

峨眉山玄武岩中岩浆硫化物矿床 Cu/Pd 和 Cu/Pt 比值差异及意义*

王生伟¹, 孙晓明^{2,3}, 周邦国¹, 石贵勇², 熊德信⁴, 翟伟²,
马东¹, 任静¹

(1 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081; 2 中山大学海洋学院, 广东 广州 510275; 3 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275; 4 肇庆学院化学化工学院, 广东 肇庆 526061)

摘要 文章对比了中国西南地区与峨眉山玄武岩有关的主要岩浆硫化物矿床的 Cu/Pd 及 Cu/Pt 比值, 结果表明, 金宝山矿床矿石和围岩的 Cu/Pd 及 Cu/Pt 比值小于原始地幔值, 力马河和白马寨铜镍矿床 Cu/Pd 及 Cu/Pt 比值远远大于原始地幔值, 而杨柳坪则介于金宝山和力马河与白马寨之间, 其 Cu/Pd、Cu/Pt 与原始地幔值大致相当。推测在与峨眉山玄武岩有关的基性超-基性岩带中, 沿金宝山分布的基性-超基性岩体经历了铂族元素的富集过程, 是中国勘探铂族元素矿床最重要的远景区之一。

关键词 地质学; Cu/Pd 和 Cu/Pt 比值; 岩浆硫化物矿床; 铂族元素; 峨眉山玄武岩

Distinction and implication of Cu/Pd and Cu/Pt ratios from magmatic sulfide deposits related to Emeishan Basalt in southwestern China

WANG ShengWei¹, SUN XiaoMing^{2,3}, ZHOU BangGuo¹, SHI GuiYong², XIONG DeXing⁴, ZHAI Wei²,
MA Dong¹ and REN Jing¹

(1 Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2 School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 3 Department of Earth science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 4 School of Chemistry and Chemical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, Guangdong, China)

Abstract

In this study, the distinction of Cu/Pd and Cu/Pt ratios of magmatic sulfides related to Emeishan basalt in southwestern China are compared and the results show that the Cu/Pd and Cu/Pt ratios of ores and wall rocks in Jinbaoshan deposit are much lower than those of primitive mantle, while the Limahe and Baimazhai are quite higher. Besides, the ratios of Yangliuping are between Jinbaoshan and Limahe or Baimazhai. These imply that the mafic-ultramafic rock bodies that related to Emeishan basalt and distributed along with Jinbaoshan have been endured the process of PGE enrichment, and thus it may be one of the most important potential targets for PGE-bearing deposits prospecting in China.

*本研究得到国家重点基础研究发展规划(973)项目 (No. 2009CB421006; 2002CB412610)、四川通安-小牛场矿产远景调查项目和国家自然科学基金(编号: 40173025)联合资助

第一作者简介 王生伟, 男, 1978年生, 博士, 主要从事矿床地球化学研究。Email: osmium@126.com

Key words: geology, Cu/Pd and Cu/Pt ratios, magmatic sulfide deposits, platinum group elements, Emeishan basalt

铂族金属主要分布于岩浆硫化物矿床中 (Naldrett et al., 1980), 是中国十分紧缺的战略资源。建国以外来, 在中国地质工作者的努力下, 在西南地区峨眉山玄武岩分布区、甘肃金川、吉林红旗岭、新疆北部喀拉通克及广西北部等地区发现了数量众多的岩浆硫化物矿床, 但仅有其中的甘肃金川、四川杨柳坪和云南金宝山等矿床的铂族元素 (PGE) 含量较高, 余者均以铜镍为主。中国 PGE 探明储量与南非、俄罗斯、加拿大和澳大利亚等国相比十分有限, 四川的攀西地区分布大量与峨眉山玄武岩有关的大型基性-超基性岩层状侵入体, 曾经被寄予厚望能找到铂族矿床, 但随着时间的推移, 该区域找矿效果并不理想。在中国哪里最有可能找到铂族矿床? 这是众多地质学家关心的问题。

前人研究已发现, 绝大多数现有的岩浆硫化物矿床在相邻区域内往往成群成带分布, 如加拿大 Ontario、澳大利亚 Kambalda、南非 Bushveld、津巴布韦 Great Dyke、俄罗斯 Noril'sk-Talnakh、美国 Duluth 等地区均由数量较多的矿点、矿床组成。中国新疆北部、攀西地区、吉林的红旗岭、云南金平以及四川杨柳坪矿床等, 均发现较多的含矿岩体, 中国最大的金川矿床目前发现有 3 个含矿岩体。因此, 同一岩带邻近的基性-超基性岩体具有相似的成因, 而已经发现的岩浆硫化物矿床, 是寻找和勘探新的含矿岩体的重要线索。

1 区域及矿床地质概况

中国西南地区广泛分布晚二叠统玄武岩, 已发现与之相伴的数量众多的基性-超基性岩体, 在云南省、四川成带状分布 (图 1)。四川境内主要分布在攀西地区、四川北部道孚-丹巴-康定和甘孜-理塘, 而云南主要分布在金平延伸至越南北部、东部富宁地区、北边跨省沿盐源-丽江-弥渡一带分布。四川的攀西地区有力马河和其南边的青矿山以及较多的铜镍矿点; 道孚-丹巴-康定有杨柳坪铜镍-铂族矿床, 由 4 个含矿岩体组成; 金平有白马寨和牛栏冲等铜镍矿床、矿点; 盐源-丽江-弥渡岩带中目前仅仅南端发现有金宝山 1 个含矿岩体。这些矿床都与峨眉山玄武岩有直接的成因联系, 但这些岩带中的岩浆硫化物矿床矿石差异十分明显: 金宝山矿床硫化物少, 镍铜含量较低, 矿石为浸染状, 肉眼与超基性的围岩几乎没什么区别, 但矿石铂族元素却非常高; 白马寨和力马河矿床硫化物较多, 镍铜含量高, 而铂族元素含量很低, 与金宝山形成鲜明对比。杨柳坪则介于两者之间。

金宝山矿床是上世纪 70 年代发现的一大型独立铂钯矿床, 矿床位于扬子地台西缘南端, 宁蒗-弥渡镁铁超镁铁岩带内, 该镁铁-超镁铁岩带向北进入四川省, 向南至云南南华县 (邓家藩, 1999)。金宝山矿床位于该岩带在云南省弥渡县境内部分, 呈似层状侵入泥盆系金宝山组地层, 区内地层呈两翼平缓的短轴背斜, 被礼社江从中分割为南北两部分 (图 2), 金宝山岩体长 5 000 m, 宽 600~1 000 m (Song et al., 2008)。以北段发育较好, 北段北西向延伸, 工程控制长 2 560 m, 宽 760~1 240 m, 岩体厚 25.07~109.06 m, 最大垂厚 170.11 m (陶琰, 2004a)。岩体组成岩石主要为异剥橄榄岩和橄榄岩, 垂厚统计占 92%, 肉眼观察铂钯矿石与围岩没有明显区别, 但单偏光下前者较后者更丰富的硫化物, 大多数硫化物岩橄榄石和辉石晶体 (假象) 粒间分布, 硫化物自形程度较差; 少量岩分布于穿透橄榄石和辉石晶体的裂隙, 为次生产物。岩石几乎全部变质, 橄榄石、辉石强烈蛇纹石化、滑石化及次闪石化, 镜下可见明显网状结构, 但是晶体结构尚存。邓海琳 (2000)、刘敏 (2002; 2004)、陶琰等 (2002; 2003; 2004a; 2004b)、朱丹等 (2003) 和 Wang 等 (2005b) 分别对金宝山进行过较详细的研究。陶琰等 (2000) 研究表明, 岩石镁铁比值为 1.76~3.81, 属铁质超基性岩类。矿床大部分工业储量集中在岩体底部和中部 (图 3)。矿床属铜镍硫化物型, 形成机制以硫化物熔离作用为主, 铜镍含量较低, 未达到工业品位 (陶琰等, 2000)。金宝山铂族元素矿床是典型的岩浆型矿床, 但整个岩体蚀变强烈, 且矿体中广泛发育热液硫化物细脉矿石, 脉体有较高的铂族元素含量, 但主要表现为就地改造, 热液活动未造成矿体形态、产状的根本变化 (陶琰, 2003) (图 4), 矿石及围岩全岩的铂族元素含量之间呈极好的正相关关系, 表明其铂族体系保存完好 (王生伟等, 2007)。主要

铂族矿物为PtTe₂、Pd₃Sn、PdTe、PtAs₂、IrAsS、PtS、PdSb等 (Wang et al., 2008)。Zhou等 (2002a; 2002b) 报道了该岩体年龄为 259 Ma, 与峨眉山玄武岩基本同期。金宝山岩体Cr含量很高, 平均值约为 0.5 % (王生伟, 2007b)。Wang 等 (2005b) 对金宝山岩体研究后发现, Cr的主要存在形式为高温矿物铬铁矿, 表明金宝山岩体结晶分异时温度很高; 陶琰 (2003) 对金宝山橄榄石分析结果显示: 其成分较为稳定, Fo为 85~86 左右, 属贵橄榄石, 同样说明金宝山的岩浆结晶温度很高, 同时Re-Os同位素显示其¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os比值为 0.1519 ~ 0.2237, 初始值为 20.71~60.6 (Tao et al., 2007), 金宝山壳源物质影响较小, 这些特征表明金宝山岩体为峨嵋地幔柱早期结晶分异的产物。

