

文章编号: 0258-7106 (2006) 01-0438-09

云南哀牢山金矿带墨江金镍矿床铂族元素 (PGE) 地球化学及其对矿床成因的制约*

孙晓明^{1,2}, 熊德信^{1,3}, 王生伟¹, 石贵勇¹, 翟伟¹

(1 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275; 2 南京大学成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093;

3 广东省肇庆学院, 广东 肇庆 526061)

摘 要 文章系统地测定了墨江金镍矿床中的金镍矿和镍矿矿石中的 PGE 含量, 结果均较低, Σ PGE 为 $(2.58 \sim 109.66) \times 10^{-9}$, 与超基性岩的 Σ PGE $[(14.58 \sim 50.48) \times 10^{-9}]$ 相差不大, 且矿石与超基性围岩 PGE + Au 的球粒陨石标准化模式基本一致, 均为 Pt 和 Ir 相对亏损和 Ru 及 Rh 相对富集的 M 型, 显示墨江金镍矿 PGE 来源较为一致, 主要来自超基性岩体; 墨江金镍矿 Pd/Ir 比值为 $0.18 \sim 10.0$, 远低于典型热液型镍矿的 Pd/Ir 值 (>100), 而与岩浆型镍矿相近, 说明其中的镍主要为岩浆成因, 后期热液改造并不是 Ni 成矿的主导因素, 因此墨江应为早期岩浆型 Ni 矿和晚期热液型 Au(Ni) 矿叠加形成的复合矿床。墨江金镍矿的超基性围岩直接来自地幔, 是由经历了基性岩浆抽提和交代作用形成的亏损地幔发生程度不同的部分熔融形成的, 其原始岩浆中硫已达到饱和。

关键词 地球化学; 铂族元素; 金镍矿床; 超基性岩; 蛇绿混杂岩; 墨江

中图分类号: P618.53 **文献标识码**: A

Platinum group elements (PGE) geochemistry of Mojiang Au-Ni deposit and its constraint on ore genesis

SUN Xiao Ming^{1,2}, XIONG De Xin^{1,3}, WANG Sheng Wei¹, SHI Gui Yong¹ and ZHAI Wei¹

(1 Department of Earth Sciences, Sun Yatsen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2 National Key Laboratory of Metallogenesis, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3 Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, Guangdong, China)

Abstract

Mojiang is a large-size Au-Ni deposit occurring in the contact zone between ultramafic intrusions and metasedimentary rocks. It was previously considered to be a typical fault-controlled hydrothermal deposit. Systematically sampling and analysis show that the PGE contents are quite low in both Au-Ni and Ni ores, and the Σ PGE is $(2.58 \sim 109.66) \times 10^{-9}$, quite similar to that of the ultramafic intrusions $[(14.58 \sim 50.48) \times 10^{-9}]$. Besides, the ores and the ultramafic intrusions possess similar chondrite-normalized patterns, i.e., both of them belong to Pt and Ir depleted and Ru and Rh enriched type, suggesting that the Mojiang mine has an identical source of PGE and most of them were derived from the ultramafic intrusions. The Pd/Ir ratios of the Mojiang ores are $0.18 \sim 10.0$, much lower than those of typical hydrothermal Ni deposits (>100) and similar to those of the typical magmatic type Ni deposits, implying that the Ni ores in the Mojiang mine mainly belong to the magmatic type, and that the post-magmatic hydrothermal alteration might have not played an important role in the Ni mineralization. It is thus concluded that the Mojiang deposit is a composite deposit composed

* 本文得到国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412610)、国家自然科学基金(40173025)、国家教育部跨世纪优秀人才培养计划基金和南京大学成矿作用国家重点实验室开放基金的联合资助

第一作者简介: 孙晓明, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床地球化学研究。Email: eessxm@mail.sysu.edu.cn。

收稿日期 2006-01-23; 改回日期 2006-03-28。李岩编辑。

mainly of early stage magmatic type Ni ores and late stage hydrothermal type Au-Ni ores. The ultramafic intrusions in the Mojiang mine were derived directly from the mantle, being products of partial melting of a depleted mantle in different degrees. The mantle in Mojiang area underwent extraction of mafic magma and metasomatism, and the primary ultramafic magma was sulfur saturated.

Key words: platinum group elements (PGE), Au-Ni deposit, ultramafic rock, ophiolitic mélange, Mojiang

云南墨江是一个主要赋存在蚀变超基性岩和浅变质岩接触带中的金镍矿床, 具有独特的地质特征和复杂的成矿地质背景。从 20 世纪 80 年代以来, 许多学者对其地质特征、成矿时代和物质来源进行了较系统的研究(蒋志, 1984; 李元, 1992; 胡云中等, 1995; 李定谋等, 1998; 陈锦荣等, 2002; 方维萱等, 2001; 谢桂青等, 2004; 应汉龙等, 2005), 而对其中铂族元素(PGE)的地球化学特征除了一些零星工作外(冉红彦等, 1996), 尚未见系统的研究。事实上, 由于铂族元素具有特殊的地球化学性质, 其配分模式一般不会受到蚀变等地质作用的影响(Barnes et al., 1985), 因此目前已被广泛用于基性-超基性岩的岩石成因和演化以及与其有关的成矿作用的示踪研究, 并且取得了许多重要的进展(Naldrett et al., 1980; 1981; 2000; Barnes et al., 1985; 1987; 1993; Lorand, 1989; Fleet et al., 1991; 1996; Chai et al., 1992; Garuti et al., 1997; 储雪蕾等, 2001; 2002; 李胜荣等, 1994; 李晓林等, 1998; 许成等, 2003; Jiang et al., 2003; Pasava et al., 2003; 2004; Maier et al., 2004; 何高文等, 2006)。本文较系统地分析了墨江金镍矿床主要矿石和蚀变超基性岩的 PGE 组成特征, 并据此初步讨论了矿床成因和物质来源。

1 矿床地质概况

大地构造上, 墨江金镍矿位于哀牢山成矿带的中部, 矿体主要受到夹于九甲—墨江断裂带和转马路断裂带之间的蛇绿混杂岩带的控制(图 1)。

矿区构造主要为北西走向的逆冲推覆断层。矿床主要围岩是上泥盆统金厂岩组和上三叠统一碗水组, 岩性主要为变余粉砂岩和硅质岩, 局部见变质火山碎屑岩。金厂岩组从下到上分为马呼洞段、四十八两山段和烂山段, 其中烂山段(D_3j_3)是金镍矿体的最主要赋矿围岩, 其中下部为变余粉砂岩、硅质岩夹薄层板岩, 向上变为变质砂岩、含砾砂岩夹变凝灰质火山熔岩和火山碎屑岩, 其中可见大量蚀变超基性岩体, 局部可见煌斑岩和花岗斑岩; 四十八

