

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

云南白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学 及其对矿床成因的制约

王生伟¹⁾, 孙晓明^{1,2)}, 石贵勇¹⁾, 熊德信^{1,3)}, 翟伟¹⁾

1) 中山大学地球科学系, 广州, 510275; 2) 南京大学壳幔演化与成矿作用国家重点实验室, 210093;
3) 广东省肇庆学院, 526061

内容提要: 采用镍硫火试金 ICP-MS 法分析了白马寨铜镍硫化物矿床矿石及其主要围岩铂族元素(PGE)含量, 结果表明铂族元素总量(Σ PGE)普遍较低, 且 Σ PGE 由矿床核部的块状矿石 ($78.15 \times 10^{-9} \sim 555.92 \times 10^{-9}$) 向外围矿化橄榄岩 ($6.77 \times 10^{-9} \sim 70.95 \times 10^{-9}$) 至辉长岩 (3.02×10^{-9}) 逐步降低。煌斑岩脉岩的 Σ PGE 也较低, 为 $6.86 \times 10^{-9} \sim 17.03 \times 10^{-9}$ 。 Σ PGE 与 Ni 含量呈明显的正相关。不同种类岩石和矿石的 PGE 原始地幔配分模式明显不同, 块状矿石为 Pt-Pd 配分型, Ir 较明显亏损; 矿化橄榄岩配分曲线较平坦, IPGE 和 PPGE 分异不明显, 但均出现 Ru 正异常。辉长岩样品和煌斑岩 PGE 配分模式几乎一致, 也均出现明显的 Ru 正异常。矿石和围岩的 Cu/Pd 值远高于原始地幔, 表明原生岩浆发生了较强的硫化物熔离作用。块状富镍矿石的 (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru) 和 Pd/Ir 分别为 138.24 和 24.7, 指示其母岩浆为演化较为彻底的玄武质岩浆, 而矿化橄榄岩的相应值分别为 3.02 和 16.09, 具有科马提质岩浆的特征参数, 因此白马寨块状矿石和矿化橄榄岩之间可能没有成因联系。块状硫化物熔体侵位前, 其母岩浆经历过长时间强烈的硫化物熔离作用, 硫化物熔浆作为独立的侵入相而侵入于 III 号岩体核部。这个过程反映了峨眉山幔柱尾部岩浆演化和成矿可能经历过高度的 S 饱和过程。白马寨矿床形成过程中可能受到地壳物质的混染。

关键词: 铂族元素; 岩浆铜镍矿床; 白马寨; 峨嵋大火成岩省; 金平; 云南

云南白马寨是20世纪50年代后期发现的一大型铜镍硫化物矿床, 以其很高的 Cu-Ni 品位和复杂的地质成因而著称。黄智龙(2003)、宋立军(2003, 2005)、管涛(2003, 2004)、张学书(2005)等人分别对该矿进行过地质地球化学研究, 但其成因一直争议较大。汤中立(1995)、宋立军(2003)认为该矿为岩浆熔离分异-脉冲贯入型-后期热液改造型矿床; Wang 等(2005)报道了该矿床的锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 258 ± 3.5 Ma, 并认为该矿为富硫化物橄榄石晶粥侵位, 由不混熔的、密度大的硫化物聚集在中心冷却形成块状硫化物矿石, 围绕块状矿石的剩余岩浆冷却分别形成橄榄岩、辉石岩和辉长岩; 石贵勇等(2006)对该矿富镍块状硫化物矿石进行了精确 Re-Os 定年, 得到其成矿年龄为 259 ± 18 Ma, 平均权重方差(MSWD)为 0.028, 显示其成矿与峨眉山大火成岩省主喷发期基本同时(陶炎等,

2004a, 2004b; Ali et al., 2005)。

铂族元素(PGE)具有强烈的亲硫和亲铁性, 自然界中主要以合金和硫化物形式存在, 超过90%的 PGE 来自于岩浆成因的硫化物矿床。基性和超基性岩是地壳中主要的富铂族元素岩石(Naldrett, 1980)。由于 PGE 具有的特殊地球化学性质, 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, 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; 张成江, 1998; 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; 刘

注: 本文为国家重点基础研究发展规划“973”项目(编号 2002CB412610)、国家自然科学基金项目(编号 40173025)、国家教育部跨世纪优秀人才计划基金和南京大学壳幔演化与成矿作用国家重点实验室开放基金联合资助的成果。

收稿日期: 2006-06-26; 改回日期: 2006-07-24; 责任编辑: 郝梓国, 刘志强。

作者简介: 王生伟, 男, 1978年生。在读博士生。主要从事矿床地球化学研究; 通讯地址: 510275, 广州中山大学地球科学系; Email: zsuwsw@163.com. 通讯作者: 孙晓明, Email: eessxm@mail.sysu.edu.cn。

庆等, 2005; 王瑞廷等, 2004a, 2004b, 2005; 何高文等, 2006; 孙晓明等, 2006)。本文较系统地分析了白马寨主要矿石和围岩的 PGE 组成特征, 并据此初步讨论了其成矿过程。

1 区域及矿床地质概况

白马寨铜镍硫化物矿床位于扬子板块西南缘、哀牢山变质带南端的金平镁铁—超镁铁质岩内, 地

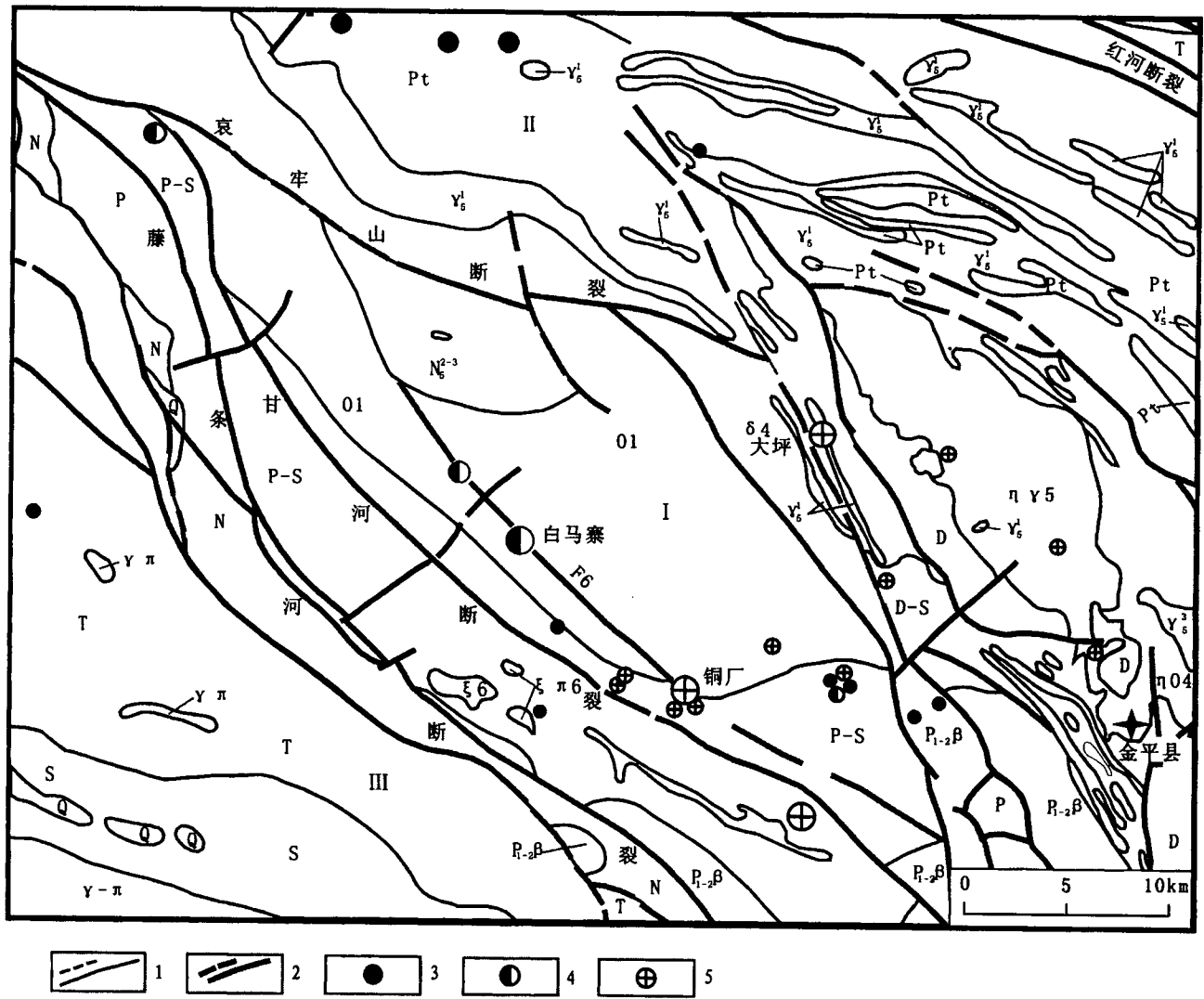


图1 金平地区地质简图(据云南省地质调查院, 2004)

Fig. 1 Geological sketch map of Jinping area(modified after Yunnan Geological Survey, 2004).

