

# 四川攀西地区几个小型镁铁-超镁铁岩体含矿性的铂族元素示踪\*

官建祥, 宋谢炎

(中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

**摘要** 峨眉山大火成岩省内带, 四川攀西地区的杨合伍、黄草坪和清水河等镁铁-超镁铁岩体分布在南北向的安宁河断裂和磨盘山-元谋断裂之间。分析表明, 这些岩体无矿岩石与金山山、杨柳坪、力马河等含矿岩体无矿岩石具有相似的铂族元素组成, 普遍较高的 Cu/Pd 比值暗示这些岩体的母岩浆在侵入到目前层位前经历过硫化物熔离作用。定量模拟计算表明, 原始岩浆经过大约 0.01% 的硫化物熔离作用形成了杨合伍岩体母岩浆, 经过 0.035% 硫化物熔离形成了黄草坪和清水河岩体的母岩浆。根据硫化物熔离情况, 认为杨合伍等岩体底部可能形成 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床, 而黄草坪和清水河岩体之下及附近可能存在 Ni-Cu 硫化物矿化的岩体。

**关键词** 地质学, 铂族元素, 硫化物熔离, 镁铁质-超镁铁质岩体, 峨眉山大火成岩省, 攀西地区

中图分类号: P618.53

文献标志码: A

## Platinum-group elements as ore potentiality tracers of a few small mafic-ultramafic intrusions in Panxi area, Sichuan Province

GUAN JianXiang and SONG XieYan

(State key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

### Abstract

Sulfides-bearing mafic-ultramafic intrusions in the central zone of the Emei Shan large igneous province within Panxi area, such as Yanghewu, Huangcaoping and Qingshuihe, are distributed between the NS-striking Anninghe fault and Mopanshan-Yuanmou fault. The barren rocks in these intrusions are similar to barren rocks in such ore-bearing intrusions as Jinbaoshan, Yangliuping and Limahe in platinum-group element composition. High Cu/Pd values of the rocks of the intrusions indicate that the parental magmas had undergone sulfide segregation before their intrusion into the present horizon. Model calculations show that the magma underwent about 0.01% sulfide segregation before the formation of the Yanghewu intrusion, and the magmas experienced 0.035% sulfide separation before the formation of the Huangcaoping and Qingshuihe intrusions. There probably exist Ni-Cu-(PGE) sulfides at the bottom of the Yanghewu intrusion and Ni-Cu sulfide mineralizations in hidden intrusions beneath the Huangcaoping and Qingshuihe intrusions or other neighboring intrusions.

**Key words:** geology, platinum-group elements, sulfide segregation, mafic-ultramafic intrusions, Emei Shan large igneous province, Panxi area

\* 本文得到国家“973”计划(2007CB411408)、中国科学院“百人计划”和国家自然科学基金项目(40730420)的联合资助

第一作者简介 官建祥,男,1982年生,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: guanjianxiang@gmail.com

\*\* 通讯作者 宋谢炎,男,1962年生,研究员,岩石与矿床地球化学专业。Email: songxieyan@vip.gyig.ac.cn

收稿日期 2009-07-16; 改回日期 2009-08-18. 李德先编辑。

岩浆铜镍硫化物多聚集在镁铁-超镁铁岩体底部成矿,而在地表往往没有露头,给找矿工作带来困难。因此,如何利用地表无矿岩石对岩体深部岩浆硫化物矿化的可能性和矿化类型进行初步的评价是非常必要的。本文试图以四川省攀西地区的几个含铜镍硫化物镁铁-超镁铁岩体为例,探讨利用其无矿岩石的铂族元素(PGE)组成评价岩体含矿性的方法。

峨眉山大火成岩省内带的攀西地区成矿地质条件较为优越,不仅是中国最重要的大型-超大型V-Ti磁铁矿床(如攀枝花、红格、白马等)矿集区,也是峨眉山大火成岩省岩浆硫化物含矿岩体分布最集中的区域(如力马河、青矿山等)(图1);

宋谢炎等(2005)。但是,迄今为止,该地区发现的矿床,除力马河铜镍硫化物矿床达到中型、青矿山达到小型规模外,其他岩体的矿化不仅规模较小,且矿化强度较弱,如黄草坪和杨合武,有些岩体的近地表矿体已被采空,如清水河(图1)。尽管前人对这些岩体进行了一定程度的研究(姚家栋,1988),但由于受到当时研究条件的限制,尚有一些问题没有得到很好的解释,如这些矿化岩体所代表的岩浆通道系统是否还有进一步找矿的潜力,可能形成哪一类岩浆硫化物矿床,如何对其他岩体深部矿化的可能性进行合理评价等问题,至今还没有一个圆满的答案。

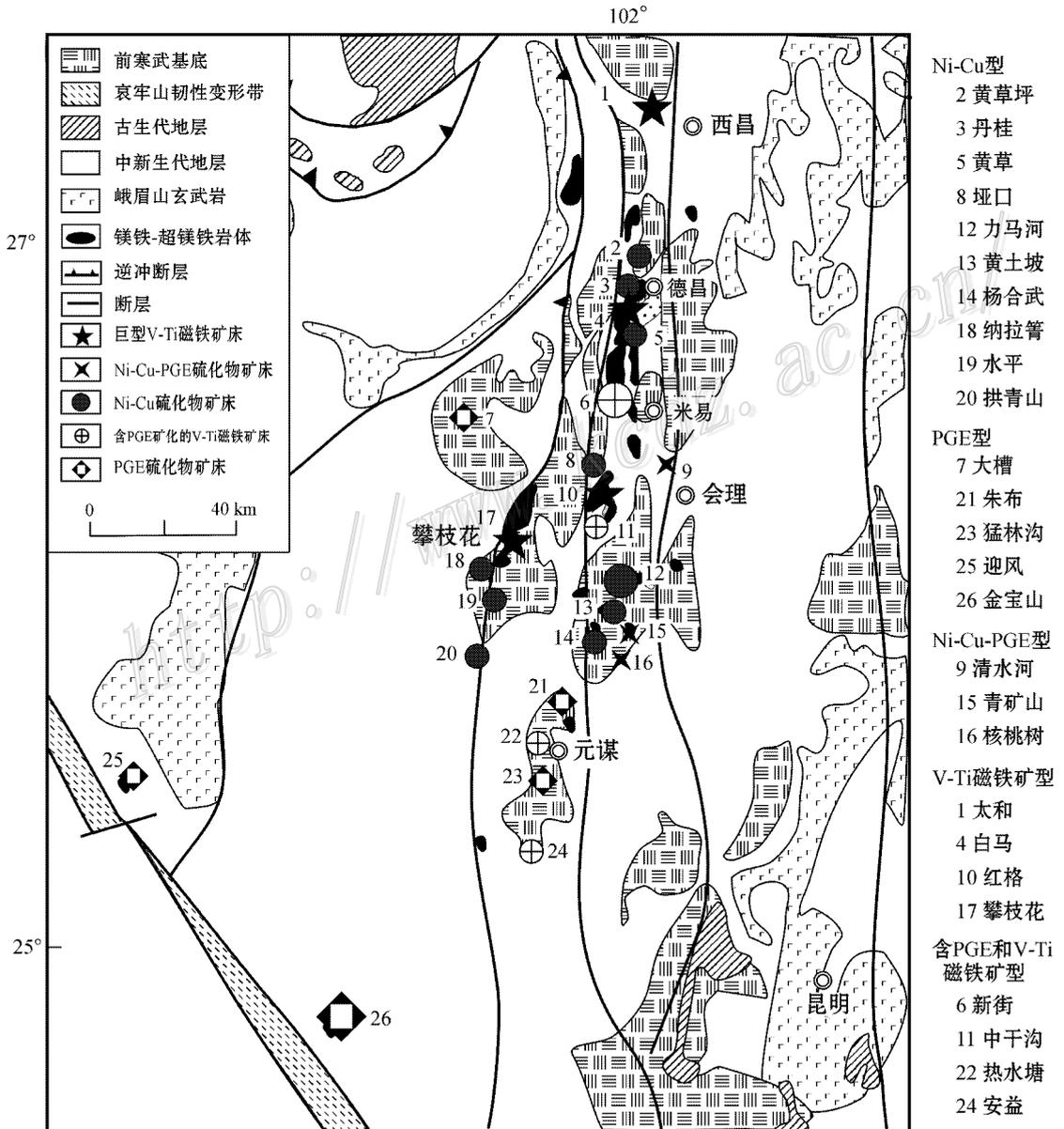


图1 峨眉山大火成岩省内带镁铁质-超镁铁质含矿岩体分布简图(据宋谢炎等,2005改绘)