两山段为含炭灰色板岩和砂、板岩互层, 夹灰色硅质岩透镜体, 顶部见一层 2~5 m 厚的绿片岩、凝灰质绿片岩; 马呼洞段底部为稳定的薄层灰岩, 中上部为变砂岩夹千枚状板岩。沿九甲—安定断裂及其附近发育数百个镁铁质岩体, 其中矿区东侧的主要超基性岩体为金厂岩体, 该岩体为 NW 走向, 长约 16 km, 宽约 0.4~1 km, 多数已发生片理化和蛇纹石化。 $Rb-Sr$ 和 $Sm-Nd$ 同位素测定显示金厂岩体侵位时代为 $(302 \pm 7.3) \text{ Ma} \sim (304 \pm 16) \text{ Ma}$ (谢桂青等, 2004)。一些学者认为该岩体属于哀牢山蛇绿混杂岩底部的超基性岩组合(李定谋等, 1998)。

金镍矿和镍矿矿体均主要位于超基性岩体与围岩接触带上(图 2), 但在空间上多数分离, 少数重叠。镍矿体主要赋存在金厂超基性岩体与围岩接触带的弯曲部位, 围岩主要为烂山段上部硅质岩和变余粉砂岩以及由超基性岩体蚀变而来的蛇纹岩和菱镁岩, 矿石类型主要有蚀变超基性岩中稠密浸染状黄铁矿型和硅质岩中浸染状黄铁矿型 2 种, 矿石矿物主要为黄铁矿、辉砷镍矿、针镍矿和方硫镍矿等, 而脉石矿物主要为石英、铬水云母等(应汉龙等, 2005)。金矿体主要分布在烂山段围岩中, 按矿化类型可分为 3 类, 一是含金石英脉型, 主要产于猫鼻梁子矿段变余砂岩中, NW 向雁行状成群分布; 第二类为含金蚀变硅质岩型, 主要分布于矿区老金牛和烂山矿段; 第三类为混合型, 主要分布在四十八两山和滴水坎矿段。金矿石主要金属矿物有黄铁矿、黝铜矿、辉砷镍矿、辉铋矿、方铅矿、闪锌矿和自然金、银金矿、自然银等金银矿物, 非金属矿物以石英和铬水云母化等为主。金矿中铬水云母的 $K-Ar$ 年龄为 $61 \sim (114.64 \pm 4.01) \text{ Ma}$ (胡云中等, 1995; 李元, 1992), 而镍矿中铬水云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $62 \sim 63 \text{ Ma}$ (应汉龙等, 2005), 但后者显然是镍矿遭受后期热液蚀变的年龄, 而不一定代表镍矿的主成矿期。

2 样品和测试方法

本次研究主要采集了猫鼻梁子和烂山露天采场

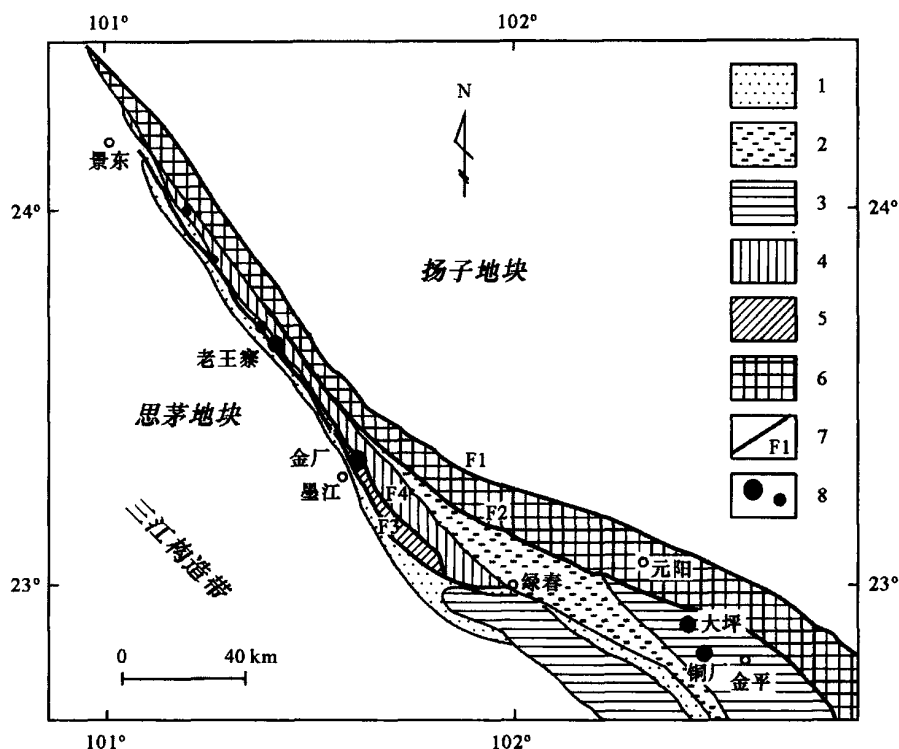


图 1 哀牢山金矿带大地构造位置图(据应汉龙等, 2005 改编)

1—上三叠统一碗水组; 2—三叠系沉积岩覆盖的古生界岩石; 3—未变质古生界岩石; 4—弱变质古生界岩石; 5—晚泥盆世至早二叠世蛇绿混杂岩; 6—下元古界哀牢山群变质岩; 7—区域断裂带及其编号(F1 红河断裂带, F2 哀牢山断裂带, F3 九甲—墨江断裂带, F4 转马路断裂带); 8—金镍矿床

Fig. 1 Tectonic map of the Ailaoshan gold belt (modified after Ying et al., 2005)

1—Upper Triassic Yiwanshui Formation; 2—Paleozoic rocks covered with Triassic sediments; 3—Unmetamorphosed Paleozoic rocks; 4—Weakly metamorphosed Paleozoic rocks; 5—Late Devonian-Early Carboniferous ophiolitic melange; 6—Lower Proterozoic Ailaoshan Group; 7—Regional faults, F1: Honghe fracture zone, F2: Ailaoshan fracture zone, F3: Jiujia-Mojiang fracture zone, F4: Zhuanmalu fracture zone; 8—Au-Ni ore deposit