1—实测、推测地质界限; 2—实测、推测性质不明断层; 3—铜矿; 4—铜镍硫化物矿床; 5—金矿; I—金平断块; II—哀牢山断块; III—绿春褶皱束; N—第三系砾岩、页岩夹石膏泥岩; Q—第四系冲积层、砾岩、砂岩; T—三叠系砂岩、页岩、板岩; P—二叠系砂岩、页岩、板岩; P-S—二叠—志留系石灰岩、生物碎屑灰岩、白云岩、硅质岩、板岩; S—志留系板岩、砂岩夹灰岩; D-S—志留—泥盆系灰岩、白云岩、硅质岩、板岩、砂岩; D—泥盆系灰岩、白云岩、硅质岩、泥质灰岩; O₁—奥陶系石英砂岩、页岩、板岩夹粉沙岩; Pt—元古界片麻岩、眼球状混合岩、麻粒岩; γ_5^2 —燕山期花岗岩; δ_4 —海西期变闪长岩; $\gamma-\pi$ —印支期花岗岩; P_{1-2}^β —玄武岩; N_{2-3}^2 —基性岩; ϵ_6 —霓霞正长岩; $\epsilon_{\pi 6}$ —正长斑岩; γ_5^1 —花岗岩; $\gamma-\pi$ —石英斑岩; η_{O_4} —黑云石英二长岩; η_{γ_5} —二长花岗岩

1—measured and inferred geological boundaries; 2—measured and inferred faults; 3—copper deposit; 4—Cu-Ni sulfide deposit; 5—gold deposit; I—Jinping fault block; II—Ailao Shan fault block; III—Lvchun bundle of folds; N—Tertiary breccia, shale and gypsum mudstone; Q—Quaternary alluvial deposit, breccia and sandstone; T—Triassic breccia, shale, slate; P—Permian sandstone, shale and slate; P-S—Permian-Silurian limestone, bioclastic limestone, silicalite and slate; S—Silurian slate, sandstone with limestone; D-S—Silurian-Devonian limestone, dolomite, silicalite, slate and sandstone; D—Devonian limestone, dolomite, silicalite and argillaceous limestone; O₁—Ordovician quartzose, shale, slate with siltstone; Pt—Proterozoic gneiss, augen migmatite and granulite; γ_5^2 Yanshanian granite; δ_4 —Hercynian epidiorite; $\gamma-\pi$ —Indosinian granite porphyry; P_{1-2}^β basalt; N_{2-3}^2 —basic rock; ϵ_6 —aegirine-nephelinite syenite; $\epsilon_{\pi 6}$ —orthophyre; γ_5^1 —granite; $\gamma-\pi$ —quartz porphyry; η_{O_4} —biotite-quartz monzonite; η_{γ_5} —adamellite

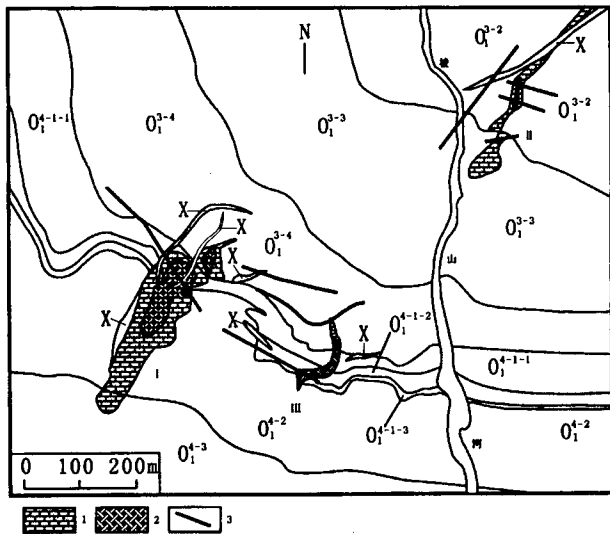


图2 白马寨铜镍矿矿区地质简图
(据宋立军等, 2005改编)

Fig. 2 Sketch geological map of the Baimazhai Ni-Cu deposit (modified after Song et al., 2005)

1—基性岩; 2—超基性岩; 3—断裂; I—岩体及编号; O_1^{3-2} —灰黑色厚层状砂岩; O_1^{3-3} —灰黑色厚层状板岩; O_1^{3-4} —灰黑色中厚层状板岩; O_1^{4-1} —砂岩、砂质板岩-板岩互层; O_1^{4-2} —浅白色长石砂岩; O_1^{4-3} —浅灰色厚层状长石砂岩; X—煌斑岩

1—basic rock; 2—ultramafic rock; 3—fault; I—rock body and its number; O_1^{3-2} —thick layered gray-black sandstone; O_1^{3-3} —thick layered gray-black slate; O_1^{3-4} —medium thick layered gray-black slate; O_1^{4-1} —interlayers of sandstone and sandy slate-slate; O_1^{4-2} —light white-coloured feldspar sandstone; O_1^{4-3} —light grey-coloured thick-layered feldspar sandstone; X—lamprophyre

处金平断块中北部(图1)。该镁铁—超镁铁岩体为带内金平—黑水河镁铁—超镁铁岩带的一部分, 金平—黑水河裂谷带夹持于红河断裂和哀牢山—藤条河缝合带, 呈三角形向北东收拢, 裂谷带的东侧为元古宙的哀牢山群变质基底, 晚二叠纪喷出的峨眉山玄武岩出露于该带的中部, 厚度达4500多米, 空间上与镁铁—超镁铁岩分布区域紧邻。金平断块呈楔形夹于绿春褶皱束和哀牢山断块之间, 西东分别以藤条河大断裂和哀牢山深断裂接壤。金平地区内较有影响的断裂有: 北西向的甘河断裂、三家断裂、金河断裂及大坪—金平断裂等, 这些断裂分别对所控制区块的岩浆活动和成矿作用有显著影响。

研究区北部分布有哀牢山群片麻岩夹变粒岩、角闪岩及少量云母片岩、大理岩等; 金平断块分布有下奥陶系碎屑岩、中上志留系—下二叠系碳酸盐岩、上二叠系峨眉山玄武岩; 绿春褶皱束分布有下

志留系碎屑岩、三叠系碎屑岩夹流纹斑岩。分布于甘河断裂北侧的白马寨基性—超基性岩带内有十余个基性—超基性岩体, 主要辉长岩、辉石岩、橄榄岩、辉绿岩、苦橄岩和细晶辉石岩等, 其次为中碱性正长岩、正长斑岩, 脉岩类为煌斑岩等。这些基性—超基性岩体中除 I、II、III 号岩体有一定规模、含铜镍矿外, 其余岩体均小, 且不具矿化。以 III 号岩体矿化最好、品位高, 是目前主要开采对象。

III 号岩体位于矿区的中部, 侵入于奥陶系砂岩中(图2, 3), 地表出露形态似镰状, 沿 296° 方向延伸倾伏, 倾伏角为 $22^\circ \sim 33^\circ$, 深部为缓侧伏的浅槽状复合体。据现有的勘探资料, 岩体沿轴向水平长度大于 530 m, 平均宽度 190 m, 南西侧较厚, 为 64 m, 北东侧较薄, 为 24 m, 平均 47 m 左右。其轴向与围岩走向基本一致, 但横向与围岩斜交, 仅南西侧与围岩的“S”形构造产状大体吻合。岩体内部及其接触带遭受强烈的蚀变作用, 通过系统的野外观察和岩矿鉴定查明, 岩体自边缘向中心由辉长岩→辉石岩→橄榄辉石岩→橄榄岩过渡系统组成, 构成环带状特征产出, 中心部位被后期贯入的块状硫化矿所充填。辉长岩组成岩体的外壳, 主要分布于岩体的北东端; 橄榄辉石岩和橄榄岩多集中在岩体中部和西南, 大致围绕块状硫化矿构成岩体的核心; 辉石岩介于辉长岩和橄榄岩之间。上述各种岩石之间接触界线清楚, 岩石组分变化较大, 含矿性差异悬殊, 并且形态和产状也各异。此外岩体中尚有各类脉岩类穿插, 以煌斑岩为主。

III 号岩体普遍含矿, 但贫富差异明显, 所有矿体均产于岩体之中或其边缘接触带上。按工业品位和产出地质条件, 圈定出 8 个工业矿体, 包括 6 个原生矿体和 2 个氧化矿体, 其中 1 和 2 号矿体最大, 储量占总储量的 97%, 而以 1 和 3 号矿体最富, Ni 品位一般在 3% 以上。其中 1 号矿体位于岩体中部, 产状与 III 号岩体基本相同, 沿倾斜方向略向岩体南西侧偏移, 为一块状特富矿体。矿体形态呈扁柱状, 在 12 勘探线以东与橄榄岩相吻合, 被橄榄岩所包围; 在 11 线以西为斜穿橄榄岩、辉石岩、辉长岩相, 显示了成矿裂隙系统的控制性和变化性, 15、10 线两处被较厚的煌斑岩脉穿切。其间形状比较规则, 仅南西缘稍有分岔, 总长度 425 m, 宽度 40~72 m, 平均 51 m; 厚度 0.7~21 m, 平均 9.3 m, 厚度变化系数 55%, 组成以致密块状硫化物矿石为主, 边部常有较薄的角砾状矿石断续分布, 与 2 号矿体的接触界线清楚, 在其底部常有数米或数十米的细粒磁铁

