

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿过程稀有气体同位素组成示踪^{*}

胡沛青¹ 张铭杰^{1**} 汤庆艳¹ 叶先仁² 汤中立¹ 李文渊³

HU PeiQing¹, ZHANG MingJie^{1**}, TANG QingYan¹, YE XianRen², TANG ZhongLi¹ and LI WenYuan³

1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

2. 中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究重点实验室, 兰州 730000

3. 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 西安 710054

1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, MOE, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Key Laboratory of Petroleum Resource Research, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Lanzhou 730000, China

3. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Xi'an 710054, China

2009-08-07 收稿, 2010-05-17 改回.

Hu PQ, Zhang MJ, Tang QY, Ye XR, Tang ZL and Li WY. 2010. Noble gas isotopic constrains on mineralization of the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit, West China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11):3375-3386

Abstract Noble gases are recognized as being exceptional tracers of volatile sources during mineralization. He, Ne and Ar abundances and isotopic compositions from 23 silicate and sulfide separates in the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit, West China, have been investigated by melting extraction MM5400 mass spectrometer. The results show that $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in silicate minerals (av. 0.239Ra) are slightly lower than those in sulfide (av. 0.456Ra), and decrease from olivine (av. 0.291Ra), orthopyroxene (av. 0.215Ra) to clinopyroxene (av. 0.174Ra). $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ and $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ ratios are plotted into the ranges between MORB line and continental crust line. $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ of olivine (Olv) and orthopyroxene (Opx) deducted by radiogenic He* and Ne* are close to the He and Ar isotopic ranges of subcontinental lithosphere mantle (SCLM). He, Ne and Ar isotopic compositions suggested that SCLM, continental crust (CC) and air saturated water (ASW) three end-members were involved into ore-forming magma of the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit. The segregation of immiscible sulfide liquid from magma took place at the early stage of magma evolution. The primary ore-forming magma had been formed by partial melting of SCLM, and undergone two stages of evolution. It had been assimilated possibly with wall rock which resulted in the sulfur supersaturating in silicate magma and segregation of immiscible sulfide melt and formed a mixed component (MC) with SCLM and continental crust (CC) signatures. The mixed component (MC) emplaced into upper chamber and mixed with a high proportion of deep circulatory ASW which induced sulfur supersaturating of ore-forming magma and in-situ formed the disseminated ore in upper magma chamber.

Key words Volatile sources; Noble gas isotope; Ultramafic intrusion; Cu-Ni-PGE sulfide deposit; Jinchuan

摘要 稀有气体同位素在示踪成矿作用流体来源方面具有独特优势。本文应用熔融质谱法测定了金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 23 个硅酸盐矿物和金属硫化物单矿物的 He、Ne 和 Ar 丰度和同位素组成。结果表明, 硅酸盐矿物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 (0.239Ra) 略低于硫化物 (平均 0.456Ra), 且从橄榄石 (平均 0.291Ra)、斜方辉石 (0.215Ra) 到单斜辉石 (0.174Ra) 逐渐降低, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ - $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 分布于 MORB 与大陆地壳演化线之间, 扣除放射性成因 $^4\text{He}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 后橄榄石和辉石中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 接近岩石圈地幔组成。He、Ne 和 Ar 同位素组成示踪表明成矿岩浆中存在岩石圈地幔 (SCLM)、地壳 (CC) 和大气饱

* 本文受国家深部探测技术与实验研究专项 (201011058)、国家自然科学基金 (40772058、40534020、40873005、40573012、40772062)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (NECT-04-0980)、国家科技支撑计划专题《金川含铜镍岩体形成特点及外围岩体地质对比》和中国科学院西部之光联合资助。

第一作者简介: 胡沛青, 女, 1972 年生, 博士, 副教授, 同位素地球化学专业, E-mail: hupq@lzu.edu.cn

** 通讯作者: 张铭杰, E-mail: mjzhang@lzu.edu.cn

和流体(ASW)三种端元成分,硫化物熔体的分离发生在岩浆结晶分异的早期。岩石圈地幔部分熔融形成的成矿初始岩浆经历了两阶段的演化。在深部岩浆房高温成矿岩浆同化围岩引入地壳混染组分,促使硫饱和及硫化物熔体的熔离,同时形成具有壳幔混合特征的混合岩浆组分(MC),上升至上部岩浆房后混入较高比例的大气饱和和流体,进一步促使硫饱和及浸染状硫化物就地熔离堆积。

关键词 成矿过程示踪;稀有气体同位素;超镁铁质侵入体;Cu-Ni-PGE 硫化物矿床;金川

中图法分类号 P597; P611

1 引言

镁铁-超镁铁质岩中赋存的铜-镍-铂族元素(PGE)硫化物矿床是Cu-Ni-PGE资源的重要成矿类型,成矿岩浆主要为科马提质和玄武质岩浆。其中与玄武质岩浆相关的Noril'sk、Sudbury和金川等三个世界级超大型Cu-Ni-PGE硫化物矿床镍资源总量估计高达 0.38×10^8 t,约占世界上该类矿床已知资源总量(含PGE)的73%(Naldrett, 1998, 2004)。Sudbury和Noril'sk矿床是赋存在大型超镁铁质岩体中的多个小矿床组成的矿群,而铜镍资源量居世界第三的金川超大型Cu-Ni-PGE硫化物矿床由一个单独的大矿床组成,含矿岩体极小($6.5 \times 0.3 \text{ km}^2$,最大延深1km),具有极高的硫化物与硅酸盐比率和独特的成矿作用(汤中立和李文渊, 1995; De Waal *et al.*, 2004; Song *et al.*, 2006, 2009)。

Cu-Ni-PGE硫化物超大规模成矿作用中,巨量硫化物从硅酸盐熔体中熔离需要大量的硫,由于硅酸盐熔体中硫的溶解度与压力负相关,深部硫饱和的成矿岩浆上升过程中将不再饱和(Wendlandt, 1982; Mavrogenes and O'Neill, 1999),因此外来硫或壳源流体的补充是Cu-Ni-PGE硫化物超大型矿

床形成的关键因素(Naldrett, 1998, 2004; 贾志永等, 2009; 宋谢炎等, 2009; 胡沛青等, 2010)。Noril'sk矿床硫化物的巨量堆积与成矿岩浆和围岩硫的同化作用有关(Li *et al.*, 2003),Duluth和Voisey's Bay超大型Ni-Cu硫化物矿床均有大量的壳源硫加入(Andrews and Ripley, 1989; Ryan *et al.*, 1995; Ripley *et al.*, 1999)。金川Cu-Ni-PGE硫化物矿床微量元素和Nd-Pb-Os同位素显示其形成过程中经历了一定程度的地壳混染(张宗清等, 2004; Li *et al.*, 2005; Ripley *et al.*, 2005; Song *et al.*, 2006, 2009);但硫同位素组成($\delta^{34}\text{S} = -2\text{‰} \sim +2\text{‰}$)位于地幔硫同位素范围(Ripley *et al.*, 2005; 田毓龙等, 2009),因此金川Cu-Ni-PGE硫化物矿床形成过程中是否有壳源硫或流体的加入需要进一步的资料证明。

化学惰性的稀有气体在地球不同储库的含量低并具完全不同的同位素组成(Allegre *et al.*, 1987; Honda *et al.*, 1993; 张铭杰等, 2000; Ozima and Podosek, 2002),在不同成因矿床示踪成矿流体来源、熔体分离和矿体来源等方面具有独特优势(Hu *et al.*, 1998, 2004; 侯增谦等, 1999; Sun *et al.*, 1999, 2004; 李延河等, 2001; 毛景文等, 2006; 翟伟等, 2006)。金川Cu-Ni-PGE硫化物矿床地表全岩样品稀有气体同位素组成示踪成矿过程无法剔除蚀变等过程的影响(史基

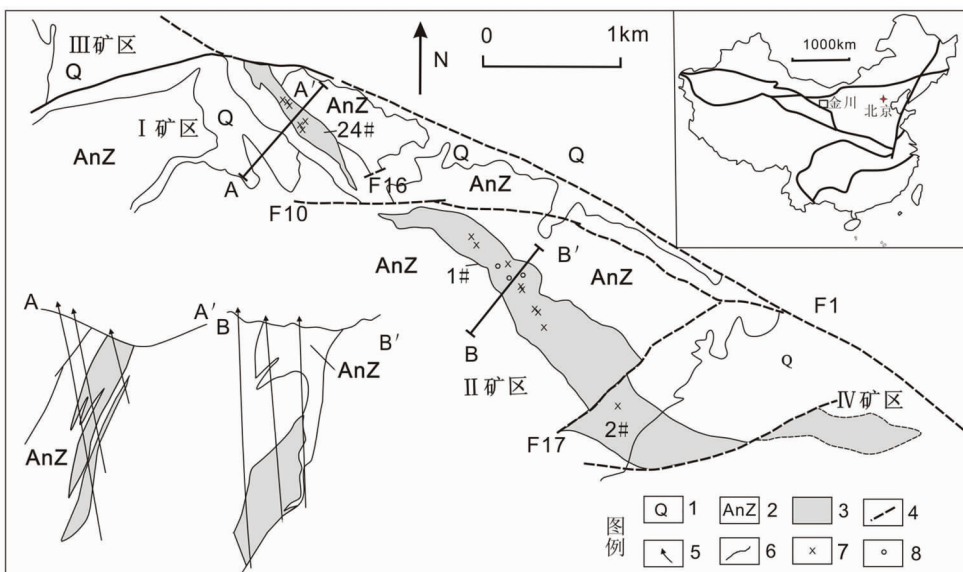


图1 金川Cu-Ni-PGE硫化物矿床地质简图及采样位置示意图(据汤中立和李文渊, 1995修改)