Fig. 1 Simplified geological map of the central Emei Shan large igneous province, showing the distribution of mineralized mafic-ultramafic intrusions(modified after Song et al., 2005)

本文利用清水河、黄草坪和杨合伍等 3 个含矿岩体中无矿岩石的 PGE、Ni、Cu 组成,结合前人对峨眉山大火成岩省 3 类岩浆铜镍硫化物矿床(即 PGE 型、Ni-Cu-PGE 型和 Ni-Cu 型)PGE 地球化学特征的研究结果(Song et al., 2008),对上述 3 个问题进行研究,为该地区今后其他镁铁-超镁铁岩体的找矿工作提供一些有意义的线索和思路。

## 1 区域地质背景

中国西南和越南北部 Song Da 地块分布着大面积的晚二叠世大陆溢流玄武岩,这些玄武岩和时空上与其密切联系的镁铁质-超镁铁质侵入岩体及中酸性碱性岩体,构成了峨眉山大火成岩省(Chung et al., 1995; Song et al., 2001; Xu et al., 2001, 2004; Zhou et al., 2002; He et al., 2003)。镁铁质-超镁铁质侵入岩体主要出露在峨眉山大火成岩省内带的攀西地区,其空间分布受南北向断裂(如安宁河断裂、磨盘山-元谋断裂和攀枝花断裂),以及这些断裂的次一级断裂控制(图 1)。根据岩体特征和成矿类型的差异,可分为与钒钛磁铁矿化有关的大型层状岩体和与岩浆硫化物矿化有关的小的镁铁质-超镁铁质岩体两大类(宋谢炎等, 2009),前者如攀枝花、红格、新街和白马,后者如金山、力马河、朱布和青矿山。放射性同位素年代学研究已经证实,这些岩体形成于大约 260 Ma(Guo et al., 2004; Zhong et al., 2004; 2006; Zhou et al., 2005; 2007; Tao et al., 2009),与峨眉山玄武岩同属晚二叠世地幔柱作用的产物(Chung et al., 1995; Song et al., 2001; Xu et al., 2004; Zhou et al., 2007)。

根据全岩  $TiO_2$  含量和 Ti/Y 比值的不同,峨眉山玄武岩可分为低 Ti 和高 Ti 系列玄武岩(Xu et al., 2001; Xiao et al., 2004)。低 Ti 峨眉山玄武岩主要分布在峨眉山大火成岩省内带,而高 Ti 玄武岩既分布在内带,也大量分布在外带(He et al., 2003; 宋谢炎等, 2009)。胡瑞忠等(2005)、宋谢炎等(2009)和 Zhou 等(2007)认为,岩浆硫化物成矿与低 Ti 玄武岩有关,钒钛磁铁矿成矿则与高 Ti 玄武岩有关。

## 2 岩体地质特征

如图 1 所示,黄草坪和杨合伍岩体位于磨盘山-元谋断裂附近,而清水河岩体位于安宁河断裂附近。前人资料显示,杨合伍岩体边缘局部出现微量的硫化物,显示 Ni 和 Pt+Pd 矿化,黄草坪岩体的铜镍矿化出现在岩体下部的单辉橄榄岩中(刘朝基等, 1988; 姚家栋, 1988);清水河岩体铜镍矿化出现在超镁铁质岩部分,现已采空。

### 2.1 杨合伍岩体

杨合伍岩体位于磨盘山元谋断裂带东侧,力马河岩体南约 40 km。与力马河岩体相似,杨合伍岩体也侵位于前震旦纪会理群力马河组变质岩系,呈北西倾伏的漏斗状岩株(图

2a)。岩相分带明显,核心相由橄榄岩和橄辉岩组成,过渡相主要是辉石岩,含长辉石岩和辉长岩则不连续地环绕辉石岩分布,岩相之间为过渡接触关系。星点浸染状分布的磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿仅出现在岩体边缘,硫化物可局部富集形成浸染状、团块状、甚至海绵陨铁状结构,个别样品  $\alpha(Pt+Pd)$  最高可达 0.42 g/t(姚家栋, 1988),但规模小,目前还没有发现工业矿体。

姚家栋(1988)认为,杨合伍岩体这种由内向外基性程度降低的分带现象与阿拉斯加型环状镁铁-超镁铁岩体相似,但攀西地区晚古生代并未经历过俯冲事件,没有形成阿拉斯加型岩体的构造背景。虽然本区不乏边缘出现硫化物矿化的镁铁质-超镁铁质岩体,如云南朱布、黑泥沟、四川阿布郎当岩体。但由内向外基性程度降低的分带却非常罕见,杨合伍岩体的岩相分带来源于较低的勘探程度,因此不能完全排除其中有错误的信息。本文对此不做深入探讨。

本次采集的橄辉岩样品具半自形中粗粒镶嵌结构和嵌晶结构(图 3a、b),由橄榄石(5%~40%)、单斜辉石(60%~90%)、斜方辉石(10%)、棕色普通角闪石(5%)、黑云母、斜长石组成。斜方辉石颗粒粗大(约 3 mm),包含早期结晶的橄榄石颗粒,常有单斜辉石反应边。

### 2.2 黄草坪岩体

该岩体位于德昌县城西南 30 km,侵位于前震旦纪康定群混合花岗岩片麻岩与会理群板岩的接触带。岩体呈楔形,东西宽近 1.5 km,南北长近 2 km(图 2b)。岩体分异明显,自南西向北东、自下而上可划分为单辉纯橄岩、含长单辉橄榄岩、含长二辉橄榄岩-橄辉岩、苏长辉长岩等岩相带。浸染状硫化物矿化出现在岩体下部含长单辉橄榄岩中,矿化带长 870 m,宽 20~70 m,延伸 350 m(刘朝基等, 1988)。从岩相分布和矿化特征可以看出,该岩体是一个典型的堆积岩体,由于后期构造活动发生了断裂和一定程度的旋转。

本研究采集的橄辉岩样品由橄榄石(35%~40%)、单斜辉石(50%~60%)、斜方辉石(约 5%)组成,含微量金属硫化物。岩石具中细粒嵌晶结构和单斜辉石包橄结构(图 3c、d)。橄榄石有弱的蛇纹石化,单斜辉石可具有棕色角闪石和黑云母反应边,常具次闪石化。辉长岩具半自形-自形粒状结构,主要由单斜辉石(60%)、斜长石(35%)以及少量棕色角闪石组成。

### 2.3 清水河岩体

清水河岩体呈岩席状位于会理县城北西约 7 km(图 1),受北西向断裂控制,侵位于下寒武统变质岩系中。岩体走向北西-南东,长约 800 m,平面上表现为北宽南窄的“蝌蚪状”(图 2c-I),剖面上呈向南西陡倾的长漏斗状脉体(图 2c-II)。岩体主要由强烈蚀变的橄辉岩和橄辉岩组成,局部边缘有少量的辉石岩零星出现。岩体附近尚有不少基性辉长岩和辉绿岩岩脉出现,前人研究认为可能是清水河岩体同源岩浆深源分异不同阶段的产物(姚家栋, 1988)。铜镍硫化物矿体呈小透镜状产于橄辉岩及橄辉岩中,产状与岩体产状一致。岩