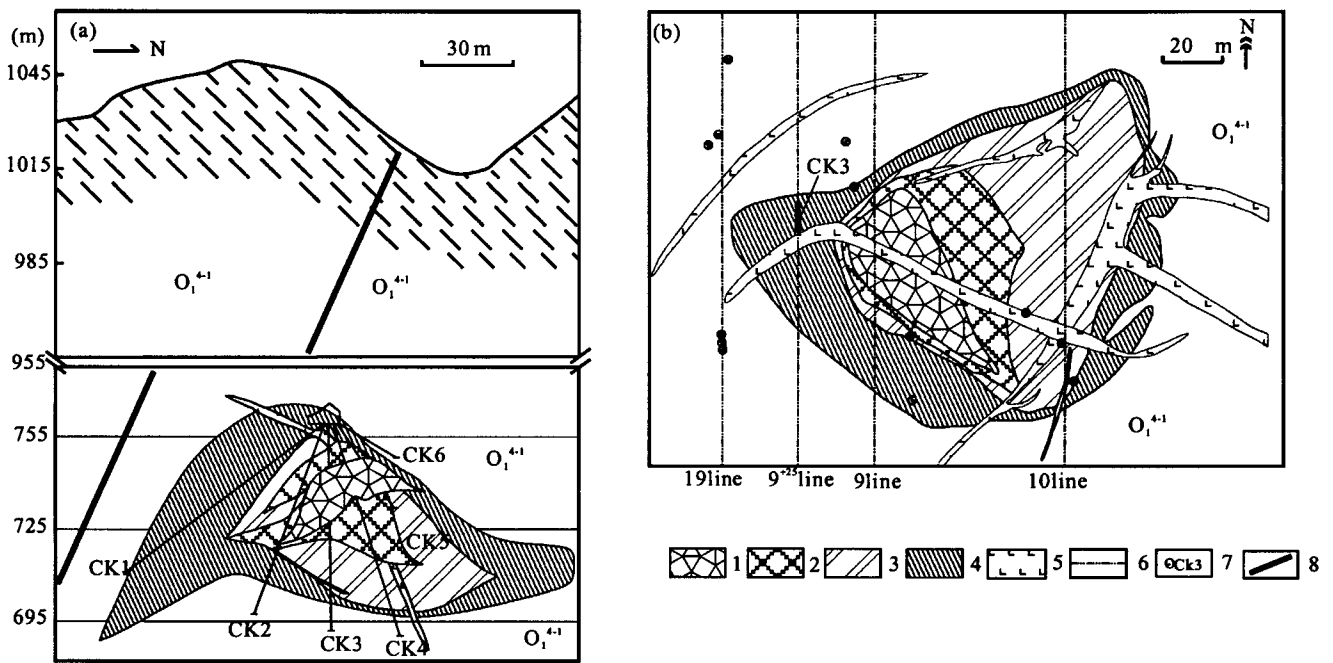


图3 白马寨 Cu-Ni 矿三号岩体平面和剖面图(据白马寨铜镍矿地质科, 2003)

Fig. 3 Plane and profile section map of the intrusion body 3 in the Baimazhai Cu-Ni deposit (modified after Geological Section Office of Baimazhai Cu-Ni deposit, 2003)

(a)—Ⅲ 岩体9+25勘探线剖面图; (b)—Ⅲ 号岩体755中段平面图。1—块状矿石; 2—矿化橄榄岩; 3—辉石岩; 4—辉长岩; 5—煌斑岩; 6—勘探线; 7—钻孔及其编号; 8—断层; O_1^{4+1} —奥陶系砂岩及板岩
 (a)—The profile section of No 9+25 exploration line; (b)—plane map at 755m level. 1—massive ore; 2—mineralized olivine; 3—pyroxenite; 4—gabbro; 5—lamprophyre; 6—exploration line; 7—drilling hole and its number; 8—fault; O_1^{4+1} —Ordovician sandstone and slate

矿富集带。主要金属硫化物为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿等, 矿体中 Ni、Cu 的品位变化很小, 并保持较稳定的比值, 一般 Ni 含量 2.05%~4.85%, 平均 3.88%; Cu 含量 0.39%~3.26%, 平均 1.99%; Co 含量 0.108%~0.224%, 平均 0.182%; Ni:Cu:Co 约 21:11:1。2号矿体围绕1号矿体分布, 呈扁筒状顺岩体延长, 产状与岩体南西侧基本一致, 为一浸染状中贫矿体。矿体北西端未圈边, 南东端为氧化线所限, 长 436 m, 宽度 72~110 m, 平均 89 m; 含矿的辉长岩、辉石岩、橄榄辉石岩、橄榄岩之比为 3:7:1:35。矿石类型较齐全, 中部以含海绵陨铁状、细粒浸染状矿的橄榄岩型为主; 向边缘, 辉长岩、辉石岩和部分橄榄辉石岩中则为浸染状、斑杂状、斑点状、片状矿石。细脉状矿石多集中于辉石岩中。矿体中平均 Ni 为 0.78%、Cu 为 0.65%, Co 为 0.036%。3号矿体赋存于岩体的中上部与围岩接触处, 为一角砾块状硫化矿脉, 其规模不大, 为 2号矿体的上带, 并被煌斑岩或表外矿所隔, 一般直接顶板为砂岩, 产状与岩体基本一

致。总长约 232 m; 宽度变化较大, 为 7~52 m, 平均 10 m; 厚度 4.8~1.5 m, 平均 2.8 m。矿石以角砾状为主, 局部为斑杂状和细脉浸染状。平均 Ni 3.69%、Cu 1.41%、Co 0.126%。

2 样品及测试方法

本次工作测试样品主要采自白马寨 III 号岩体坑道和 9+25 线 CK3 钻孔岩心的块状硫化物矿石、矿化橄榄岩、矿化辉石橄榄岩、辉长岩和煌斑岩共 15 件, 其中辉长岩呈浅灰绿色, 岩石均已蚀变, 常见辉长—含长结构和辉长结构; 橄榄辉石岩为深灰色或灰绿色, 半自形粒状结构, 纤维鳞片变晶结构, 块状及片状构造, 原生矿物多已蚀变, 主要组成矿物为滑石、透闪石, 次要矿物为白云石、石英、绿泥石、金云母并含有少量楣石、磷灰石; 橄榄岩为暗绿色至黑绿色, 为假象自形粒状结构, 海绵陨铁状结构。岩石虽受强烈蚀变, 但大部分仍保留完好的橄榄石假象, 偶尔可在矿物中心部位见新鲜橄榄石。主要组成矿物为取代橄榄石及辉石等的斜绿泥石、

滑石、叶绿泥石,其次为碳酸盐、金云母、透闪石、黑云母、磁铁矿、硫化物及少量榍石;煌斑岩脉主要为云煌岩,少数为斜云煌岩,一般具轻微蚀变。斑晶由辉石(以单斜辉石为主)、霓辉石、黑云母、橄榄石(假象)组成,基质为正长石、黑云母、少量辉石、磷灰石等,镜下可以看到黑云母明显定向排列。

表1 PGE分析采用的标样标准值和测定值对比

Table 1 Comparison between the recommended and the measured PGE contents in the standard samples

标样	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd
GPt-3 测定值	8.124	4.4	12.6	1.1	6.2	3.7
推荐值	9.6±2	4.3±0.5	14.8±2.7	1.3±0.3	6.4±0.9	4.6±0.6
GPt-4 测定值	2.138	5.8	2.8	4.6	51.2	68.2
推荐值	2.4±0.6	4.7±1.1	2.5±0.2	4.3±0.8	58±5	60±9

注:单位为 $\times 10^{-9}$ 。Ni和Cu等微量元素分析在南京大学壳幔演化与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ELAN9000型的ICP-MS。

样品测试工作在国家地质实验测试中心进行,具体分析流程各为:将200目待测样品与一定比例碳酸钠、硼酸钠、硼砂、玻璃粉、硫磺、面粉混合,倒入坩埚中,加入适当量钨稀释剂在1150高温炉内熔融,把溶体倒入铁模中冷却后取出镗扣,用6mol/L的盐酸溶解镗扣并滤出不溶物,在封闭溶样器中用王水溶解滤渣,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-

MS)测定Os、Ir、Ru、Rh、Pt和Pd。将试样于刚玉坩埚中经 Na_2O_2 熔融分解,王水浸取后蒸发脱水除 SiO_2 ,Te共沉淀富集PGE和Au,用同位素稀释法ICP-MS测定Ru、Ir、Pt和Pd,内标法测定Rh和Au。ICP-MS测定精度 $\text{RSD} \leq 6.5$,测试标样为GDP-3和GDP-4,测定值对比结果见表1,可见测定值与推荐值相当吻合。

3 测试结果和讨论

白马寨主要矿石和围岩的PGE和微量元素测试结果见表2。从表2可见:①白马寨铜镍矿区岩石和矿石铂族元素含量偏低,且不同岩性样品 ΣPGE 差异明显,一般含硫化物越多,PGE含量越高;②核部块状矿石 ΣPGE 为 $(78.15 \sim 555.92) \times 10^{-9}$,矿化橄榄岩为 $(6.77 \sim 70.95) \times 10^{-9}$,辉长岩为 3.02×10^{-9} ,煌斑岩为 $(6.86 \sim 17.03) \times 10^{-9}$,由中心向外PGE含量逐步降低;③Ni与 ΣPGE 之间呈明显正相关性(图4);④钻孔中铂族元素含量随深度和岩性变化而变化(图5),位于核部块状矿石的硫化物Ni和Cu含量最高, ΣPGE 含量以及各个铂族元素和Au含量也随之增加,以Os、Pt、Pd和Au更为明显,Au含量变化较大。矿化橄榄岩Cu、Ni含量较低, ΣPGE 以及PGE含量随之降低,至辉长岩达最低值。

表2 白马寨铜镍硫化物矿床矿石和岩石的铂族元素和Au、Cu、Ni含量

Table 2 PGE and Au, Cu, Ni composition of ores and around rocks from Baimazhai Cu-Ni sulfide deposit