1-第四系;2-前寒武系;3-岩体;4-断层;5-钻孔;6-地层界限;7-钻孔岩心样品;8-坑道样品

Fig. 1 Sketch geological map and sampling localities of the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit (after Tang and Li, 1995)

安等, 2005)。本文在金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床不同矿区和矿体中的地下采矿区和钻孔岩心中采集新鲜的二辉橄榄岩、橄长岩和辉石岩及块状和浸染状矿石等样品, 分选出硅酸盐和金属硫化物单矿物样品, 分析 He、Ne 和 Ar 同位素组成, 结合混合模型计算、示踪成矿作用过程中流体的来源。

2 地质概况

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床赋矿超镁铁质岩体位于阿拉善地块西南缘的龙首山隆起, 呈 NW-SE 向不整合侵入于前长城系白家嘴子组 (AnZ) 大理岩、片麻岩及少量混合花岗岩中 (图 1)。超镁铁质侵入体锆石-斜锆石 U-Pb 年龄为 831Ma (Li *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2010), 硫化物 Re-Os 同位素年龄为 833Ma (Yang *et al.*, 2008)。含矿岩体主要由富橄榄石和铬铁矿的二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩、橄长岩、橄二辉岩和二辉岩组成。主要矿物为橄榄石、斜方辉石和单斜辉石, 其中橄榄石为自形-浑圆状, 辉石中有微晶包裹体 (图 2)。岩体经历不同程度的蛇纹石化、磁铁矿化、绿泥石化和阳起石化等 (Ripley *et al.*, 2005)。大多数硫化物富集的橄长岩蚀变强烈, 但贫硫化物的二辉橄榄岩中保存着新鲜的橄榄石和辉石等岩浆矿物。

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床从西到东依次分为 III、I、II 和 IV 矿区, 其中 I 和 II 矿区包含 24#、1# 和 2# 三个主要矿体 (图 1), 由块状、网状和浸染状硫化物矿石组成, 矿石矿物

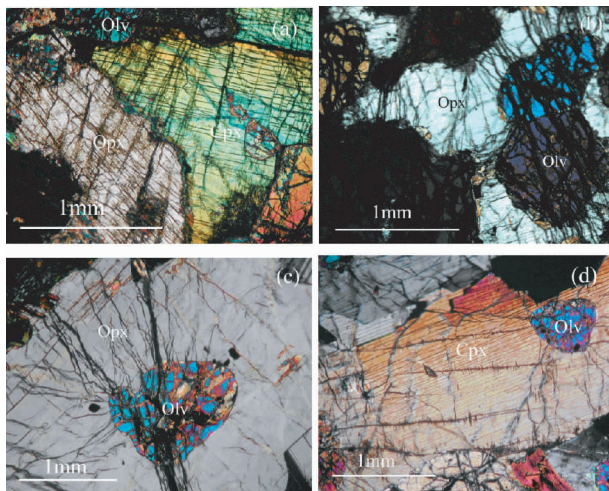


图 2 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床超镁铁质岩样品正交偏光显微照片

(a) 二辉橄榄岩 (样品 E22-05), 斜方辉石与单斜辉石间锯齿状接触; (b) 二辉橄榄岩 (样品 E23-11), 斜方辉石充填于橄榄石自形晶粒间; (c) 中粗粒二辉橄榄岩 (样品 E22-08), 局部见包橄结构; (d) 二辉橄榄岩 (样品 E25-16)

Fig. 2 The micrographs of ultramafic rocks in the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit

主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿等, 呈网状和浸染状分布于富橄榄石的岩石中, 最主要的原生硫化物组合为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿。24# 和 1# 矿体较富铜, 多处发育铂族金属富集体, 各类型矿石的铂族元素含量也较高, 轻重稀土的分馏程度低; 2# 矿体 Ni/Cu 比值最大, 含铜低, 轻重稀土的分馏程度高 (汤中立和李文渊, 1995)。

3 样品及实验

在金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 I 矿区 24# 矿体和 II 矿区的 1# 和 2# 矿体井下采矿区和钻孔 (ZK73, ZK80, ZK87, ZK89 和 ZK80) 岩心中采集新鲜的二辉橄榄岩和辉石岩等不同类型岩石和块状矿石、浸染状矿石样品 50 个 (采样位置见图 1)。在室内薄片岩相学研究的基础上, 选择新鲜的样品 (<10% 蚀变) 粉碎至 0.2 ~ 0.9mm, 在双目体视显微镜下挑选出纯净的橄榄石、斜方辉石和单斜辉石及黄铜矿、镍黄铁矿等主要的原生硫化物单矿物样品 23 个, 样品类型、采样深度及详细的岩石学描述见表 1。分选好的单矿物样品先用 0.03mol/L 的 HCl 浸泡、超声波清洗除去次生碳酸盐和残余蚀变部分, 再用蒸馏水反复冲洗至中性; 然后用 CH₂Cl₂ 超声波清洗除去表面污染有机组分, 最后在 100℃ 烘干后用来测试。

He、Ne 和 Ar 丰度与同位素组成在中国科学院地质地球物理研究所油气资源重点实验室采用加热熔化-MM5400 磁偏转静态真空质谱计测试。熔样用钼坩埚和薄铝箔在 1700℃ 脱气 24h 以降低热空白, 1600℃ 系统热本底值为: $^4\text{He} = 2.46 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{STP}$ (STP-标准状态), $^{20}\text{Ne} = 4.08 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{STP}$, $^{40}\text{Ar} = 1.39 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{STP}$, 热本底同位素组成接近于空气值。约 500mg 样品包裹于薄铝箔中, 放进真空抽提线样品转盘的钼坩埚中, 抽真空至压力小于 1×10^{-5} Pa 时, 同时将气体抽提和净化管线 (由活性炭阱、海绵钛炉、Zr-Al 吸气泵及不锈钢管线组成) 用外加热器 150℃ 焙烤 24h; 加热去气后质谱计主机动态真空 $\leq 4.0 \times 10^{-8}$ Pa, 处理系统真空 $\leq 5.0 \times 10^{-7}$ Pa, 主机本底 $^{36}\text{Ar} \leq 2.2 \times 10^{-18}$ mol, 可脱除样品及系统表面吸附的空气。

把样品加热至 1600℃, 释出的气体送入净化系统, 依次用海绵钛炉 (800℃) 和 Zr-Al 吸气泵 (室温) 净化, 活性炭阱 (液氮温度) 完全吸附 Ar 后关闭活性炭阱。在液氮温度下用烧结型不锈钢滤芯吸附 Ar、Kr 和 Xe 等重稀有气体后进行 He 和 Ne 分析。He 和 Ne 分析完成后抽真空, 将关闭的活性炭阱置于冰水 (恒定的温度点) 中冷却 30mins 解析 Ar, 隔离真空泵, 将析出气扩充至整个处理系统平衡后, 把 Ar 引入质谱计进行 Ar 含量和同位素测试。实验条件: 发射电流 $I_{t_4} = 800 \mu\text{A}$, $I_{t_{40}} = 200 \mu\text{A}$, 高压为 9.000kV。分析过程中采用兰州市皋兰山顶的大气作标样。详细的分析程序和校正方法见 Ye *et al.* (2007)。

表1 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床研究样品及岩石学特征

Table 1 The petrological features of studied samples from the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit

样品号	行号	类型	深度(m)	岩石	矿物	岩石描述
II 矿区						
E11-01b	11	采坑	1118	Lht	Opx	二辉橄榄岩,含浸染状硫化物
E12-02a	12	采坑	1118	Lht	Olv	二辉橄榄岩,含浸染状硫化物;橄榄石,浑圆状,局部见包橄结构;单斜辉石,自形晶
E12-02b					Opx	
E18-19a	18	采坑	1730	Lht	Olv	二辉橄榄岩,橄榄石,自形-浑圆状,局部见包橄结构;斜方辉石,自形晶
E18-19b					Opx	
E22-05b	22	采坑	1118	Lht	Opx	中粗粒二辉橄榄岩,橄榄石,自形-浑圆状;斜方辉石,自形-他形晶
E22-08b		ZK66	968	Lht	Opx	中粗粒二辉橄榄岩,橄榄石,浑圆状,局部见包橄结构;斜方辉石、单斜辉石,自形-浑圆状;含海棉陨铁状硫化物
E23-09b	23	ZK73	972	Lht	Opx	二辉橄榄岩,含浸染状硫化物
E23-11a		ZK73	870	Lht	Olv	二辉橄榄岩,橄榄石,浑圆-自形晶;斜方辉石、单斜辉石,自形-浑圆状;斜长石,自形晶;含浸染状硫化物
E23-11b					Opx	
E23-13b		ZK71	880	Lht	Opx	二辉橄榄岩,海绵陨铁结构
E24-14e	24	采坑	1017	Ore	Cpt	黄铜矿
E25-16a	25	ZK80	974	Lht	Olv	粗粒二辉橄榄岩
E25-16b					Opx	粗粒二辉橄榄岩
E26-17b	26	ZK89	983	Lht	Opx	浸染状中-细粒含矿辉石岩
E26-18a		ZK87	983	Lht	Olv	粗粒二辉橄榄岩,橄榄石,浑圆-自形晶;斜方辉石、单斜辉石,自形-浑圆状
E26-18b					Opx	
E26-18c					Cpx	
II 矿区						
E35-20e	35	采坑	1294	Ore	Pnd	块状特富矿,镍黄铁矿,黄铜矿
I 矿区						
L24-03e	6	采坑	1340	Ore	Cpt	黄铜矿
L21-04em	21	采坑	1345	Ore	Pnd	镍黄铁矿
L21-04es					Cpt	黄铜矿
L24-01c	24	采坑	1340	Pyt	Cpx	辉石岩

Lht-二辉橄榄岩;Pyt-辉石岩;Olv-橄榄石;Opx-斜方辉石;Cpx-单斜辉石;Ore-硫化物矿石;Pnd-镍黄铁矿;Cpt-黄铜矿

4 分析结果

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床超镁铁质岩和矿石组成矿物的 He、Ne 和 Ar 的元素丰度和同位素组成见表 2, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 以 R/Ra 表示 (Ra 为大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, $1\text{Ra} = 1.39 \times 10^{-6}$)。所有分析数据均在系统误差范围之内。

4.1 He 丰度和同位素组成

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床超镁铁质岩和矿石组成矿物中 He 的丰度和同位素组成具有较大的变化范围。 ^4He 含

量变化于 $8.56 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{STP} \cdot \text{g}^{-1} \sim 340 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{STP} \cdot \text{g}^{-1}$ (STP-标准状态,下略),平均 $100.1 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。硅酸盐矿物 ^4He 含量 ($8.36 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \sim 340 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, 平均 $119 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 高于硫化物 ($9.85 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \sim 70.3 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, 平均 $32.12 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), 从橄榄石 (平均 $72.58 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 到斜方辉石 (平均 $151.91 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 有明显的增大。

$^3\text{He}/^4\text{He}$ 变化于 $0.155 \sim 0.807\text{Ra}$, 平均 0.286Ra , 远低于上地幔和大气 (Ra) 的 He 同位素组成 (Allegre *et al.*, 1987; Sarda *et al.*, 1988), 但高于大陆壳的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值 ($n \times 10^{-8}$, Allegre *et al.*, 1987)。硫化物中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 较高, 平均 0.456Ra , 变化于 $0.268 \sim 0.807\text{Ra}$; 而硅酸盐矿物中 $^3\text{He}/^4\text{He}$

表2 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 He、Ne 和 Ar 丰度和同位素组成及误差

Table 2 He, Ne and Ar abundances and isotopic compositions with 1σ error in the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit

样品号	样重 (g)	含量 (× 10 ⁻⁷ cm ³ · STP · g ⁻¹)						同位素比值							
		⁴ He	σ	²² Ne	σ	⁴⁰ Ar	σ	³ He/ ⁴ He (Ra)	σ	²⁰ Ne/ ²² Ne	σ	²¹ Ne/ ²² Ne	σ	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	σ
E12-02a	0.186	9.15	0.65	0.0641	1.0233	158	12	0.200	0.011	10.65	0.09	0.0277	0.0003	476.2	18.5
E23-11a	0.452	84.10	5.70	0.0144	0.1400	576	39	0.299	0.005	9.58	0.20	0.0340	0.0009	5744.0	123.1
E25-16a	0.453	164	11	0.0454	0.4400	1782	121	0.366	0.008	9.04	0.25	0.0329	0.00010	41190.0	2245.3
E26-18a	0.456	97.1	6.5	0.0193	0.1480	1395	95	0.334	0.006	9.31	0.25	0.0277	0.0009	43202.4	3786.6
E18-19a	0.362	8.56	0.59	0.0442	0.6154	98.7	6.6	0.253	0.009	11.37	0.09	0.0280	0.0002	1171.4	71.3
E11-01b	0.431	43.1	3.0	0.0197	0.2769	418	28	0.290	0.009	10.10	0.13	0.0319	0.0005	21399.6	760.2
E12-02b	0.231	37.8	2.5	0.0347	0.3867	602	41	0.269	0.006	10.08	0.15	0.0270	0.0005	7964.2	364.5
E22-05b	0.457	199	14	0.0567	0.6500	1589	107	0.207	0.008	10.05	0.2	0.0322	0.0007	28565.9	651.2
E22-08b	0.352	340	23	0.0418	0.5714	2536	169	0.181	0.005	9.57	0.21	0.0359	0.0008	33281.9	1132.9
E23-09b	0.454	150	10	0.0228	0.2815	328	22	0.168	0.003	10.69	0.27	0.0387	0.0010	3471.0	266.0
E23-11b	0.455	194	13	0.0216	0.1781	705	47	0.173	0.005	10.21	0.32	0.0386	0.0012	26471.6	1033.2
E23-13b	0.449	321	21	0.0423	0.4643	679	45	0.204	0.004	10.41	0.28	0.0398	0.0009	8961.0	260.5
E25-16b	0.454	220	15	0.0226	0.2273	1167	77	0.190	0.003	9.69	0.33	0.0440	0.0014	36626.9	1585.0
E26-17b	0.456	31.7	2.1	0.0245	0.3500	29.1	2.0	0.278	0.008	11.30	0.12	0.0318	0.0004	1724.8	76.6
E26-18b	0.456	71.6	4.9	0.0226	0.2360	1396	93	0.244	0.007	9.00	0.25	0.0319	0.0010	31610.5	1481.8
E18-19b	0.452	62.8	4.2	0.0122	0.0939	294	20	0.155	0.005	9.50	0.33	0.0304	0.0009	3394.4	104.6
E26-18c	0.452	79.1	5.3	0.0146	0.1414	351	29	0.174	0.009	10.22	0.29	0.0306	0.0008	22621.1	6131.7
E24-14e	0.448	70.3	4.7	0.0058	0.0387	25.9	1.8	0.393	0.010	10.12	0.75	0.0404	0.0034	1105.4	39.6
E35-20e	0.456	13.93	0.90	0.0086	0.5862	29.7	2.0	0.268	0.006	10.84	0.03	0.0330	0.0008	377.3	8.3
L24-01c	0.45	28.7	1.9	0.0244	0.3545	109.9	7.5	0.311	0.008	10.80	0.11	0.0323	0.0003	7210.7	404.8
L24-03e	0.45	22.6	1.5	0.0101	0.0684	275	19	0.808	0.008	9.40	0.19	0.0348	0.0009	1936.0	71.2
L21-04em	0.455	9.85	0.67	0.0135	0.0725	3.6	0.3	0.477	0.011	9.41	0.51	0.0316	0.0014	1199.5	101.6
L21-04es	0.451	43.9	2.9	0.0054	0.0321	51.7	3.5	0.336	0.005	9.06	0.53	0.0367	0.0018	691.5	14.9

测试者: 中国科学院地质地球物理研究所油气资源研究重点实验室叶先仁, 测试仪器: MM5400 磁偏转静态真空质谱计

较低(0.155~0.366Ra), 平均0.239Ra, 其中橄榄石³He/⁴He最高(平均0.291Ra), 斜方辉石次之(平均0.215Ra), 单斜辉石最低(平均0.174Ra)。橄榄石和硫化物中³He/⁴He和⁴He含量呈正相关或不相关, 而斜方辉石和单斜辉石中³He/⁴He与⁴He含量具负相关关系(图3)。