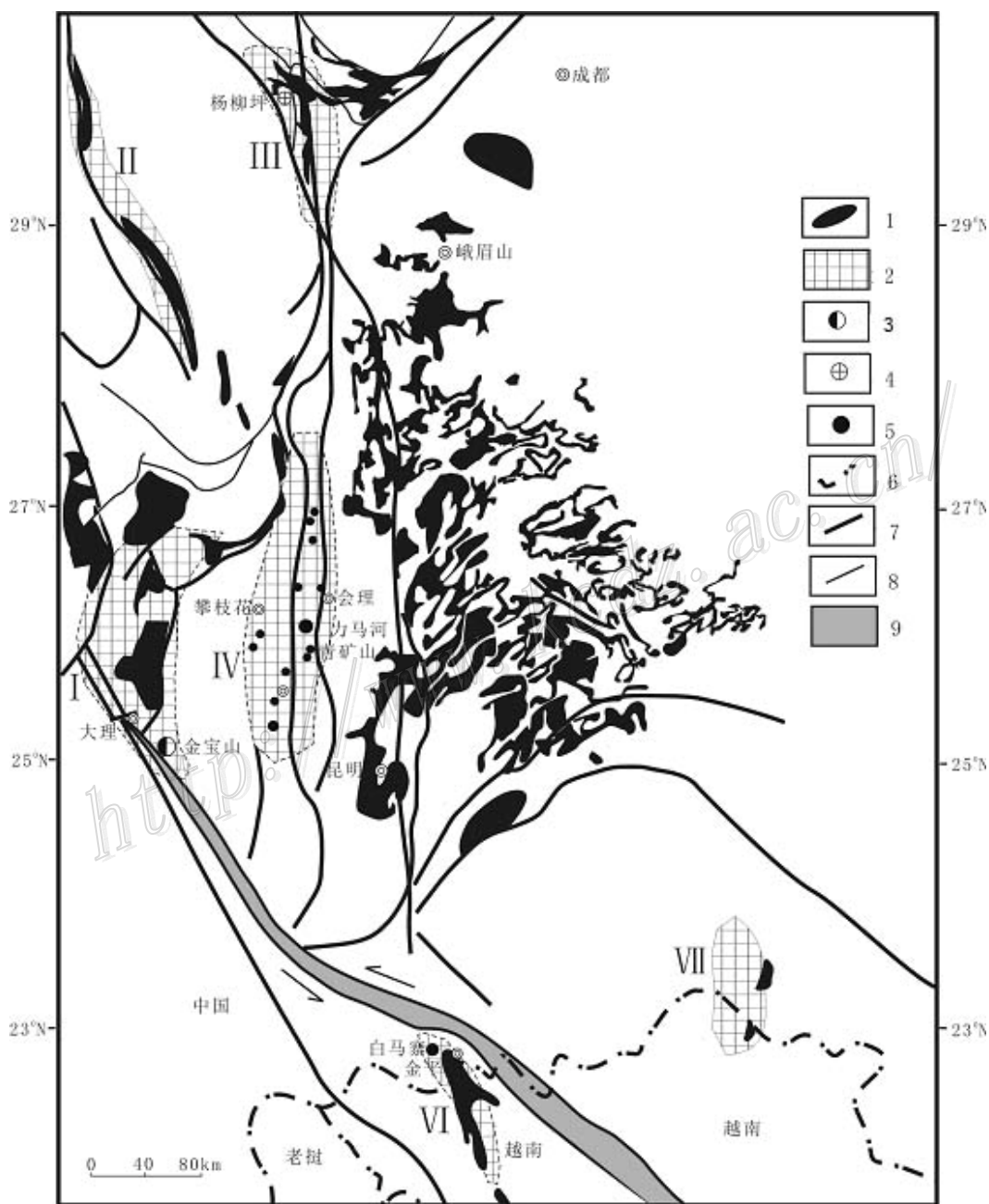


图 1 峨眉山玄武岩、及其相关的基性-超基性岩带和铜镍-铂族矿床简图 (据肖龙, 2003 改编)
 1—峨眉山玄武岩; 2—基性-超基性岩体大致分布区; 3—铂族矿床; 4—铜镍-铂族矿床; 5—铜镍矿床; 6—国界; 7—深大断裂; 8—次级断裂;
 9—哀牢山变质带; I . 岩带及其编号

Fig. 1 sketch map of the Emeishan basalt, and the related mafic-ultramafic rock body and Cu-Ni-PGE deposits (modified after Xiao, 2003)

1—Emeishan basalts; 2—sketch area of mafic-ultramafic rock sills lined; 3—PGE sulfide deposit; 4—Cu-Ni-PGE sulfide deposit; 5—copper-nickel sulfide deposit; 6—national boundaries; 7—deep fault; 8—secondary fault; 9—Ailaoshan metamorphic zone; I . rock sills and number

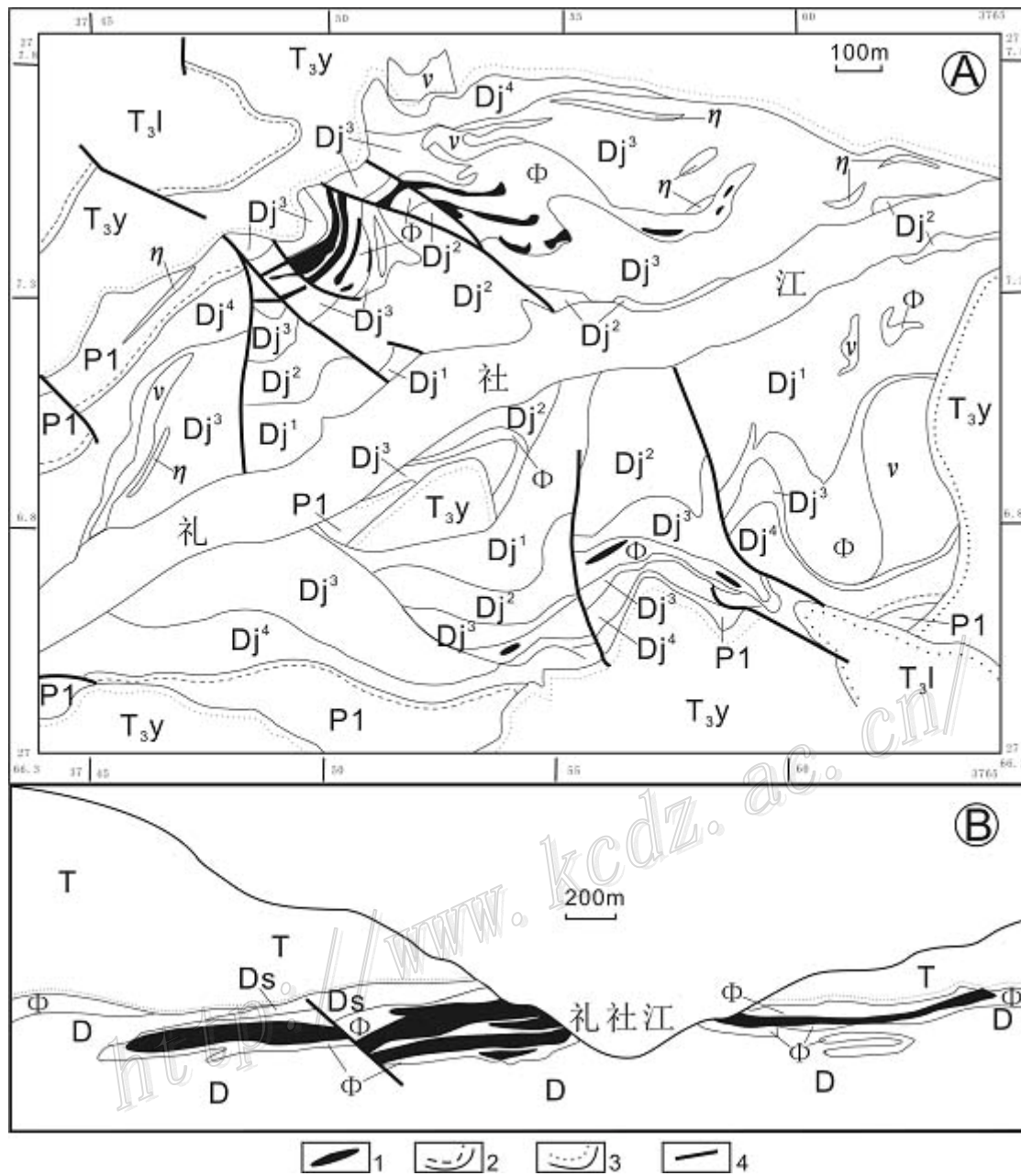


图2 金宝山矿区地质简图(A)和剖面图(B) (据陶琰等, 2004a 改编)

1—铂钯矿矿体; 2—假整合; 3—不整合; 4—断裂; T_{3l}—上三叠统罗家大山组; T_{3y}—上三叠统云南驿组; P₁—下二叠统; Dj⁴—泥盆系金宝山组第四段; Dj³—泥盆系金宝山组第三段; Dj²—泥盆系金宝山组第二段; Dj¹—泥盆系金宝山组第一段; η—辉绿岩; v—辉长岩; Φ—超基性岩

Fig.2 Geological sketch map (a) and profile section (b) of Jinbaoshan mine (modified after Tao et al., 2004a)

1—Pt-Pd ore body; 2—disconformity; 3—unconformity; 4—fault; T_{3l}—upper Triassic Luojiadashan formation; T_{3y}—upper Triassic Yunnanyi formation; P₁—nether Permian stratum; Dj⁴—the fourth member of Devonian Jinbaoshan formation; Dj³—the third member of Devonian Jinbaoshan formation; Dj²—the second member of Devonian Jinbaoshan formation; Dj¹—the first member of Devonian Jinbaoshan formation; T—Triassic stratum; D—Devonian stratum; η—diabase; v—gabbro; Φ—ultramafic rock.

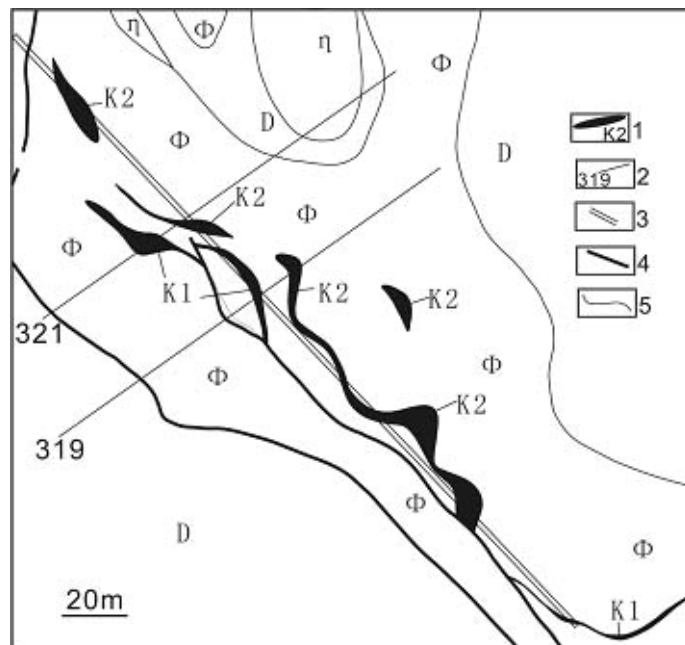


图 3 金宝山平面图 (据云南省地质调查院, 2004)

1—矿体及编号; 2—勘探线; 3—坑道; 4—断裂; 5—地质界线; D—泥盆系灰岩; η—辉绿岩; Φ—超基性岩

Fig.3 Plane map of Jinbaoshan deposit (modified after Yunnan Provincial Academy of Geological Survey, 2004)

