染状矿石的硫化物含量普遍高于 2 号岩体,在矿石的结构上较为接近。因此矿石的硫化物含量和矿石结构也不是假等时线年龄出现的原因,对于假等时线年龄出现的原因仍需深入研究,藉此也希望引起广大学者的关注。综上所述,浸染状矿石的 Re-Os 等时线年龄存在着不确定性,应慎重使用。在判断其是否可作为成矿年龄时,应当结合矿床类型、成矿过程以及成岩年龄来综合判断。

4.2 成矿物质来源与地壳混染示踪

Re-Os 同位素体系是硫化物矿床形成的强有力的示踪剂和成矿过程中地壳物质混入程度的高灵敏度的指示剂^[19-20]。岩浆成因的 Cu-Ni 硫化物矿床中因普遍富含铂族元素而被认为其成矿物质来源于地幔;但近年来的 Re-Os 同位素研究表明:该类矿床的成矿物质可能完全来自于地幔,或者多数情况下是壳-幔混合来源,甚至可能完全来自地壳。也就是说,此前认为由幔源物质形成的该类矿床多数成矿过程中均有不同比例的地壳物质参与^[21]。本次研究的 2 号岩体浸染状矿石¹⁸⁷Re 与¹⁸⁸Os 初始比值与前人获得的 7 号岩体块状矿石的¹⁸⁷Re 与¹⁸⁸Os 初始比值 (0.315 ± 0.050) 十分接近,且 2 号岩体和 7 号岩体的¹⁸⁷Re 与¹⁸⁸Os 初始比值明显高于 1 号岩体。总体上,红旗岭铜镍硫化物矿床的¹⁸⁷Re 与¹⁸⁸Os 初始比值高于成矿物质完全源于地幔的 Kambalda 铜镍硫化物矿床的¹⁸⁷Re 与¹⁸⁸Os 初始比值 $(0.108 89 \pm 0.000 35)$ ^[22],明显低于成矿物质来源于地壳的加拿大 Sudbury 铜镍硫化物矿床的¹⁸⁷Re 与¹⁸⁸Os 初始比值 (8.73 ± 0.37) ^[23],高于富集地幔(EMI)中¹⁸⁷Re 与¹⁸⁸Os 值 (0.152) ,各类地幔中的最大值^[24],但远低于平均大陆地壳¹⁸⁷Re 与¹⁸⁸Os 值 (3.63) ^[25]。上述特征对比均表明红旗岭铜镍硫化物矿

床的成矿物质可能为壳-幔混合来源。

γ_{Os} 是指示地壳物质加入成矿体系的一个重要参数^[26]。由于地壳相对富 Re, 所以, 混入的地壳物质愈多, 产生的放射性¹⁸⁷Os 含量就越高, 反映在 γ_{Os} 上正值愈大; 而 Re 的亏损则导致 γ_{Os} 为负值^[27-28]。红旗岭矿床 1 号岩体浸染状矿石的 γ_{Os} 值为 67.5~155.8, 均值为 122.4, 2 号岩体浸染状矿石的 γ_{Os} 值为 113.9~206.9, 均值为 153.7, 与 7 号岩体的块状矿石的 γ_{Os} 值(137~161, 均值为 150.5)相比, 1 号岩体 γ_{Os} 值反映的混染程度稍小, 而 2 号岩体的 γ_{Os} 值与 7 号岩体相当。与世界上典型的铜镍硫化物矿床相比, 红旗岭矿床的 γ_{Os} 值与芬兰 Kevitsa 矿床(γ_{Os} 值为 130~170, 地壳 Os 混入比例 <30%) 较为接近^[29], 但明显低于加拿大 Sudbury 矿床(γ_{Os} 值为 430~814, 地壳 Os 混入比例 <50%)^[23]。由此可见, 红旗岭矿床中的 Os 可能主要以幔源为主, 同时有一定量的壳源 Os 加入, 壳源 Os 所占比例为 20%~30%, 地壳物质的加入也可能是促使岩浆熔离成矿的重要因素。