编号	采样位置	岩性	Cu	Ni	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au
05107	755中段31采	矿化橄辉岩	41.67	401.71	0.22	0.30	3.48	0.17	2.69	3.83	7.80
05108	755中段31采	块状富镍矿石	14942.39	46549.15	10.11	1.79	8.95	1.57	229.23	304.27	820.00
05109	755中段31采	块状富镍矿石	11986.26	48774.48	6.85	5.52	11.35	3.14	25.02	26.27	35.00
05112	720中段37采	块状富镍矿石	19397.87	36386.15	4.76	3.14	8.32	2.49	102.38	265.80	670.00
05123	CK3钻孔52.3 m	煌斑岩	471.66	939.08	0.40	0.42	9.93	0.19	2.68	3.41	43.00
05127	CK3钻孔39.4 m	矿化橄榄岩	406.79	526.01	0.14	0.22	4.02	0.10	0.89	1.40	8.80
05129	CK3钻孔33.3 m	矿化橄榄岩	1988.41	5016.12	0.94	1.04	5.47	0.45	4.16	4.95	8.40
05130	CK3钻孔33.1 m	块状富镍矿石	28296.19	30119.76	4.13	0.77	5.68	1.10	228.50	228.25	6.00
05132	CK3钻孔22.7 m	块状富镍矿石	14715.75	42641.01	3.93	1.45	7.64	1.45	159.63	143.37	210.00
05135	CK3钻孔15.0 m	块状富镍矿石	16960.72	36075.16	3.16	1.42	9.64	1.24	198.30	246.83	520.00
05136	CK3钻孔14.5 m	矿化辉石橄榄岩	2239.77	9115.13	0.75	0.81	5.30	0.53	23.35	40.22	84.00
05137	CK3钻孔9.5 m	矿化橄榄岩	7716.43	7383.62	1.17	1.18	5.63	0.82	11.70	7.92	16.00
05138	CK3钻孔6.4 m	云煌岩	45.31	138.07	0.11	0.25	3.40	0.17	1.39	1.54	1.20
05139	CK3钻孔5.0 m	云煌岩	66.22	155.16	0.22	0.35	3.89	0.11	1.62	1.94	8.00
05140	CK3钻孔3.0 m	辉长岩	94.73	224.38	0.09	0.12	1.80	0.04	0.40	0.57	1.40

注:PGE和Au单位为 $\times 10^{-9}$;Cu和Ni为 $\times 10^{-6}$ 。

白马寨不同岩性岩石和矿石的原始地幔标准化 PGE 配分模式明显不同(图6): 块状富镍硫化物矿石为 Pt-Pd 配分型, Ir 较明显亏损; 矿化橄榄岩配分曲线表现为一致的 Ru 正异常, Pd 至 Au 较陡; 辉长岩和煌斑岩的 PGE 配分模式十分相似, Os 至 Pd 较平坦, Pd 至 Au 之间较陡, 均出现明显的 Ru 正异常。

金川是世界第三位、我国最大的岩浆铜镍硫化物矿床, 比较而言, 白马寨 PGE 配分模式与金川矿床较为不同, 后者块状矿石 PGE 配分模式较平坦, Pd 和 Ir 分异不明显(汤中立, 1995; 王瑞廷, 2004b), 而前者块状矿石 PGE 配分模式为 Pt-Pt 配分型, Pd 和 Ir 强烈分异; 金川海绵陨铁状矿石与白马寨同类矿石 PGE 配分曲线大体类似, 但前者具弱 Ru 负异常, 而后者明显的 Ru 正异常, 反映出二者母岩浆差异较大。

关于 Ru 的分异, 同是与峨嵋地幔柱有关的地质体, 不同地区 Ru 异常具有一定差异: 峨眉山清音电站玄武岩未出现 Ru 异常(张成江等, 1998), 金宝山岩体和攀西地区玄武岩具 Ru 负异常(陶琰等, 2004; Zhong et al., 2006), 而白马寨橄辉岩及辉长岩则为明显的正异常。Ru 正异常说明形成白马寨岩体的原始岩浆中 S 曾达到饱和, 因为前人研究显示在 PGE 中, 只有 Ru 可单独与 S 形成硫化物 RuS₂, Ru 的含量可以用来指示岩浆中 S 是否达到饱和(Barnes et al., 1985)。

白马寨主要矿石和围岩的 PGE 特征性参数及其与国内外典型岩浆型铜镍矿的对比见表3和表4, 从中可见白马寨 PGE 的特征参数与目前已知的、具有代表性的地质体参数具有一定的差异, 反映了白马寨母岩浆性质的特殊性。

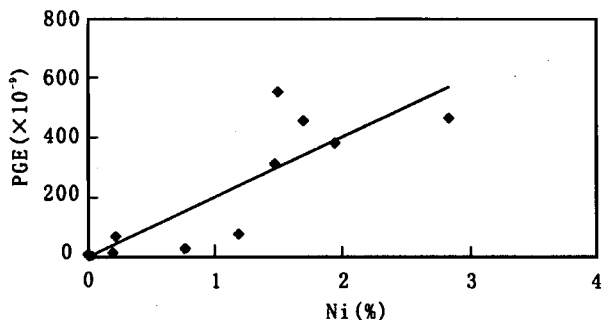


图4 白马寨矿石和围岩 Ni 与 ΣPGE 相关性图解
Fig. 4 Correlation of ΣPGE vs. Ni in Baimazhai Cu-Ni sulfide deposit

由表3可见, 白马寨块状矿石 Pd/Ir 比值变化较大, 为4.76~297.2, 平均138.24, 远高于金川块状矿石的4.82, 也高于富硫化物拉斑玄武岩的77.08 (Barnes, 1985), 在目前已知的岩浆硫化物矿床中极为罕见。一般说来, 岩浆演化越彻底, 其 Pd/Ir 比值越大, 而相应岩浆硫化物的 Pd/Ir 值较小, 这是因为 Pd 和 Ir 在硫化物/硅酸盐中都有很高的分配系数。白马寨矿床块状矿石的 Pd/Ir 值如此之大, 显示形成白马寨块状矿石的母岩浆演化很彻底。此外, 白马寨矿化橄辉岩的 Pd/Ir 为4.75~49.71, 平均16.09, 辉长岩 Pd/Ir 为4.72, 煌斑岩 Pd/Ir 为5.58~8.15, 平均6.59, 均大于原始地幔 Pd/Ir 值 1.22, 说明它们也经过了一定程度的演化, 但明显

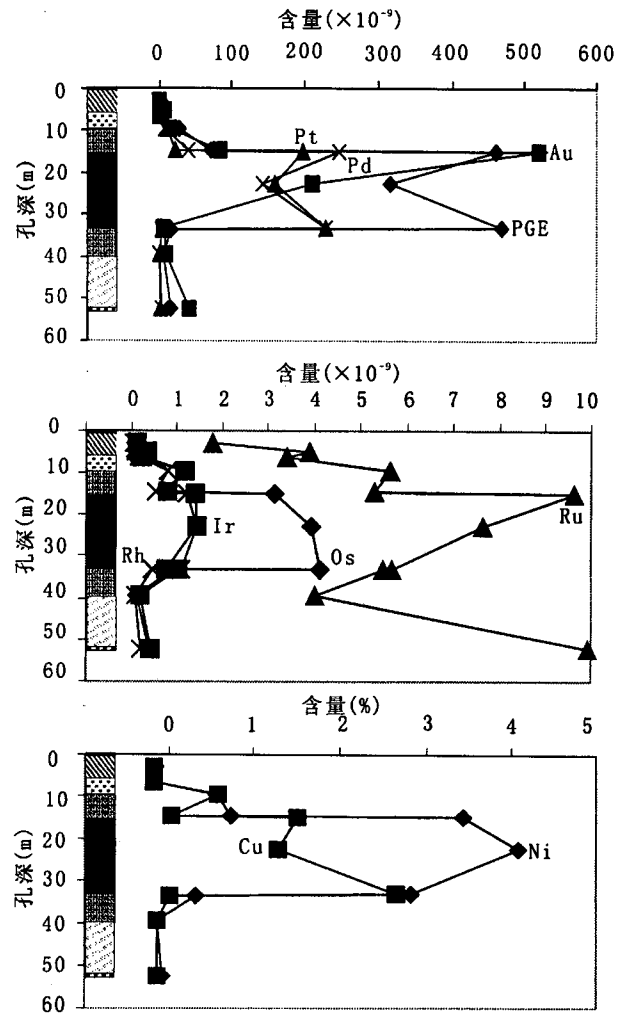


图5 9+25-CK3钻孔 ΣPGE 以及 PGE、Ni 和 Cu 含量随深度变化图(图例同图2)
Fig. 5 Metal elements profile through drill hole 9+25-CK3 (The symbols are same as Fig. 2)