1—Ore body and number; 2—Exploration line; 3—Gallery; 4—Falut; 5—Geological boundary; D—Devonian limestone; η—Diabase; Φ—Ultramafic rock

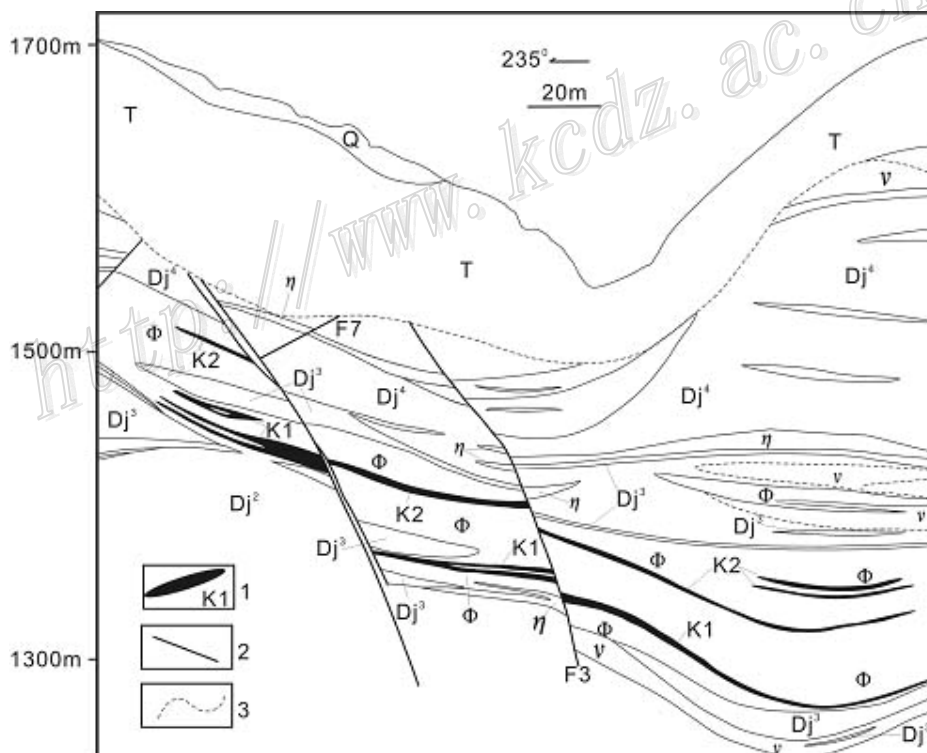


图 4 金宝山 319 勘探线剖面图 (据云南省地质调查院, 2004)

1—矿体及编号; 2—断裂; 3—推测地质界限。Q—第四纪沉积物; T—三叠系地层; T_{3l}—上三叠统罗家大山组; T_{3y}—上三叠统云南驿组; P₁—下二叠统; Dj¹到Dj⁴—泥盆系金宝山组第一到第四段; η—辉绿岩; v—辉长岩; Φ—超基性岩

Fig. 4 Profile section of exploration line 319 (modified after Yunnan Provincial Academy of Geological Survey, 2004)

1—Ore body and number; 2—Falut; 3—Speculated geological boundary; Q—Quaternary sediments; T_{3l}—Upper Triassic Luojiadashan formation; T_{3y}—Upper Triassic Yunnanyi formation; P₁—Lower Permian stratum; Dj¹ to Dj⁴—are the first to fourth members of Devonian Jinbaoshan formation; η—Diabase; v—Gabbro; Φ—Ultramafic rock.

杨柳坪铜镍铂族矿床位于四川省丹巴县境内，峨眉大火成岩省北部。区内峨眉山玄武岩称为大石包组 (P_2d)，主要围岩为泥盆系危关组 (Dwg)。杨柳坪矿区目前发现有 4 个含矿岩体，分别为正子燕窝、打枪燕窝、协作坪及杨柳坪 (图 5)。详细矿床地质特征参见宋谢炎等 (2004)。Song 等 (2003) 和宋谢炎等 (2004) 认为围岩地层碳酸盐分解释放的 CO_2 是促进岩浆对流并导致铜镍硫化物熔体从硅酸盐浆熔离的主要原因。王登红等 (2000a; 2000b; 2001; 2002a; 2002b) 认为杨柳坪的铜镍铂族矿床成因上主要与岩浆结晶分异和熔离作用有关，但有大量的后期热液携带矿质参与叠加成矿，部分热液还进入有利的围岩中形成独立的热液型和矽卡岩型富矿体。

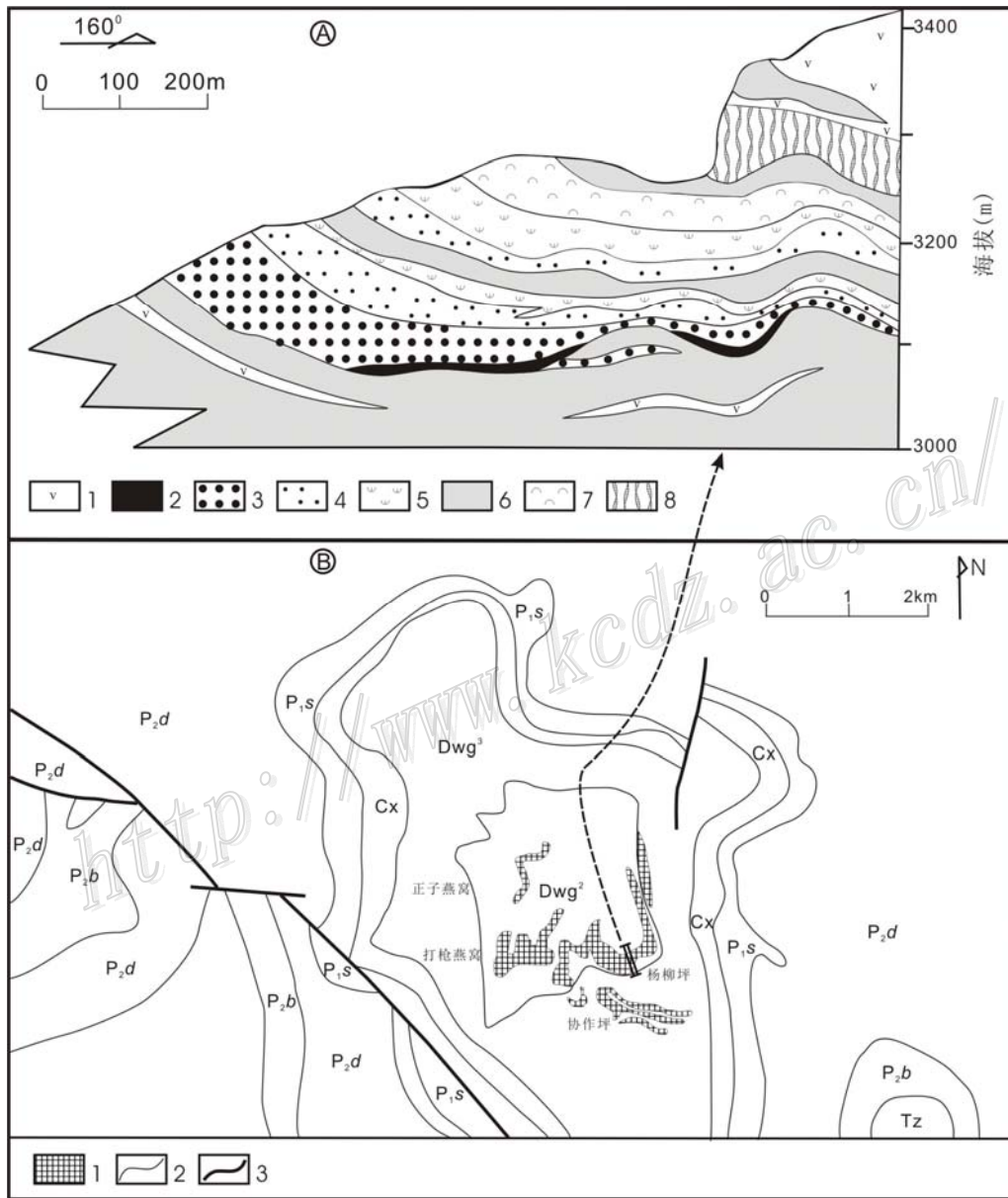


图 5 杨柳坪矿区地质图(据 Song et al., 2008)

- A. 1—辉长岩; 2—块状矿石; 3—浸染状矿石; 4—稀疏浸染状矿石; 5—蛇纹岩; 6—泥盆统大理岩、片岩; 7—滑石片岩; 8—石炭统片岩
 B. 1—超基性岩; 2—地质界线; 3—断层; Dwg^3 —泥盆统大理岩及片岩; Cx—石炭统片岩; P_{1s} —早二叠统大理岩; P_{2d} —大石包组玄武岩; P_{2b} —二叠统变质砂岩夹凝灰质板岩; Tz—下三叠统变质砂岩夹大理岩

Fig. 4 Geological map of Yangliuping deposit(modified after Song et al., 2008)

- A: 1— Gabbro; 2—Massive ore; 3—Disseminated ore; 4—Sparsely disseminated ore; 5—Serpentinite; 6—Devonian marble, Schist; 7—Talc schist; 8—Carboniferous schist; B: 1—Ultrabasic rock; 2—Geological boundary; 3—Fault; Dwg^3 —Devonian marble and schist; Cx—Carboniferous schist; P_{1s} —Early Permian marble; P_{2d} —Emeishan basalts; P_{2b} —Interlayers of Permian Meta-sandstone and tuffaceous slate; Tz—Interlayers of nether Triassic meta-sandstone and marble

白马寨是上世纪 50 年代后期发现的一中型铜镍硫化物矿床, 位于扬子板块西南缘、哀牢山变质带南端的金平-黑水河镁铁-超镁铁质岩内, 地处金平断块中北部。白马寨矿区目前发现 4 个岩体 (图 6), I、II、III 号岩体勘探较为详细, 矿化情况已经基本弄清, I、II 号岩体从外自内分别由辉长岩、辉岩、橄榄辉岩组成, 核部橄榄辉岩形成浸染状矿石, 只有中心偶尔可见极少块状矿石。IV 号岩体为新近发现, 尚在勘探中。侵入于奥陶系砂岩中的白马寨 III 号岩体为主要铜镍矿体 (图 6), 位于矿区的中部。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→辉岩→橄榄辉岩→橄榄岩过渡系统组成, 构成环带状特征产出, 中心部位由块状硫化矿所充填。辉长岩组成岩体的外壳, 主要分布于岩体的北东端, 少矿化; 橄榄辉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, 为浸染状和海绵陨铁状矿石; 辉石岩介于辉长岩和橄榄岩之间, 为稀疏浸染状矿石。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, 并且形态和产状不相吻合。此外岩体尚有各类脉岩类穿插, 以煌斑岩为主 (图 6)。

