

峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 成矿作用

——几个典型矿床岩石地球化学特征的分析

陶 琰¹, 胡瑞忠¹, 王兴阵^{1,2,3}, 朱 丹¹, 宋谢炎¹, 冯家毅¹

1. 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, 贵阳 550002;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 安徽理工大学 资源环境系, 安徽 淮南 232001

摘要: 峨眉山大火成岩省岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿化岩体广泛分布, 构成峨眉山地幔柱成矿系统中一个非常重要的成矿系列。本文剖析了峨眉山大火成岩省该类矿床的分布及部分典型矿床的地质地球化学特征和矿化特征, 揭示了成矿岩体统一的地幔柱成因, 阐述了 Cu-Ni-PGE 成矿作用与峨眉山地幔柱岩浆活动体系的关系, 探讨了由于岩浆演化过程及硫化物熔离富集过程的差异所导致的矿化类型变异。指出 Cu-Ni-PGE 矿床成矿岩体原始岩浆为地幔柱高程度熔融的高镁玄武岩浆, 成矿岩体与峨眉山低钛玄武岩同源, 矿化岩体主要产于峨眉山地幔柱活动模型的内带低钛玄武岩分布区; 金宝山、朱布、力马河、杨柳坪矿床分别代表峨眉山地幔柱 Cu-Ni-PGE 成矿作用不同成矿机制的端员类型。

关键词: 地幔柱; 峨眉山大火成岩省; 岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床

中图分类号: P618.410.671; P618.530.671 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2006)03-0236-09

The Cu-Ni-PGE Mineralization in the Emeishan Large Igneous Province —Geochemical Study on Some Typical Deposits

TAO Yan¹, HU Rui-zhong¹, WANG Xing-zhen^{1,2,3}, ZHU Dan¹, SONG Xie-yan¹, FENG Jia-yi¹

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;
2. Graduate School, CAS, Beijing 100049, China; 3. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

Abstract: There are many magmatic Cu-Ni-PGE deposits widely distributed in the Emeishan Large Igneous Province (ELIP). Through the case study on the distribution of the deposits thoroughly and the geochemical and mineralization characteristics of some typical Cu-Ni-PGE deposits in the ELIP, this paper has revealed the common features of all those ore-bearing intrusions in association with the Emeishan mantle plume, the genetic relationship between the ore-bearing intrusions and the low Ti Emeishan basalt, elucidated the relationship between the Cu-Ni-PGE mineralization and the magmatic system of the Emeishan mantle plume, discussed the mineralization variation caused by the differences of the magmatic evolution processes and the sulfide segregation and enrichment processes. It is believed that the parental magma of Cu-Ni-PGE ore-bearing intrusions was the high-Mg basalt formed by high degree partial melting of the mantle plume, with cognate source to the low Ti Emeishan basalt. The Cu-Ni-PGE deposits are generally located in the inner zone of the mantle plume where low-Ti basalts are widely distributed. It is believed that the Jinbaoshan, Zhubu, Limahe and Yangliuping deposits are representatives of various end types of the Cu-Ni-PGE mineralization through different ore-forming mechanisms.

Key words: mantle plume; Emeishan large igneous province; magmatic Cu-Ni-PGE deposits

地幔柱成矿系统中, 岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床是最重要成矿作用之一, 世界上许多重要的岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床的成矿岩体, 如布什维尔德、诺里尔斯克、大岩墙和 Duluth Complex 等都被认为是地

幔柱岩浆活动的产物^[1,2]。峨眉山大火成岩省岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿化岩体广泛分布, 构成了峨眉山地幔柱成矿系统中一个非常重要的成矿系列^[3]。

岩石地球化学研究已初步建立了地幔柱岩浆活

收稿日期: 2006-01-19 收到, 06-06 改回

基金项目: 中国科学院重要方向项目资助(KZCX3-SW-125); 国家自然科学基金资助项目(40573020, 40572054)