硫同位素组成是硫化物矿床硫来源的直接指示剂。红旗岭铜镍硫化物矿床 12 件不同类型矿石中黄铜矿和镍黄铁矿的硫同位素分析数据显示, 红旗岭矿床中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值为 -2.2‰~0.9‰, 平均值为 -0.7‰, 极差为 3.1‰, 变化范围较窄, 基本接近于 0, 硫源较为均一, 并且与幔源硫 $\delta^{34}S$ 值较为接近(约为 $0 \pm 2\%$)^[30], 表明红旗岭铜镍硫化物矿床的 $\delta^{34}S$ 值具有地幔硫的特点。已有研究表明: 有些铜镍硫化物矿床硫化物的 $\delta^{34}S$ 值偏离 0 显示出较高的正值, 且极差较大, 如俄罗斯的 Noril'sk ($\delta^{34}S$ 为 4.9‰~10.6‰)、Talnakh ($\delta^{34}S$ 为 2.7‰~16.3‰)、Oktyabri'skiy ($\delta^{34}S$ 为 7.1‰~19.0‰) 以及中国的煎茶岭 ($\delta^{34}S$ 为 6.1‰~13.2‰)、力马河 (1.5‰~13.2‰) 等硫化物矿床, 它们的硫同位素与地幔硫具有明显的差别, 均表明有来自地壳的次生硫的加入^[31]; 也有一些硫化物矿床的硫同位素特征与红旗岭矿床相似, 如加拿大的 Sudbury ($\delta^{34}S$ 为 0.2‰~2.5‰) 以及中国的金川 (-1.1‰~2.5‰)、喀拉通克 ($\delta^{34}S$ 为 -1.02‰~1.84‰)、香山 ($\delta^{34}S$ 为 -0.79‰~2.78‰) 等硫化物矿床, 它们硫同位素均具有地幔硫的特点^[32-35], 但是前人研究中证明这些矿床的成矿过程中均有地壳物质的加入^[23, 36-38]。因此, 硫同位素的特征可以对硫化物来源具有一定的示踪作用, 但很多时候不具备独立示踪的能力。

4.3 矿床成因讨论

成矿岩浆中硫饱和促使硫化物熔体从硅酸盐岩浆中熔离出来是岩浆铜镍硫化物矿床成矿的关键^[39]。许多因素可能促使幔源成矿岩浆中硫饱和, 产生不混溶, 使得硫化物因重力下沉而最终成矿。如岩浆快速冷却、岩浆的分异结晶作用、岩浆混合作用以及地壳同化混染等都能促使成矿岩浆中硫饱和^[40]。Keays^[41] 提出如果在岩浆演化中硫过早地处于饱和状态而发生下沉, 则会由于 Cu、Ni 含量太低, 继而不可能形成有经济价值的矿床。红旗岭铜镍硫化物矿床的 1 号、2 号和 7 号含矿岩体均有良好的岩相分异, 岩相间为渐变过渡关系, 岩体由上至下基性程度依次增高, 同时岩相中矿物结晶粒度较大, 均为同源岩浆结晶分异的产物, 说明岩浆快速冷却这一因素对成矿的影响很小。而岩浆的分异结晶作用和岩浆混合作用对成矿的影响在红旗岭矿床的以往研究中已得到证实^[42], 在此不再赘述。红旗岭主要成矿岩体(7 号、1 号、2 号)均具有较明显的壳源 Os 的混入, 因此地壳混染也可能是引起含矿岩浆发生不混溶作用而导致成矿的重要原因。综上所述, 岩浆快速冷却对红旗岭铜镍硫化物矿床的成矿作用贡献不大, 而岩浆结晶分异作用、岩浆混合作用以及地壳物质混染才是含矿岩浆硫饱和和促使不混溶作用发生而最终成矿的诱因。