前人研究表明, 白马寨年龄与峨嵋上玄武岩大致相同 (Wang et al., 2005a; 石贵勇等, 2006), 其成矿与峨眉山大火山岩省主喷发期基本同时 (Ali et al., 2005; 陶琰等, 2004a; 2004b)。该矿具有很高的 Cu-Ni 品位, 罗君烈 (1995)、汤中立 (1996)、邓家藩 (1999)、张学书等 (2005) 分别对该矿进行过研究。汤中立 (1996)、宋立军 (2003; 2005) 认为该矿为深部熔离、脉动侵入而成; 王生伟等 (2006; 2007b) 报道了白马寨主要矿石及围岩的 PGE 地球化学特征, 提出位于该矿峨嵋地幔柱晚期发生结晶分异和硫化物融离的产物, 且其核部的块状矿石作为与外围矿/岩石没有直接亲缘关系的独立相于后期侵入; Zhang 等 (2004) 和 Pu 等 (2007) 认为白马寨是经过强烈热液改造的岩浆硫化物矿床; 但 Wang 等 (2005a; 2006a; 2006b) 和 Sun 等 (2008) 研究发现, 该矿的块状矿石、矿化橄榄辉岩、辉石岩和辉长岩具有相似的 Cu/Pd 比值, 并认为白马寨矿床为一次侵入, 就地熔离, 且热液强烈改造而成。

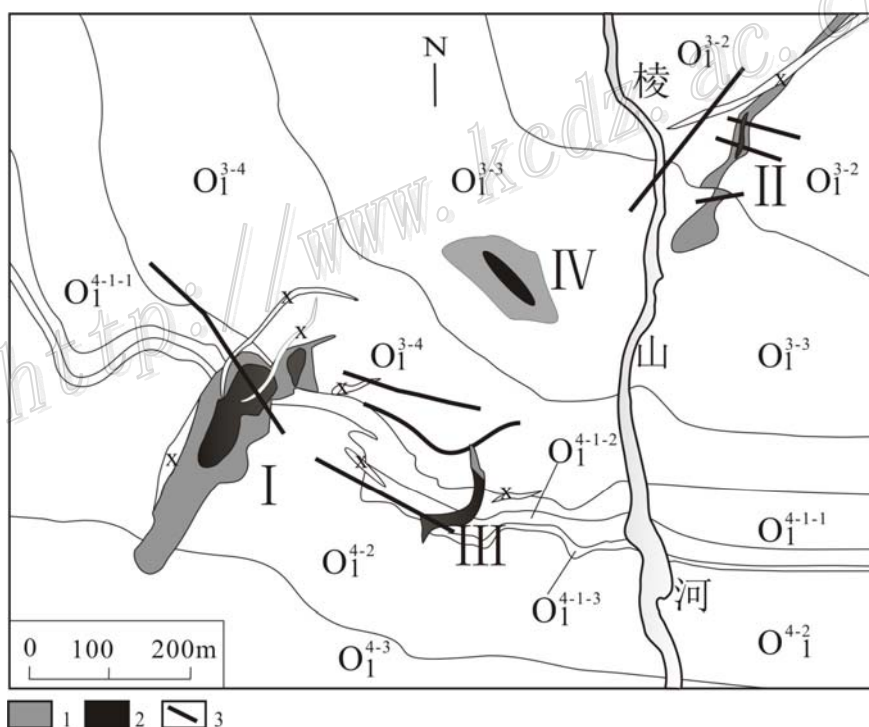


图 6 白马寨铜镍矿矿区地质简图 (据宋立军等, 2005 改编)

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

Fig. 5 Sketch geological map of the Baimazhai Ni-Cu deposit (modified after Song et al., 2005)

1—Basic rock; 2—Ultramafic rock; 3—Fault; I—rock body and number; O_1^{3-2} —Thick-layered gray to black sandstone; O_1^{3-3} —Thick-layered gray to black slate; O_1^{3-4} —Medium-thick-layered gray to 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

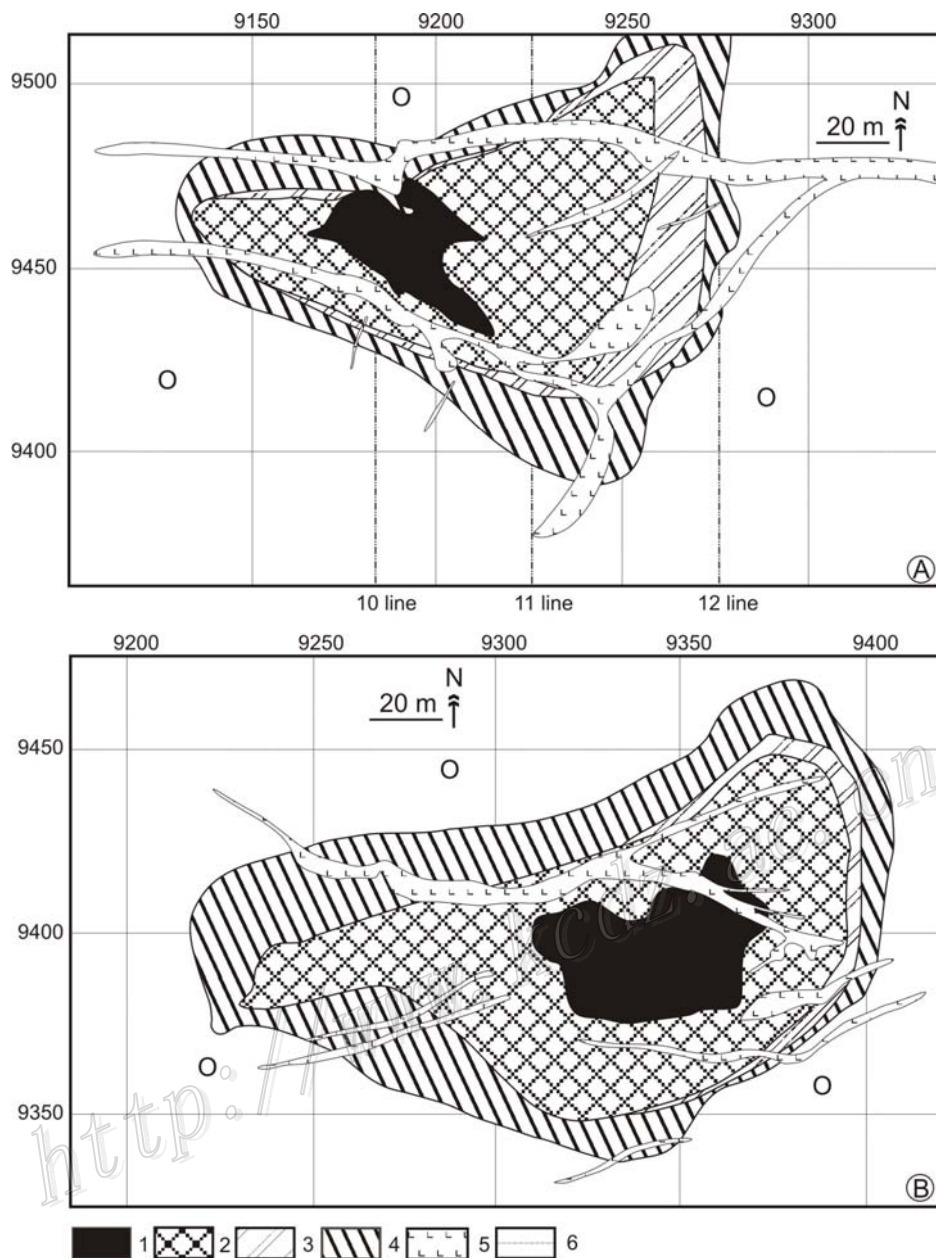


图7 白马寨 785 m(A)和 845m(B)中段平面图 (据白马寨矿地质科, 2003)

1—块状硫化物; 2—橄榄岩; 3—辉石岩; 4—辉长岩; 5—煌斑岩; 6—勘探线及其编号; O—奥陶系砂岩

Fig. 6 Plane map at 785 m and 845 m level in Baimazhai deposit

(modified after Geological Section of Baimazhai Cu-Ni deposit, 2003)

1—Massive ore; 2—Dunite; 3—Pyroxenite; 4—Gabbro; 5—Lamprophyre; 6—Exploration line and number; O—Ordovician sandstone

2 Cu/Pd 比值及 Cu/Pt 比值找矿的地球化学原理

Cu/Pd比值、Cu/Pt比值是评价岩体铂族元素富集程度及岩浆演化一个重要的参数, 在研究PGE矿床中应用广泛 (Barnes., 1990; 1993; Maier et al., 1996)。Fleet 等 (1996) 实验表明, Pt、Pd在硫化物/硅酸盐中的分配系数为 $D_{Pt} = 10 (\pm 4) \times 10^3$ 、 $D_{Pd} = 17 (\pm 7) \times 10^3$; Crocket 等 (1997) 的实验结果为 $D_{Pt} = 16.5 (\pm 6.3) \times 10^3$ 、 $D_{Pd} = 28 (\pm 12.5) \times 10^3$ (表 1), 大于Cu在硫化物/硅酸盐中的分配系数 (约 1 383) 一个数

量级, 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岩中熔离, 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比值近似于地幔值; 反之, 如岩浆经历过S饱和, 硫化物熔离作用会使Pd相对于Cu更多被带走, 剩余岩浆Pd较Cu更亏损, 其Cu/Pd比值高于原始地幔; 而接受了硫化物熔体的基性-超基性岩体, 其Cu/Pd比值一般小于原始地幔。S在岩浆中含量由超基性、基性、中性至酸性是递减的。大多数基性岩浆和科马提质岩浆只含 0.01%~0.2% 的硫 (Maier et al., 1996), 因此要使岩浆中少量的硫化物聚集成矿, 岩浆中S的含量必须达到饱和。导致发生S饱和的因素有, 外来S的加入 (主要为 SO_4^{2-} 和 FeS_2)、暗色矿物 (橄榄石、辉石; 铬铁矿、磁铁矿等) 的结晶分异、长英质物质 (如硅铝质的大陆地壳) 的加入以及岩浆温度的降低等 (Brooks et al., 1999)。后两者会导致岩浆的基性程度降低, 从而使得S的溶解度降低。也正是由于以上因素, 导致峨眉山玄武岩浆产生S饱和而发生硫化物融离作用, 并伴随岩浆结晶分异, 形成了西南地区的岩浆硫化物矿床。