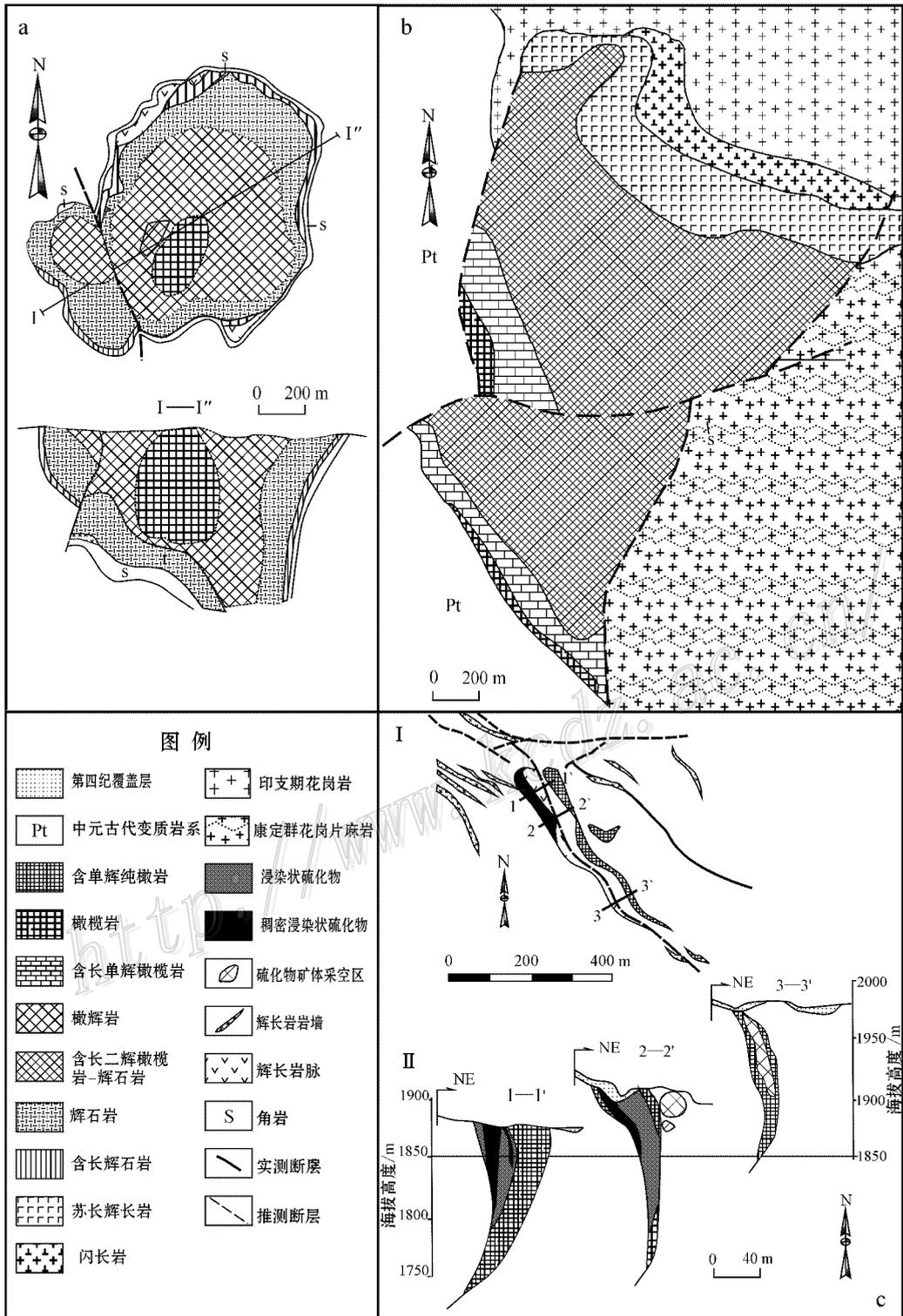


图 2 峨眉山大火成岩省内带杨合伍等镁铁质-超镁铁质含硫化物矿化岩体地质与剖面图(据姚家栋, 1988)

a. 杨合伍岩体; b. 黄草坪岩体; c. 清水合岩体

Fig. 2 Geological maps and cross section of mafic-ultramafic intrusions in the central zone of ELIIF (after Yao, 1988)

a. Yanghewu intrusion; b. Huangcaoping intrusion; c. Qingshuihe intrusion

相带和 Cu-Ni 硫化物矿化的分布表明清水河岩体是岩浆通道的一部分,硫化物是在岩浆通道变宽的部位发生沉淀而形成的,类似于加拿大 Voisey's Bay Ni-Cu-Co 硫化物矿床(Li et al., 1999)。由于硫化物主要沉降在岩浆通道的底部,所以,清水河岩体原始产状应为近水平的,因后期构造发生了较大角度的旋转。

由于硫化物矿体已采空,岩体出露不好,本次研究仅采集到蚀变的含长橄辉岩。岩石主要由强烈次闪石化辉石和蛇纹石化橄榄石构成,含少量斜长石假象,有微量半自形的硫化物出现在矿物边部(图 3e、f)。

### 3 样品分析及结果

本次研究选择的样品包括 4 件杨合伍岩体橄辉岩,6 件清水河岩体含长橄辉岩,4 件黄草坪岩体橄辉岩和 2 件辉长岩。

全岩硫、铜、镍测试在中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。全岩  $w(S)$  用红外吸收光谱分析法测定,检测限为  $1 \times 10^{-6}$ 。 $w(Ni)$ 、 $w(Cu)$  用等离子光谱仪 AES 测定,分析误差在 5% 以内。铂族元素用 Ni 火试金-碲共沉淀法在中国地质科学院完成,称样量为 15~20 g,分析仪器为等离子质谱(ICP-MS),平均检出限:Os 为  $0.007 \times 10^{-6}$ 、

Ir 为  $0.013 \times 10^{-9}$ 、Ru 为  $0.02 \times 10^{-9}$ 、Rh 为  $0.001 \times 10^{-9}$ 、Pt 为  $0.026 \times 10^{-9}$ 、Pd 为  $0.06 \times 10^{-9}$ 。根据对标准样品 UMT-1 和 WPR-1 的分析,分析精度优于 10%。分析结果及一些参数比值列于表 1。

由表 1 可见,除杨合伍岩体 SY05-2 的  $w(S)$  达到 0.88% 外,其他样品的  $w(S)$  都低于 0.3%。样品中  $w(Ni)$ 、 $w(Cu)$ 、 $w(PGE)$  随  $w(S)$  增加而增加。从 3 个岩体的橄辉岩来看,杨合伍橄辉岩具有最低的  $w(Ni)$  ( $262 \times 10^{-6}$ ) 和  $w(Cu)$  (分别为  $262 \times 10^{-6}$ 、 $54 \times 10^{-6}$ ),  $w(PGE)$  相对富集 ( $4.4 \times 10^{-9} \sim 146.4 \times 10^{-9}$ ), 尤其富集 PPGE (PPGE/IPGE = 4.1~11.5), 并以低 Ni/Cu 比值 (0.9~4.8) 和高 Pd/Ir 比值 (15.0~18.5) 为特征。黄草坪橄辉岩具有最高的  $w(Ni)$  ( $2\,001 \times 10^{-6}$ ) 和相对高的  $w(Cu)$  ( $103 \times 10^{-6} \sim 462 \times 10^{-6}$ ), Ni/Cu 比值为 2.2~19.5,  $\Sigma PGE$  变化很大 ( $2.1 \times 10^{-9} \sim 184.8 \times 10^{-9}$ ),  $w(Pd)$ 、 $w(Pt)$  最高可达  $49.6 \times 10^{-9}$  和  $89.4 \times 10^{-9}$ , PPGE/IPGE = 1.8~3.3, Pd/Ir 在 2.4~9.5 之间变化。清水河含长橄辉岩  $w(Ni)$ 、 $w(Cu)$  范围分别是  $1\,156 \times 10^{-6} \sim 1\,376 \times 10^{-6}$  和  $103 \times 10^{-6} \sim 223 \times 10^{-6}$ , Ni/Cu 比值在 7.3~10.6 之间,多数样品  $\Sigma PGE$  小于  $10 \times 10^{-9}$ , 相对富集 PPGE (PPGE/IPGE = 1.8~3.3), Pd/Ir 比值范围为 3.7~12.1, 介于杨合伍和黄草坪橄辉岩之间。杨合伍辉长岩  $w(Ni)$ 、 $w(Cu)$ 、 $w(PGE)$  明显低于橄辉岩  $w(Ni)$  ( $19 \times 10^{-6} \sim 141 \times 10^{-6}$ )、