综上所述, 红旗岭铜镍硫化物矿床成因主要为含矿母岩浆在上地幔高度部分熔融, 在上升和分异演化过程中, 有一定量的地壳物质加入到岩浆和成矿系统中; 而地壳物质的加入引发硫饱和, 从而引发不混溶作用, 形成富硫化物的矿浆, 继而向上侵位形成大型铜镍硫化物矿床。

5 结论

1) 对红旗岭矿床 1 号岩体和 2 号岩体浸染状矿石的 Re-Os 同位素测定结果表明, 浸染状矿石的 Re-Os 等时线年龄与对应岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄并不总是一致的, 并且相同的矿石类型也可能给出不同的等时线年龄, 有些可能与岩体的形成年龄较为接近, 另外一些则与岩体的形成年龄具有一定的偏差。1 号岩体和 2 号岩体 γ_{Os} 值的对比表明, 地壳物质混染并非是导致 Re-Os 同位素出现假等时线年龄的根本原因。

2) 红旗岭 1 号岩体和 2 号岩体浸染状矿石的 ¹⁸⁷Re 与 ¹⁸⁸Os 初始比值和 γ_{Os} 值的特点表明, 红旗岭

铜镍硫化物矿床的成矿物质可能为壳-幔混合来源, Os 主要来源于地幔,同时有一定量的壳源 Os 的加入,壳源 Os 所占比例为 20%~30%。

3) 岩浆快速冷却对红旗岭铜镍硫化物矿床的成矿作用贡献不大,而岩浆结晶分异作用、岩浆混合作用以及地壳物质混染才是含矿岩浆硫饱和促使不混熔作用发生而最终成矿的诱因。红旗岭铜镍硫化物矿床成因主要为含矿母岩浆在上地幔高度部分熔融,在上升和分异演化过程中,有一定量的地壳物质加入到岩浆和成矿系统中;而地壳物质的加入引发硫饱和,从而引发不混熔作用,形成富硫化物的岩浆,继而上侵定位形成大型铜镍硫化物矿床。

参考文献 (References):