表 1 铂族元素在硫化物/硅酸盐中的配分系数 ($\times 10^3$)Table 1 Partition coefficient of PGE between sulfide and silicate phases ($\times 10^3$)

	Os	Ir	Ru	Pt	Pd	资料来源
D _{硫化物/硅酸盐}	30±6	26±11	6.4±2.1	10±4	17±7	Fleet et al., 1996
D _{硫化物/硅酸盐}	10±2.6	51±20	7.0±5.4	16.5±6.3	28±12.5	Crocket et al., 1997

Barnes 等 (1993) 在研究加拿大魁北克省庞迪亚克 Belleterre-Angliers Belt 的铜镍矿时发现, 在含 PGE 层位附近 Cu/Pd 比值发生突变, 并认为 Cu/Pd 比值大于原始地幔的岩体, 不利于寻找 PGE 矿床, 但深部或岩体底部有可能发现 PGE 矿床; Cu/Pd 比值与原始地幔接近的岩体, 有潜力找到的矿床中, 铂族元素可以作为副产品。Maier 等 (1996) 在研究 Bushveld 矿床时同样得出在富 PGE 层位附近, Cu/Pd 比值也突然增大, 而含 PGE 层位 Cu/Pd 比值则小于原始地幔。Cu/Pd 比值增大正是由于其融离出了含 PGE 的硫化物熔体。中国的金川和杨柳坪 Cu/Pd 比值接近原始地幔值, 正是以 Cu-Ni 为主, PGE 作为副产品开采的矿床。

3 西南地区岩浆硫化物矿床的 Cu/Pd 比值、Cu/Pt 比值特征及意义

与峨眉山玄武岩有关的基性-超基性岩带中发现了 3 种不同的岩浆硫化物矿床, 这些矿床相距遥远。尽管前人对金宝山、杨柳坪、白马寨、力马河等矿床做了很多工作, 但侧重于单个矿床的研究。这些不同类型的矿床成矿过程中的内在联系研究较为薄弱。王生伟等 (2007a) 将峨眉山玄武岩成矿过程分为金宝山阶段、杨柳坪阶段和白马寨阶段, 分别代表峨眉山玄武岩 S 低度饱和、中度饱和及高度饱和情况下硫化物熔离的过程 (图 8)。陶琰等 (2007) 通过模拟计算认为力马河矿石为峨眉山玄武岩硫化物第二次融离形成的产物, 第一次融离出来的硫化物类似于金宝山矿石。Song 等 (2008) 通过铂族元素地球化学及模型计算显示, 富铂族元素 (PGE) 的硫化物, 如金宝山, 由初始玄武岩质岩浆结晶分异而成; 富铜镍-铂族元素的硫化物, 如杨柳坪, 其母岩浆经历了少量硫化物 (0.01%) 的熔离; 富 Ni-Cu 的硫化物, 其母岩浆经历了 0.025% 的硫化物熔离过程。

这些研究表明, 西南地区与峨眉山玄武岩有关的不同类型的岩浆硫化物矿床是峨眉山玄武岩在不同 S 饱和程度下融离和岩浆结晶分异的产物。图 9 显示, 从金宝山-杨柳坪-白马寨、力马河及青矿山, 在峨眉山玄武岩不同阶段结晶分异和硫化物融离过程中, 它们的 R 值 (硅酸盐/硫化物) 由大变小。

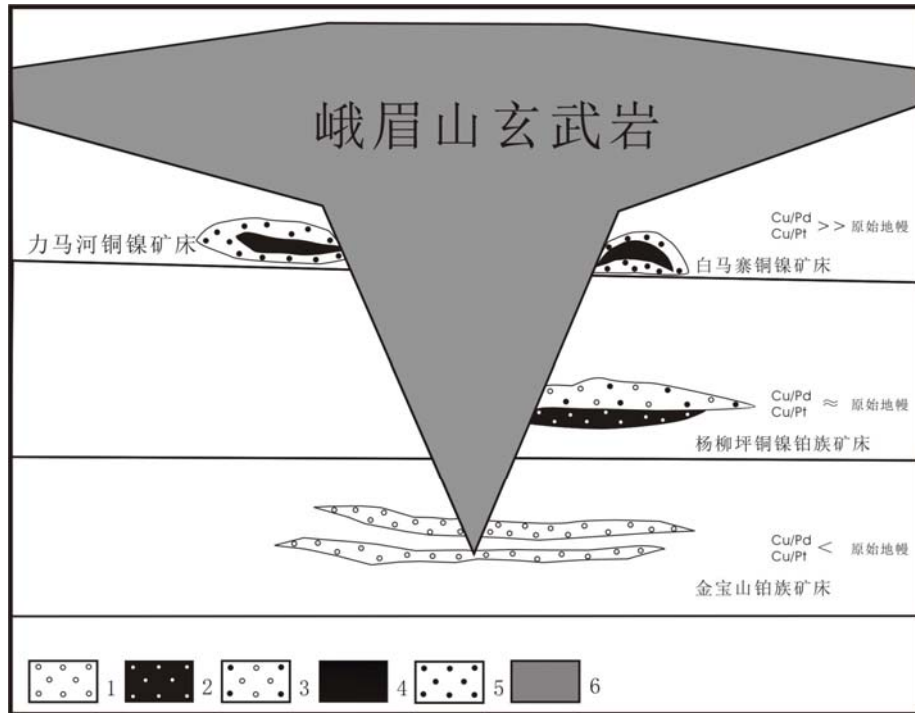


图 8 峨眉山玄武岩形成岩浆硫化物模式图

1—富 PGE 贫 Ni-Cu 浸染状矿体；2—富 PGE-Cu-Ni 块状矿体；3—富 PGE-Cu-Ni 浸染状矿体；4—富 Cu-Ni 贫 PGE 块状矿体；5—富 Cu-Ni 贫 PGE 浸染状矿体；6—峨眉山玄武岩

Fig. 8 Genetic model for magmatic sulfide deposit related to Emeishan basalts

1—PGE rich and Ni-Cu poor disseminated ore body; 2—PGE-Ni-Cu rich massive ore body; 3—PGE-Ni-Cu disseminated ore body; 4—Cu-Ni rich and PGE poor massive ore body; 5—Ni-Cu rich and PGE poor disseminated ore body; 6—Emeishan basalts

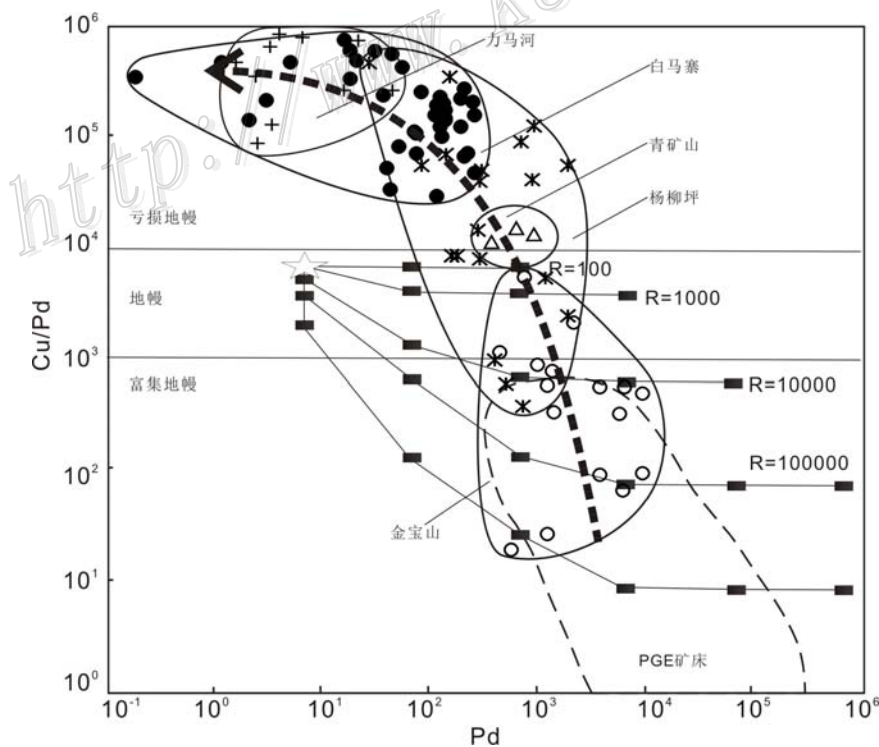


图 9 与峨眉山玄武岩有关的岩浆硫化物矿床矿石的 Pd-Cu/Pd 图解

Fig. 9 Pd-Cu/Pd diagram of ores from magmatic sulfide deposits related to Emeishan Basalts

峨眉山玄武岩目前分布范围较宽, 且与之相伴的基性-超基性岩体也呈分散带状分布。这些都是由于晚二叠纪后扬子地台西南缘强烈的构造运动分解造成的。最典型的为红河-哀牢山左旋断裂作用, 使得原来在大理-丽江附近的金平地区的玄武岩及基性-超基性岩体沿断裂向南东移动了几百公里 (Tapponnier et al., 1990; Allen et al., 1984; Leloup et al., 1995; Rangin et al., 1995; 任纪舜等, 1996; 段建中等, 2000)。肖龙等 (2003a; 2003b) 通过详细的地层对比和地球化学特征对比, 也证实金平地区玄武岩和云南宾川玄武岩至少在白垩纪以前是相邻或相连的, 红河-哀牢山断裂的左旋使两地玄武岩发生位移的距离约为 600 千米。不难想象, 峨眉山玄武岩在喷发时应该是连成一片的, 与之相应的岩体在空间上分布也应紧密相连的, 因此, 可以将峨嵋地幔柱体系中的玄武岩及相关的岩体复原成一个整体。不同的基性-超基性岩带只不过是峨眉山玄武岩在不同条件(深度、温度、压力)结晶分异的产物。含有金宝山岩体的盐源-丽江-弥渡基性-超基性岩带可以看成是整个峨嵋地幔柱体系中的早期的含铂族层位, 金宝山则是这个层位中的一个 PGE 矿床点; 丹巴-康定一带的基性超基性岩带可以看成是峨嵋地幔柱体系中的含 Cu-Ni-PGE 层位, 杨柳坪等则是这个层位中的矿床点; 金平至越南北部一带的基性-超基性岩带可以看作峨嵋地幔柱体系中一个含 Cu-Ni 层位, 白马寨、牛栏冲等则是这个层位的矿床点。