的原生未氧化金镍矿石和镍矿石,为对比研究,还采集了金厂岩体中的较新鲜和已蚀变的橄榄岩。将样品洗净并烘干后,按不同矿石类型和围岩类型分别球磨粉碎至粒度 $75 \mu\text{m}$,以尽量减少样品污染。

本次 PGE 分析在河南岩矿分析测试中心完成。其中 Pt、Pd 和 Au 采用湿法分解,活性炭等富集,光谱法测定:将 10 g 样品用盐酸-过氧化氢溶样,活性炭-树脂组合工艺富集,富集物灰化后加入光谱缓冲剂,用光栅光谱仪摄谱,用光谱超痕量分析测量系统测定,方法检出限为 Pt: 0.2×10^{-9} , Au 和 Pd: 0.1×10^{-9} ; Os 和 Ru 采用碱熔分解-蒸馏分离-催化光度法测定:将 5 g 样品用过氧化钠熔融法分解,硫酸酸化,以溴酸钠-重铬酸钾-氯化钠作氧化剂,乙醇-硫酸为分离剂,蒸馏法分离钨、钼,利用钨、钼对铈(IV)-铈(III)体系,催化分光光度法测定,方法检出限 0.02×10^{-9} ; Rh 和 Ir 用铈试金富集-催化光度法和催化极谱法测定:样品经小铈试金分离富集,试金扣置于蒸

馏水中粉化,加入稀盐酸加热溶解,过滤除去铁和镍,待测铂族元素硫化物沉淀后用焦硫酸钠熔融法分解,用水提取并分成两份溶液,在硫酸-六次甲基四胺体系中,催化极谱法测铈,铈(III)-铈(IV)-Ag(I)体系中,催化光度法测铈,样品用量 10 g ,方法检出限 0.02×10^{-9} ; Ag 用王水溶解,原子吸收法测定:王水溶解银后,溶液蒸至近干,用盐酸赶硝酸,转化为盐酸介质,定溶后用 GGX-9 型原子吸收仪测定,检出限为 0.2×10^{-6} 。用该方法分析中国国家标准物质 GBW07288 和 GBW07289,分析结果与推荐值相符,12 次测定精密度为: GBW07288: Pt 25%, Pd 20%, Rh 15%, Ir 25%, Ru 8.7%, Os 5.4%, GBW07289: Pt 22%, Pd 18%, Rh 16%, Ir 20%, Ru 7.5%, Os 5.0%。

Ni 和 Cu 等微量元素分析在南京大学成矿作用国家重点实验室完成,分析仪器为美国 Perkin-Elmer 公司生产的 ELAN9000 型 ICP-MS。

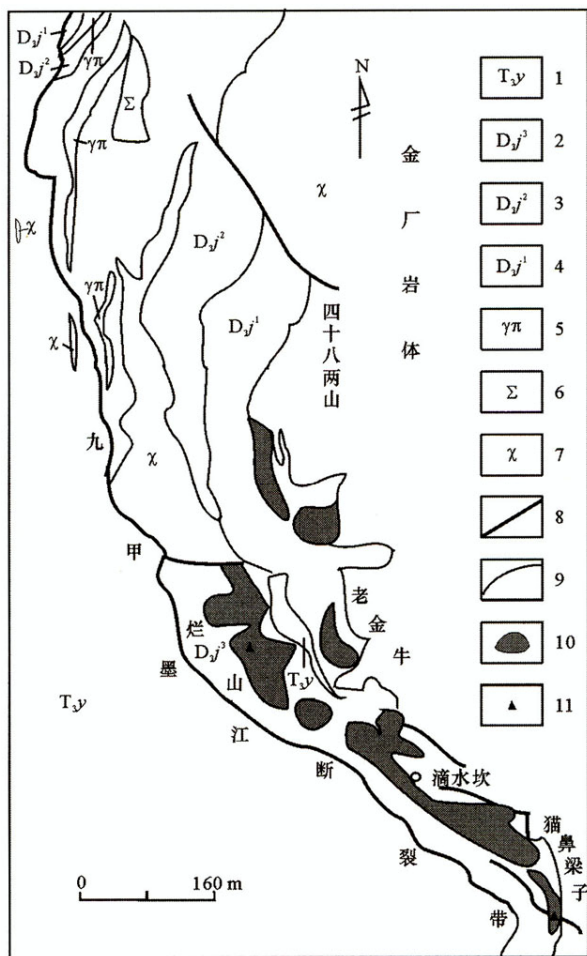


图 2 墨江金镍矿床地质图 (据应汉龙等, 2005 改编)
1—上三叠统一碗水组; 2—上泥盆统金厂组烂山段; 3—金厂组四十八两山段; 4—金厂组马呼洞段; 5—花岗斑岩; 6—煌斑岩; 7—金厂超基性岩; 8—断层; 9—地层或岩性界线; 10—金镍矿体分布范围; 11—主要采样位置

Fig. 2 Geological map of the Mojiang Au-Ni deposit (modified after Ying et al., 2005)

1—Upper Triassic Yiwanshui Formation; 2—Lanshan Member of Upper Devonian Jinchang Formation; 3—Sishibaliangshan Member of Jinchang Formation; 4—Mahudong Member of Jinchang Formation; 5—Granite-porphry; 6—Lampophyre; 7—Jinchang ultrabasic intrusion; 8—Fault; 9—Stratigraphic or lithologic boundary; 10—Distribution area of Au-Ni orebodies; 11—Sampling site

3 分析结果和讨论

墨江金镍矿主要矿石类型和超基性岩体的 PGE、Au、Ag、Ni 和 Cu 的测试结果见表 1, 从中可见: ①墨江矿无论金镍矿石还是镍矿石中的 PGE 含量均较低, 其中金镍矿石中 Σ PGE 为 $(2.58 \sim 92.96) \times 10^{-9}$, 镍矿石中 Σ PGE 为 $(21.8 \sim 109.66) \times 10^{-9}$, 与蚀变超基性岩的 Σ PGE $[(14.58 \sim 50.48) \times$