第一作者简介: 陶琰(1963-), 男, 副研究员, 矿床地球化学专业。

动体系,揭示了地幔柱岩浆活动在时空上的变化规律。研究认为,地幔柱引起的大规模玄武质岩浆活动可分为高 Ti 和低 Ti 两种玄武岩^[4,5]。低 Ti 玄武岩形成于地幔柱作用早期,在地幔柱轴部地区岩浆活动高峰时的岩石圈高度拉张减薄环境,由于大量地幔上涌、高程度部分熔融作用导致原始岩浆 MgO 含量超过 10%~12%,相当于高镁玄武岩。高 Ti 玄武岩则形成于地幔柱活动相对较弱阶段,特别是地幔柱活动中心的边缘地带、岩石圈较厚、熔融程度相对较低的条件^[4,5]。研究表明,成矿岩浆的岩石地球化学性质有很强的地球化学限定性,普遍认为硫不饱和的熔融岩浆是形成 Cu-Ni-PGE 矿床的重要条件^[6,7],成矿原始岩浆一般为地幔较高度熔融形成的高镁玄武岩或苦橄质岩浆^[6,7]。因此,地幔柱构造岩浆活动的内在规律与 Cu-Ni-PGE 矿床对成矿岩浆条件的要求限定了地幔柱成矿系统的 Cu-Ni-PGE 成矿作用。本文拟通过对峨眉山大火成岩省岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床的分布和部分典型矿床地质地球化学特征与矿化特征的研究,揭示成矿岩体统一的地幔柱成因及与低钛玄武岩的成因联系,探讨由于岩浆演化过程及硫化物熔离富集过程的差异造成的矿化类型变异机制。

1 Cu-Ni-PGE 矿床的分布

前人^[5]将峨眉山地幔柱活动模型划分出内带、过渡带及外带(图 1A),内带以低钛玄武岩为主,过渡带与外带基本上为高钛玄武岩。

峨眉山大火成岩省岩浆 Cu-Ni-PGE 矿化岩体主要产于峨眉山地幔柱活动模型内带的低钛玄武岩分布区,经地壳强烈抬升剥蚀后出露,如元谋岩群、会理小关河岩群,由于地幔柱与裂谷的耦合作用,成矿岩体呈线形出露在川滇构造带上,包括最北端的丹巴地区、西南部的大理-丽江地区,典型矿床主要有金宝山铂钨矿、朱布 Cu-Ni-PGE 矿床、力马河镍矿、杨柳坪 Cu-Ni-PGE 矿床(图 1)。

元谋岩群:位于康滇地轴南段元谋岩穹内,为一狭长的前震旦系古老变质岩结晶基底,南北长 75 km,东西宽 5~25 km,四周被中生代红层覆盖。该区处于峨眉山大火成岩省地幔柱活动模型内带并与川滇裂谷昔格达断裂带耦合。区内大量出露基性-超基岩体,岩体规模较小,相对较大者有二十余个,如朱布、黑泥坡 I、黑泥坡 III、热水塘、猛林沟等岩体,大部分岩体均有(Cu-Ni)PGE 矿化。岩体的岩

性组合及岩石地球化学性质基本相似,且岩体相带分异较完整,岩相分带从底部、边部的橄榄岩到上部、中心部位的辉长岩、闪长岩,呈环带状,矿化主要在底部和边缘部位,浸染状含矿硫化物赋存在橄榄岩相中,朱布岩体最为典型。朱布岩体(图 1D)呈一不对称的漏斗状,平面上为椭圆形,南北长 750 m,东西宽 400 m,垂深 580 m。岩相带分异良好,有橄榄岩相、橄辉岩相、辉石岩相和辉长岩相。主要矿体沿内接触带产出,含矿岩相为橄榄岩相。Pt+Pd 品位为 0.5~1.5 g/t, Cu 为 0.1%~0.4%, Ni 为 0.5%~1.5%。