从表 2 可见, 金宝山铂钯矿石的 Cu/Pd 值为 19~5539, 平均值为 858, 全都小于原始地幔值 (约 7 500, McDonough et al., 1995); Cu/Pt 比值为 27~6 258, 平均值为 1 189, 也远小于原始地幔值 (4 225, McDonough et al., 1995)。而金宝山的超基性围岩的 Cu/Pd 比值和 Cu/Pt 比值也都小于原始地幔值。表明, 首先其母岩浆之前没有发生过硫化物熔体的融离作用; 金宝山超基性围岩与矿石都经历了铂族元素的富集过程, 而围岩 PGE 含量达不到边界品位, 是由于硫化物量太少的缘故, 显微镜下也极少见硫化物, 远远少于矿石硫化物的含量。此外, 如果金宝山铂钯矿石是由富含铂族元素的岩浆就位后再融离而成的话, Cu/Pt 比值和 Cu/Pd 比值在含 PGE 层位附近会突然升高 (Barnes et al., 1993), 然而事实并非如此, 矿石和围岩的差别并不明显。因此, 金宝山矿石并非岩浆就位后分异和融离形成, 超基性围岩与矿石是“兄弟关系”, 两者在较短时间内先后侵入, 而不是“母子关系”。此外, 金宝山辉长岩的 Cu/Pd 比值和 Cu/Pt 比值分别为 1 312 和 978, 也表明其经历了 PGE 的富集过程。

杨柳坪矿石的 Cu/Pd 比值和 Cu/Pt 比值变化较大, 从 10^2 至 10^5 呈无规则分布, 但仍有较多样品的 Cu/Pd 比值和 Cu/Pt 比值与原始地幔接近。王登红等 (2002b) 研究发现, 杨柳坪矿床有大量的后期热液携带矿质参与叠加成矿, 部分热液还进入有利的围岩中形成独立的热液型和矽卡岩型富矿体。其离散的 Cu/Pd 和 Cu/Pt 比值可能与后期强烈的热液活动有关 (郑建斌等, 2004)。

青矿山矿石样品数量较少, 其 Cu/Pd 比值和 Cu/Pt 比值较为集中, 约为原始地幔值的几倍, 反应了其母岩浆曾发生过硫化物的融离作用。

白马寨和力马河矿石的 Cu/Pd 比值和 Cu/Pt 比值远远大于原始地幔, 绝大多数都在 10^6 级, 较原始地幔高出两个数量级, 这表明在力马河及白马寨的硫化物熔体被熔离出来之前, 它们的母岩浆已经融离出过大量的硫化物, 由于 PGE 相对 Cu-Ni 更多被带走, 导致其 Cu/Pd 比值、Cu/Pt 比值远远小于原始地幔值。

由于 S 的含量极低, 玄武质岩浆只能携带极少量的含 PGE 的硫化物, 但峨嵋地幔柱体积巨大, 其携带而来 Cu、Ni 和 PGE 是相当可观的, 中国 PGE 资源极其紧缺, 虽在中国西南地区发现了大量与峨眉山玄武岩有关的 Cu-Ni-PGE 矿床, 但遗憾的是, 到目前为止, 并没有找到如俄罗斯 Noril'sk 一样与溢流玄武岩有关的超大型铜镍铂族矿床。一些学者研究发现, 峨眉山玄武岩 PGE 含量较中国玄武岩平均值要高很多, 其相邻的沉积物中 PGE 含量也很高, 由此推断中国西南地区为最有希望找到大型、超大型 PGE 矿床的远景区域。

然而, 玄武岩和其相邻沉积物中 PGE 含量高, 并不一定有利于成矿, 这是因为 PGE 主要来自峨眉山玄武岩, 玄武岩中 PGE 高, 则说明 PGE 处于分散状态, 没有或较少通过硫化物收集从玄武岩中熔离出来聚集成矿。因此寻找与峨眉山玄武岩有关的铂族元素矿床, 应该优先选择玄武岩 PGE 含量低且 Cu/Pd 及 Cu/Pt 比值高于原始地幔的区域。由前文讨论可知, 应将重点放在峨嵋地幔柱上升早期和中期结晶分异形成的镁铁-超镁铁岩体上, 因为在地幔柱上升的早、中期, 玄武岩刚刚由不饱和变为饱和, R 因子较大, 硫

化物可以从硅酸盐中萃取到大量的PGE，从而聚集成矿。

表2 西南地区岩浆硫化物矿床铂族参数

Table 2 Major PGE parameters of magmatic sulfide deposits related Emeishan basalt

矿床	岩石/矿石类型	样品编号	Ni	Pt	Pd	Cu	Cu/Pd	Cu/Pt	Ni/Cu	数据来源
金宝山	铂钯矿石	05210	2597	2405	3676	340	93	141	7.6	本文
		05214	3785	3886	6618	3753	567	966	1.0	
		05219	1756	785	1254	416	332	530	4.2	
		05221	1408	622	1099	642	584	1032	2.2	
	2H23	3079	2008	3724	2123	570	1057	1.5	Tao et al., 2007	
	2H28	1559	190	351	405	1154	2132	3.8		
	2H38	2396	557	1216	960	789	1724	2.5		
	1H28	1659	564	640	3545	5539	6285	0.5		
	1H20	2344	795	852	767	900	965	3.1		
	1H12	2745	1683	1990	4341	2181	2579	0.6		
	322-6R	1344	3672	6305	411	65	112	3.3		
	145-3R	4570	6383	10080	944	94	148	4.8		
145-4R	4555	6430	10240	5046	493	785	0.9			
JB19	1332	338	462	9	19	27	148.0	本文		
19-96	1912	967	1089	29	27	30	65.9			
39-82	3329	3661	5836	1888	324	516	1.8	Tao et al., 2007		
05208	867	67	102	5	47	71	181.3			
05224	1318	57	47	6	121	100	230.8			
1H34	1514	77	58	212	3655	2753	7.1			
1H23	1382	55	46	19	413	345	72.7			
1H3	1354	24	31	8	258	333	169.3			
19-176	1545	58	103	64	621	1103	24.1			
1309-2	1295	56	81	41	506	732	31.6			
B33	1306	13	22	9	407	682	145.1			
19-156	1470	57	63	68	1079	1193	21.6			
39-80	1337	37	43	12	279	324	111.4			
2H8-2	1371	63	76	21	276	333	65.3	本文		
辉长岩	05200	520.28	5.55	4.14	5.43	1312	978		95.8	
杨柳坪	块状矿石	Y01-44	55744	1308	1797	4495	2501	3437	12.4	Song et al., 2008
		Y01-57	55309	1126	380	370	974	329	149.5	
杨柳坪	网状矿石	Y02-2	39362	2236	886	112913	127441	50498	0.3	本文
		Y02-3	45415	4867	1786	99967	55973	20540	0.5	
杨柳坪		Y01-38	4351	1734	288	14621	50767	8432	0.3	本文
网状矿石	Y01-53	1626	138	79	4408	55797	31942	0.4		
杨柳坪		Y01-49	9041	359	26	12423	477808	34604	0.7	本文
浸染状矿石	YD-2	21949	3819	1135	6163	5430	1614	3.6		
杨柳坪	正子燕窝	Z01-1	50193	1247	150	1284	8560	1030	39.1	本文
	块状矿石	ZD-22	61651	1997	487	293	602	147	210.4	
		ZD-25	61924	1493	682	261	383	175	237.3	
	正子燕窝	Z01-37	18408	675	263	3754	14274	5561	4.9	本文
		Z01-40	10390	704	132	9183	69568	13044	1.1	
	网状矿石	Z01-43	5677	2449	146	50255	344212	20521	0.1	本文
		Z02-1	25184	1654	855	35844	41923	21671	0.7	
	正子燕窝	Z02-2	6531	665	272	10746	39507	16159	0.6	本文
	浸染状矿石	Z01-6	3886	494	167	1416	8479	2866	2.7	
		Z01-32	6827	410	280	2260	8071	5512	3.0	本文

青矿山	浸染状矿石	SQ05-4	6504	311	593	8889	14990	28582	0.7	
		SQ05-8	5749	387	861	11352	13185	29333	0.5	
		SQ05-9	1262	164	351	3927	11188	23945	0.3	
块状矿石	BMZ-90	32800	49	59	23700	398990	485656	1.4		
	BMZ-91	30700	60	154	30600	198701	513423	1.0		
	BMZ-92	27300	88	140	31200	222857	356571	0.9		
	BMZ-93	25600	195	157	27200	173248	139487	0.9		
	BMZ-94	31100	148	130	4100	31538	27703	7.6		
	BMZ-95	17700	210	313	48500	154952	230952	0.4		
	BMZ-96	32700	167	159	22800	143396	136527	1.4		
	BMZ-97	15900	180	302	61900	204967	343889	0.3		
	BMZ-98	15600	222	249	65000	261044	292793	0.2	Wang et al., 2006a; 2006b	
	BMZ-99	28100	162	223	48700	218386	300617	0.6		
	BMZ-100	38700	103	123	19100	155285	185437	2.0		
	BMZ-101	39500	104	78	8800	112821	84615	4.5		
	BMZ-102	38200	130	141	17600	124823	135385	2.2		
	BMZ-103	36800	159	156	23100	148077	145283	1.6		
	BMZ-104	36400	163	130	24400	187692	149693	1.5		
	BMZ-105	37600	71	92	22600	246187	317862	1.7		
BMZ-106	42100	32	38	8700	230159	269350	4.8			
白马寨	05108	46549	229	304	14942	49109	65185	3.1		
	05109	48774	25	26	11986	456272	479067	4.1		
	05112	36386	102	266	19398	72979	189469	1.9	本文	
	05130	30120	229	228	28296	123970	123835	1.1		
	05132	42641	160	143	14716	102642	92187	2.9		
	05135	36075	198	247	16961	68714	85531	2.1		
橄辉岩 (网状状矿石)	BMZ80	3084	4	3	4920	1523220	1185542	0.6		
	BMZ82	17592	47	54	4611	84917	97898	3.8		
	BMZ84	10496	22	44	1572	35485	70493	6.7		
	BMZ86	10644	14	22	13178	599000	941286	0.8		
	BMZ88	13196	29	47	24411	523841	856526	0.5		
	BMZ90	23039	46	87	5746	66198	125185	4.0	Wang et al., 2006a; 2006b	
	BMZ1071	26082	23	30	13927	458125	602900	1.9		
	BMZ1072	21142	13	18	11079	633086	852231	1.9		
	BMZ109	1578	1	2	251	142614	209167	6.3		
	BMZ111	6586	15	17	5250	301724	359589	1.3		
	BMZ113	5884	45	80	8841	110237	198229	0.7		
BMZ115	1075	2	3	539	207308	354605	2.0			
力马河	05107	402	0	0	42	330714	200337	9.6		
	05127	526	1	1	407	439298	589551	1.3		
	05129	5016	4	5	1988	440011	480641	2.5	本文	
	05136	9115	25	41	2240	55112	91270	4.1		
	05137	7384	11	6	7716	1243783	692057	1.0		
	SI05-7	822	1	2	98	56647	116667	8.4		
二辉辉石岩	SI05-8	1116	1	0	201	467442	287143	5.6		
	SI05-9	834	0	1	151	274545	321277	5.5		
	SI05-10	591	1	0	75	227273	133929	7.9		
	SI05-1	265	3	4	180	45570	58065	1.5	Song et al., 2008	
辉长岩	SI05-2	157	2	2	110	49327	62147	1.4		
	SI05-3	268	0	0	132	306977	306977	2.0		
	SI05-5	1012	2	3	265	85484	111345	3.8		
	SI05-11	1619	3	3	427	128614	170800	3.8		
浸染状矿石	SI05-13	13743	14	5	8125	1762473	576241	1.7		
块状矿石	LMK1	18200	2	2	830	356223	441489	21.9	陶琰等, 2007	