$10^{-9}]$ 相差不大; ②墨江样品 PGE 均属于 IPGE (Os + Ir + Ru) 富集、PPGE (Rh + Pt + Pd) 亏损型, PPGE/IPGE 均低于 1, 为 $0.17 \sim 0.56$, 此点与冉红彦等 (1996) 的分析结果稍有不同; 考虑到 Au 的活动性较 Pd 强很多, 故本文未将 Au 计入 PPGE; ③墨江样品中 Au 均高于 100×10^{-9} , Ni 含量变化很大, 但受到风化作用的镍矿石 Ni 含量明显降低, 仅为 60×10^{-9} , 显示后期风化作用将 Ni 从矿石中带出, 而 Ag 和 Cu 含量普遍较低; ④墨江样品特征元素对的比值变化较大, 即使是同类样品也如此, 显示其中贵金属元素分布受到多种地质作用的控制。其 Pt/Pd 比值为 $0.09 \sim 1.57$, 均低于球粒陨石的 Pt/Pd (1.84), 而 Pd/Ir 比值为 $0.18 \sim 10.0$, 大多数高于球粒陨石的 Pd/Ir 比值 (1.21) (表 1), 相对靠近岩浆型镍矿的 Pd/Ir 比值, 而远低于热液型镍矿的 Pd/Ir 比值 (>100 , Maier et al., 1996), 说明墨江金镍矿中镍矿主要为岩浆成因, 后期热液作用并不是 Ni 成矿的主导因素。

类似于稀土元素 (REE) 的 Eu 和 Ce 异常表达方式, 可以采用如下公式计算 PGE 中 Pt 和 Pd 的异常:

$$\text{Pt/Pt}^* = \frac{\text{Pt}_N}{\sqrt{\text{Rh}_N \cdot \text{Pd}_N}}, \quad \text{Pd/Pd}^* = \frac{\text{Pd}_N}{\sqrt{\text{Pt}_N \cdot \text{Au}_N}}$$

式中 Pt_N 、 Rh_N 、 Pd_N 、 Au_N 均为球粒陨石标准化值。

对墨江不同类型样品的 PGE + Au 数据进行 CI 碳质球粒陨石标准化后作图 (图 3), 从中可见: 各种样品的 PGE + Au 元素配分曲线较为一致, 绝大多数样品的 Pt 和 Ir 为负异常, Ru 和 Rh 为正异常, 图型呈较明显的 M 型, 表 1 上也可见墨江样品多数的 $\text{Pt/Pt}^* < 1$, 显示金镍矿和镍矿中的 PGE 来源较为一致, 与超基性岩体有关。同时, 绝大多数样品中较高的 Ru 正异常说明墨江金镍矿的原始岩浆中 S 已达到饱和, 因为在 PGE 中, 只有 Ru 可单独与 S 形成硫化物 RuS_2 , Ru 的含量可以用来指示岩浆中 S 是否达到饱和 (Barnes et al., 1985)。

在 Pt/Pd-Ir/Pd 关系图 (图 4) 上, 可见墨江各类矿石和超基性围岩主要落在地幔线附近, 也显示该矿中 PGE 主要来源于地幔。在 Cu/Ir-Ni/Pd 和 Ni/Cu-Pd/Ir 图上 (图 5), 可见墨江多数样品落在地幔岩范围内或其附近, 亦显示墨江金镍矿中超基性岩的原始岩浆直接来自地幔。

Pd/Ir-Pt/Pt* 图 (图 6) 上, 可见墨江矿石和超

表 1 墨江金镍矿主要矿石和围岩铂族元素(PGE)、Au、Ag、Ni和Cu含量及相关参数
Table 1 PGE, Au, Ag, Ni and Cu contents and relative parameters of ores and around rocks from Mojiang Au-Ni deposit

样号及样品描述	$w_B/10^{-9}$								$w_B/10^{-6}$				Pt/Ir	Pd/Ir	Ir/Au	Pt/Pd	Cu/Pd	PPGE* / IPGE	Σ PGE	Pt/Pt* Pd/Pd*	
	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	Ag	Ni	Cu											
猫鼻梁子 1783 坑道																					
03104 含 Cr 水云母金镍矿石	1.10	0.79	1.92	0.31	0.27	0.26	781.89	0.50	10037	58.0	0.34	0.33	0.001	1.04	223076.92	0.22	4.65	0.25	0.01		
03105 同上	6.99	1.50	14.62	0.73	0.42	4.05	135.49	0.50	2913	3.0	0.28	2.70	0.011	0.10	740.74	0.23	28.31	0.06	0.37		
03106 金镍矿石	41.57	4.05	29.92	0.89	10.09	6.44	910.16	1.80	10883	1.5	2.49	1.59	0.004	1.57	232.92	0.23	92.96	1.12	0.05		
烂山露天采场																					
03128 超基性岩中金镍矿石	0.37	1.20	0.31	0.25	0.23	0.22	>1500	6.00	1862	27.7	0.19	0.18	<0.001	1.05	125909.09	0.37	2.58	0.26	0.01		
2号矿体																					
03137 同上	7.62	8.10	17.71	2.10	1.22	13.73	>1500	3.00	14922	3.6	0.15	1.70	<0.005	0.09	262.20	0.51	50.48	0.06	0.22		
03138 蚀变橄榄岩	6.02	3.47	11.92	1.05	0.41	2.15	281.58	0.50	4489	2.5	0.12	0.62	0.012	0.19	1162.79	0.17	25.02	0.07	0.14		
10号矿体																					
03143 蚀变橄榄岩	2.25	1.51	7.76	0.82	1.18	1.06	115.26	0.2	3662	2.4	0.78	0.70	0.013	1.11	2264.15	0.27	14.58	0.34	0.06		
猫鼻梁子																					
03145 橄榄岩	6.16	4.80	11.99	1.16	1.21	6.83	105.70	0.00	2360	51.0	0.25	1.42	0.045	0.18	7467.06	0.40	32.15	0.11	0.41		
03146 镍矿石	4.09	3.02	9.68	0.57	0.69	3.75	229.77	0.20	3036	21.0	0.23	1.24	0.013	0.18	5600.00	0.30	21.80	0.12	0.20		
03147 风化镍矿石	2.60	5.58	14.25	0.62	1.17	4.43	163.51	0.00	60	20.4	0.21	0.79	0.034	0.26	4604.97	0.28	28.65	0.19	0.22		
03148 镍矿石	5.70	2.63	15.33	1.05	0.72	8.76	305.12	0.20	31747	84.0	0.27	3.33	0.009	0.08	9589.04	0.45	34.19	0.06	0.40		
03149 镍矿石	11.63	4.89	53.98	2.66	10.68	25.82	111.09	0.20	4997	13.3	2.18	5.28	0.044	0.41	515.10	0.56	109.66	0.34	0.51		
03150 金镍矿石	2.59	5.85	15.88	1.47	0.86	4.55	550.64	0.20	634	5.6	0.15	0.78	0.011	0.19	1230.77	0.28	31.20	0.09	0.14		
M9-1 含金石英脉	1.1	0.4	1.2	<1	0.1	2.2	175300	976.9			0.25	5.50	0.000	0.05		1.22	6.00	0.02	0.01		
M176 菱镁岩	4.8	1.0	7.8	5.0	5.9	10.0	110.0	<1.0			5.90	10.00	0.009	0.59		1.54	34.50	0.22	0.27		
原始地幔	3.4	3.2	5.0	0.9	7.1	3.9	1.0				2.22	1.22	3.20	1.82		1.03	23.50	1.00	1.00		
CI 球粒陨石	490	455	710	130	1010	550	140				2.22	1.21	3.25	1.84		1.11	3345.00	1.00	1.00		