会理小关河岩群:分布于康滇地轴中段会理小关河地区,为以小关河为中心、东西宽约 20 km、南北长 20 km 的结晶基底,主要为下元古界会理群石英岩、石英钠长片岩和白云片岩等。该区位于峨眉山大火成岩省地幔柱活动模型内带,也是与川滇裂谷安宁河断裂带耦合的地区。岩体类型及矿化类型多样,既有相带分异较完整的岩体(如力马河岩体),也有单一辉长岩相的岩体;矿化类型有贫 Pt、Pd 的 Cu、Ni 矿化岩体(如力马河、杨合武岩体),也有 Cu-Ni-PGE 矿化岩体(如核桃树岩体)。矿石类型除浸染状硫化物矿石外,力马河镍矿的工业矿石为海绵陨铁结构的块状硫化物矿石。岩体类型及矿化类型变化较大,反映深部岩浆分异和矿化分异作用比较强烈。力马河镍矿矿化岩体(图 1B)侵位于会理群力马河组砂板岩地层,岩体主要由辉长-闪长岩及含矿辉石橄榄岩组成,岩相带分异良好。成矿元素组合为 Ni-Cu(Co),铂族元素含量很低,矿石呈浸染状、海绵陨铁状和致密块状。致密块状矿石 Ni 品位在 5%左右。

大理-丽江地区:位于峨眉山大火成岩省地幔柱活动模型内带与川滇裂谷程海-祥云断裂带耦合的地区,为峨眉山玄武岩产出厚度最大的地区,以地幔柱高度熔融形成的低钛玄武岩为主。该区可望有较好的岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床的成矿作用,但该区处于中生代沉降区,缺乏强烈剥蚀作用,现今地表出露岩体很少,矿化岩体仅见大理地区的金宝山、迎风、荒草坝岩体和丽江地区的松坡岩体。金宝山铂钨矿(图 1E)是峨眉山大火成岩省中已发现的最大的铂族元素矿床,成矿岩体呈似层状(岩席),侵位于泥盆系金宝山组白云岩、泥灰岩、砂板岩中,因礼社江(红河上游)强烈深切割而出露。岩体缺乏良好的相带分异,主要由蛇纹石化的辉橄岩组成,岩体上部