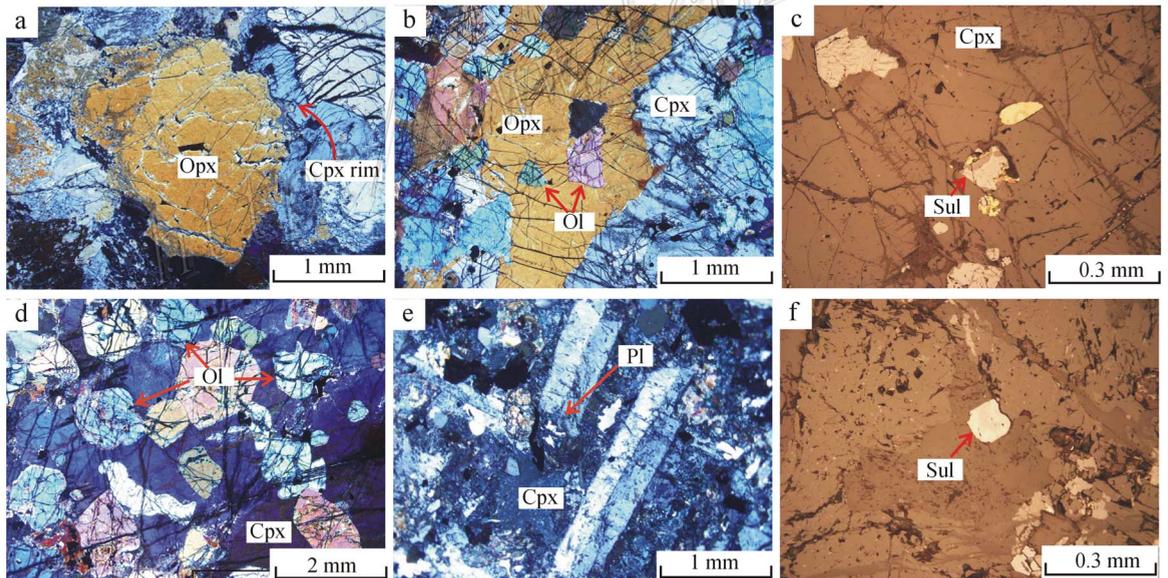


图 3 铜镍硫化物含矿岩体典型显微结构图

a, b. 杨合伍岩体橄辉岩; c, d. 黄草坪岩体橄辉岩; e, f. 清水河岩体含长橄辉岩。Ol—橄榄石; Cpx—单斜辉石; Opx—斜方辉石; Sul—硫化物

Fig. 3 Selected microscopic photographs, showing typical lithologic textures of the rocks of the Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions

a, b. Olivine websterite from Yanghewu intrusion; c, d. Olivine websterite from Huangcaoping intrusion; e, f. Plagioclase-bearing Olivine websterite. Ol—Olivine; Cpx—Clinopyroxene; Opx—Orthopyroxene; Sul—Sulfide

表1 杨合伍、清水河和黄草坪镁铁质-超镁铁质岩体硅酸盐岩石的硫、镍、铜、铂族元素分析结果及比值

Table 1 Concentrations of S, Ni, Cu, PGE and selected ratios of mafic-ultramafic rocks from Yanghewu, Qingshuihe and Huangcaoping mafic-ultramafic intrusions

岩体及样品号	$w_B/\%$			$w_B/10^{-6}$							比值				
	S	Ni	Cu	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	$\Sigma$ PGE	PPGE/IPGE	Ni/Cu	Pd/Ir	Cu/Pd	Pt/Pt*
杨合伍岩体(橄辉岩)															
SYO5-2	0.88	1 259	1 403	7.53	3.41	1.71	2.06	80.60	51.1	146.4	10.6	0.9	15.0	27 462	37.550
SYO5-3	0.01	262	54	0.14	0.18	0.61	0.14	7.24	3.33	11.6	11.5	4.8	18.5	16 215	0.224
SYO5-4	0.03	392	61	0.24	0.10	0.53	0.06	1.79	1.72	4.4	4.1	6.5	17.2	35 276	0.026
SYO5-7	0.17	456	348	0.72	0.38	0.89	0.21	9.52	6.95	18.7	8.4	1.3	18.3	50 084	0.522
黄草坪岩体(SH05-1、SH05-2 样品岩性为辉长岩,其余为橄辉岩)															
SH05-1	0.25	141	137	0.19	0.13	0.41	0.04	3.10	1.81	5.7	6.8	1.0	13.9	75 867	0.038
SH05-2	0.01	19	32	0.07	0.02	0.31	<0.02	0.18	0.52	1.1	1.8	0.6	26.0	61 538	0.001
SH05-3	0.28	1 205	462	0.18	0.09	0.61	0.02	0.49	0.72	2.1	1.4	2.6	8.0	641 340	0.003
SH05-4	0.27	1 446	458	2.14	0.73	0.86	0.17	16.90	1.72	22.5	5.0	3.2	2.4	266 052	0.415
SH05-6	0.25	789	354	0.40	0.08	0.42	<0.02	0.46	0.76	2.1	1.4	2.2	9.5	465 158	0.003
SH05-11	0.23	2 001	103	32.5	5.42	6.09	1.81	89.40	49.60	184.8	3.2	19.5	9.2	2 067	38.442
清水河岩体(含长橄辉岩)															
SQS05-1	0.17	1 376	145	3.38	1.06	1.72	0.34	13.70	6.03	26.2	3.3	9.5	5.7	23 973	0.891
SQS05-3	0.17	1 158	143	0.67	0.40	0.91	0.12	3.47	1.80	7.4	2.7	8.1	4.5	79 233	0.073
SQS05-4	0.17	1 203	164	1.73	0.54	1.20	0.17	4.55	2.00	10.2	1.9	7.3	3.7	81 873	0.120
SQS05-6	0.10	1 156	109	0.35	0.07	0.28	<0.02	0.64	0.80	2.2	2.1	10.6	11.4	136 781	0.004
SQS05-8	0.27	1 313	223	0.26	0.12	0.79	0.02	0.93	1.44	3.5	2.0	5.9	12.1	155 104	0.007
SQS05-10	0.22	1 202	129	2.01	0.32	0.58	0.12	3.32	1.72	8.1	1.8	9.3	5.4	75 058	0.068

$w(\text{Cu})$   $\times 32 \times 10^{-6} \sim 137 \times 10^{-6}$ ),  $w(\Sigma \text{PGE})$   $\times 1.1 \times 10^{-9} \sim 5.7 \times 10^{-9}$ ), 却具有最高的 Pd/Ir 比值(13.9~26.0)。除 1 个样品外,其他样品的 Cu/Pd 比值在 105~106 之间,高于地幔平均值(103~104, Barnes et al., 1993),说明岩石形成过程中经历了较强的硫化物熔离作用。

## 4 讨论

近年来大量的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定证实,攀西裂谷的镁铁-超镁铁岩体主要为晚二叠世峨眉地幔柱活动的产物,如力马河和朱布岩体的锆石 SHRIMP 年龄分别为(263 ± 3) Ma 和(261 ± 2) Ma,与峨眉山玄武岩的地层年代一致(Zhou et al., 2007)。尽管杨合伍、清水河和黄草坪岩体还没有锆石定年数据,但它们产出的构造位置都受到安宁河断裂和磨盘山-元谋断裂的控制,岩体的岩石学、含矿性特征及围岩地层也都与力马河、朱布等岩体相似,不仅表明它们是同一岩浆事件的产物,也说明它们与峨眉山玄武岩有着密切的成因联系。

硫化物熔离是岩浆硫化物矿床最根本的成因机制(Naldrett, 1989),母岩浆成分和硫化物熔离强度则决定了矿床的类型。因此,识别岩浆是否发生过硫化物熔离在 Ni-Cu-PGE 矿床成因研究和找矿勘探中至关重要。橄榄石中 Ni 含量亏损情况可以用来判断岩浆硫化物熔离作用(Lesher et al., 1981; Naldrett et al., 1984)。笔者对上述 3 个岩体橄榄石成

分的研究表明,如果初始岩浆  $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{FeO})$  分别为 12.5% 和 12.3%,  $w(\text{Ni})$  为  $330 \times 10^{-6}$ , 则黄草坪岩体所经历的橄榄石分离结晶程度大致为 12%, 同时经历了约 0.06% 的硫化物熔离。杨合伍岩体以分离结晶为主,仅有微量的硫化物熔离,这些结果与这 2 个岩体的含矿性特征基本吻合(官建祥等 2010)。然而,上述计算结果显示清水河岩体却几乎没有出现硫化物熔离,与地质资料所及实际样品观察相矛盾。造成橄榄石成分分析结果与实际现象出入的原因可能是:①数据太少造成的分析不全面;②初始岩浆成分不恰当;③橄榄石成分示踪的分辨率较低。

PGE 的硫化物熔浆/硅酸盐熔浆分配系数高达  $10^4 \sim 10^5$ , 远高于 Ni 的分配系数(约 500), 而且 PGE 不易被后期热液活化, 所以 PGE 是硫化物熔离最敏感和最有效的示踪元素(Peach et al., 1990; Bezmen et al., 1994; Fleet et al., 1996; 宋谢炎等 2005; 2009)。因此,有必要通过上述 3 个岩体与峨眉山玄武岩和峨眉山大火成岩省其他已知含矿岩体无矿原始 PGE 组成的对比,讨论这些岩体无矿岩石 PGE 组成的地质意义及其所蕴含的找矿信息。