	LMK2	21100	1	2	210	87137	283784	100.5	
	LMK3	29100	31	21	15600	753623	496815	1.9	
网脉状矿石	LMK4	42700	121	43	11400	266979	94215	3.7	
	LMK5	10300	9	6	5140	805643	576880	2.0	
斑点状矿石	LMS1	6080	18	15	4090	267320	223497	1.5	
	LMS2	6910	13	4	3640	947917	286614	1.9	
	LMS4	4510	5	3	2060	651899	382900	2.2	
无矿橄榄岩	LMS5	1690	12	2	720	470588	59504	2.3	
	LMU3	580	2	1	880	1060241	511628	0.7	
	LMU4	930	7	5	38	7280	5605	24.5	
	LMU5	970	7	5	26	5696	3898	37.3	
CI 球粒陨石		10500	1010	550	120	218	119	88	McDonough et al., 1995
原始地幔		1960	7.1	3.9	30	7692	4225	65	

从金宝山 PGE 地球化学来看, 其 IPGE 与 PPGE 分异程度虽然较白马寨弱, 但其 IPGE/PPGE、Pd/Ir 和 Pt/Ir 与世界上多数玄武岩型的 PGE 矿床比较而言, 要高得多, 当峨嵋地幔柱在开始发生硫化物熔离时, 其岩浆演化程度很高, 首先可能与地幔部分熔融程度有关; 其次, 峨嵋地幔柱初期 S 含量很低, 喷发速度太快, 结晶分异和熔化硅铝质的壳源物质有限, 如果地壳厚度一致, 岩浆上升的距离相同, 那么峨嵋山玄武岩的融离而成矿时间就很短, 这可能是为什么在中国西南地区至今还没发现如俄罗斯 Noril'sk 那样超大型矿床的主要原因。

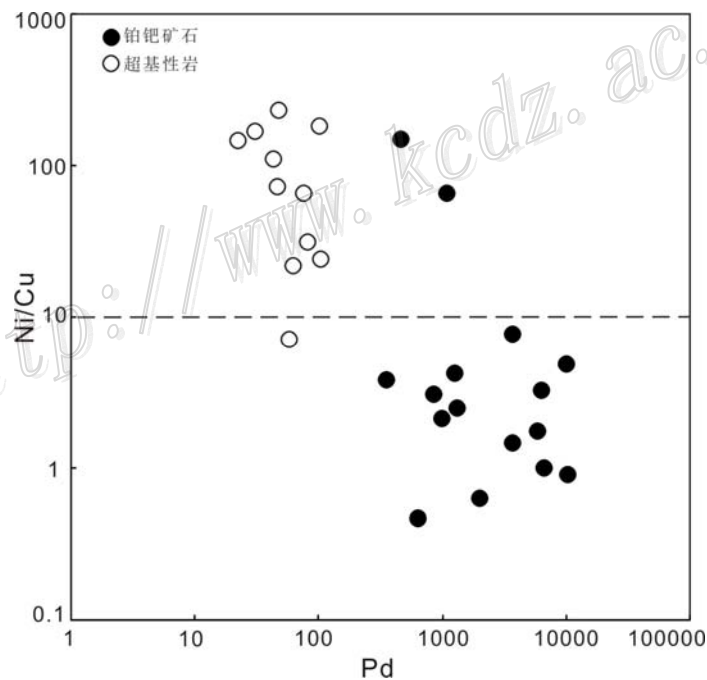


图 10 金宝山矿床的 Pd-Ni/Cu 图

Fig. 10 Pd-Ni/Cu diagram of Jinbaoshan deposit

前文提到, 经历了 PGE 过程的岩体往往具有较原始地幔更小的 Cu/Pd 比值, 照此理论, 找 Cu-Ni-PGE 矿床时应当寻找 Cu/Pd 比值较原始地幔小的岩体。但是, 对于金宝山型矿床而言, 由于铂钯矿石为主要稀疏浸染状, 矿石用肉眼观察与围岩并没有什么区别, 因此, 这类矿床具有很大的隐蔽性, 且由于各种条件的限制, 目前 PGE 的分析费用昂贵、分析流程复杂繁琐, 如果对标本逐一进行 PGE 精确分析测试的话, 代价太高。

但从表 2 可见, 绝大多数金宝山矿石的 Ni/Cu 比值小于 10, 仅仅有 JB19 及 19-96 的 Ni/Cu 比值大于 10, 可能与热液蚀变和 R 因子有关(与陶琰私人通信)。

从前文的对比研究我们知道, 金宝山型矿床形成于高温阶段, 为地幔柱早期结晶分异的产物, 其矿石形成于地幔柱刚刚 S 饱和时, 而此前结晶分异形成的超基性岩体只有极少硫化物, 由于 Ni 在橄榄石、斜方辉石等暗色矿物中含量高, 可以取代其中的 Fe^{2+} , 而 Cu 不能取代 Fe^{2+} , 导致不含矿的硫化物的超基性岩体中的 Cu 含量往往较低, 因此 S 饱和前结晶分异的不含矿的超基性岩体的 Ni/Cu 值很高, 表 2 也显示, 金宝山超基性围岩 Ni/Cu 比值绝大多数都在 20 以上; 但随着 S 的逐渐饱和度, 此时结晶分异的岩体中会出现富含 PGE 的硫化物, 由于 Ni、Cu 在硫化物中的含量均远远高于超基性的硅酸盐岩浆, 必然导致该阶段结晶分异的、富含 PGE 硫化物超基性岩体的 Ni/Cu 比值迅速降低(图 10), 因此, 金宝山矿石的 Ni/Cu 比值大都在 10 以下。Ni、Cu 分析成本相对较低, 这样用间接方法寻找金宝山这类稀疏浸染型矿床, 可大大降低找矿和探矿时分析成本。当然, 更精确的 PGE 含量仍需要显微镜下鉴定和进一步定量分析予以确定。

4 结 论

与峨眉山玄武岩有关的基性-超基性岩带中分布的不同类型的岩浆硫化物矿床的 Cu/Pd 比值、Cu/Pt 比值差异极其悬殊, 攀西地区力马河及金平地区白马寨的 Cu/Pd 比值、Cu/Pt 比值远远高于原始地幔, 表明其母岩浆由于强烈的硫化物熔离作用导致铂族元素强烈亏损; 杨柳坪的 Cu/Pd 比值、Cu/Pt 比值与原始地幔大致相近表明四川北部的道孚-丹巴-康定一带的基性-超基性岩体的母岩浆经历了少量硫化物熔离而其铂族元素轻度亏损; 金宝山岩体 Cu/Pd 比值、Cu/Pt 比值均小于原始地幔值, 表明其矿石和围岩都经历了铂族元素的富集过程, 同时推测沿金宝山相邻分布的其他与峨眉山玄武岩有关的基性-超基性岩体也经历了相同的过程, 金宝山岩体由于立社江(红河的上游)的深切作用使其出露于地表, 而那些金宝山附近的隐伏于地下的晚二叠基性-超基性岩体, 是中国寻找铂族矿床的重要目标。同时由于该类新铂族矿床的矿石与超基性围岩肉眼难辨, 在进行分析时利用 Ni/Cu 比值可以进行间接且快速找矿, 同时能大大降低勘探成本。

志 谢 本文野外采样和资料收集得到云南白马寨铜镍矿地质科、云南云宝铂钯矿业有限公司祁敬东总工程师和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屈文俊博士、中国科学院广州地球化学研究所孙亚莉老师协助完成了样品铂族元素测试。此外中国科学院贵阳地球化学研究所陶琰老师给予了很大启发, 在此一并表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