* 不包括 Au 在内。

M9-1、M176 据冉红彦等,1996;原始地幔、CI 球粒陨石据 McDonough et al.,1995;其余为本文数据。

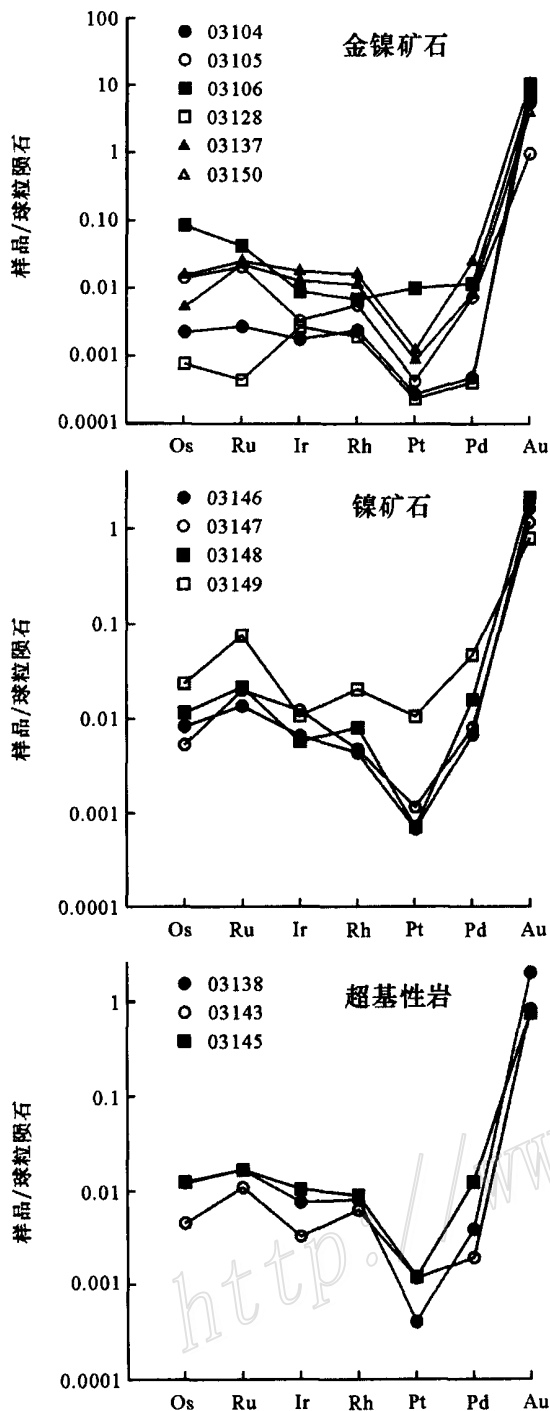


图 3 墨江金镍矿主要矿石和超基性岩体 PGE + Au 的球粒陨石标准化曲线

CI 球粒陨石 PGE 和 Au 含量据 McDonough et al., 1995

Fig. 3 Chondrite-normalized patterns of PGE and Au in ores and ultramafic intrusions in the Mojiang Au-Ni deposit
The PGE and Au contents of CI chondrite after McDonough et al., 1995

基性岩主要落在部分熔融趋势线内,而远离结晶分异趋势线,显示墨江金镍矿的原始岩浆主要是地幔

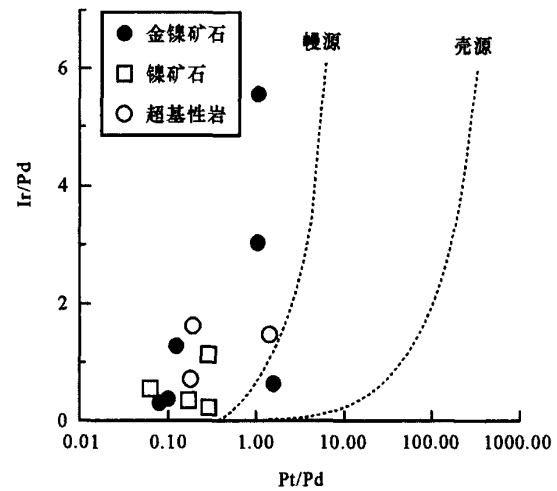


图 4 墨江金镍矿主要矿石和超基性岩体 Pt/Pd-Ir/Pd 关系图(据 Jiang et al., 2003 改编)

Fig. 4 Pt/Pd versus Ir/Pd diagram of ores and ultramafic intrusions from the Mojiang deposit(modified after Jiang et al., 2003)

岩部分熔融形成的,但变化很大的 Cu/Pd 比值(表 1)显示其部分熔融的程度相差较大。实验资料证实,在岩浆结晶分异过程中,IPGE 相对于 PPGE 为相容元素,IPGE 优先进入橄榄石等矿物中,PPGE 主要进入残留熔体;而在部分熔融过程中,PPGE 优先进入熔浆中,IPGE 留在残留体内,使得部分熔融形成的岩浆的原始地幔或球粒陨石配分曲线具有富集 PPGE 而亏损 IPGE 的特点。许多地幔熔岩正具有这种 PGE 配分模式(Lorand et al., 1999; Tatsumi et al., 2000)。但是,墨江金镍矿超基性岩和矿石的 PGE 配分曲线正好相反,具有富集 IPGE 和亏损 PPGE 的正斜率型配分模式,与西藏许多蛇绿岩套底部地幔橄榄岩的 PGE 配分模式相似(喻亨祥等, 2000; 夏斌等, 2001; 陈根文等, 2002),说明墨江金厂超基性岩可能是由经历了基性岩浆抽提和交代作用形成的亏损地幔部分熔融产生的。