4.2 Ne 丰度和同位素组成

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床²⁰Ne 含量变化于 5 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹ ~ 68 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹, 平均 26 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹; ²¹Ne 含量变化于 0.0198 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹ ~ 1.182 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹, 平均 0.084 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹; ²²Ne 含量变化于 0.005 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹ ~ 0.064 × 10⁻⁷ cm³ · g⁻¹, 平均 0.026 × 10⁻⁷ cm³ · g⁻¹; ²⁰Ne、²¹Ne 和 ²²Ne 平均含量与大气值(分别为 34.8 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹, 0.10 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹ 和 3.55 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹, Allegre *et al.*, 1987) 相比较低。硅酸盐矿物的²⁰Ne、²¹Ne 和 ²²Ne 平均含量(分别为 31 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹、0.10 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹ 和 3 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹) 高于硫化物(分别为 8.5 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹、0.03 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹ 和 0.9 × 10⁻⁹ cm³ · g⁻¹)。

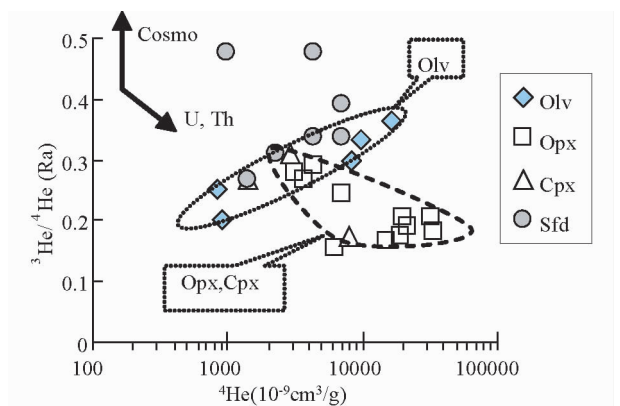


图3 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床组成矿物中³He/⁴He-⁴He 相关图

Olv-橄榄石; Opx-斜方辉石; Cpx-单斜辉石; Sfd-硫化物; Cosmo. -宇宙辐射成因 He; U, Th-放射性成因 He (Ikeda *et al.*, 2001)

Fig.3 Plots of ³He/⁴He vs. ⁴He contents released from constituent minerals in the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit

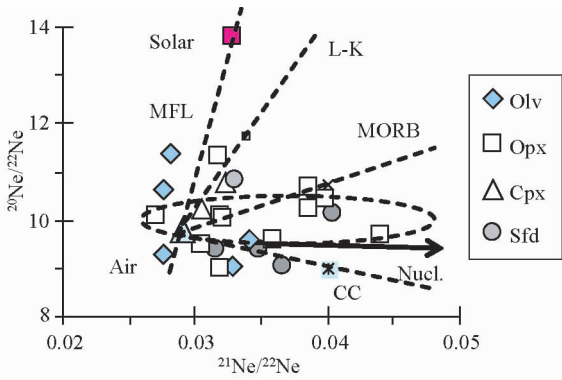


图4 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床组成矿物中 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ - $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 相关图

Air-大气 (Allegre *et al.*, 1987; Sarda *et al.*, 1988); MORB-大洋中脊玄武岩 (Sarda *et al.*, 1988); Solar-太阳风 (Benkert *et al.*, 1993); MFL-大气 Ne 质量分馏线 (Sarda *et al.*, 1988); CC-大陆地壳线 (Allegre *et al.*, 1987); L-K-Loihi-Kilauea 演化线 (Honda *et al.*, 1991); Nucl.-放射性成因组分 (Ballentine and Burnard, 2002; Kennedy *et al.*, 1990); 其余缩写同图 3

Fig. 4 Plot of $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ vs. $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ ratios from constituent minerals in the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit

$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 平均值 (10.02) 介于大气值 (9.8) 和 MORB 值 (13.62) (Allegre *et al.*, 1987) 之间。硅酸盐矿物 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ (平均 10.09) 略高于硫化物平均 (9.77)。 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 的平均值从橄榄石 (9.99)、斜方辉石 (10.05) 到单斜辉石 (10.22) 依次增大。 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 平均值 (0.034) 接近太阳风的组成 (0.033, Benkert *et al.*, 1993)。硅酸盐矿物的 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 平均值 (0.033) 略低于硫化物 (0.035)。

在 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ - $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 三同位素图解 (图 4) 中, 橄榄石和硫化物的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 主要沿大陆地壳演化线 (CC; Allegre *et al.*, 1987) 分布, 部分橄榄石的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 沿氦同位素质量分馏线 (MFL, Sarda *et al.*, 1988) 分布。斜方辉石和单斜辉石的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 主要分布于 MORB (Sarda *et al.*, 1988; Honda *et al.*, 1991) 与大陆地壳演化线 (CC, Allegre *et al.*, 1987) 之间, 含有放射性成因 $^{21}\text{Ne}^*$ (Ballentine and Burnard, 2002; Kennedy *et al.*, 1990) (图 4)。

4.3 Ar 丰度和同位素组成

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床超镁铁质岩和矿石 ^{40}Ar 丰度分布范围 $(3.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \sim 2536 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$, 平均 $634.7 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。 ^{36}Ar 丰度分布范围为 $0.003 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \sim 0.332 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, 平均 $0.067 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。硅酸盐矿物 ^{40}Ar 平均含量 ($789.7 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 高于硫化物 ($77.18 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)。橄榄石中 ^{40}Ar 平均含量最低 ($801.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), 斜方辉石

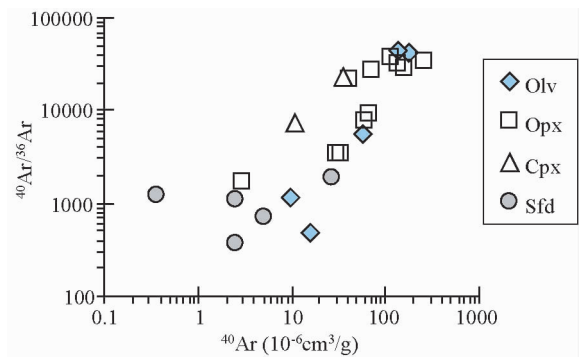


图5 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床组成矿物中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - ^{40}Ar 含量相关图

相关缩写同图 3

Fig. 5 Plot of $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios- ^{40}Ar contents released from constituent minerals in the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit

的 ^{40}Ar 平均含量最高 ($885.74 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)。 ^{36}Ar 平均含量从橄榄石 ($11.84 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)、硫化物 (6.44)、斜方辉石 (5.48) 到单斜辉石 (1.55) 依次减小。

$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值变化大 (377.3 ~ 43202.4), 平均 14365.1, 分布于大气值 (295, Allegre *et al.*, 1987) 和 MORB 值 (40000, Burnard *et al.*, 1994) 之间。硅酸盐矿物中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (476.2 ~ 43202, 平均 18060) 明显高于金属硫化物 (377.3 ~ 1936, 平均 1061.9), 从橄榄石、斜方辉石到单斜辉石 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 平均值 (分别为 18357、18497 和 22621) 依次增大。橄榄石和辉石等硅酸盐矿物中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 ^{40}Ar 呈正相关关系, 而硫化物中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 ^{40}Ar 没有明显的相关关系 (图 5)。

5 讨论

5.1 稀有气体的来源

研究样品采用全熔法释出稀有气体的潜在来源有: (1) 与太阳风相关的宇宙成因稀有气体, 主要保存于受太阳辐射或被地表流体交代的样品中 (Kurz, 1986); (2) 大气污染源稀有气体, 主要吸附在矿物表面、裂隙和破裂包裹体中 (Mohapatra and Honda, 2006; Staudacher *et al.*, 1986); (3) 放射性成因稀有气体, 主要为样品中 U、Th 和 K 衰变形成, 赋存在矿物结构缺陷和空隙中 (Matsumoto *et al.*, 2000); (4) 矿物结晶时捕获流体介质中的稀有气体 (Yamamoto *et al.*, 2004), 主要赋存于流体包裹体和矿物结构缺陷和空隙中 (Zhang *et al.*, 2009)。

本研究样品均采自钻孔岩心和井下采矿坑道, 严格的样品分选和 HCl 浸泡-超声波清洗等样品前处理基本除去了次生碳酸盐和表面蚀变组分 (Zhang *et al.*, 2004, 2007, 2009), 因此与太阳风有关的宇宙成因稀有气体可以排除。实验分析前样品及气体纯化系统外加热-高真空去气可完全脱除样品表面、裂隙和破裂包裹体吸附的大气来源污染组分 (Hu *et*

al., 2007; Ye *et al.*, 2007)。分析样品明显不同于大气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值证明上述处理程序排除大气污染的有效性。

全熔法可释出样品中流体包裹体和晶体结构缺陷中的稀有气体,即矿物结晶时捕获流体介质中的稀有气体以及放射性成因稀有气体, ^3He 、 ^{20}Ne 和 ^{36}Ar 为非放射性成因同位素,全部为地球形成时捕获的原始流体组分,因此样品 He、Ne 和 Ar 同位素组成的变化主要受控于岩石结晶初始流体的稀有气体组成和后期放射性成因 $^4\text{He}^*$ 、 $^{21}\text{Ne}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 的累积加入量。