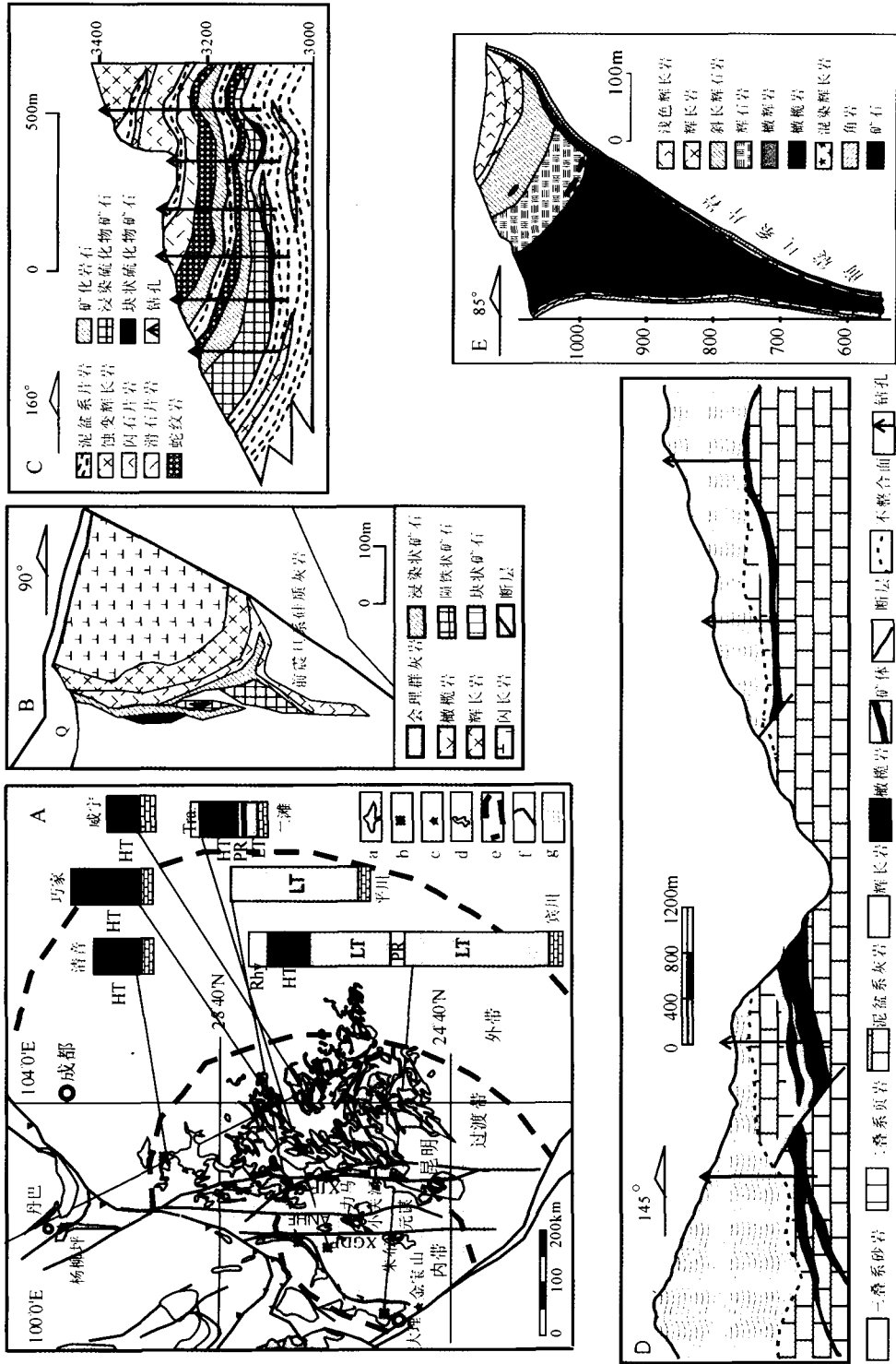


图 1 峨眉山大火成岩省典型 Cu-Ni-PGE 矿床的分布及其代表性矿化岩体剖面
Fig. 1 Locations and the geological sections of the typical Cu-Ni-PGE deposits in ELIP

A. 峨眉山大火成岩省典型 Cu-Ni-PGE 矿床产出位置及地幔柱活动分带。资料据文献[5]。a. 玄武岩; b. 玄武岩代表剖面位置; c. 典型 Cu-Ni-PGE 矿床; d. 矿化岩体群; e. 地幔柱活动模型分带界限; f. 断裂; g. 川滇南北上构造带。TH, 高钛玄武岩; LT, 低钛玄武岩; PR, 岩橄岩; Rhy, 流纹岩; Tra, 粗面岩; XJF, 小江断裂; ALHF, 安宁河断裂; XGD, 昔格达断裂。B. 力马河岩体剖面, 据文献[8]。C. 杨柳坪岩体剖面, 据文献[9]。D. 金宝山岩体剖面, 据文献[10]。E. 朱布岩体剖面, 据文献[9]

有辉长岩相。矿化以铂族元素富集而相对贫 Cu、Ni 为特征。矿体呈似层状、凸镜状赋存于辉橄岩中, 矿石一般含硫化物低于 3%, 硫化物主要为浸染状, Pt+Pd 含量为 1~5 g/t, 最高可达 17 g/t, Cu、Ni 含量较低, Cu 为 0.03%~0.24%, 平均 0.14%; Ni 为 0.07%~0.2%, 平均 0.17%。

丹巴地区: 位于川滇裂谷带北端, 区内大面积出露二叠纪玄武岩, 厚度普遍在 1000 m 以上, 最厚可达 1500 m, 属于峨眉山大火成岩省的一部分, 处于峨眉山幔柱活动模型的外带。在杨柳坪穹窿及附近, 有 9 个大小不等的 Cu-Ni-PGE 矿化基性-超基型岩体, 主要有杨柳坪、正子岩窝、协作坪和打枪岩窝等, 岩石特征及矿化特征基本相同。矿化岩体不在峨眉山幔柱活动模型内带, 我们认为是地幔柱与裂谷耦合作用的结果, 其机理可能是地幔柱活动模型的变形(如沿裂谷方向的扩张或分裂), 也可能是内带玄武质岩浆沿良好的断裂通道侧向运移的结果。杨柳坪 Cu-Ni-PGE 矿床(图 1C)岩体呈岩席侵入泥盆系云英片岩、炭质板岩、石英岩和大理岩, 上部岩相为辉长辉绿岩, 向下为辉石岩和橄榄岩, 岩体强烈蛇纹石化、滑石化和次闪石化。矿体呈似层状、透镜状、脉状赋存在下部蛇纹岩和滑石岩相带中, 主要由浸染状矿石组成, 矿石品位 Cu 0.16%~0.7%, Ni 0.4%~1.2%, PGE 1.4%~2.3 g/t。