### 4.1 硫化物熔离的 PGE 示踪

$w(\text{PGE})$  数据和原始地幔标准化模式对比表明,清水河和黄草坪岩体的  $w(\text{PGE})$  明显低于杨合伍橄辉岩,甚至低于力马河岩体无矿岩石的  $w(\text{PGE})$  的平均值(图 4); 而黄草坪岩体岩石  $w(\text{PGE})$  的变化范围最宽。杨合伍岩体个别橄辉岩样品的  $w(\text{PGE})$  与金宝山岩体无矿岩石相当(图 4)。图 5 的投影显示杨合伍、清水河和黄草坪岩体无矿岩石的  $w(\text{Ni})$

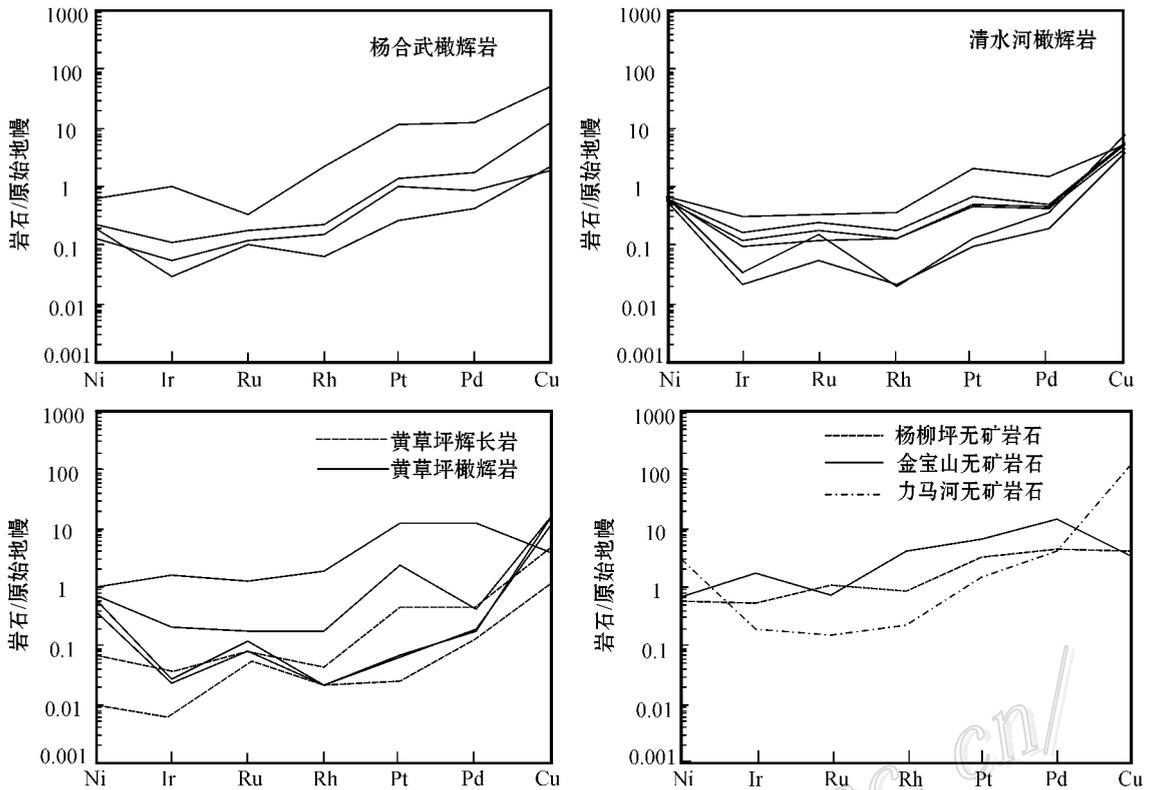


图 4 铂族元素原始地幔标准化配分模式

原始地幔值据 Barnes et al. , 1999 ; 杨柳坪、金宝山和白马寨数据分别来自 Song et al. , 2008 ; Tao et al. , 2007 ; Wang et al. , 2006

Fig. 4 Primitive mantle-normalized platinum-group element patterns

Data of primitive mantle from Barnes et al. , 1999 ; PGE data of Yangliuping , Jinbaoshan and Baimazhai from Song et al. , 2008 , Tao et al. , 2007 and Wang et al. , 2006 , respectively

$\omega(\text{Cu})$  和  $\omega(\text{PGE})$  普遍高于低 Ti 玄武岩, 而多数低于高 Ti 玄武岩, 但是铂族元素之间的变化关系却与低 Ti 玄武岩类似, 随着  $\omega(\text{Ir})$  的降低,  $\omega(\text{Rh})$ 、 $\omega(\text{Pt})$ 、 $\omega(\text{Pd})$  等迅速下降(图 5a、b、c), 说明这些侵入体岩石和低 Ti 玄武岩都经历了硫化物熔离。高 Ti 玄武岩则主要受硅酸盐矿物分离结晶作用的控制(Song et al. , 2009)。从  $\omega(\text{Pd})$ 、 $\omega(\text{Pt})$  及比值变化来看, 低 Ti 玄武岩具有很宽的  $\omega(\text{Pt})$ 、 $\omega(\text{Pd})$  变化范围和较窄的 Pd/Pt 比值范围(0.33~3)(图 5), 这种特征指示了硫化物熔离是主要的控制因素(Song et al. , 2009)。除了一个样品外, 杨合伍等岩体的岩石 Pd/Pt 值也在低 Ti 玄武岩范围内, 且多数高于地幔值(Pd/Pt=0.6, Taylor et al. , 1985)(图 5d) 说明除了硫化物熔离外, 还有其他岩浆过程导致 PGE 发生了分异。

#### 4.2 硫化物熔离过程和矿化类型的判断

Ni 在橄榄石和单斜辉石中是相容元素, Ir 在单斜辉石中是相容元素, 在橄榄石中是不相容元素, Rh 是橄榄石的相容元素, 在单斜辉石和斜方辉石中都是不相容元素, Pt 在橄榄石和单斜辉石中均表现出不相容性, 在斜方辉石中表现为相容元素, Pd 和 Cu 在上述矿物中都表现为不相容元素(Capobianco et al. , 1990 ; 1994 ; Hill et al. , 2000 ; Puchtel et al. ,

2001 ; Ely et al. , 2002 ; Righter et al. , 2004)。因此, 在 S 不饱和的玄武质岩浆中, 镁铁质分离结晶会导致残余岩浆中  $\omega(\text{Ni})$  和  $\omega(\text{Ir})$ 、 $\omega(\text{Rh})$  含量下降, 但  $\omega(\text{Pt})$ 、 $\omega(\text{Pd})$  和  $\omega(\text{Cu})$  会增加, 残余岩浆中 Pd/Ir 比值显著增高, 而 Cu/Pd 保持不变。当岩浆 S 达到饱和时, 由于 PGE 在硫化物熔浆和硅酸盐岩浆之间的分配系数比 Ni、Cu 高 2~3 个数量级(Peach et al. , 1990 ; Fleet et al. , 1991 ; Crocket et al. , 1992), 微量的硫化物乳滴就会大量萃取岩浆中的 PGE, 导致母岩浆中强烈亏损 PGE, 而  $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$  又出现微弱降低, 残余岩浆中 Pd/Ir 比值保持不变, 而 Cu/Pd 比值却明显增高。因此, 可以利用 PGE 元素关系以及 Cu/Pd 比值来判断岩浆是否发生硫化物熔离。Song 等(2008)对峨眉山大火成岩省典型岩浆硫化物矿床的矿石在 100% 硫化物的基础上, 利用 Campbell 等(1979)的公式计算了硫化物中的铂族元素含量变化, 对于贫硫化物岩石则直接用全岩  $\omega(\text{PGE})$  计算方法和初始条件见 Song et al. (2008) 结果表明少硫化物的金宝山 Pd-Pd 矿床的硫化物是从 PGE 不亏损的原始岩浆中直接熔离出来的, 同时 R 值(硅酸盐熔浆与硫化物熔浆的比值)非常大; 杨柳坪 Ni-Cu-PGE 矿床和力马河 Ni-Cu 矿床的硫化物分别是经历过大约 0.01% 和 0.025% 硫化物熔离的残余岩浆经二次熔离形