5.2 放射性成因稀有气体

放射性成因 $^4\text{He}^*$ 可通过 U 和 Th 衰变形成, $^{21}\text{Ne}^*$ 通过 Wetherill 反应 [$^{18}\text{O}(\alpha, n)^{21}\text{Ne}^*$] 形成 (Yatsevich and Honda, 1997), $^{40}\text{Ar}^*$ 通过 12% 的 ^{40}K 经 K 层电子捕获形成。Wetherill 反应中 α 粒子来源于 U 和 Th 衰变形成的放射性成因 $^4\text{He}^*$,因此地幔中放射性成因的 $^{21}\text{Ne}^*$ 和 $^4\text{He}^*$ 是耦合的 (Sarda *et al.*, 1988; Honda *et al.* 1991; Shaw *et al.*, 2001)。通过 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 ^4He 、 ^{21}Ne 与 ^4He 、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 与 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 与 ^{40}Ar 相关性可判别放射性成因 $^4\text{He}^*$ 、 $^{21}\text{Ne}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 的贡献 (Ikeda *et al.*, 2001)。

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床斜方辉石和单斜辉石中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 ^4He 含量负相关(图 3), $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 与 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 相关图指示具放射性成因 $^{21}\text{Ne}^*$ (图 4) (Ballentine and Burnard, 2002; Kennedy *et al.*, 1990), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 与 ^{40}Ar 正相关(图 5), ^{21}Ne 与 ^4He 正相关(图 6),说明斜方辉石和单斜辉石中具有明显的放射性成因 $^4\text{He}^*$ 、 $^{21}\text{Ne}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 。橄榄石中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 ^4He 含量正相关(图 3), ^{21}Ne 和 ^4He 不相关(图 6),表明放射性成因 $^4\text{He}^*$ 和 $^{21}\text{Ne}^*$ 的贡献不明显,但 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 ^{40}Ar 正相关说明放射性成因 $^{40}\text{Ar}^*$ 的贡献较大。金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿初始岩浆为高温 (>1400℃)条件下岩石圈地幔橄榄岩约 33% 部分熔融形成的高 MgO (~15%) 苦橄质拉斑玄武岩浆 (Chai and Naldrett, 1992)。U 和 Th 在玄武质岩浆结晶体系中属于强不相容元素,主要赋存于岩浆晚期结晶的矿物中,即橄榄石中 U 和 Th 含量低于辉石,产生的放射性成因 $^4\text{He}^*$ 的含量也低,斜方辉石 ^4He 的平均含量 ($151.91 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 明显高于橄榄石 ($72.58 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 支持这一推论。

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床硫化物熔浆与硅酸盐岩浆在深部发生熔离 (De Waal *et al.*, 2004; Su *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2009), 其中保存的 U、Th 和 K 的含量较低。硫化物中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 ^4He 含量不相关(图 3), ^{21}Ne 和 ^4He 不相关(图 6), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 ^{40}Ar 没有明显的相关关系,说明硫化物中放射性成因 $^4\text{He}^*$ 、 $^{21}\text{Ne}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 的贡献极低。

放射性成因 $^4\text{He}^*$ 、 $^{21}\text{Ne}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 的量受控于体系的 U、Th 及 K 的含量和体系形成的时间。大陆岩石圈地幔一般具

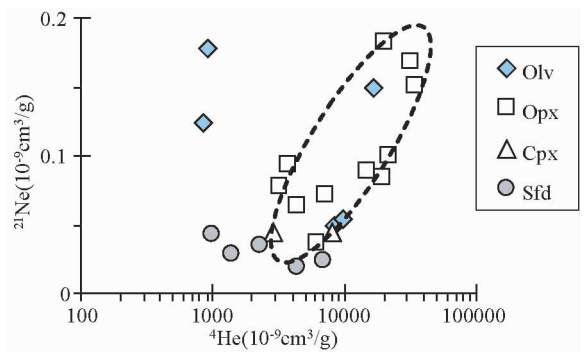


图 6 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床组成矿物中 ^{21}Ne - ^4He 相关图

相关缩写同图 3

Fig. 6 Plot of ^{21}Ne - ^4He contents released from constituent minerals in the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit

有较低的 U 含量 (< 2×10^{-9}) (Gautheron and Moreira, 2002)。根据金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床橄榄石和斜方辉石的 U (分别为 2.9×10^{-9} 和 13.3×10^{-9})、Th (2.1×10^{-9} 和 52.5×10^{-9}) 和 K 含量 (0.04% 和 0.08%) (刘民武, 2003), 结合锆石-斜锆石 U-Pb 精确年龄 (831 Ma, Zhang *et al.*, 2010) 估算放射性成因 $^4\text{He}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 的含量, 结果表明橄榄石和辉石中放射性成因 $^4\text{He}^*$ 的含量分别为 $0.39 \times 10^{-6} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.74 \times 10^{-6} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, $^{40}\text{Ar}^*$ 的含量分别为 $0.138 \times 10^{-6} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.277 \times 10^{-6} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

5.3 成矿岩浆作用的稀有气体制约

岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床密切相关的赋矿超镁铁质岩石对稀有气体具有很强的保存能力, 如加拿大安大略省 Abitibi 古老绿岩带 (2765 ± 42 Ma) 中蛇纹石化和绿泥石化的科马提岩中保存着高达 30.7Ra 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值 (Matsumoto *et al.*, 2002), 西伯利亚地区 253 Ma 的暗色岩套中橄榄石保存着高达 12.7Ra 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Basu *et al.*, 1995)。假定金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 (831 Ma) 中新鲜的橄榄石和辉石对 He 和 Ar 保持封闭体系, 扣除放射性成因 $^4\text{He}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 后橄榄石和辉石中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的平均值分别为 3.70Ra (3.14 ~ 4.65Ra) 和 3.07Ra (1.97 ~ 5.54Ra), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的平均值分别为 18335 和 17785, 接近金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床所属华北克拉通岩石圈地幔的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的平均值 (~3.72, Xu and Liu, 1997; 李延河等, 2001), 与全球岩石圈地幔的 He (6.1 ± 0.9Ra) 和 Ar (30000) 同位素组成 (Dunai and Baur, 1995; Gautheron and Moreira, 2002; Gautheron *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005) 相比, 结合岩石地球化学等证据, 表明起源于陆下岩石圈地幔环境的成矿岩浆中存在地壳和大气饱和流体等端元组分。

岩石圈地幔、地壳和大气饱和流体等不同来源组分的稀有气体同位素组成有较大差异, 可有效地示踪成矿岩浆过程

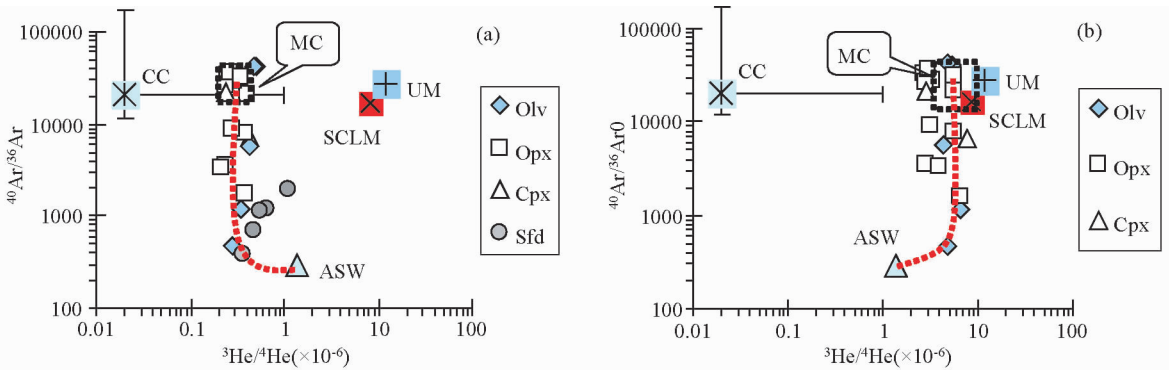


图7 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床组成矿物中扣除放射性成因 $^4\text{He}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 前(a)和扣除后(b)的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 相关图

CC-大陆壳 (Allegre *et al.*, 1987); UM-上地幔 (O'Nions and Tolstikhin, 1994); SCLM-岩石圈地幔 (Dunai and Baur, 1995); ASW-大气饱和和流体 (Ozima and Podosek, 2002); 其余缩写同图3

Fig. 7 Plots of $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios (a) and those deducted radiogenic $^4\text{He}^*$ and $^{40}\text{Ar}^*$ (b) of constituent minerals in the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit

中不同来源组分的贡献。如地壳的 $^3\text{He}/^4\text{He} = 2 \times 10^{-8}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 1650 \sim 170000$ (Allegre *et al.*, 1987); 陆下岩石圈地幔的 $^3\text{He}/^4\text{He} = 6.1\text{Ra}$ (Gautheron and Moreira, 2002), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 30000$ (Duna and Baur, 1995); 大气饱和和流体具有与大气一致的 He、Ne 和 Ar 同位素组成, 即 $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.399 \times 10^{-6}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$ (Ozima and Podosek, 2002)。金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 主要分布于 MORB (Sarda *et al.*, 1988; Honda *et al.*, 1991)与大陆壳演化线 (CC: Allegre *et al.*, 1987) 之间 (图4); $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 分布在大气饱和和流体 (ASW) 与一混合组分 (MC) 混合曲线限定的较窄的范围内, 如图7所示, 并未散布于岩石圈地幔、地壳和大气饱和和流体三端元限定的广大区内, 由此推断陆下岩石圈地幔与大陆壳不同比例混合形成混合组分 (MC), 然后与大气饱和和流体 (ASW) 混合, 即成矿岩浆至少经历了两阶段的演化。岩石地球化学及 PGE 资料支持深部岩浆房 (Staging chamber, 4~9 km) 的演化 (De Waal *et al.*, 2004; Song *et al.*, 2009), 熔体-流体包裹体研究表明存在深部岩浆房 (深度为 12.9~15km) 和上部岩浆房 (6.9~9.3km) (Yang *et al.*, 1998, 2006)。

5.4 成矿作用中不同来源流体的混入比例

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿岩浆中岩石圈地幔、地壳和大气饱和和流体组分的比例可以通过 He、Ne 和 Ar 同位素组成进行估算。一般地, He 在大气中的居留时间较短 (1~10Ma, Lupton *et al.*, 1980), 再循环进入地幔的大气来源 He 可忽略不计 (Porcelli and Wasserburg, 1995), 因此可用大陆壳 (CC, $^3\text{He}/^4\text{He} = 2 \times 10^{-8}$) 和岩石圈地幔 (SCLM, $^3\text{He}/^4\text{He} = 8.48 \times 10^{-6}$) 两个端元 (Hiyagon *et al.*, 1992; Allegre *et al.*, 1987) $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合模式来计算成矿岩浆中地幔和地壳组分的混合比例:

$$X_M = \frac{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{Sample}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{CC}}}{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{SCLM}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{CC}}}$$

与 He 和 Ne 相比, 在地质历史中大气 Ar 积累量较高 (Fisher, 1997)。大陆壳和岩石圈地幔拥有相近的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值 (Allegre *et al.*, 1987; Dunai and Baur, 1995), 而大气饱和和流体的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值与二者有较大的差异, 可采用大气饱和和流体-大陆壳 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 混合模型估算混入大气饱和和流体的比例。

大气饱和和流体、岩石圈地幔和地壳组分比例估算中采用扣除放射性成因 $^4\text{He}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值, 结果表明大气饱和和流体占有较高的比例, 平均为 64.65%, 地幔与地壳组分平均比例接近, 分别为 17.62% 和 17.86%。硅酸盐矿物中保存的地幔与地壳组分平均比例接近, 分别为 21.04% 和 21.83%。

5.5 成矿作用流体混入机制

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床硫化物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (平均 0.46Ra) 与硅酸盐矿物 (平均 0.24Ra) 相比较, 说明硫化物熔体的分离可能发生在深部岩浆房早期阶段, 这得到包裹体、橄榄石 Ni 含量及 PGE 资料的支持。如铬铁矿中沿生长面分布的球形硫化物包裹体、以及硅酸盐矿物流体包裹体中的硫化物表明硫化物熔体的分离发生在岩浆结晶的早期阶段 (Yang *et al.*, 1998, 2006); 而橄榄石 Ni 含量 (Li *et al.*, 2004) 和 PGE 组成 (Su *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2009) 证明硫化物熔体不是上部岩浆房就地熔离, 而在深部岩浆房与玄武质岩浆熔离, 携带大量硫化物熔体和橄榄石的玄武质岩浆晶粥上侵形成 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 (De Waal *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2009)。

Cu-Ni-PGE 硫化物超大规模成矿作用中巨量硫化物从硅酸盐熔体中熔离需要过饱和的硫, 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物

矿床硫化物的硫同位素 ($\delta^{34}\text{S} = -2\text{‰} \sim +2\text{‰}$) 位于地幔硫同位素范围 (Ripley *et al.*, 2005; 田毓龙等, 2009), 可排除壳源硫加入的可能。诱使成矿岩浆硫饱和、促使硫化物熔体分离的因素可能为壳源氧化性流体, 地壳组分的混染或氧化性流体的加入使岩浆氧逸度增加, 降低了硅酸盐岩浆中硫的溶解度, 促使硫饱和及硫化物熔体熔离。

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床 He、Ne 和 Ar 同位素组成揭示成矿岩浆中混入了地壳和大气饱和和流体组分。地壳组分和大气饱和和流体组分可通过地幔-地壳不同端元组分源区部分熔融、岩浆混合、板块俯冲、围岩同化混染、深部循环大气饱和和流体交代或次生蚀变等不同方式加入到成矿岩浆中 (Yamamoto *et al.*, 2004; Mohapatra and Honda, 2006; 傅飘儿等, 2009; 胡沛青等, 2010)。金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床超镁铁质岩体并非俯冲岩浆作用的产物 (Chai and Naldrett, 1992; Li *et al.*, 2004), 结晶过程中 He 同位素不会发生分馏, 新鲜的单矿物样品和有效的前处理可完全排除次生蚀变对测定样品 He、Ne 和 Ar 同位素组成的影响。

成矿玄武岩浆早期结晶矿物-橄榄石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值较低, 表明地壳组分的加入可能始于岩浆源区或深部岩浆房橄榄石结晶之前。橄榄石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (平均 0.291Ra) 和地幔组分估算比例 (平均 25.57%) 高于斜方辉石 (分别为 0.215Ra 和 19.29%), 地壳组分估算比例 (平均 17.57%) 低于斜方辉石 (平均 23.46%), 指示地壳组分的混入随成矿岩浆结晶不断增加, 排除具再循环地壳组分的岩石圈地幔的源区部分熔融 (张铭杰等, 2009), 可能为高温成矿初始岩浆在深部岩浆房同化围岩引入的地壳组分。考虑到硫化物熔体在深部岩浆房熔离, 由此推断混染地壳组分可能是促使硫饱和的主要因素之一。

非常新鲜、不含硫化物的中粗粒二辉橄榄岩中橄榄石 (样品 E25-16a 和 E26-18a) 的地幔组分比例最高 (分别为 57.38% 和 61.74%), 大气饱和和流体的估算比例极低 (分别为 0 和 0.10%); 辉石 (E25-16b 和 E26-18b) 的大气饱和和流体 (分别为 11.39% 和 23.60%) 的比例较低, 地幔组分 (分别为 31.61% 和 49.85%) 较高, 说明大气饱和和流体可能是在上部岩浆房成矿岩浆就地结晶过程中加入的, 可能是区域拉张环境下 (张铭杰等, 2001) 深部循环到上部岩浆房中混入到成矿岩浆中的氧化性流体, 如碳酸盐富集的流体 (Lehmann *et al.*, 2007), 为促使硫饱和、浸染状硫化物就地熔离堆积的主要因素。

6 结论

金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床橄榄石、辉石和硫化物中 He、Ne 和 Ar 丰度和同位素组成提供了成矿岩浆作用过程中流体的来源。主要结论包括:

(1) 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床橄榄石、辉石和硫化物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 低, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ - $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 分布于 MORB 与大陆地

壳演化线之间, 扣除放射性成因 $^4\text{He}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 后橄榄石和辉石中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (平均分别为 3.70Ra 和 3.07Ra) 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (平均值分别为 18335 和 17785) 接近岩石圈地幔的 He 和 Ar 同位素组成。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 混合模型估算成矿岩浆中大气饱和和流体占有较高的比例, 平均为 64.65%, 地幔与地壳组分平均比例接近, 分别为 17.62% 和 17.86%。

(2) $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值和地幔组分估算比例从橄榄石到斜方辉石逐渐降低, 结合 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 分布特征表明成矿岩浆至少经历了岩浆源区 (或深部岩浆房) 和上部岩浆房两阶段的演化, 岩石圈地幔部分熔融形成的成矿岩浆受到大陆壳组分的混染形成一混合组分 (MC), 然后混入了大气饱和和流体。

(3) 硫化物 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (平均 0.456Ra) 高于硅酸盐矿物 (0.239Ra), 硫化物熔体在岩浆分异的早期发生分离, 高温成矿中岩浆深部岩浆房同化围岩引入的地壳组分可能是促使深部硫饱和、硫化物熔离的主要因素, 大气饱和和流体的混入是上部岩浆房硫饱和、浸染状硫化物就地熔离堆积的主要因素。