由于墨江矿区受到强烈的韧性变形和逆掩推覆以及伴随的水/岩反应,原生矿石的结构构造受到较多的破坏而被掩盖。但从镍矿的 PGE 组成看,其主成矿期应与金厂岩体同时,亏损上地幔部分熔融而来的超基性岩浆中接近饱和的 S 与岩浆中的 Fe^{2+} 等形成黄铁矿等硫化物,由于 Ni^{2+} 在硫化物和硅酸盐熔体间的配分系数为 100 左右, Ni^{2+} 将会优先进入硫化物,而形成岩浆型镍矿。后期的韧性剪切变形对超基性岩等围岩进行强烈的改造的同时,其中的硫化物亦将发生塑性变形。来自下地壳等地的地质

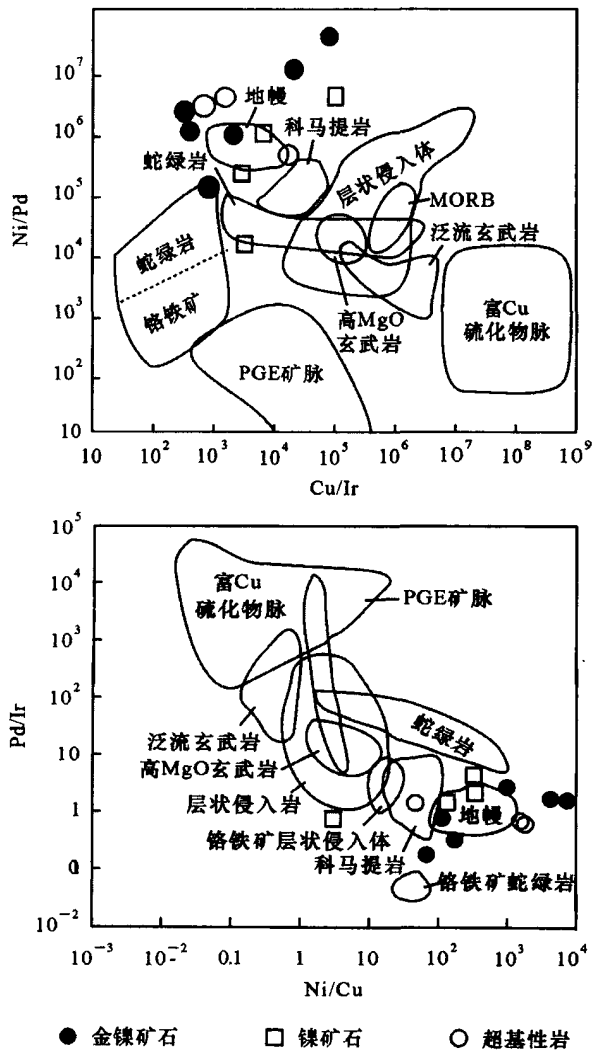


图5 墨江金镍矿主要矿石和超基性岩体 Cu/Ir - Ni/Pd 和 Ni/Cu - Pd/Ir 图(引自 Pasava et al., 2003)

Fig. 5 Cu/Ir versus Ni/Pd and Ni/Cu versus Pd/Ir diagram of the Mojiang deposit (after Pasava et al., 2003)

流体对原生镍矿石及其围岩进行交代,导致 Ni 等元素的活化迁移,并形成金的矿化。因此墨江应属早期岩浆型 Ni 矿和晚期热液型 Au(Ni)矿叠加形成的复合矿床,其中岩浆型镍矿的成矿时代将有待于矿石中含镍黄铁矿等硫化物的 Re-Os 同位素精确定年。

4 主要结论

(1) 墨江金镍矿矿石中 PGE 含量均较低, Σ PGE 为 $(2.58 \sim 109.66) \times 10^{-9}$, 与蚀变超基性岩的 Σ PGE $[(14.58 \sim 50.48) \times 10^{-9}]$ 相差不大, 且矿石与超基性围岩 PGE + Au 的球粒陨石标准化模式基本一致, 均为 Pt 和 Ir 相对亏损和 Ru 及 Rh 相对富

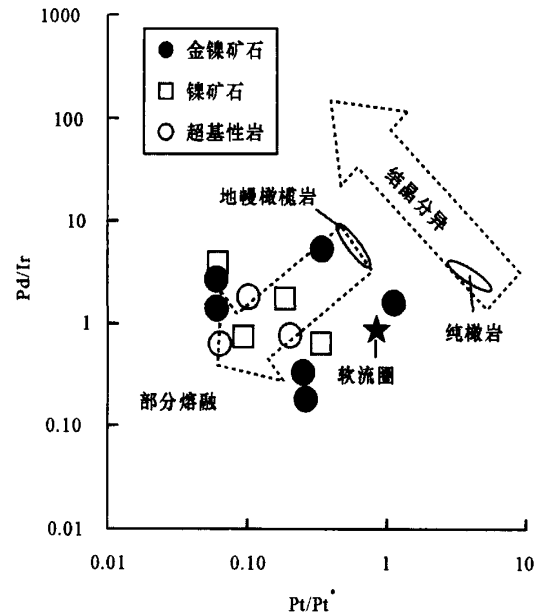


图6 墨江金镍矿主要矿石和超基性岩体 Pd/Ir 和 Pt/Pt* 图(据 Garuti et al., 1997; Jiang et al., 2003 改编)

Fig. 6 Pd/Ir versus Pt/Pt* diagram of ores and ultramafic intrusions from the Mojiang deposit (modified after Garuti et al., 1997; Jiang et al., 2003)

集的 M 型, 显示墨江金镍矿 PGE 来源较为一致, 主要来自超基性围岩;

(2) 墨江金镍矿 Pd/Ir 比值为 0.18 ~ 10.0, 远低于典型热液型镍矿的 Pd/Ir 值 (>100), 说明其中的镍主要为岩浆成因, 后期热液改造并不是 Ni 成矿的主导因素; 因此墨江为早期岩浆型 Ni 矿和晚期热液型 Au(Ni)矿组成的复合矿床;

(3) 墨江金镍矿的超基性围岩直接来自地幔, 是由经历了基性岩浆抽提和交代作用形成的亏损地幔发生程度不同的部分熔融形成的, 其原始岩浆中硫已达到饱和。

致谢 本文野外采样和资料收集得到了云南墨江金矿地质科、云南省地质调查院、云南省地质矿产勘查开发局和武警黄金部队第十三支队的大力支持, PGE 样品分析得到河南岩矿分析测试中心姚文生高工的协助, 微量元素 ICP-MS 测定由南京大学成矿作用国家重点实验室高剑峰完成, 谨致谢忱!