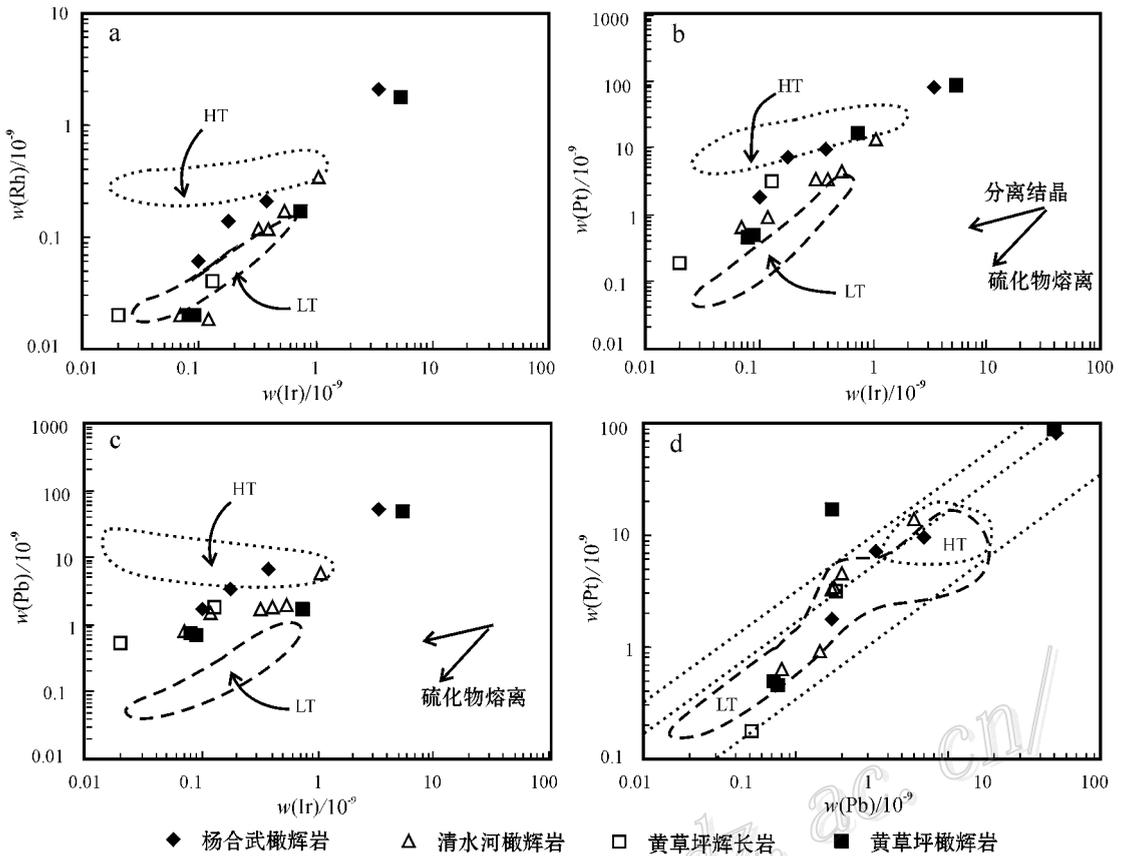


图 5 杨合伍、清水河和黄草坪镁铁质-超镁铁质侵入体岩石的铂族元素关系图解

LT—低 Ti 峨眉山玄武岩, HT—高 Ti 峨眉山玄武岩 数据来自 Song et al. , 2009 地幔 Pd/Pt 值来自 Taylor et al. , 1985

Fig. 5 Correlations between PGE for rocks of Yanghewu, Qingshuihe and Huangcaoping mafic-ultramafic intrusions

LT and HT—Low Ti and high Ti Emei Shan basalts, respectively; data of LT and HT basalts from Song et al. , 2009; primitive mantle values from Taylor et al. , 1985

成的,而且 R 值较小。如何利用无矿岩石的 PGE 组成分析成矿过程、判断岩体深部及岩浆通道系统可能的硫化物矿化类型对找矿工作无疑具有重要的参考和指导意义。

随着  $w(\text{Ir})$  下降,杨合伍等 3 个岩体岩石中的  $w(\text{Rh})$ 、 $w(\text{Pt})$ 、 $w(\text{Pd})$  也迅速降低,与低 Ti 玄武岩相似,这些特征表明这几个侵入体岩石与低 Ti 玄武岩都经历了岩浆硫化物熔离作用。除了黄草坪橄辉岩中有一个样品 Cu/Pd 比值较低外,其余样品 Cu/Pd 比值都在  $10^4 \sim 10^6$  之间,明显高于原始地幔值 ( $10^3 \sim 10^4$ , Barnes et al. , 1999),也说明这些岩石的母岩浆曾经发生过硫化物熔离作用。

为了定量了解杨合伍等岩体母岩浆硫化物熔离情况及可能的矿化类型,有必要将其无矿岩石的 PGE 与典型岩浆硫化物矿床的无矿岩石做一比较。假设原始岩浆为 PGE 不亏损的低 Ti 峨眉山玄武岩( $w(\text{Pt})$  为  $15 \times 10^{-9}$ ;  $w(\text{Pd})$  为  $22 \times 10^{-9}$ ;  $w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Ni})$  为  $200 \times 10^{-6}$ ),硫化物中  $w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{Cu})$  和  $w(\text{PGE})$  可以根据下列公式 (Campbell et al. , 1979) 计算:

$$C_i^{\text{Sul}} = C_i^{\text{Sil}} \times D_i^{\text{Sul/Sil}} \times (R + 1) / (R + D_i^{\text{Sul/Sil}})$$

$C_i^{\text{Sul}}$  和  $C_i^{\text{Sil}}$  分别为元素 i 在硫化物熔浆和硅酸盐熔浆中的浓度,  $D_i^{\text{Sul/Sil}}$  为元素 i 在硫化物熔浆与硅酸盐熔浆之间的分配系数, R 为硅酸盐熔浆/硫化物熔浆的比值。

从 Pd-Ni 图解可以看到(图 6)杨合伍橄辉岩  $w(\text{Pd})$  较高,  $w(\text{Ni})$  变化较大,这与杨柳坪 Ni-Cu-PGE 矿化岩体的无矿岩石极为相似,较金山无矿岩石有更宽的  $w(\text{Ni})$  变化范围。除了一个样品具有异常高的  $w(\text{Pd})$  外,清水河和黄草坪橄辉岩样品都落在白马寨和力马河 Ni-Cu 矿化的无矿岩石范围内。模拟计算表明,上述原始岩浆经过大约 0.01% 的硫化物熔离后,残余岩浆二次熔离 ( $R = 1000$ ) 形成的硫化物成分与杨合伍硫化物成分相似,杨合伍无矿橄辉岩中大致含有 < 1% (仅有一个样品 > 1%) 的这种硫化物(图 6)。原始岩浆经过大约 0.035% 硫化物熔离后,经二次熔离 ( $R = 2000$ ) 形成的硫化物成分大致与清水河和黄草坪橄辉岩中硫化物成分相当。图 6 显示这些岩石硫化物含量大致为 1% ~ 2%。这说明杨合伍镁铁质-超镁铁质岩的母岩浆是弱 PGE 亏损的,而清水河和黄草坪岩石的母岩浆是强烈亏损 PGE 的。杨合伍岩体可能形成 Ni-Cu-PGE 型硫化物矿化,清水河和黄草坪可能