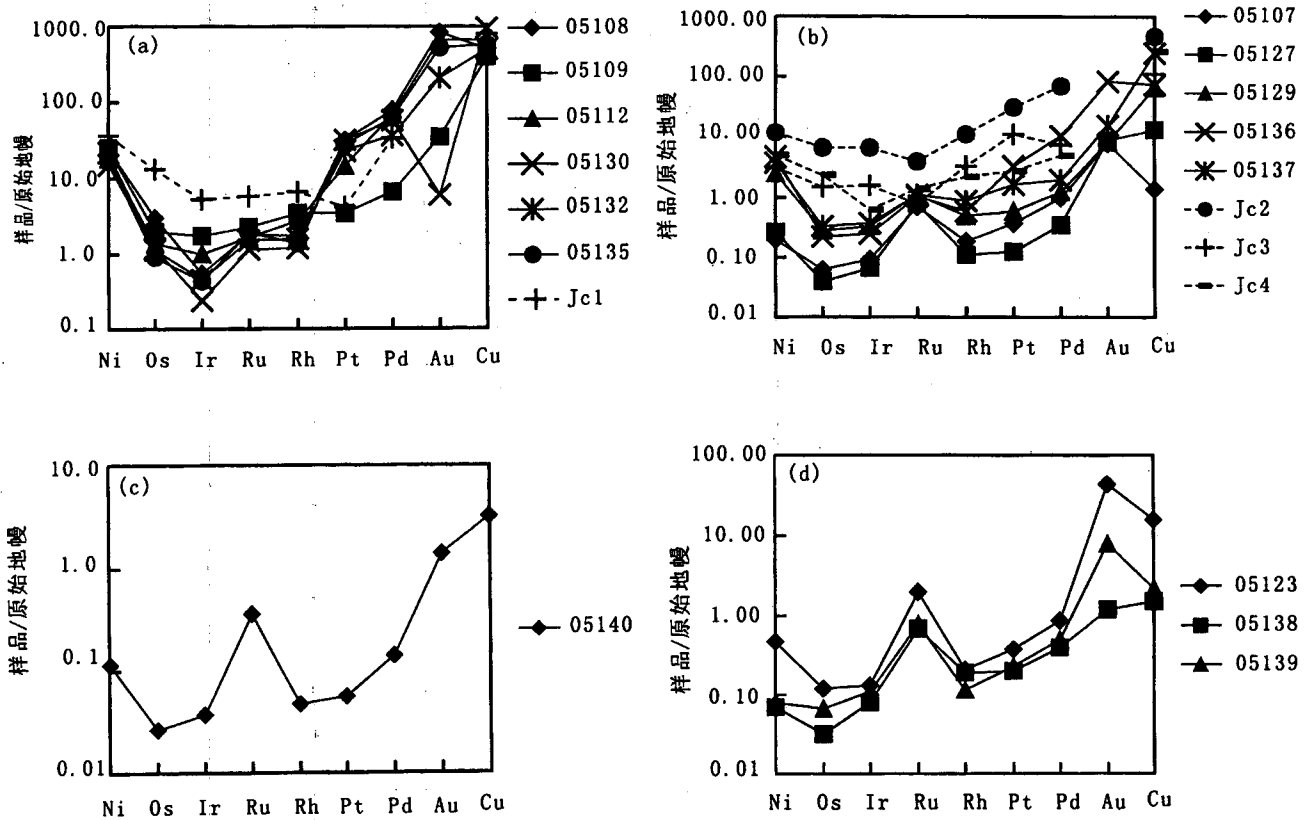


图6 白马寨岩石、矿石原始地幔配分曲线

Fig. 6 Mantle normalized patterns of rock and ore from Bamazhai magmatic sulfide deposit

(a)一块状矿石;(b)矿化橄榄岩(海绵陨铁状和浸染状矿石);(c)辉长岩;(d)煌斑岩(原始地幔 PGE, Au 和 Cu, Ni 据 McDonough et al., 1995; jc₁, jc₂, jc₃ 和 jc₄ 分别代表金川块状矿石、海绵陨铁矿石、星点状矿石和浸染状矿石, 据汤中立, 1995)
 (a)—Massive ore; (b)—mineralized olivine(net-textured and disseminated ore); (c)—gabbro; (d)—lamprophyre(The contents of PGE, Au and Cu, Ni in primitive mantle after McDonough et al., 1995; jc₁, jc₂, jc₃ and jc₄ represent for massive, net-textured, small pots and disseminated ore from Jinchuan magmatic sulfide deposit, after Tang Zhongli, 1995)

表3 白马寨铜镍硫化物矿铂族元素特征参数

Table 3 PGE parameters of Baimazhai Cu-Ni sulfide deposit

样号	样品名称	Pt/Ir	Pd/Ir	Ir/Au	Pt/Pd	Pt/(Pt+Pd)	Cu/Pd	PPGE/IPGE ^①	Pt/Pt	Pd/Pd	Ni/Cu	Cu/(Cu+Ni)	Au/Pd	ΣPGE (×10 ⁻⁶)
05108		128.13	170.08	0.002	0.75	0.43	49108.97	25.59	2.78	0.48	3.12	0.24	2.69	555.92
05109		4.53	4.76	0.158	0.95	0.49	456271.85	2.16	0.73	0.61	4.07	0.20	1.33	78.15
05112	块状	32.63	84.70	0.005	0.39	0.28	72979.21	22.71	1.05	0.69	1.88	0.35	2.52	386.89
05130	富镍	297.53	297.20	0.128	1.00	0.50	123970.17	43.18	3.82	4.21	1.06	0.48	0.03	468.43
05132	矿石	110.47	99.22	0.007	1.11	0.53	102641.80	23.28	2.93	0.54	2.90	0.26	1.46	317.47
05135		139.35	173.46	0.003	0.80	0.45	68714.18	31.30	3.00	0.53	2.13	0.32	2.11	460.59
05107		9.04	12.86	0.038	0.70	0.41	10875.13	1.63	0.88	0.57	9.64	0.09	2.04	10.69
05127	矿化橄	4.09	6.44	0.025	0.64	0.39	289941.05	0.53	0.63	0.34	1.29	0.44	6.27	6.77
05129	榄岩及	3.98	4.75	0.124	0.84	0.46	401374.63	1.22	0.73	0.57	2.52	0.28	1.70	17.01
05136	辉石橄	28.86	49.71	0.010	0.58	0.37	55694.82	9.28	1.33	0.62	4.07	0.20	2.09	70.95
05137	榄岩	9.92	6.71	0.074	1.48	0.60	974788.55	2.46	1.21	0.40	0.96	0.51	2.02	28.42
05140	辉长岩	3.37	4.72	0.086	0.71	0.42	167372.97	0.48	0.69	0.51	2.37	0.30	2.47	3.02
05123		6.40	8.15	0.010	0.79	0.44	138154.45	0.57	0.88	0.22	1.99	0.33	12.60	17.03
05138	煌斑岩	5.47	6.05	0.212	0.90	0.48	29499.02	0.78	0.71	0.81	3.05	0.25	0.78	6.86
05139		4.68	5.58	0.043	0.84	0.46	34185.13	0.80	0.95	0.37	2.34	0.30	4.13	8.12
	原始地幔 ^②	2.22	1.22	3.200	1.82	0.65	7692.31	0.95	1.00	1.00	65.33	0.02	0.26	23.50
	球粒陨石 ^③	2.22	1.21	3.250	1.84	0.65	218.18	0.94	1.00	1.00	87.50	0.01	0.25	3345.00

注: ① PPGE^{*}/IPGE 为 (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru); ②和③引自 McDonough et al. 1995.

表4 铂族元素特征参数对比

Table 4 Comparison of PGE characteristic parameters

序号	名称	Pt/Pd	Pd/Ir	(Pt+Pd)/ (Os+Ir+Ru)
1	布什维尔德MR层矿石	2.2	7.68	6.43
2	安大略科马提岩中的浸染状矿石	10.5	9.8	3.3
3	阿尔卑斯型纯橄榄岩	4.05	0.49	0.68
4	富硫化物拉斑玄武岩	0.38	77.08	13.01
5	原始上地幔	1.36	1.52	1.08
6	原始地幔	1.82	1.22	0.93
7	CI球粒陨石	1.84	1.21	0.94
8	诺里尔斯克			12.58
9	峨眉山玄武岩	1.41	78.5	13.96
10	金川块状矿石	0.55	4.82	1.31
	金川浸染状矿石	1.8	6.17	1.54
	金川海绵陨铁状矿石	2.2	7.68	6.43
	金川星点状矿石	1.71	14	11.88
	金川二辉橄榄岩	1.42	15	10
11	白马寨块状矿石	0.83	138.24	24.7
	白马寨矿化橄榄岩	0.85	16.09	3.02
	白马寨辉长岩	0.71	4.72	0.48
	白马寨煌斑岩	0.84	6.59	0.72

资料来源: 1~4—Barnes et al. (1985, 1987); 5—Ringwood et al. (1991); 6, 7—McDnough et al. (1995), 汤中立等(1995); 8, 10—汤中立等(1995)及王瑞廷等(2004b); 9—张成江等(1998)。

较块状硫化物矿体为弱。

白马寨块状矿石及矿化橄榄岩的Pt/Pd比值分别为0.83和0.85, 小于原始地幔(1.82)及球粒陨石(1.84), 介于富硫化物拉斑玄武岩(0.38)和原始上地幔(1.36)之间; 块状矿石的Au/Pd比值为0.03~2.69, 矿化橄榄岩为1.70~6.27, 辉长岩为2.47, 煌斑岩为0.78~12.60, 表明矿石的PGE组成几乎没有受到热液作用的影响。

前人研究显示(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)值是母岩浆分异程度的函数(Naldrett, 1981), 与玄武质岩浆有关的铜镍硫化物矿床矿石(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)值为5.7~55.6, 与科马提质岩浆有关的铜镍硫化物矿床矿石相应值为1.3~3.5。白马寨块状矿石(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)值为2.16~43.18, 其中大部分高于22.0, 平均为24.7, PPGE和IPGE分异明显, 高于金川块状矿石比值(1.31), 落在玄武质岩浆范围内, 而矿化橄榄岩的比值为0.52~9.28, 平均值为3.02, 落在科马提质岩浆范围内, 显示二者的母岩浆明显不同。

岩浆型铜镍硫化物矿石的S/Se值被认为是判断非地幔硫化物污染的重要指示(Green, 1978; Barrie et al., 1989), 原始岩浆S/Se约为2700(Aller, 1967), 岩浆硫化物矿石为2000~10000(Naldrett, 1981)。金川S/Se为3000~4000(Gang

et al., 1992), 白马寨块状硫化物矿石为8311.90, 接近地壳和酸性岩的S/Se值(8000), 矿化橄榄岩为7288.89(熊凤翔等, 1965), 落入岩浆硫化物矿石的范围内, 但均大于金川, 也说明白马寨岩体演化过程中可能有地壳物质的加入。Re-Os同位素测定显示白马寨块状硫化物矿石¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os初始比值较高, 为0.455±0.024, 相应γOs值为+263, 说明其中有较多的地壳物质加入(石贵勇等, 2006)。