- [1] 杨言辰, 孙德有, 马志红, 等. 红旗岭镁铁—超镁铁岩侵入体及铜镍硫化物矿床的成岩成矿机制[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2005, 35(5): 593-600.
Yang Yanchen, Sun Deyou, Ma Zhihong, et al. The Forming Mechanisms of Hongqiling Mafic and Ultramafic Intrusive Bodies and Cu-Ni Sulfide Deposits [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(5): 593-600.
- [2] Xi Aihua, Ge Yuhui, Cai Yuanfeng, et al. Magnetic Mineralogy of the Hongqiling Cu-Ni Sulphide Deposit: Implications for Ore Genesis[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(10): 1192-1198.
- [3] 刘金玉, 郝爱华, 葛玉辉, 等. 红旗岭 3 号含矿岩体地质年龄及其岩石学特征[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2010, 40(2): 321-326.
Liu Jinyu, Xi Aihua, Ge Yuhui, et al. Mineralization Age of the No. 3 Ore-Bearing Intrusion and Its Petrological Significance in Hongqiling Cu-Ni Sulfide Deposits, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(2): 321-326.
- [4] 冯光英, 刘燊, 冯彩霞, 等. 吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1594-1606.
Feng Guangying, Liu Shen, Feng Caixia, et al. Zircon U-Pb Age, Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry and the Petrogenesis of the Ultramafic Pluton in Hongqiling, Jilin Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1594-1606.
- [5] 赵新运, 郝立波, 陆继龙, 等. 红旗岭矿床茶尖矿区铂族元素地球化学特征及其意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2013, 43(3): 748-757.
Zhao Xinyun, Hao Libo, Lu Jilong, et al. Geochemical Characteristics and Significance of Platinum Group Elements of Mafic Intrusions in Chajian Ore District in Hongqiling Deposit[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(3): 748-757.
- [6] 郝立波, 孙立吉, 赵玉岩, 等. 吉林红旗岭镍矿田茶尖岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其意义[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2013, 38(2): 233-240.
Hao Libo, Sun Liji, Zhao Yuyan, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Chajian Mafic-Ultramafic Rocks in Hongqiling Mine Field, Jilin Province, and Its Implications [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(2): 233-240.
- [7] 郝立波, 孙立吉, 赵玉岩, 等. 吉林红旗岭 2 号岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2012, 42(增刊 3): 166-178.
Hao Libo, Sun Liji, Zhao Yuyan, et al. The No. 2 Mafic-Ultramafic intrusion SHRIMP U-Pb Zircon Dating and Its Geological Significance in Hongqiling Area of Jilin Province, China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(Sup. 3): 166-178.
- [8] Lü Linsu, Mao Jingwen, Li Hongbo, et al. Pyrrhotite Re-Os and SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Hongqiling Ni-Cu Sulfide Deposits in Northeast China [J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43: 106-119.
- [9] Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, et al. Os, Nd and Pb Isotope Systematics of Southern African Peridotite Xenoliths: Implications for the Chemical Evolution of Subcontinental Mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53: 1583-1595.
- [10] Mao Jingwen, Yang Jianmin, Qu Wenjun, et al. Re-Os Age of Cu-Ni Ores from the Huangshandong Cu-Ni Sulfide Deposit in the East Tianshan Mountains and Its Implication for Geodynamic Processes [J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2003, 77(2): 220-226.
- [11] 王瑞廷, 赫英, 王东生, 等. 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[J]. 地质论评, 2003, 49(2): 205-211.
Wang Ruiting, He Ying, Wang Dongsheng, et al. Re-Os Isotope Age and Its Application to the Jianchaling Nickel-Copper Sulfide Deposit, Lueyang, Shaanxi Province [J]. Geological Review, 2003, 49(2): 205-211.
- [12] 杨胜洪, 陈江峰, 屈文俊, 等. 金川铜镍硫化物矿床