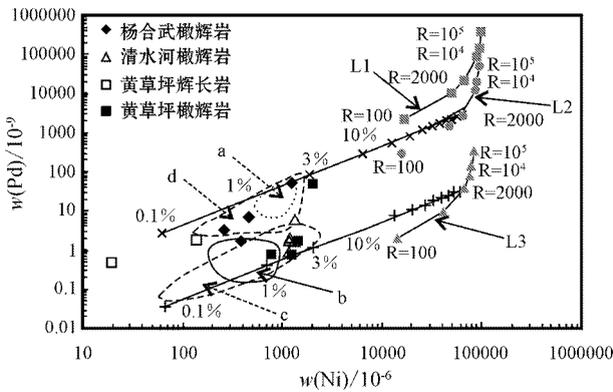


图 6 杨合伍、清水河和黄草坪镁铁质-超镁铁质岩体贫硫化物岩石 Pd-Ni 变化模拟图解

浸染状硫化物中 Pd、Ni 含量计算是基于 100% 硫化物中金属含量，而贫硫化物硅酸盐中 Pd、Ni 含量计算是基于全岩含量。L1—从富 PGE 的玄武质岩浆 ( $\alpha(\text{Pt})$  为  $15 \times 10^{-9}$ ,  $\alpha(\text{Pd}) = 22 \times 10^{-9}$ ,  $\alpha(\text{Ni})$  为  $200 \times 10^{-6}$ ) 熔离的硫化物熔浆中金属含量变化趋势线；L2—从硫化物熔离大约 0.01% 后的残余岩浆 ( $\alpha(\text{Pt})$  为  $2 \times 10^{-9}$ ,  $\alpha(\text{Pd})$  为  $3 \times 10^{-9}$ ,  $\alpha(\text{Ni})$  为  $190 \times 10^{-6}$ ) 中二次熔离的硫化物熔浆中金属含量变化趋势线；“x” 连线代表残余岩浆 ( $R = 2000$ ) 时经二次熔离产生的硫化物含量；L3—从硫化物熔离大约 0.035% 后的残余岩浆 ( $\alpha(\text{Pt})$  为  $0.01 \times 10^{-9}$ ,  $\alpha(\text{Pd})$  为  $0.02 \times 10^{-9}$ ,  $\alpha(\text{Ni})$  为  $168 \times 10^{-6}$ ) 中二次熔离的硫化物熔浆中金属含量变化趋势线；“+” 连线代表残余岩浆 ( $R = 2000$ ) 时熔离出的硫化物含量。虚线范围：a. 金宝山贫硫化物岩石 (Tao et al., 2007)；b. 白马寨贫硫化物岩石 (Wang et al., 2006)；c. 力马河贫硫化物岩石 (未发表数据)；d. 杨柳坪贫硫化物岩石 (Song et al., 2008)。n%—贫硫化物岩石中硫化物百分含量。

Fig. 6 Model calculation of the variation of Pd with Ni in the sulfide-poor rocks from Yanghewu, Qingshuihe and Huangcaoping mafic-ultramafic intrusions

The Pd and Ni concentrations of the disseminated sulfides are on a 100% sulfide basis, whereas the Pd and Ni concentrations of the silicate rocks are on a whole-rock basis. L1 represents the trend of metal content in sulfide melts segregated from PGE-rich basaltic magma with  $15 \times 10^{-9}$  Pt,  $22 \times 10^{-9}$  Pd and  $200 \times 10^{-6}$  Ni under variable R values; L2 represents the trend of metal content in sulfide melts segregated from the magma after about 0.01% sulfide segregation and thus with  $2 \times 10^{-9}$  Pt,  $3 \times 10^{-9}$  Pd and  $190 \times 10^{-6}$  Ni; the “x” connected line represents the segregated proportion of sulfide from residual magma (undergone 0.01% sulfide segregation,  $R = 2000$ ); L3 represents the trend of metal content in sulfide melts segregated from the magma after approximately 0.035% sulfide segregation and thus with  $0.01 \times 10^{-9}$  Pt,  $0.02 \times 10^{-9}$  Pd and  $168 \times 10^{-6}$  Ni. the “+” connected line represents the segregated proportion of sulfide from residual magma (undergone 0.035% sulfide segregation,  $R = 2000$ ); Dash line limits: a. Jinbaoshan sulfide-poor rocks (from Tao et al., 2007); b. Baimazhai sulfide-poor rocks (from Wang et al., 2006); c. Limahes sulfide-poor rocks (unpublished); d. Yangliuping sulfide-poor rocks (from Song et al., 2008). n%—Percentage of sulfides in sulfide-poor rocks

与 Ni-Cu 型矿化有关。

### 4.3 成矿前景及找矿方向

岩浆通道成矿是岩浆硫化物矿床类型中具有重要意义的一种，其典型实例包括俄罗斯西伯利亚 Noril'sk-Talnakh 岩浆 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床 (Czamanske, et al., 1992; Nal-

drett et al., 1992; 1996; Brüggmann et al., 1993; Arndt et al., 2003; Li et al., 2003; Lightfoot et al., 2005), 中国的金川 Ni-Cu 矿床 (汤中立等, 1995; Li et al., 2004; Song et al., 2006a) 以及加拿大的 Voisey's Bay Ni-Cu-Co 矿床 (Li et al., 1999; 2001)。峨眉山大火成岩省北部的杨柳坪岩体也被证明是作为峨眉山玄武岩的岩浆通道相产出的 (Song et al., 2003; 2006b)。杨合伍、清水河和黄草坪等岩体周围并未发现峨眉山玄武岩出露，这可能是由于攀西地区中生代地壳抬升导致玄武岩被剥蚀殆尽的缘故，因此也不能排除其曾经是峨眉山玄武岩岩浆通道的可能性。

前文计算表明，杨合伍岩体母岩浆是弱 PGE 亏损，因此，岩体下部或外围出露的岩体有可能发现 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床。黄草坪岩体母岩浆是 PGE 强亏损的，因此，在该岩体和附近类似岩体中应以寻找 Ni-Cu 矿床为主。清水河 Ni-Cu 岩体所代表的岩浆通道系统中也将以寻找 Ni-Cu 矿床为主。

## 5 结论

本文通过对杨合伍、清水河和黄草坪等岩体的镁铁质-超镁铁质岩铂族元素地球化学特征的详细研究，得到了以下几点结论：

- (1) 杨合伍岩体的母岩浆是原始岩浆经过大约 0.01% 硫化物熔离后的残余岩浆，具有弱 PGE 亏损的特点；
- (2) 清水河和黄草坪岩体母岩浆是原始岩浆经 0.035% 硫化物熔离后的残余岩浆，强烈亏损 PGE，这种 PGE 亏损的母岩浆上升到成岩层位后，又经历了硫化物熔离作用；
- (3) 在清水河和黄草坪岩体内部及其所代表的岩浆通道系统上应以寻找 Ni-Cu 型硫化物矿床为主；
- (4) 而杨合伍岩体附近有形成 Ni-Cu-(PGE) 矿床的可能。

## References

Arndt N T, Czamanske G K, Walker R J, Chauvel C and Fedorenko V A. 2003. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits [J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 98(3): 495-515.

Barnes S J and Picard C P. 1993. The behavior of platinum-group elements during partial melting, crystal fractionation, and sulfide segregation: An example from the Cape-Smith Fold Belt, northern Quebec [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 57(1): 79-87.

Barnes S J and Maier W D. 1999. The fractionation of Ni, Cu, and the noble metals in silicate and sulphide liquids [A]. In: Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C and Farrow C E G, eds. Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration [M]. Geological Association of Canada, 13: 69-106.

Bezmen N S, Asif M, Brüggmann G E, Romamekno I M and Naldrett A J. 1994. Experimental determinations of sulfide-silicate partitioning of PGE and Au [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 58: 1251-1260.