Cu/Pd比值是评价岩浆演化一个重要的参数, 在研究PGE矿床中应用广泛(Barnes, 1993; Maier et al., 1996)。Pd在硫化物/硅酸盐中的分配系数为17000(Fleet et al., 1996), 远大于Cu在硫化物/硅酸盐中的分配系数(约1383), 故Pd主要赋存于岩浆中的硫化物内。岩浆演化过程中, 如S不饱和, 则硫化物无法从硅酸盐中熔离, 赋存于岩浆中硫化物内的Pd将使岩浆中Pd相对与Cu更强烈富集, Cu/Pd值小于地幔; 反之, 如岩浆经历过S饱和, 硫化物熔离过程将使Pd相对于Cu更多被带走, 剩余岩浆Pd较Cu更亏损, 其Cu/Pd值高于原始地幔。表3可见: 白马寨块状矿石Cu/Pd为49108.97~456271.85, 平均为145614.36; 矿化橄榄岩Cu/Pd为10875.13~974788.55, 平均346534.84; 辉长岩为167372.97; 煌斑岩为29499.02~341851.32, 平均值为169834.93, 均远大于原始地幔值6500, 也大于金川Cu/Pd值(50000)(王瑞廷, 2004b)和攀西地区各种玄武岩Cu/Pd值(4667~49347)(Zhong et al., 2006), 表明白马寨原生岩浆曾经S饱和, 且发生过比金川更强烈的硫化物熔离作用, 富含PGE的岩浆滞留于深部, 剩余岩浆因为硫化物的大量熔离而明显亏损PGE, 因此白马寨III号岩体没有出现如金川高PGE含量的矿石。同时, 由于富含PGE的岩浆滞留深部, 金平地区寻找PGE和铜镍硫化物隐伏矿床的潜力巨大。

模拟计算显示, 峨眉山溢流玄武岩源区含硫较低, 因此其部分熔融形成的原始岩浆也应该是S不饱和的(张招崇等, 2005)。从前文可知, 白马寨母岩浆经历过S饱和。要使岩浆从S不饱和变为饱和, 其实现途径包括: 外来S的加入、温度降低、与饱和S岩浆的混合以及长英质物质加入等(Brooks et al., 1999)。金平地区在二叠纪前存在大量的奥陶系砂岩以及志留、泥盆系海相沉积岩, 故S源比较丰富, 砂岩又富SiO₂, 岩浆岩侵位或喷出后温度会降低, 因此金平地区的峨眉山玄武岩具备由S不饱

和岩浆变为饱和进而发生硫化物熔体熔离作用的条件。峨眉山玄武岩的地球化学特征指示一些玄武岩明显受地壳的同化混染作用(张招崇等, 2005); 同时, 白马寨的 Ir/Pd 和 Pt/Pd 图解(图7)中, 样品几乎全部落入幔源与壳源之间, 也表明白马寨明显可能受到壳源物质混染。

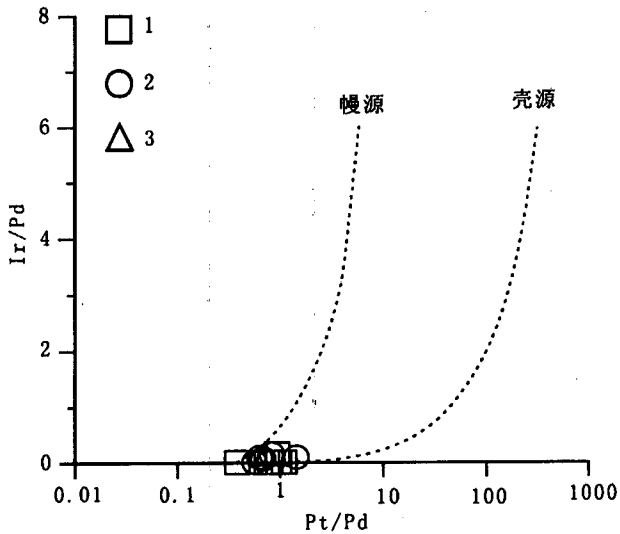


图7 白马寨主要岩石和矿石 Pt/Pd-Ir/Pd 关系图
(据 Jiang et al., 2003 改编)

Fig. 7 Pt/Pd vs. Ir/Pd of main rock and ore from Baimazhai (Modified after Jiang et al., 2003)
1—块状矿石; 2—矿化橄榄岩; 3—辉长岩
1—Massive ore; 2—mineralized olivine; 3—gabbro

4 矿床成因探讨

经过深部熔离后的不含矿岩浆的体积, 比含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆的体积要大得多。在上侵过程中, 不含矿岩浆大部分侵入到不同空间或喷溢出地表形成岩群或岩流, 剩余的岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆可以多次贯入同一空间或分别贯入不同的空间成岩成矿, (汤中立, 1996)。金平地区玄武岩为晚二叠纪峨眉山大火成岩省的一部分, 由于红河断裂的强烈走滑过程使之与相距数百千米的云南宾川玄武岩分离 (Tapponnier, 1990; 肖龙等, 2003)。峨眉山玄武岩为目前公认的峨眉地幔柱的产物, 地幔柱早期体积巨大的玄武岩喷出地表, 形成峨眉山玄武岩的金平部分; 晚期比玄武岩含 MgO 更高的剩余岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆作为地幔柱的尾部, 多次贯入同一空间。金川岩体的母岩浆为高 MgO 辉长质的岩浆 (Naldrett, 1992; 王瑞廷, 2004b)。白马寨矿石在 Pd/Ir-Ni/Cu 图上落在与金

川类似的高 Mg 玄武岩浆范围(图8), 显示其母岩浆也应与晚二叠纪峨眉地幔柱有成因联系。但从前文可知, 白马寨岩体的 Pd/Ir、(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)、Cu/Pd 和 Pt/Pd 等参数与金川差别较大, 尤其是块状矿石, 反映了二者母岩浆所经历的演化过程不同。

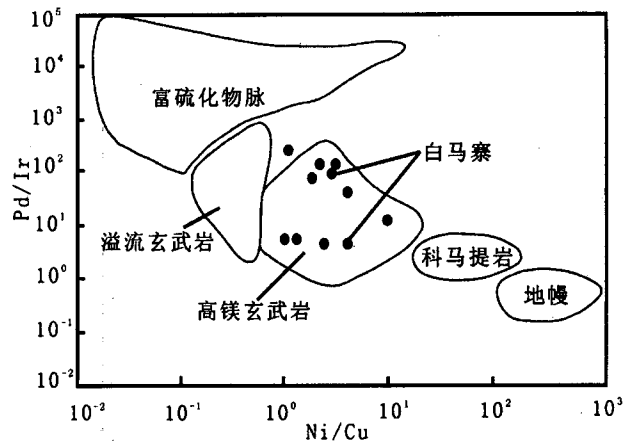


图8 白马寨铜镍硫化物矿床矿石 Ni/Cu-Pd/Ir 图解
(据 Chai et al., 1992 等改编)

Fig. 8 The Ni/Cu vs. Pd/Ir diagram of Baimazhai magmatic sulfide deposit (modified after Chai et al., 1992)

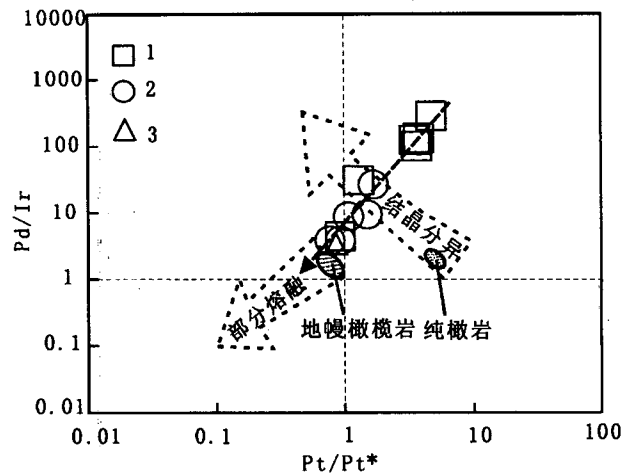


图9 白马寨铜镍硫化物矿床 Pd/Ir-Pt/Pt* 图解
(据 Garuti 等, 1997 改编, 图例同图7)

Fig. 9 Pd/Ir vs. Pt/Pt* diagram of Baimazhai Cu-Ni sulfide deposits (modified after Garuti et al., 1997; the symbols are same as Fig. 7)