2 岩矿样品及成分测定

我们分析了金山、朱布、力马河岩体的辉石橄榄岩、辉长岩及主要矿化岩石(或矿石)代表性样品的主微量元素及铂族元素(表 1、2); 主、微量元素在中国科学院地球化学研究所采用常规化学分析方法测定; 微量元素采用 ICP-MS 质谱分析, 分析方法见文献[11], 根据对标准样品 GBPG-1 的分析结果, 分析误差小于 5%。铂族元素在矿床地球化学国家重点实验室和国家地质实验中心测定, 分析方法同文献[12]。平均检出限: Ir 为 0.013×10^{-9} 、Ru 为 0.02×10^{-9} 、Rh 为 0.001×10^{-9} 、Pt 为 0.026×10^{-9} 、Pd 为 0.06×10^{-9} 。根据对标准样品 GPt-4 的分析结果, 分析误差均小于 15%。

3 讨论

(1) 成矿岩体在岩石地球化学性质上的相似性及与峨眉山玄武岩的关系: 金山、朱布、力马河、杨柳坪矿床岩石与矿石原始地幔标准化的曲线型式如图

2, 尽管有一些细微的差别, 但总体来看, 各岩体岩石微量元素标准化蛛网图曲线基本相似, 表现出良好的地球化学亲缘关系, 微量元素组成表现为显著的分异特征, 强不相容元素相对弱不相容元素明显富集, 并有显著的 Nb、Ta 相对亏损, 类似一般大陆拉斑玄武岩的标准化曲线型式, 表明成矿岩体原始岩浆应为玄武质岩浆; 且其微量元素蛛网图曲线可与低钛峨眉山玄武岩(LTEFB)微量元素组成类比。

Zhou 等^[18]认为, 金山、朱布、力马河、杨柳坪等岩体形成于统一的构造-岩浆背景下, 为峨眉山幔柱活动的产物。当前, 成矿岩体与峨眉山玄武岩的成因关系得到普遍认同, 但成矿岩体的岩浆成因如何结合到现有峨眉山幔柱活动模型, 则尚未有统一的认识。据徐义刚等^[19,20]研究, 大部分低钛玄武岩岩浆是高镁玄武岩浆经深部橄榄石结晶分异的残余熔体。已有研究指出, Cu-Ni-PGE 成矿岩体岩石地球化学性质与峨眉山低钛玄武岩岩石地球化学性质相似, 岩浆成因属性一致, 成岩机制互补, 成矿元素盈亏相对应, Cu-Ni-PGE 成矿岩体是低钛峨眉山玄武岩同源的深成相对应产物^[21]。