- 的 Re-Os“年龄”及其意义[J]. 地球化学, 2007, 36(1): 27-36.
- Yang Shenghong, Chen Jiangfeng, Qu Wenjun, et al. Re-Os “Ages” of Jinchuan Copper-Nickel Sulfide Deposit and Their Significance [J]. Geochimica, 2007, 36(1): 27-36.
- [13] 杨刚, 杜安道, 卢记仁, 等. 金川镍-铜-铂矿床块状硫化物矿石的 Re-Os(ICP-MS)定年[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(3): 241-245.
- Yang Gang, Du Andao, Lu Jiren, et al. Re-Os Isotopic Age Dating of Cu-Ni-PGE Sulfide Deposit from Jinchuan Area, Gansu Province, China [J]. Science in China: Series D, 2005, 35(3): 241-245.
- [14] 屈文俊, 陈江峰, 杜安道, 等. Re-Os 同位素定年对岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床成矿时代的制约[J]. 矿床地质, 2012, 31(1): 151-160.
- Qu Wenjun, Chen Jiangfeng, Du Andao, et al. Re-Os Dating: Constraints on Mineralization Age of Magmatic Cu-Ni Sulfide Ore Deposit [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(1): 151-160.
- [15] 张广良, 吴福元. 吉林红旗岭地区造山后镁铁-超镁铁岩体的年代测定及其意义[J]. 地震地质, 2005, 27(4): 600-608.
- Zhang Guangliang, Wu Fuyuan. Geochronology Significances of the Postorogenic Mafic-Ultramafic Rocks in Hongqiling Area of Jilin Province, NE China [J]. Seismology and Geology, 2005, 27(4): 600-608.
- [16] Horan M F, Morgan J W, Walker R J, et al. Re-Os Isotopic Constraints on Magma Mixing in the Peridotite Zone of the Stillwater Complex, Montana, USA [J]. Contrib Mineral Petrol, 2001, 141: 446-457.
- [17] Yang Gang, Du Andao, Lu Jiren, et al. Re-Os (ICP-MS) Dating of the Massive Sulfide Ores from the Jinchuan Ni-Cu-PGE Deposit [J]. Science in China: Series D, 2005, 48(10): 1672-1677.
- [18] 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 等. 新疆坡北基性-超基性岩带 10 号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 633-642.
- Li Huaqin, Mei Yuping, Qu Wenjun, et al. SHRIMP Zircon U-Pb and Re-Os Dating of No. 10 Intrusive Body and Associated Ores in Pobei Mafic-Ultramafic Belt of Xinjiang and Its Significance [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 633-642.
- [19] Lambert D D, Foster J G, Frick L R, et al. Re-Os Isotopic Systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co Magmatic Ore System, Labrador, Canada [J]. Lithos, 1999, 47: 69-88.
- [20] 毛景文, 张光弟, 杜安道, 等. 遵义黄家湾镍铂族元素矿床地质、地球化学和 Re-Os 同位素年龄测定: 兼论华南寒武系底部黑色页岩多金属成矿作用[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 234-243.
- Mao Jingwen, Zhang Guangdi, Du Andao, et al. Geology, Geochemistry, and Re-Os Isotopic Dating of the Huangjiawan Ni-Mo-PGE Deposit, Zunyi, Guizhou Province; With a Discussion of the Polymetallic Mineralization of Basal Cambrian Black Shales in South China [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 234-243.
- [21] 蒋少涌, 杨竟红, 赵葵东, 等. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2000, 36(6): 669-677.
- Jiang Shaoyong, Yang Jinghong, Zhao Kuidong, et al. Re-Os Isotope Tracer and Dating Methods in Ore Deposits Research [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2000, 36(6): 669-677.
- [22] Foster J G, Lambert D D, Frick L R. Re-Os Isotopic Evidence for Genesis of Archaean Nickel Ores from Uncontaminated Komatiites [J]. Nature, 1996, 382: 703-706.
- [23] Walker R J, Morgan J W, Naldertt A J, et al. Re-Os Isotope Systematics of Ni-Cu Sulfide Ores, Sudbury Igneous Complex, Ontario; Evidence for a Major Crustal Component [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 105: 416-429.
- [24] Shirey S B, Walker R J. The Re-Os Isotope System in Cosmochemistry and High-Temperature Geochemistry [J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 1998, 26: 423-500.
- [25] Ripley E M, Lambert D D, Frick L R. Re-Os, Sm-Nd and Pb Isotopic Constraints on Mantle and Crustal Contributions to Magmatic Sulfide Mineralization in the Duluth Complex [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62: 3349-3365.
- [26] Walker R J, Morgan J W, Horan M F, et al. Re-Os Isotopic Evidence for an Enriched Mantle Source for the Noril'sk-Type, Orebearing Intrusions, Siberia [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58: 4179-4197.
- [27] 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 等. 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[J]. 矿床地质, 2002, 21(4): 323-330.