- Brüggemann G E, Naldrett A J, Asif M, Lightfoot P C, Gorbachev N S and Fedorenko V A. 1993. Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian trap in the Noril'sk region, Russia[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57(9):2001-2018.
- Campbell I H and Naldrett A J. 1979. Influence of silicate-sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides[ J ]. *Econ. Geol.*, 74(6):1503-1506.
- Capobianco C J and Drake M J. 1990. Partitioning of Ruthenium, Rhodium, and Palladium between spinel and silicate melt and implications for platinum group element fractionation trends[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54(3):869-874.
- Capobianco C J, Hervig R L and Drake M J. 1994. Experiments on crystal liquid partitioning of Ru, Rh and Pd for magnetite and hematite solid-solutions crystallized from silicate melt[ J ]. *Chemical Geology*, 113(1-2):23-43.
- Chung S L and Jahn B M. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary[ J ]. *Geology*, 23(10):889-892.
- Crocket J H, Fleet M E and Stone W E. 1992. Experimental partitioning of Osmium, Iridium and Gold between basalt melt and sulfide liquid at 1300-degrees-C[ J ]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 39(3):427-432.
- Czamanske G K, Kunilov V E, Zientek M L, Cabri L J, Likhachev A P, Calk L C and Oscarson R L. 1992. A Proton-microprobe study of magmatic sulfide ores from the Norilsk-Talnakh district, Siberia[ J ]. *Canadian Mineralogist*, 30:249-287.
- Ely J C and Neal C R. 2002. Method of data reduction and uncertainty estimation for platinum-group element data using inductively coupled plasma-mass spectrometry[ J ]. *Geostandards Newsletter-the Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 26(1):31-39.
- Fleet M E, Stone W E and Crocket J H. 1991. Partitioning of Palladium, Iridium, and Platinum between sulfide liquid and basalt melt: Effects of melt composition, concentration, and Oxygen fugacity[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55(9):2545-2554.
- Fleet M E, Crocket J H and Stone W E. 1996. Partitioning of platinum-group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(13):2397-2412.
- Guan J X, Song X Y, Danyushevsky L V, Chen L M and Nie X Y. 2010. Genetic significances of olivine from magmatic sulfide ore-bearing intrusions in the central zone of the Emeishan large igneous province[ J ]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*(in Chinese with English abstract)(In press).
- Guo F, Fan W M, Wang Y and Li C. 2004. When did the emeishan mantle plume activity start? Geochronological and geochemical evidence from ultramafic-mafic dikes in southwestern China[ J ]. *International Geology Review*, 46(3):226-234.
- He B, Xu Y G, Chung S L, Xiao L and Wang Y. 2003. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3-4):391-405.
- Hill E, Wood B J and Blundy J D. 2000. The effect of Ca-Tschemmaks component on trace element partitioning between clinopyroxene and silicate melt[ J ]. *Lithos*, 53(3-4):203-215.
- Hu R Z, Tao Y, Zhong H, Huang Z L and Zhang Z W. 2005. Mineralization systems of a mantle plume: A case study from the Emeishan igneous province southwest China[ J ]. *Earth Science Frontiers*, 12(1):42-54 (in Chinese with English abstract).
- Leshner C M, Lee R F, Groves D I, Bickle M J and Donaldson M J. 1981. Geochemistry of komatiites from Kambalda, western Australia: I. Chalcophile element depletion, a consequence of sulfide liquid separation from komatiitic magmas[ J ]. *Econ. Geol.*, 76:1714-1728.
- Li C and Naldrett A J. 1999. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: Reaction of olivine with sulfide and silicate liquids[ J ]. *Lithos*, 47:1-31.
- Li C S, Maier W D and de Waal S A. 2001. Magmatic Ni-Cu versus PGE deposits: Contrasting genetic controls and exploration implications[ J ]. *South African Journal of Geology*, 104(4):309-318.
- Li C, Ripley E M and Mathez E A. 2003. The effect of S on the partitioning of Ni between olivine and silicate melt in MORH[ J ]. *Chemical Geology*, 201(3-4):295-306.
- Li C S, Xu Z H, Sybrand A W, Ripley E M and Maier W D. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implications for ore genesis[ J ]. *Mineralium Deposita*, 39(2):159-172.
- Lightfoot P C and Keays R R. 2005. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian trap, Noril'sk region: Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores[ J ]. *Econ. Geol.*, 100(3):439-462.
- Liu C J, Zeng X W, Jin J T and Xu T R. 1988. Basic-ultrabasic rocks in the Kangdian region, southwestern China[ M ]. Chongqing: Chongqing Pub. House (in Chinese).
- Naldrett A J and Hewins R H. 1984. The main mass of the sudbury igneous complex[ J ]. *Ontario Geological Survey Special Volume D*, 235-251.
- Naldrett A J. 1989. Magmatic sulfide deposits[ M ]. Oxford University Press, USA.
- Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V, Doherty W and Gorbachev N S. 1992. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Norilsk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores[ J ]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 87(4):975-1004.
- Naldrett A J, Fedorenko V A, Asif M, Lin S S, Kunilov V E, Stekhin A I, Lightfoot P C and Gorbachev N S. 1996. Controls on the composition of Ni-Cu sulfide deposits as illustrated by those at Noril'sk, Siberia[ J ]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 91(4):751-773.
- Peach C L, Mathez E A and Keays R R. 1990. Sulfide melt silicate melt distribution coefficients for noble-metals and other chalcophile elements as deduced from mmorb-implications for partial melting[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54(12):3379-3389.
- Puchtel I S and Humayun M. 2001. Platinum group element fractionation in a komatiitic basalt lava lake[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65(17):2979-2993.
- Righter K, Campbell A J, Humayun M and Hervig R L. 2004. Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir, and Au between Cr-bearing spinel,

- olivine, pyroxene and silicate melts [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68(4):867-880.
- Song X Y, Zhou M F, Hou Z Q, Cao Z M, Wang Y L and Li Y G. 2001. Geochemical constraints on the mantle source of the upper permian Emeishan continental flood basalts, southwestern China [ J ]. *International Geology Review*, 43(3):213-225.
- Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, Sun M and Wang Y L. 2003. Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China [ J ]. *Mineralium Deposita*, 38(7):831-843.
- Song X Y, Zhang C J, Hu R Z, Zhong H, Zhou M F, Ma R C and Li Y G, 2005. Genetic links of magmatic deposits in the Emeishan large igneous province with dynamics of mantle plume [ J ]. *Mineral Petrol.*, (4):35-44 (in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Hu R Z and Chen L M. 2009. The character of Copper, Nickel and Platinum group elements and their significances in research of the origin, evolution of mantle derived magma and related magmatic sulfide deposits [ J ]. *Earth Science Frontiers*, (4):287-305 (in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Zhou M F, Wang C Y, Qi L and Zhang C J. 2006a. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, northwest China [ J ]. *International Geology Review*, 48(12):1113-1132.
- Song X Y, Zhou M F, Keays R R, Cao Z M, Sun M and Qi L. 2006b. Geochemistry of the Emeishan flood basalts at Yangliuping, Sichuan, SW China: Implications for sulfide segregation [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(1):53-74.
- 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 [ J ]. *Chemical Geology*, 253(1-2):38-49.
- Song X Y, Keays R R, Xiao L, Qi H W and Ihlenfeld C. 2009. Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China [ J ]. *Chemical Geology*, 262(3-4):246-261.
- Tang Z L and Li W Y. 1995. Mineralisation model and geology of the Jinchuan Cu-Ni (PGE-bearing) sulfide deposit [ M ]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- 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 [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(3):321-337.
- Tao Y, Ma Y S, Miao L C and Zhu F L. 2009. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan Province, SW China [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 54(1):168-172.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust; its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [ M ]. Blackwell Scientific Publications, United Kingdom.
- Wang C Y, Zhou M F and Keays R R. 2006. Geochemical constraints on the origin of the permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion and its Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, SW China [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152:309-321.
- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B and Pirajno F. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume-lithosphere interaction [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3-4):525-546.
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M and Wu G Y. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [ J ]. *Lithos*, 58(3-4):145-168.
- Xu Y G, He B, Chung S L, Menzies M A and Frey F A. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province [ J ]. *Geology*, 32(10):917-920.
- Yao J D. 1988. Genesis of Magmatic Cu-(Pt)-Ni Sulfide Deposit in the Xichuan region [ M ]. Chongqing: Chongqing Pub. House (in Chinese).
- Zhong H, Yao Y, Prevec S A, Wilson A H, Viljoen M J, Viljoen R P, Liu B G and Luo Y N. 2004. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China [ J ]. *Chemical Geology*, 203(3-4):237-252.
- Zhong H and Zhu W G. 2006. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China [ J ]. *Mineralium Deposita*, 41(6):599-606.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, Robinson P T, Sun M, Kennedy A K, Leshner C M and Keays R R. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupean mass extinction [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(3-4):113-122.
- Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, Keays R R, Zhang C J and Malpas J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China [ J ]. *Journal of Petrology*, 46(11):2253-2280.
- Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, Wang C Y and Kennedy A K. 2007. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [ J ]. *Lithos*, 64:352-268.

#### 附中文参考文献

- 官建祥, 宋谢炎, Leonid V Danyushevsky, 陈列锰, 聂晓勇. 2010. 峨眉火成岩省内带岩浆硫化物含矿岩体橄辉石的成因意义 [ J ]. *地球科学-中国地质大学学报(待刊)*.
- 胡瑞忠, 陶 琰, 钟 宏, 黄智龙, 张正伟. 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例 [ J ]. *地学前缘*, (1):42-54.
- 刘朝基, 曾绪伟, 金久堂, 须同瑞. 1988. 康滇地区基性超基性岩 [ M ]. 重庆: 重庆出版社.
- 宋谢炎, 张成江, 胡瑞忠, 钟 宏, 周美夫, 马润成, 李佑国. 2005. 峨眉火成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系 [ J ]. *矿物岩石*, (4):35-44.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 2009. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义 [ J ]. *地学前缘*, (4):287-305.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比 [ M ]. 北京: 地质出版社.
- 姚家栋. 1988. 西昌地区硫化铜(铂)镍矿床成因 [ M ]. 重庆: 重庆出版社.