- 邓家藩. 1999. 云南硫化物型铜镍和铂族矿床. 云南地质, 18(1): 22-35.
- 邓海琳, 李朝阳, 漆亮, 等. 2000. 云南金宝山铂族元素矿床初步研究. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 333-336.
- 段建中, 谭菝虹. 2000. 滇西三江地区新生代主要走滑断裂性质及特征. 云南地质, 19(1): 8-23.
- 刘敏. 2002. 金宝山铂钯矿多元素的相关关系与铂族矿物的产出形式. 矿产综合利用, 5: 28-32.
- 刘敏. 2004. 云南金宝山铂钯矿矿石的工艺矿物学研究. 矿产综合利用, 1: 23-27.
- 罗君烈. 1995. 云南铂、铜镍、铬矿床的成矿模式. 14(4): 311-318.
- 任纪舜, 金小赤. 1996. 红河断裂的新观察. 地质论评, 42(5): 939-442.
- 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, 22(10).
- 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.
- 宋谢炎, 曹志敏, 罗辅勋, 等. 2004. 四川丹巴杨柳坪铜镍铂族元素硫化物矿床成因初探. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(3): 256-266.
- 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, 等. 2000. 云南金宝山铂钯矿床成矿机制探讨. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 338-340.
- 陶 琰, 高振敏, 罗泰义, 等. 2002. 云南金宝山超镁铁岩原始岩浆成分反演. 岩石学报, 18(1): 70-82.
- 陶 琰, 朱 丹, 高振敏, 等. 2003. 金宝山铂族元素矿床铂族元素的热液活动研究. 矿物岩石地球化学通报, 22(1): 32-37.
- 陶 琰, 高振敏, 罗泰义, 等. 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 琰, 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.
- 王登红, 楚莹石, 骆辅勋, 等. 2000a. 四川杨柳坪 Cu-Ni-PGE 富矿体的成因及意义. 地球学报, 21(3): 260-265.
- 王登红, 楚莹石, 罗辅勋, 等. 2000b. 杨柳坪铜-镍-铂族元素矿床的矿化类型及意义. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 323-325.
- 王登红, 骆耀南, 傅德明, 等. 2001. 四川杨柳坪 Cu-Ni-PGE 矿区基性超基性岩的地球化学特征及其含矿性. 地球学报, 22(3): 135-140.
- 王登红, 应汉龙, 骆耀南, 等. 2002a. 试论与布什维尔杂岩体有关的铂族元素-铬铁矿床成矿系列及其对中国西南部的意义. 地质与资源, 11(4): 223-249.
- 王登红, 刘凤山, 楚莹石, 等. 2002b. 四川杨柳坪热液型富铂族元素矿床的发现及其意义. 地质通报, 21(3): 158-162.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 等. 2006. 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. 地质学报, 80(9): 1474-1486.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 等. 2007. 云南金宝山和白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素(PGE)地球化学的差异及其成因意义. 地质学报, 2007, 81(1): 93-108.
- 王生伟. 2007. 云南白马寨和金宝山硫化物矿床地质地球化学对比研究(博士学位论文). 广州: 中山大学.
- 肖 龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 2003a. 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.
- 肖 龙. 2003b. 峨眉山大火成岩省西部玄武岩的岩石地球化学特征及成因. 地幔柱-岩石圈相互作用. 35-50.
- 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.
- 郑建斌, 曹志敏, 宋谢炎, 安 伟, 刘 激. 2004. 杨柳坪岩浆 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床 PGE 地球化学特征. 地质与勘探, 40(5): 16-20.
- 朱 丹, 陶 炎, 罗泰义, 高振敏, 等. 2003. 云南金宝山镁铁-超镁铁岩的地球化学特征及成因. 矿物学报, 23(1): 63-69.
- Ali J R, Thompson G M, Zhou M F, et al. 2005. Emeishan large igneous province, SW China. Lithos, 79: 475-489.
- Allen C R, Gillespie A R, Han Y, et al. 1984. Red River and associated faults Yunnan Province China: Quaternary geology slip rates and seismic hazard. Geological Society of America Bulletin, 95: 686-700.
- Barnes S J. 1990. The use of metal ratios in prospecting for platinum-group element deposits in mafic and ultramafic intrusions. Journal of Geochemical Exploration, 37: 91-99.
- 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. Econ. Geol., 88: 1402-1418.
- 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 Platinova reef, Skaergaard intrusion. Lithos, 47: 107-126.
- Crocket J H, Fleet M E and Stone W E. 1997. Implications of composition for experimental partitioning of platinum-group elements and gold between sulfide liquid and basalt melt: The significance of nickel content. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(19): 4139-4149.
- Deng H L, Li C Y, Qi L, et al. 2000. The junior research on Jinbaoshan platinum group elements deposit, Yunnan. Bulletin of Mineralogy, petrology and Geochemistry, 19(4): 333-336 (in Chinese).
- Deng J F. 1999. The sulphide Cu-Ni and Pt deposits in Yunnan. Geology of Yunnan, 18(1): 22-35(in Chinese with English abstract).
- Duan J Z and Tan Y H. 2000. The nature and feature of Cenozoic main strike-slip fault in the Three-River area of west Yunnan. Yunnan Geology, 19(1): 8-23.
- Fleet M E, Crocket J H and 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.
- Leloup P H, et al. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone(Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. Tectonophysics, 251: 3-84.
- Liu M. 2002. Multielemental relationship of Jinbaoshan Pt-Pd ore and occurrence of platinum group minerals. Multipurpose Utilization of Mineral Resources(in Chinese with English abstract).
- Liu M. 2004. Process mineralogy of Jinbaoshan platinum-palladium ore, Yunnan. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1: 23-27 (in Chinese with English abstract).
- Luo J L. 1995. Genetic model for Platinum, copper, nickel, and chromium deposits in Yunnan Province. Yunnan Geology, 14(4): 311-318(in Chinese).
- 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. *Econ. Geol.*, 91: 1151-1158.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120: 223-230.
- Naldrett A J and Duke J M. 1980. Platinum metals in magmatic ores. *Science*, 208: 1417-1424.
- Pu C J, Qin D X, Nian H, Zhang X S, et al. 2007. Geological and geochemical characteristics of the Baimazhai Ni-Cu-(PGE) sulphide deposit in Yunnan, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 26(4): 374-383.
- Rangin C, Klein M, Roques D, et al. 1995. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, 243: 675-678.
- Ren J S and Jin X C. 1996. New observations of the Red River fault. *Geological Review*, 42(5): 939-442 (in Chinese with English abstract).
- Shi G Y, Sun X M, Wang S W, et al. 2006. Re-Os isotopic dating and its geological implication of Baimazhai Cu-Ni sulphide deposit, Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10)(in Chinese with English abstract).
- 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 and 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).
- Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, et al. 2003. Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area Permian Emeishan igneous province, SW China. *Mineralium Deposita*, 38: 831-843.
- Song X Y, Cao Z M, Luo F X, et al. 2004. Origin of Yangliuping Ni-Cu-PGE sulfide deposit in Danba, Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(3): 256-266 (in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Zhou M F, Tao Y and Xiao J F. 2008. Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology*, 253: 38-49.
- Sun X M, Wang S W, Sun W D, Shi G Y, Sun Y L, Xiong D X, Qu W J and Du A D. 2008. PGE geochemistry and Re-Os dating of massive sulfide ores from the Baimazhai Cu-Ni deposit, Yunnan Province, China. *Lithos*, 105: 12-24.
- 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, Luo T Y, Gao Z M, et al. 2000. Ore genesis discussion of Jinbaoshan Pt-Pd deposit in Yunnan Province. *Bulletin of Mineralogy, petrology and Geochemistry*, 19(4): 338-340 (in Chinese).
- Tao Y, Gao Z M, Luo T Y, et al. 2002. Inversion of primary magma composition for Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 70-82 (in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Zhu D, Gao Z M and Luo T Y. 2003. Study on PGE remobilization in Jinbaoshan deposit. *Bulletin of Mineralogy, petrology and Geochemistry*, 22(1): 32-37(in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Gao Z M, Luo T Y and 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).
- Tao Y, Li C S, Hu R Z, Ripley E M, Du A D and Zhong H. 2007. Petrogenesis of the Pt-Pd mineralized Jinbaoshan ultramafic intrusion in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 153: 321-337.
- Tapponnier P, et al. 1990. The Ailaoshan-Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear zone between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431-437.
- Wang C Y, Zhou M F and Keays R R. 2005a. 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 C Y, Zhou M F and Zhao D G. 2005b. Mineral chemistry of chromite from the Permian Jinbaoshan Pt-Pd-sulphide-bearing ultramafic intrusion in SW China with petrogenetic implications. *Lithos*, 83: 47-66.
- Wang C Y and Zhou M F. 2006a. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China. *Mineral Deposita*, 41: 771-783.

- Wang C Y, Zhou M F and Keays R R. 2006b. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China. *Contribution to mineralogy and petrology*, 152:309-321.
- Wang C Y, Prichard H M, Zhou M F and Fisher P C. 2008. Platinum-Group minerals from the Jinbaoshan Pd-Pt deposit, SW China: Evidence for magmatic origin and hydrothermal alteration. *Mineral Deposita*, 43: 791-803.
- Wang D H, Chu Y S, Luo F X, et al. 2000a. Mineralization and its significance in Yangliuping Cu-Ni-PGE deposit. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 323-325 (in Chinese).
- Wang D H, Chu Y S, Luo F X, et al. 2000b. The origin of the Cu-Ni-PGE ore body in Yangliuping, Sichuan Province, and the significance of its discovery. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(3): 260-265 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Luo Y N, Fu D M, et al. 2001. Petrochemistry and ore potentiality of the mafic-ultramafic rocks in the Yangliuping Cu-Ni-PGE mine, Sichuan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 135-140 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Ying H L, Luo Y N, et al. 2002a. The platinum group element-chromite metallogenic series related to the Bushveld complex in south Africa. *Geology and Resources*, 11(4): 223-249 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Liu F S, Chu Y S, et al. 2002b. Discovery of PGE-rich hydrothermal ore in the Yangliuping, Sichuan, and its significance. *Geological Bulletin of China*, 21(3): 158-162 (in Chinese with English abstract).
- Wang S W, Sun X M, Shi G Y, Xiong D X and Zhai W. 2006. Platinum group elements (PGE) geochemistry of Baimazhai Ni-Cu sulfide deposit and its constraints on the ore genesis. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1474-1486 (in Chinese with English abstract).
- Wang S W, Sun X M, Shi G Y, Xiong D X and Zhai W. 2007. Distinction of platinum group elements (PGE) geochemistry between the Jinbaoshan and Baimazhai magmatic sulfide deposits in Yunnan Province, China, and its Implication for ore genesis. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 93-108(in Chinese with English abstract).
- Wang S W. 2007. Comparative studies on Geology and geochemistry of Baimazhai and Jinbaoshan magmatic sulfide deposits in Yunnan Province, China. A Dissertation Submitted to Graduate School of Sun Yat-Sen University for the Degree of Doctor of Philosophy.
- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. 2003a. 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).
- Xiao L. 2003b. Geochemistry and Petrogenesis of Flood Basalts from Western Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implication for Plume-Lithosphere Interaction.
- Zhang X S, Pirajno F, Qin D X, et al. 2006. Baimazhai, Yunnan Province, China: a hydrothermally modified magmatic nickel-copper-PGE sulfide deposit. *Inter. Geol. Rev.*, 48: 725-741
- 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).
- Zheng J B, Cao Z M, Song X Y, An W and Liu J. 2004. PGE geochemistry of the Yangliuping magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposit. *Geology and Prospecting*, 40(5): 16-20.
- Zhu D, Tao Y, Gao Z M, et al. 2003. Geochemical and petrological characteristics of mafic and ultramafic intrusions in Jinbaoshan, Yunnan. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(1): 63-69 (in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Yang Z X, Song X Y, Keays R R and Lesher C M. 2002a. Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China. In: Cabri L J, ed. *The geology, geochemistry, mineralogy, mineral beneficiation of the platinum group elements*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy Petroleum, 54: 619-636.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, et al. 2002b. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planet Sci. Lett.* 196: 113-122.