致谢 本文研究样品在采集过程中得到金川集团田毓龙、王玉山、肖立忠和高亚林的大力帮助; 论文撰写过程中美国印第安纳大学的 Edwards Ripley 和李楚思 (Chusi Li) 教授给予了指导和帮助; 特别是两位匿名评审专家的建设性修改建议对本文的修改提高起到了关键作用, 在此表示衷心的感谢。

References

- Allegre CJ, Staudacher T and Sarda P. 1987. Rare gas systematics: Formation of the atmosphere, evolution and structure of Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 81: 127-150
- Andrews MS and Ripley EM. 1989. Mass transfer and sulfur fixation in the contact aureole of the Duluth Complex, Duka Road Cu-Ni deposit, Minnesota. *Can. Mineral.*, 27: 293-310
- Ballentine CJ and Burnard PG. 2002. Production, release and transport of noble gases in the continental crust. In: Porcelli DP, Ballentine CJ and Wieler R (eds.). *Noble Gases Geochemistry and Cosmochemistry. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47: 481-538
- Basu AR, Poreda RJ, Renne PR, Teichmann F, Vasiliev YR, Sobolev NV and Turrin BD. 1995. High- ^3He plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts. *Science*, 269: 822-825
- Benkert JP, Baur H, Signer P and Wieler R. 1993. Helium, neon, and argon from the solar wind and solar energetic particles in lunar ilmenites and pyroxenes. *J. Geophys. Res.*, 98: 13147-13162
- Burnard PG, Stuart F and Turner G. 1994. C-He-Ar variations within a dunite nodule as a function of fluid inclusion morphology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 128: 243-258
- Chai G and Naldrett AJ. 1992. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma. *Journal of Petrology*, 33: 277-303
- De Waal SA, Xu Z, Li C and Mouri H. 2004. Emplacement of viscous

- mushes in the Jinchuan ultramafic intrusion, western China. *Can. Mineral.*, 42: 371–392
- Dunai TJ and Baur H. 1995. Helium, neon and argon systematics of the European subcontinental mantle; Implications for its geochemical evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 2767–2783
- Fisher DE. 1997. Helium, argon and xenon in crushed and melted MORB. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61(14): 3003–3012
- Fu PE, Hu PQ, Zhang MJ, Jia YQ, Tang ZL and Li WY. 2009. Petrogenesis of Huangshan Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang. *Geochimica*, 38(5): 123–132 (in Chinese with English abstract)
- Gao YL, Tang ZL, Zhang MJ, Tian YL and Xiao LZ. 2009. Geochemical characteristics, genesis of concealed Cu-rich ore body in the Jinchuan deposit, northwestern China, and its prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 83(6): 1085–1100
- Gautheron CE and Moreira M. 2002. Helium signature of the subcontinental lithospheric mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 199: 39–47
- Gautheron CE, Moreira M and Allègre C. 2005. He, Ne and Ar composition of the European lithospheric mantle. *Chem. Geol.*, 217: 97–112
- Hiyagon H, Ozima M and Marty B. 1992. Noble gases in submarine glasses from mid-oceanic ridges and Loihi seamount: Constraints on the early history of the Earth. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 1301–1316
- Honda M, McDougall I, Patterson DB, Doulgeris A and Clague DA. 1991. Possible solar noble-gas component in Hawaiian basalts. *Nature*, 349: 149–151
- Honda M, McDougall I, Patterson DB, Doulgeris A and Clague DA. 1993. Noble gases in submarine pillow basalt glasses from Loihi and Kilauea, Hawaii: A solar component in the Earth. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57(4): 859–874
- Hou ZQ, Li YH, Ai YD, Tang SH and Zhang QL. 1999. Helium isotopic composition of submarine hydrothermal ore-forming system in Okinawa trough. *Science in China (Series D)*, 29: 155–162 (in Chinese)
- Hu PQ, Zhang MJ, Tang ZL, Li C and Wang JZ. 2007. Chemical and stable isotopic compositions of volatiles in mantle peridotites of the Yushigou ophiolite in Qilian orogenic belt, western China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 169–176
- Hu PQ, Ren LY, Fu PR, Zhang MJ, Li XY and Qin HY. 2010. Petrogenesis and oregenesis of the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in Hami, Xinjiang, West China. *Mineral Deposits*, 29(1): 158–168 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Burnard PG, Turner G and Bi X. 1998. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan Province, China. *Chem. Geol.*, 146: 55–63
- Hu RZ, Burnard PG, Bi XW, Zhou MF, Pen JT, Su WC and Wu KX. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China. *Chem. Geol.*, 203: 305–317
- Ikeda Y, Nagao K and Kagami H. 2001. Effects of recycled materials involved in a mantle source beneath the southwest Japan arc region: Evidence from noble gas, Sr, and Nd isotopic systematics. *Chem. Geol.*, 175(3–4): 509–522
- Jia ZY, Zhang MJ, Tang ZL, Li WY, Ren LY and Hu PQ. 2009. Petrogenesis of Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang. *Mineral Deposits*, 28(5): 673–686 (in Chinese with English abstract)
- Kennedy BM, Hiyagon H and Reynolds JH. 1990. Crustal neon: A striking uniformity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 98: 277–286
- Kim KH, Nagao K, Tanaka T, Sumino H, Nakamura T, Okuno M, Lock JB, Youn JS and Song J. 2005. He-Ar and Nd-Sr isotopic compositions of ultramafic xenoliths and host alkali basalts from the Korean peninsula. *Geochem. J.*, 39: 341–356
- Kurz MD. 1986. Cosmogenic helium in a terrestrial igneous rock. *Nature*, 320: 435–439
- Lehmann J, Arndt N, Windley B, Zhou MF, Wang CY and Harris C. 2007. Field relationships and geochemical constraints on the emplacement of the Jinchuan intrusion and its Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Gansu, China. *Econ. Geol.*, 102: 75–94
- Li C, Ripley EM and Mathez EA. 2003. The effect of S on the partitioning of Ni between olivine and silicate melt in MORB. *Chem. Geol.*, 201: 295–306
- Li C, Xu ZH, De Waal SA, Ripley EM and Maier WD. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 39: 159–172
- Li XH, Su L, Chung SL, Li ZX, Liu Y, Song B and Liu DY. 2005. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 6: 16–32
- Li YH, Li JC, Song HB and Guo LH. 2001. Helium isotope studies of the mantle xenoliths and high pressure megacrysts from the Cenozoic basalts in the eastern China. *Science in China (Series D)*, 31(8): 641–647 (in Chinese)
- Liu MW. 2003. Geochemical comparison of several nickel deposits in China. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Northwest University, 1–145 (in Chinese with English summary)
- Lupton JE, Klinkhammer GP, Normark WR, Haymon R, MacDonald KC, Weiss RF and Craig H. 1980. Helium-3 and manganese at the 21°N East Pacific Rise hydrothermal site. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50(1): 115–127
- Mao JW, Zhang RF, Ye HS, Gao JJ and Chen W. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of fuchsite and sericite from altered rocks close to ore veins in Shagou large-size Ag-Pb-Zn deposit of Xiong'ershan area, western Henan Province, and its significance. *Mineral Deposits*, 25(4): 359–368 (in Chinese with English abstract)
- Matsumoto T, Honda M, McDougall I, O'Reilly SY, Norman M and Yaxley G. 2000. Noble gases in pyroxenites and metasomatised peridotites from the Newer Volcanics, southeastern Australia: Implications for mantle metasomatism. *Chem. Geol.*, 168: 49–73
- Matsumoto T, Seta A, Matsuda J, Takebe M, Chen YL and Arai S. 2002. Helium in the Archean komatiites revisited: Significantly high $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios revealed by fractional crushing gas extraction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 196: 213–225
- Mavrogenes JA and O'Neill H St C. 1999. The relative effects of pressure, temperature, and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 83: 1173–1180
- Mohapatra RK and Honda M. 2006. "Recycled" volatiles in mantle-derived diamonds: Evidence from nitrogen and noble gas isotopic data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 252: 215–219
- Naldrett AJ. 1998. 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 Verlag, 728
- O'Nions RK and Tolstikhin IN. 1994. Behaviour and residence time of lithophile and rare gas tracers in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 124: 131–138
- Ozima M and Podosek FA. 2002. Noble Gas Geochemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 1–281
- Porcelli D and Wasserburg GJ. 1995. Mass transfer of helium, neon, argon, and xenon through a steady-state upper mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(23): 4921–4937
- Ripley EM, Park YR, Li CS and Naldrett AJ. 1999. Sulfur and oxygen isotopic evidence of country rock contamination in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada. *Lithos*, 47(1–2): 53–68
- Ripley EM, Li CS and Sarkar A. 2005. Mineralogical and stable isotopic

- studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Cu-Ni deposit, China. *Econ. Geol.*, 100: 1349–1361
- Ryan B, Wardle RJ and Gower CF. 1995. Nickel-copper sulphide mineralization in Labrador; The Voisey's Bay discovery and its exploration implications. *Gov. of Newfoundland and Labrador, Current Res. Report 95-1*, 177–204
- Sarda P, Staudacher T and Allegre CJ. 1988. Neon isotopes in submarine basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 91: 73–88
- Shaw AM, Hilton DR, Macpherson CG and Sinton JM. 2001. Nucleogenic neon in high $^3\text{He}/^4\text{He}$ lavas from the Manus back-arc basin: A new perspective on He-Ne decoupling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 194: 53–66
- Shi JA, Wang L, Takano, Wang Q and Wang JP. 2005. Element and noble gas isotopic geochemistry of ultramafic rocks in Jinchuan. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 125: 45–51 (in Chinese with English abstract)
- Song XY, Zhou MF, Wang Y and Qi L. 2006. Role of crustal contamination in the formation of the Jinchuan Ni-Cu-PGE sulfide deposit, NW China. *International Geological Review*, 48: 1113–1132
- Song XY, Keays RR, Zhou MF, Qi L, Ihlenfeld C and Xiao JF. 2009. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73: 404–424
- Staudacher T, Kurz MD and Allegre CJ. 1986. New noble-gas data on glass samples from Loihi seamount and Hualalai and on dunite samples from Loihi and Reunion Island. *Chem. Geol.*, 56: 193–205
- Su SG, Li C, Zhou MF, Ripley EM and Qi L. 2008. Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China. *Mineralium Deposita*, 43: 609–622
- Sun XM, Norman DI and Sun K. 1999. N_2 -Ar-He systematics and source of ore-forming fluid in Changkeng Au-Ag deposit, central Guangdong, China. *Science in China (Series D)*, 42(5): 474–481
- Sun XM, Wang M and Xue T. 2004. He-Ar isotopic systematics of fluid inclusions in pyrites from PGE polymetallic deposits in Lower Cambrian black rock series, South China. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 1–6
- Tang ZL and Li WY. 1995. *The Metallogenetic Model and Geological Contrast on the Jinchuan Platinum-bearing Ni-Cu Sulfide Deposit*. Beijing: Geological Publishing House, 1–209 (in Chinese with English abstract)
- Tian YL, Bao GZ, Tang ZL and Wang YS. 2009. Geological and geochemical characteristics of the magma conduit type orebodies of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1515–1525 (in Chinese with English abstract)
- Wendlandt RF. 1982. Sulfide saturation of basalt and andesite melts at high pressures and temperatures. *Amer. Mineral.*, 67: 877–885
- Xu S and Liu CQ. 1997. Helium isotopic compositions of mantle-derived xenoliths in the eastern China and its implication to the geochemical evolution of mantle. *Chinese Science Bulletin*, 42: 1190–1193
- Yamamoto JJ, Kaneoka I, Nakai S, Kagi H, Prikhodko VS and Arai S. 2004. Evidence for subduction-related components in the subcontinental mantle from low $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio in mantle xenoliths from Far Eastern Russia. *Chem. Geol.*, 207: 237–259
- Yang SH, Qu WJ, Tian YL, Chen JF, Yang G and Du AD. 2008. Origin of the inconsistent apparent Re-Os ages of the Jinchuan Ni-Cu sulfide ore deposit, China: Post-segregation diffusion of Os. *Chem. Geol.*, 247: 401–418
- Yang XZ, Ishihara S and Matsueda H. 1998. Multiphase melt inclusions in the Jinchuan complex, China: Implications for petrogenic and metallogenic physico-chemical conditions. *International Geology Review*, 40: 335–349
- Yang XZ, Ishihara S and Zhao DH. 2006. Genesis of the Jinchuan PGE deposit, China: Evidence from fluid inclusions, mineralogy and geochemistry of precious elements. *Mineral. Petrol.*, 86: 109–128
- Yatsevich I and Honda M. 1997. Production of nucleogenic neon in the Earth from natural radioactive decay. *J. Geophys. Res.*, 102(B5): 10291–10298
- Ye XR, Tao MX, Yu CN and Zhang MJ. 2007. Helium and neon isotopic composition in the ophiolites from the Yarlung Zangbo River, Southwestern China: The information from deep mantle. *Science in China (Series D)*, 50(6): 801–812
- Zhai W, Sun XM, He XP, Su LW and Wu YL. 2006. Noble gas isotopic geochemistry of Axi gold deposit and its metallogenic implications, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2590–2596 (in Chinese with English abstract)
- Zhang MJ, Wang XB and Li LW. 2000. Composition of mantle fluid. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 401–412 (in Chinese with English abstract)
- Zhang MJ, Wang TY, Gao JP and Li LM. 2001. Geochemical constraints on petrogenesis of Hashatubei ultramafic complex, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 206–214 (in Chinese with English abstract)
- Zhang MJ, Wang XB, Liu G, Zhang TW and Bo WR. 2004. The compositions of upper mantle fluids beneath Eastern China: Implications for mantle evolution. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 125–130
- Zhang MJ, Hu PQ, Niu YL and Su SG. 2007. Chemical and stable isotopic constraints on the origin and nature of volatiles in subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China. *Lithos*, 96: 55–66
- Zhang MJ, Niu YL and Hu PQ. 2009. Volatiles in the mantle lithosphere: Occurrence modes and chemical compositions. In: Anderson JE and Coates RW (eds.). *The Lithosphere: Geochemistry, Geology and Geophysics*. New York: Nova Science Publishers, Chapter 5, 171–212
- Zhang MJ, Li YX, Hu PQ, Wang XB, Niu YL and Fu PE. 2009. Recycled crustal volatiles in subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 311–323 (in Chinese with English abstract)
- Zhang MJ, Kamo SL, Li C, Hu PQ and Ripley EM. 2010. Precise U-Pb zircon-baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China. *Mineralium Deposita*, 45: 3–9
- Zhang ZQ, Du AD, Tang SH, Lu JR, Wang JH and Yang G. 2004. Age of the Jinchuan copper-nickel deposit and isotopic geochemical feature of its source. *Acta Geologica Sinica*, 78: 359–365 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 傅飘儿, 胡沛青, 张铭杰, 贾元琴, 汤中立, 李文渊. 2009. 新疆黄山铜镍硫化物矿床成因研究. *地球化学*, 38(5): 123–132
- 侯增谦, 李延河, 艾永德, 唐绍华, 张绮玲. 1999. 冲绳海槽活动热水成矿系统的氦同位素组成: 幔源氦证据. *中国科学(D辑)*, 29: 155–162
- 胡沛青, 任立业, 傅飘儿, 张铭杰, 李晓亚, 秦宏毅. 2010. 新疆哈密黄山东铜镍硫化物矿床成岩成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 158–168
- 贾志永, 张铭杰, 汤中立, 李文渊, 任立业, 胡沛青. 2009. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程. *矿床地质*, 28(5): 673–686

- 李延河, 李金城, 宋鹤彬, 郭立鹤. 2001. 中国东部新生代玄武岩中幔源包体和高压巨晶的氩同位素研究. 中国科学(D辑), 31(8): 641-647
- 刘民武. 2003. 中国几个镍矿床的地球化学比较研究. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 1-145
- 毛景文, 郑榕芬, 叶会寿, 高建京, 陈文. 2006. 豫西熊耳山地区沙沟银铅锌矿床成矿的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义. 矿床地质, 25(4): 359-368
- 史基安, 王雷, 高野穆一郎, 王琪, 王金鹏, 叶先仁. 2005. 金川超镁铁质岩元素及稀有气体同位素地球化学特征. 矿物岩石, 125: 45-51
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比. 北京: 地质出版社, 1-209
- 田毓龙, 包国忠, 汤中立, 王玉山. 2009. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道型矿体地质地球化学特征. 地质学报, 83(10): 1515-1525
- 翟伟, 孙晓明, 贺小平, 苏丽薇, 吴有良. 2006. 新疆阿希低硫型金矿稀有气体同位素地球化学及其成矿意义. 岩石学报, 22(10): 2590-2596
- 张铭杰, 王先彬, 李立武. 2000. 地幔流体组成. 地学前缘, 7(2): 401-412
- 张铭杰, 王廷印, 高军平, 李丽梅. 2001. 内蒙古哈沙图北超镁铁杂岩体成因的地球化学制约. 岩石学报, 17(2): 206-214
- 张铭杰, 李延鑫, 胡沛青, 王先彬, Niu Yaoling, 傅飘儿. 2009. 中国东部陆下岩石圈地幔中的再循环地壳流体组分. 地质学报, 83(3): 311-323
- 张宗清, 杜安道, 唐索寒, 卢纪仁, 王进辉, 杨刚. 2004. 金川铜镍硫化物矿床年龄和源区同位素地球化学特征. 地质学报, 78: 359-365