根据 Xu 等^[16]对峨眉山玄武岩成因类型的划分, 高钛玄武岩钕初始同位素组成含有相对较高的放射性同位素, $\epsilon_{Nd} = 4.8 \sim 1.1$; 低钛玄武岩 ϵ_{Nd} 相对较低, 一般为 $1.4 \sim -4.8$; 峨眉山大火成岩省典型 Cu-Ni-PGE 成矿岩体岩石的 ϵ_{Nd} 一般为 $0.8 \sim -2.7$ (陶琰, 待发表), 其同位素组成与低钛玄武岩相当; 成矿岩体显著的 Nb、Ta 相对亏损, 也与低钛玄武岩类似, 而与高钛玄武岩有所不同。但成矿岩体超镁铁岩样品 Ti/Y 值多数大于 500 (400~800), 按玄武岩类型划分标准, 与低钛玄武岩不一致。笔者认为, 超镁铁岩体含有大量堆晶组分, 如作为早期堆晶组分的铬铁尖晶石含有很高的 Ti (2%~9%), 且大量的单斜辉石也相对富 Ti (0.5%~1%), 尽管 Ti 在岩浆演化过程中总体上向熔体相富集, 但可造成 Ti/Y 值在超镁铁岩中较高, 用于玄武岩类型划分尺度之一的 Ti/Y 值不能直接鉴别超镁铁岩成因类型的归属。另外, 低钛玄武岩在岩浆演化时表现为橄榄石及辉石的结晶分异, 而高钛玄武岩则主要以辉长岩质的结晶分异为岩浆演化趋势^[16]。因此, 成矿岩体作为以橄榄石及辉石的结晶分异形成的镁铁-超镁铁岩体, 成因上应与低钛玄武岩相联系。因此笔者认为, 峨眉山大火成岩省的主要 Cu-Ni-PGE 矿化岩体应与低钛峨眉山玄武岩(LTEFB)有成因联系, 结合

表 1 峨眉山大火成岩省典型 Cu-Ni-PGE 矿化岩体岩石、矿石的主量、微量元素组成

Table 1 The major and trace elements composition from some rocks and ores from some typical deposits in ELIP