图9也说明了白马寨矿床岩石、矿石的 PGE 具有部分熔融趋势, 接近地幔橄榄岩, 暗示了岩浆深部熔离作用的存在。

在部分熔融或结晶分异中,会形成固体和熔体之间互补的分配模式,即如前者富集某元素,后者必然亏损该元素,因此在配分模式中会出现该元素在二者间相反的异常。由于Ir在熔离过程中较Pd更倾向于硫化物中,如果橄榄岩为块状矿石的母岩浆,那么二者体现在Ir及Pd/Ir上也应出现互补关系,即硫化物应该富集Ir同时具有低Pd/Ir值,而橄榄岩亏损Ir且有高Pd/Ir值,然而事实却相反。由此观之,白马寨块状矿石与矿化橄榄岩没有直接的亲缘关系。金平早期喷溢出的、分布于上部的低钛、低Mg的玄武岩(肖龙等,2003)不大可能为白马寨铜镍矿的母岩浆,而其母岩浆可能主要是分布于下部的低钛、高Mg和后期侵入的、地幔柱尾部岩浆。地幔柱上侵到一定深度,由于温度降低和壳源物质混染等原因,使得S不饱和的柱头变为饱和,发生硫化物熔离作用,富含PGE的硫化物离析,导致上升的柱头玄武岩丢失PGE。由于Ir在硫化物/硅酸盐中的分配系数大于Pd,且Ir在尖晶石和铬铁矿中含量较高,二者为高温矿物,Ir熔点高于Pd,故在结晶分异和部分熔融过程中,Ir表现为相容性,即更趋向于向下运移,而Pd相对于Ir趋向于低熔点的玄武岩中。岩浆继续向上运移,喷出地表或高位侵入,形成溢流玄武岩,或辉长岩和辉绿岩;后续岩浆继续侵入,深部剩余岩浆即地幔柱尾部岩浆因结晶分异朝着高MgO、富硫化物方向演化。由于地幔柱尾部岩浆温度较高,可能会融解更多的壳源物质,同时自身温度会因融解壳源物质而大幅下降,使岩浆S溶解度降低,从而继续发生更强烈的硫化物熔离作用。含橄榄石晶体的含矿岩浆侵位速度较快,快速侵入到先前辉石岩和辉长岩岩浆侵位的位置,此后深部剩余岩浆继续融解壳源物质,并暂时停止向上侵位,发生长时间的、强烈熔离作用,绝大部分硫化物熔体从岩浆中析出。当白马寨核部的硫化物矿浆形成时,剩余岩浆的PGE因先前长时间、强烈的熔离作用而强烈亏损,且Ir比Pd更多被硫化物熔体带走,故块状矿石的硫化物熔浆出现低 Σ PGE、Ir负异常和高Pd/Ir的特征。

总之,白马寨PGE地球化学的研究显示其块状矿石与矿化橄榄岩没有直接的亲缘关系,位于核部的硫化物熔浆是作为独立的侵入相而侵入于Ⅲ号岩体核部的。侵位前,其母岩浆发生了长时间的、强烈的硫化物熔离过程。这个过程有别于金川矿床,可能反映了峨眉山地幔柱尾部岩浆演化和成矿特殊过程,即可能经历过高度的S饱和。

5 结论

(1)白马寨Ⅲ号岩体的 Σ PGE含量普遍较低,且从核部块状硫化物矿石到其外围的矿化橄榄岩直至辉长岩呈递减趋势。 Σ PGE含量与Ni含量成明显的正相关。

(2)白马寨不同种类岩石和矿石的PGE配分模式明显不同,块状矿石为Pt-Pd配分型,Ir较明显亏损;矿化橄榄岩配分较平坦,IPGE和PPGE分异不明显,但表现为一致的Ru正异常。辉长岩样品和煌斑岩几乎为一致的配分模式,也均出现明显的Ru正异常。

(3)白马寨块状富镍矿石的(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)值为24.7,Pd/Ir平均值为138.24,指示其母岩浆为演化较为彻底的玄武质岩浆;矿化橄榄岩(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)和Pd/Ir分别为3.02和16.09,具有科马提质岩浆的特征参数;故块状矿石与矿化橄榄岩没有必然的亲缘关系,硫化物熔体侵位前,其母岩浆经历过过长时间的、强烈的硫化物熔离作用。白马寨岩体母岩浆较金川演化得更为彻底;

(4)白马寨矿床岩浆演化中经历过因地壳物质混染等因素导致的S高度饱和的过程。

致谢:本文野外采样和资料收集得到云南金平104镍矿地质科、云南省地质调查院的大力支持,国家地质实验测试中心杜安道老师和曲文俊博士在样品测试过程中给予了很大帮助,在此一并表示诚挚的谢意!

注 释

① 熊凤翔,黄仁新,江鑫培,等. 1965. 云南金平白马寨铜镍矿储量报告. 云南地质局第十五地质队, 10~11.

参 考 文 献

- 储学蕾,孙敏,周美夫. 2001. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学. 岩石学报, 17(1): 112~122.
- 储学蕾,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. 科学通报, 47(6): 457~461.
- 管涛,黄智龙,谢力华,等. 2003. 云南白马寨镍矿区煌斑岩地球化学 I. 主要元素和微量元素. 矿物学报, 23(3): 278~288.
- 管涛,黄智龙,谢力华,等. 2004. 云南白马寨镍矿区煌斑岩地球化学 II. 地幔源区特征. 矿物学报, 24(1): 14~18.
- 何高文,孙晓明,杨胜雄,等. 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. 矿床地质, 25(2): 164~174.
- 黄智龙,管涛,谢力华,许德如. 2003. 岩石学混合计算在岩浆结晶分异作用研究中的应用——以云南白马寨镍矿区煌斑岩为例. 大地构造与成矿学, 27(3): 237~242.