- Mao Jingwen, Yang Jianmin, Qu Wenjun, et al. Re-Os Dating of Cu-Ni Sulfide Ores from Huangshandong Deposit in Xinjiang and Its Geodynamic Significance [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(4):323-330.
- [28] Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, et al. Re-Os Dating of the Kalatongke Cu-Ni Deposit, Altay Shan, NW China, and Resulting Geodynamic Implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 32: 452-468.
- [29] Sproule R A, Lambert D D, Hoatson D M. Re-Os Isotopic Constraints on the Genesis of the Sally Malay Ni-Cu-Co Deposit, East Kimberley, Western Australia[J]. *Lithos*, 1999, 47:89-106.
- [30] Ripley E M, Li C S. Applications of Stable and Radiogenic Isotopes to Magmatic Cu-Ni -PGE Deposits: Examples and Cautions[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5):124-131.
- [31] 杨合群. 金川铜镍矿床硫同位素地球化学[J]. *西北地质*, 1989 (2): 20-23.
Yang Hequn. Sulfur Isotope Geochemistry of Jinchuan Copper-Nickel Sulfide Deposit, Gansu Province, China [J]. *Northwestern Geology*, 1989 (2):20-23.
- [32] 格里年科. 硫同位素地球化学[M]. 赵瑞,译. 北京: 科学出版社, 1980.
Grinenko V A. Sulfur Isotope Geochemistry [M]. Translated by Zhaorui. Beijing: Science Press, 1980.
- [33] 傅德彬. 吉林赤柏松硫化铜-镍矿床的矿浆成因模式 [J]. *地质学报*, 1994, 68(2):142-157.
Fu Debin. A Genetic Model for Ore Magma of the Chibaisong Copper-Nickel Sulphide Deposit, Jilin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(2):142-157.
- [34] 杨合群, 汤中立, 苏犁, 等. 金川硫化铜镍矿床成矿岩浆性质和源区特征讨论[J]. *甘肃地质学报*, 1997, 6(1):44-52.
Yang Hequn, Tang Zhongli, Su Li, et al. Discussion on Characters of Minerogenic Magma and Source Area in Jinchuan Cu-Ni Sulfide Deposit [J]. *Acta Geologica Gansu*, 1997, 6(1):44-52.
- [35] 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 中国新疆铜矿床和镍矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. Copper Deposits and Nickel Deposits, Xinjiang Province, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [36] 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 等. 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 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(4):285-293.
Zhang Zuoheng, Chai Fengmei, Du Andao, et al. Re-Os Dating and Ore-Forming Material Tracing of the Karatungk Cu-Ni Sulfide Deposit in Northern Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(4): 285-293.
- [37] 李月臣, 赵国春, 屈文俊, 等. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定 [J]. *岩石学报*, 2006, 22 (1):245-251.
Li Yuechen, Zhao Guochun, Qu Wenjun, et al. Re-Os Isotopic Dating of the Xiangshan Deposit, East Tianshan, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 245-251.
- [38] 解广轰, 汪云亮, 范彩云, 等. 金川超镁铁岩侵入体及超大型硫化物矿床的成岩成矿机制 [J]. *中国科学: D 辑*, 1998, 28(增刊):31-36.
Xie Guanghong, Wang Yunliang, Fan Caiyun, et al. The Rock-and Ore-Forming Mechanism of Mafic-Ultramafic Intrusions and Super Large Sulfide Deposit in Jinchuan Area[J]. *Science in China: Series D*, 1998, 28(Sup.):31-36.
- [39] Naldrett A J. World-Class Cu-Ni-PGE Deposits: Key Factors in Their Genesis [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34: 227-240.
- [40] 贾志永, 张铭杰, 汤中立, 等. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程 [J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 673-686.
Jia Zhiyong, Zhang Mingjie, Tang Zhongli, et al. Petrogenesis of Kalatongke Cu-Ni Sulfide Deposit in Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28 (5): 673-686.
- [41] Keays R R. The Role of Komatiitic and Picritic Magmatism and S-Saturation in the Formation of Ore Deposits [J]. *Lithos*, 1995, 34:1-18.
- [42] 吕林素, 毛景文, 周振华, 等. 吉林红旗岭 1 号和 7 号岩体中含矿超镁铁质岩的矿物化学特征: 对岩浆演化过程以及铜镍硫化物矿床形成机制的约束 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(1):319-344.
Lü Linsu, Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, et al. Mineral Chemistry of Ore-Bearing Ultramafic Rocks from the Hongqiling Nos. 1 and 7 Intrusions in Jilin Province: Constraints on the Magmatic Processes and the Metallogenesis of Ni-Cu Sulfide Deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1):319-344.