References

- Barnes S J and Naldrett A J. 1987. Fractionation of the platinum-group elements and gold in some komatiites of the Abitibi greenstone belt,

- Northern Ontario[J]. *Econ. Geol.*, 82(1): 165 ~ 183.
- Barnes S J, Couture J F and Sawyer E W. 1993. Nickel-copper occurrences in the Belleterre-Angliers belt of the Pontiac subprovince and the use of Cu/Pd ratios in interpreting platinum-group element distributions[J]. *Econ. Geol.*, 88: 1402 ~ 1418.
- Barnes S J, Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas[J]. *Chem. Geol.*, 53: 303 ~ 323.
- Chai G and Naldrett A J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China[J]. *Econ. Geol.*, 87: 1475 ~ 1495.
- Chen G W, Xia B, Mei H J, Wang G Q, Zhong Z H, Wang H and Qi L. 2002. Geochemical characteristics of precious metallic elements in the mantle peridotite from Luqu ophiolite, Tibet[J]. *Geochimica*, 31(6): 549 ~ 556(in Chinese with English abstract).
- Chen J R, Cui X W and Wu Y H. 2002. Study on the diagenetic and metallogenic age of Jinchang gold deposit in Mojiang, Yunnan[J]. *Gold Geol.*, 8(1): 1 ~ 5 (in Chinese with English abstract).
- Chu X L, Sun M and Zhou M F. 2001. The platinum-group elements geochemistry in chemical geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 112 ~ 122(in Chinese with English abstract).
- Chu X L, Sun M and Zhou M F. 2002. PGE patterns of ores of the Dajing Cu-poly metallic deposit in Linxi County, Inner Mongolia: Indicator to source of metallogenic elements[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 47: 1119 ~ 1124.
- Fang W X, Hu R Z, Xie G Q, Su W C and Qi L. 2001. Diagenetic-metallogenetic ages of pyrite cherts and their implications in Mojiang nickel-gold deposit in Yunnan Province, China[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 46(10): 857 ~ 860(in Chinese).
- Fleet M E and Stone W E. 1991. Partitioning of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55: 245 ~ 253.
- Fleet M E, Crockett J H and Stone W E. 1996. Partitioning of platinum group elements (Os, Ir, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 2397 ~ 2412.
- Garuti G, Fershtater G and Bea F. 1997. Platinum-group elements as petrological indicator in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: Preliminary results[J]. *Tectonophysics*, 276: 181 ~ 194.
- He G W, Sun X M, Yang S X, Xue T, Song C B, Shi G Y, Zhang M and Han X Q. 2006. Platinum group elements (PGE) geochemistry of polymetallic nodules in CC zone, east Pacific Ocean[J]. *Mineral Deposits*, 25(2): 164 ~ 174(in Chinese with English abstract).
- Hu Y Z, Tang S C, Wang H P, Yang Y Q and Deng J. 1995. Geology of gold deposits in Ailaoshan[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 106 ~ 250 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Yang J H, Ling H F, Feng H Z, Chen Y Q and Chen J H. 2003. Re-Os isotopes and PGE geochemistry of black shales and intercalated Ni-Mo polymetallic sulfide bed from the Lower Cambrian Niutitang Formation, South China[J]. *Progress in Natural Sciences*, 13(10): 788 ~ 794.
- Jiang Z. 1984. The geochemical process of the formation of the Jinchang gold-nickel deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 20(1): 6 ~ 13 (in Chinese with English abstract).
- Li D M, Cao Z M, Tang G J, He S X, Li B H, Wen C Q and Xu Z M. 1998. Gold deposits in Ailaoshan ophiolitic mélange zone[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 52 ~ 115 (in Chinese with English abstract).
- Li S R, Gao Z M and Chen N S. 1994. A trial discussion on geochemical tracing system of platinum group elements[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1: 36 ~ 37 (in Chinese).
- Li X L, Cai Z F and Mao X Y. 1998. Study of geochemical tracing of platinum group elements: the geochemical characteristics of platinum group elements in Xinjie layered intrusion, Sichuan Province[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 41 (Supp.): 162 ~ 168 (in Chinese with English abstract).
- Li Y. 1992. Discussion on metallogenetic material sources of Mojiang gold deposit[J]. *Yunnan Geol.*, 11(2): 130 ~ 143((in Chinese with English abstract).
- Lorand J P, Gros M and Pattou L. 1999. Fractionation of platinum-group element in the upper mantle: A detailed study in Pyrenean orogenic peridotites[J]. *J. Petrol.*, 40: 951 ~ 987.
- Lorand J P. 1989. Abundance and distribution of Cu-Fe-Ni sulfides, sulfur, copper and platinum-group elements in orogenic type spinel lherzolites massifs of Ariege (Northeastern Pyrenees, France)[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 93: 50 ~ 64.
- Maier W D, Barnes S J and Teigler B. 1996. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld complex: Implications for platinum-group element exploration[J]. *Econ. Geol.*, 91: 1151 ~ 1158.
- Maier W D and Barnes S J. 2004. Pt/Pd and Pd/Ir ratios in mantle-derived magmas: A possible role for mantle metasomatism[J]. *South African Journal of Geology*, 107: 333 ~ 340.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth[J]. *Chem. Geol.*, 120: 223 ~ 253.
- Naldrett A J and Duke M. 1980. Platinum metals in magmatic sulfide ores[J]. *Sci.*, 208: 1417 ~ 1424.
- Naldrett A J. 1981. Nickel sulfides deposits: Classification, composition and genesis[J]. *Econ. Geol.*, 75 Ann: 628 ~ 685.
- Naldrett A J, Asia M and Krstic S. 2000. The composition of mineralization at the Voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to Platinum-group elements[J]. *Econ. Geol.*, 95(4): 845 ~ 865.
- Pasava J, Barnes S and Vyoma A. 2003. The use of mantle normalization and metal ratios in the identification of the sources of platinum-group elements in various metal-rich black shales[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 775 ~ 783.
- Pasava J, Vyoma A, Petersen S and Herzig P. 2004. PGE distribution in massive sulfides from the PACMANUS hydrothermal field, eastern Manus basin, Papua New Guinea: Implications for PGE enrichment in some ancient volcanogenic massive sulfide deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 39: 784 ~ 792.
- Ran H Y, Huang W K, Gan X P, Shan Z X, Tao M and Liu Y. 1996.