- 李胜荣, 高振敏, 陈南生. 1994. 试论铂族元素地球化学示踪体系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 k k 四川新街层状侵入岩体铂族元素地球化学特征. 地球物理学报, 41(增刊): 162~168.
- 刘庆, 候泉林, 周新华, 等. 2005. 大别造山带祝家铺辉长岩的铂族元素特征. 岩石学报, 21(1): 227~239.
- 石贵勇, 孙晓明, 王生伟等, 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义. 岩石学报(待刊).
- 宋立军, 吴冲龙, 朱杰勇, 等. 2005. 白马寨铜镍硫化物地球化学特征及成矿. 地质与勘探, 41(4): 39~46.
- 宋立军, 朱杰勇. 2003. 金平白马寨铜镍矿床综合信息成矿预测模型. 云南地质, 22(2): 161~169.
- 孙晓明, 熊德信, 王生伟, 等, 2006. 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. 矿床地质, 25(3)(待刊).
- 汤中立, 李文渊, 等. 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, 117~125.
- 汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制. 地质学报, 70(3): 237~243.
- 陶琰, 高振敏, 罗泰义, 祁敬东. 2004a. 金宝山岩体铂族元素特征及成因意义. 矿物岩石地球化学通报, 23(1): 28~31.
- 陶炎, 罗泰义, 高振敏等. 2004b. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系—以云南金宝山岩体为例. 地质论评, 50(1): 9-15.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. 2004a. 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征及其意义. 岩石学报, 21(1): 219~226.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. 2004b. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征. 大地构造与成矿学, 28(3): 279~286.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. 2005. 煎茶岭与金川硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征对比及其意义. 矿床地质, 24(3): 462~470.
- 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 2003. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉山幔柱关系: 地球化学证据. 岩石学报, 19(1): 38~48.
- 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 2003. 铂族元素地球化学研究评述. 地学前缘, 10(4): 520~528.
- 张成江, 李晓林. 1998. 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征. 岩石学报, 14(3): 297~304.
- 张学书, 秦德先, 范柱国, 等. 2005. 云南省金平白马寨铜镍矿区铁—超镁铁岩群地球化学特征. 地质与勘探, 41(4): 51~56.
- 张招崇, 王福生, 曲文俊, 等. 2005. 峨眉山大火成岩身中高 Os 苦橄岩的发现及地址意义. 地质学报, 79(4): 516~521.
- Ali J R, Thompson G M, Zhou M F, et al. 2005. Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 79: 475~489.
- Aller L H. 1967. Earth, chemical composition of, and its comparison with that of the sun, moon and the other planets, in Runkhon, S. K., ed., *Composition of the earth*. New York, Pergamon Press: 784.
- Barnes S J, Couture J F, Sawyer E W, et al. 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. *Economic Geology*, 88: 1402~1418.
- Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. 1985. The origin of the Fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chem. Geol.*, 53: 303~323.
- Barnes S J, Naldrett A J. 1987. Fractionation of the platinum-group elements and gold in some komatiites of the Abitibi greenstone belt, northern Ontario. *Economic Geology*, 82: 165~183.
- Barrie C T, Naldrett A J. 1989. The geology and tectonic setting of the Montcalm gabbroic complex and Ni-Cu deposit, in Prendergast M D, and Jones M J, eds., *Magmatic sulfide—the Zimbabwe volume*; London, inst. Mining Metallurgy: 151~163.
- Brooks C K, Keays R R, Lambert D D, et al. 1999. Re-Os isotope geochemistry of Tertiary picritic and basaltic magmatism of East Greenland; constraints on plume-lithosphere interactions and the genesis of the Platinoval reef, Skaergaard intrusion. *Lithos*, 47: 107~126.
- Chai G, Naldrett A J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China. *Economic Geology*, 87: 1475~1495.
- Chu X L, Sun M, Zhou M F. 2001. The platinum-group elements geochemistry in chemical geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 112~122(in Chinese with English abstract).
- Chu X L, Sun M, Zhou M F. 2002. PGE patterns of ores of the Dajing Cu-polymetallic deposit in Linxi County, Inner Mongolia; indicator to source of metallogenic elements. *Chinese Science Bulletin*, 47, 1119~1124.
- Fleet M E, Crockett J H, Stone W E. 1996. Partition of platinum-group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2397~2412.
- Fleet M E, Stone W E. 1991. Partition of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 245~253.
- Gang C, Naldrett A J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, northwest China. *Economic Geology*, 87: 1475~1495.
- Garuti G, Fershtater G, Bea F, et al. 1997. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals; preliminary results. *Tectonophysics*, 276: 181~194.
- Green A H. 1978. evolution of Fe-Ni sulfide ores associated with Archean ultramafic komatiites. Langmuir, Towership. Ontario. Unpub. PhD thesis, Univ. Toronto: 355.
- Guan T, Huang Z L, Xie L H, et al. 2003. Geochemistry of lamprophyres in Baimazhai nickel deposit, Yunnan province, I. Major and trace elements. *Acta Mineralization Sinica*, 23(3): 278~288(in Chinese with English abstract).
- Guan T, Huang Z L, Xie L H, et al. 2004. Geochemistry of lamprophyres in Baimazhai nickel deposit, Yunnan province, I. Characteristics of mantle source region. *Acta Mineralization Sinica*, 24(1): 14~18(in Chinese with English abstract).
- He G W, Sun X M, Yang S X, et al. 2006. Platinum group elements (PGE) geochemistry of polymetallic nodules in the CC zone, Eastern Pacific Ocean. *Mineral Deposit*, 25(2): 164~174(in Chinese with English abstract).
- Huang Z L, Guan T, Xie L H, Xu D R. 2003. Petrological mixing calculation and its application to magma fractional crystallization a case study of lamprophyres in Baimazhai nickel deposit, Yunnan province(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Yang J H, Ling H F, Feng H Z et al. 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. *Progress In Natural Sciences*, 13(10): 788~794.
- Li S R, Gao Z M and Chen N S. 1994. A trial discussion on geochemical tracing system of platinum group elements. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1: 36 ~ 37 (in Chinese).
- Li X L, Cai Z F, 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. *Acta Geophysica Sinica*, 41 (suppl.): 162~168 (in Chinese with English abstract).
- Liu Q, Hou Q L, Zhou X H, et al. 2005. The distribution of platinum-group elements in gabbros from Zhujiapu, Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*. 21(1): 227 ~ 239 (in Chinese with English abstract).
- Lorand J P. 1989. Abundance and distribution of Cu-Fe-Ni sulfide, sulfur, copper and platinum-group elements in orogenic-type spinel lherzolite massifs of Ariege (northeastern Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science letters*, 93: 50~64.
- Maier W D, Barnes S J, De klerk W J, et al. 1996. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld complex; implications for platinum-group element exploration. *Economic Geology*, 91: 1151~1158.
- Maier W D, Gomwe T, Barnes S J, et al. 2004. Platinum group elements in the Uitkomst Complex. *S. Afr. Econ. Geol.* 99: 499 ~516.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120: 223~230.
- Naldrett A J, Duke J M. 1980. Platinum metals in magmatic ores. *Science*, 208: 1417~1424.
- Naldrett A J, Mohammed Asif, Sasa Krstic. 2000. The composition of mineralization at the Voisey's bay Ni-Cu sulfide deposit with special reference to platinum-group element. *Economic Geology*, 95: 845~865.
- Naldrett A J, Pessaran A. 1992. Compositional variation in the Sudbury ores and prediction of the proximity of footwall copper-PGE ore. *Ontario Geological Survey Miscellaneous Paper*, 159: 49~64
- Naldrett A J. 1981. Nickel sulfide deposits; Classification, composition, and genesis. *Economic Geology*. 75th Anniversary. 628~685.
- Pasava J, Barnes S and Vyma 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. *Mineralium Deposita*, 38: 775~783.
- Pasava J, Vyma 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. *Mineralium Deposita*, 39: 784~792.
- Ringwood A E. 1991. Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(8): 2083~2110.
- Song L J, WU C L, Zhu Y J, et al. 2005. Geochemical characteristics and mineralization of Baimazhai Cu-Ni sulfide deposit, Yunnan province. *Geology and Prospecting*, 41(4): 39~46 (in Chinese with English abstract).
- Song L J, Zhu J Y, 2003. The metallogenetic prognosis model on comprehensive information of Baimazhai copper-nickel deposit in Jinping. *Yunnan Geology*, 22(2): 161~169 (in Chinese with English abstract).
- Sun X M, Xiong D X, Wang S W, et al. 2006. Platinum group elements (PGE) geochemistry of Mojiang Au-Ni deposit and its constraint on the ore genesis. *Mineral Deposit*, 25(3) (in press).
- Tang G Z L, LI W Y. 1995. The Metallogenic Pattern and Geology Comparison of Jinchuan Platinum Bearing Copper-nickel Sulfide Deposit. Beijing: Geology Press, 117~125 (in Chinese).
- Tang Z L. 1996. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in China. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 237~243 (in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Gao Z M, Luo T Y, Qi J D. 2004a. PGE in Jinbaoshan Intrusion; Possible Evidence of Mantle Plume Origin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 28~31 (in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Luo T Y, Gao Z M, et al. 2004b. The relation between Emeishan continental flood basalts and Cu-Ni deposits of southwestern China trap: A case study on Jinbaoshan mafic-ultramafic intrusion, Yunnan. *Geological Review*, 50(1): 9~15 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier P, et al. 1990. The Ailao shan—Red River metamorphic belt; Tertiary left-lateral shear zone between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431~437.
- Wang C Y, Zhou M F, Keays R R. 2005. Origin of the Permian Baimazhai Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Jinping, southern Yunnan province, SW China. *Recent advances in magmatic ore system in mafic-ultramafic rocks*, 76~78.
- Wang R T, Mao J W, He Y, et al. 2004b. Geochemical characteristics of platinum group elements in Jinchuan super-large sulfide copper-nickel deposit. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 279~286 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T, Mao J W, He Y, et al. 2005. Composition of platinum group elements (PGE) between Jianchaling and Jinchuan nickel sulfide deposits and its significance. *Mineral Deposits*, 24(3): 462~470 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T, Mao J W, He Y, et al. 2005a. Geochemical characteristics of platinum group elements of the sulfide nickel ores and related rocks in Jianchaling, Lueyang county, shannxi province, China and their implication for genesis. *Acta Petrologica sinica*, 21(1): 219~226 (in Chinese with English abstract).
- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. 2003. Late Permian flood basalts at Jinping area and its relation to Emei mantle plume; geochemical evidence. *Acta petrologica Sinica*, 19(10): 38~48 (in Chinese with English abstract).
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, et al. 2003. Preview on geochemistry of platinum-group elements, 10(4): 520~528 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C J, Li X L. 1998. PGE geochemistry of the Emeishan basal province. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 297~304 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X S, Qin D X, Fan G Z, et al. 2005. Geochemical characteristics of mafic-ultramafic swarms in the Baimazhai nickel and copper deposit, Jinping, Yunnan. *Geology and Prospecting*, 41(4): 51~56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Wang F S, Qu W J, et al. 2005. Discovery of high-Os

chicrites in the large Emeishan igneous province and Its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 516~521 (in Chinese with English abstract).

Zhong H, Zhu W G, Qi L, et al. 2006. Platinum-group element (PGE) geochemistry of the Emeishan basalts in the Pan-Xi area, SW China. *Chinese Science Bulletin*, 51(7): 845~854.

Platinum Group Elements (PGE) Geochemistry of Baimazhai Ni-Cu Sulfide Deposit and Its Constraints on the Ore Genesis

WANG Shengwei¹⁾, SUN Xiaoming^{1,2)}, SHI Guiyong¹⁾, XIONG Dexin^{1,3)}, ZAI Wei¹⁾

1) *Department of Earth Science, Sun Yatsen University, Guangzhou, 510275*

2) *National Key Laboratory of Crust-Mantle Evolution and Mineralization, Nanjing, Jiangsu, 210093*

3) *Zhaoqing University, Zhaoqing, Guangdong, 526061*

Abstract

Concentrations of platinum group elements (PGE) of ores and related rocks from Baimazhai Ni-Cu sulfide deposit were determined by using an ICP-MS with nickel sulfide fire assay pre-concentration. The results show that the total PGE (Σ PGE) in the Baimazhai ores and the around rocks are quite low, which decreases gradually from central massive ores ($78.15 \times 10^{-9} \sim 555.92 \times 10^{-9}$) to the mineralized peridotite ($6.77 \times 10^{-9} \sim 70.95 \times 10^{-9}$) and gabbro (3.02×10^{-9}). The lamprophyre dykes also show low Σ PGE ($6.86 \times 10^{-9} \sim 17.03 \times 10^{-9}$). Besides, the Σ PGE show obvious direct correlation with Ni contents. Primitive mantle normalized PGE patterns of various rocks and ores from Baimazhai mine are quite different, the massive ores possess Pt-Pd type with relatively Ir depleted patterns, while the mineralized peridotite show relatively flat with positive Ru patterns. The gabbro and lamprophyre dykes show nearly same PGE patterns with marked positive Ru anomaly. Cu/Pd ratios of the Baimazhai rocks and ores are greatly higher than that of the primitive mantle, implying that the parental magmas might have undergone strong sulfide segregation. (Pd+Pt)/(Os+Ir+Ru) and Pd/Ir ratios of the massive ores are 138.24 and 24.7, indicating that its parental magma is of gabbroic or basaltic and underwent exhaustively complete sulfide segregation. On the contrary, the corresponding ratios of the mineralized peridotite are 3.02 and 16.09 respectively, which are similar to those of komatiitic magma, implying that the massive ores has no genetic relationship with the mineralized peridotite. Before intrusion of the sulfide liquid of massive ores, its parental magma might have undergone long-term and strong sulfide segregation, and the sulfide liquid might have intruded into the core of the rock body No. 3 of the Baimazhai mine as an isolated intrusive phase. The PGE parameters of Baimazhai Ni-Cu deposit suggest that evolution and mineralization of the late part of the Emei mantle plume might have undergone highly S saturation, and crustal contamination might have played an role during mineralization of the Baimazhai deposit.

Key words: Platinum-group elements; magmatic Cu-Ni deposit; Baimazhai; Emeishan large igneous Province; Jinping; Yunnan Province