- The noble elements in the gold deposits related to altered ultrabasic rock massives[J]. *Geochimica*, 25(5): 520 ~ 528 (in Chinese with English abstract) .
- Tatsumi Y, Oguri K, Shimoda G, Kogiso T and Barszczus H G. 2000. Contrasting behavior of noble-metal elements during magmatic differentiation in basalts from the Cook Islands, Polynesia[J]. *Geol.*, 28: 131 ~ 134.
- Xia B, Chen G W, Mei H J, Guo L Z, Xiao X C, Yu H X, Qi L, Wang G Q and Zhong Z H. 2001. PGE geochemistry of Jiding ophiolite in Tibet and its constraint on mantle processes[J]. *Sciences in China (Series D)*, 44(11): 1019 ~ 1028.
- Xie G Q, Hu R Z, Mao J W, Fan W X and Li R L. 2004. Discussion on metallogenic ages of Mojiang gold deposit in Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 253 ~ 260 (in Chinese with English abstract) .
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, Zhai S K, Li W B and Guan T. 2003. Review on geochemistry of platinum group elements[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 520 ~ 528 (in Chinese with English abstract) .
- Ying H L, Wang D H and Liu H L. 2005. Geology and formation time of nickel mineralization in Jinchang nickel-gold deposit, Mojiang, Yunnan[J]. *Mineral Deposits*, 24(1): 44 ~ 52 (in Chinese with English abstract) .
- Yu H X, Xia B, Mei H J, Gu L Z, Qi L and Tu X L. 2000. The distribution characteristics of PGE in mantle rocks in the Dazuka ophiolite, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(22): 2446 ~ 2452 (in Chinese) .
- 储雪蕾, 孙敏, 周美夫. 2002. 内蒙古林西大井铜多金属矿床矿石的铂族元素分布和物质来源[J]. *科学通报*, 47(6): 457 ~ 461.
- 方维萱, 胡瑞忠, 谢桂青, 苏文超, 漆亮. 2001. 墨江镍金矿床(黄铁矿) 硅质岩的成岩成矿时代及意义[J]. *科学通报*, 46(10): 857 ~ 860.
- 何高文, 孙晓明, 杨胜雄, 薛婷, 宋成兵, 石贵勇, 张美, 韩喜球. 2006. 东太平洋 CC 区多金属结核铂族元素(PGE) 地球化学及其意义[J]. *矿床地质*, 25(2): 164 ~ 174.
- 胡云中, 唐尚鹑, 王海平, 杨岳清, 邓坚. 1995. 哀牢山金矿地质[M]. 北京: 地质出版社. 106 ~ 250.
- 蒋志. 1984. 金厂金镍矿床形成的地球化学过程[J]. *地质与勘探*, 20(1): 6 ~ 13.
- 李定谋, 曹志敏, 覃功炯, 何叔欣, 李保华, 温春齐, 徐则民. 1998. 哀牢山蛇绿混杂岩带金矿床[M]. 北京: 地质出版社. 52 ~ 115.
- 李胜荣, 高振敏, 陈南生. 1994. 试论铂族元素地球化学示踪体系[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1: 36 ~ 37.
- 李晓林, 柴之芳, 毛雪瑛. 1998. 铂族元素地球化学示踪研究——四川新街层状侵入岩体铂族元素地球化学特征[J]. *地球物理学报*, 41(增刊): 162 ~ 168.
- 李元. 1992. 墨江金矿床的成矿物质来源[J]. *云南地质*, 11(2): 130 ~ 143.
- 冉红彦, 黄婉康, 甘先平, 单祖翔, 陶密, 刘雁. 1996. 蚀变超基性岩金(镍) 矿床中的贵金属元素——以云南墨江金矿和陕西煎茶岭金矿为例[J]. *地球化学*, 25(5): 520 ~ 528.
- 夏斌, 陈根文, 梅厚均, 郭令智, 肖序常, 喻亨祥, 漆亮, 王国强, 钟志洪. 2001. 西藏吉定蛇绿岩铂族元素地球化学及其对地幔过程的制约[J]. *中国科学(D辑)*, 31(7): 578 ~ 585.
- 谢桂青, 胡瑞忠, 毛景文, 方维萱, 李瑞玲. 2004. 云南墨江金矿床成矿时代探讨[J]. *矿床地质*, 23(2): 253 ~ 260.
- 许成, 黄智龙, 刘丛强, 翟世奎, 李文博, 管涛. 2003. 铂族元素地球化学研究评述[J]. *地学前缘*, 10(4): 520 ~ 528.
- 应汉龙, 王登红, 刘和林. 2005. 云南墨江金厂镍金矿床镍矿化地质特征及形成时间[J]. *矿床地质*, 24(1): 44 ~ 52.
- 喻亨祥, 夏斌, 梅厚均, 郭令智, 漆亮, 涂湘林. 2000. 西藏大竹卡蛇绿岩中地幔橄榄岩铂族元素分布特征[J]. *科学通报*, 45(22): 2446 ~ 2452.

附中文参考文献

- 陈根文, 夏斌, 梅厚均, 王国强, 钟志洪, 王核, 漆亮. 2002. 西藏路曲蛇绿岩地幔橄榄岩的贵金属元素地球化学特征[J]. *地球化学*, 31(6): 549 ~ 556.
- 陈锦荣, 崔学武, 武玉海. 2002. 云南墨江金矿床成岩成矿年龄研究[J]. *黄金地质*, 8(1): 1 ~ 5.
- 储雪蕾, 孙敏, 周美夫. 2001. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学[J]. *岩石学报*, 17(1): 112 ~ 122.