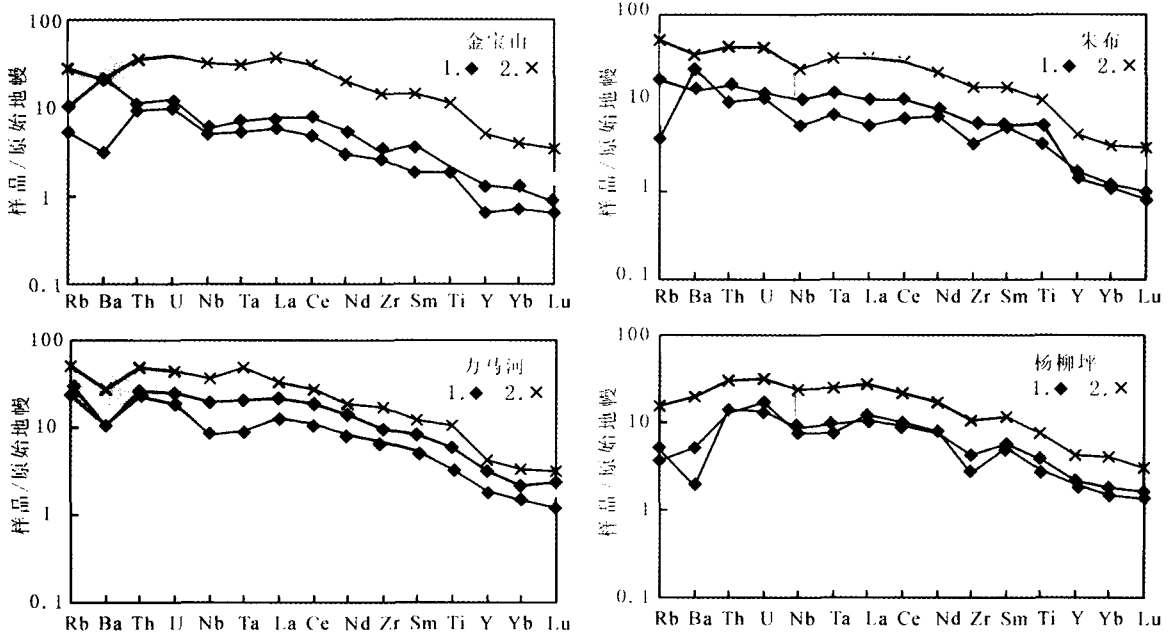
典型矿床	金宝山			朱布			力马河			杨柳坪			
样品号	145-3R	B33	DMC	31-15	Z5	P4U2	LM1-9	LM1-4	LM1-14	ZD-8	ZD-7	1-9	
类型	W (D)	W (D)	G	W	W	G	W	W	G	W (D)	W (D)	G	
主 量 元 素	SiO ₂	39.63	38.7	41.35	47.11	39.13	50.15	42.95	41.18	48.97	40.7	42.1	47.9
	TiO ₂	0.4	0.47	2.397	0.73	0.99	2.32	1.27	0.72	2.3	0.61	0.82	1.59
	Al ₂ O ₃	1.41	5.9	13.74	7.07	2.82	13.13	10.01	8.78	17.86	5.5	6.5	14.9
	Fe ₂ O ₃	6.25	6.9	0.54	7.53	5.33	6.21	3.96	6.33	6.15	11.8	12.5	13.2
	FeO	4.35	5.5	6.86	5.77	9.54	7.64	10.18	10.6	9.54			
	MnO	0.11	0.13	0.19	0.1	0.19	0.13	0.15	0.15	0.11	0.15	0.15	0.19
	MgO	31.2	28.6	4.98	20.6	28.45	11.86	17.33	16.84	6.1	28	25.7	7.2
	CaO	0.8	1.8	16.57	4.45	6.05	4.74	7.59	7.01	3.43	3.6	4.5	11.1
	Na ₂ O	0.11	0.18	2.07	0.21	0.31	0.79	0.42	0.54	1.47	0.11	0.17	2.6
	K ₂ O	0.09	0.15	0.38	0.04	0.33	0.55	0.36	0.41	0.73	0.05	0.06	0.34
	P ₂ O ₅	0.13	0.17	0.078	0.65	0.03	0.27	0.032	0.034	0.56	0.1	0.11	0.22
	Cr ₂ O ₃	0.90	0.84	0.01	0.50	0.57	0.20	0.25	0.30	0.01	0.52	0.45	0.02
	LOI	13.93	10.53	10.53	5.02	6.29	1.72	5.92	6.44	2.48	9	7	1.6
	Sum	99.31	99.87	99.70	99.78	100.03	99.71	100.42	99.34	99.71	100.14	100.06	100.86
微 量 元 素	Rb	3.3	6.5	17.5	2.5	11.2	31.8	15.0	19.8	32.4	2.3	3.1	9.8
	Sr	10	21	560	64	79	254	64	176	581	62	47	653
	Y	3.0	5.9	22.1	7.4	6.3	20.0	14.2	8.4	19.4	9.1	9.8	19.5
	Zr	29	35	156	38	64	166	109	78	188	29	48	115
	Nb	3.5	4.1	22.2	3.9	7.5	16.9	13.9	5.8	25.6	5.3	6.3	16.9
	Ba	22	154	143	168	96	245	74	188	35	13	137	
	La	4.0	5.2	24.8	3.8	7.5	22.4	15.0	8.8	23.0	8.2	7.1	18.7
	Ce	8.54	13.5	54.9	11.9	18.9	51.4	33.0	19.5	48.9	17.4	15.9	38.8
	Pr	0.98	1.68	6.35	1.89	2.53	6.94	4.27	2.42	5.97	2.41	2.27	5.31
	Nd	4.01	7.4	26.5	9.4	11.6	30.0	18.8	11.0	25.6	10.5	10.1	23.2
	Sm	0.82	1.65	6.29	2.35	2.44	6.47	3.64	2.40	5.43	2.31	2.49	5.15
	Eu	0.13	0.40	1.70	0.58	0.87	1.92	1.18	0.72	1.74	0.59	0.55	1.52
	Gd	0.76	1.58	5.54	2.50	2.27	6.28	3.99	2.26	5.53	2.23	2.34	4.77
	Tb	0.12	0.24	0.82	0.32	0.27	0.85	0.53	0.35	0.74	0.31	0.35	0.72
	Dy	0.60	1.26	4.59	1.65	1.41	4.30	2.90	1.88	4.02	1.91	2.08	4.31
	Ho	0.12	0.27	0.83	0.30	0.25	0.80	0.53	0.31	0.78	0.36	0.39	0.8
	Er	0.28	0.57	2.32	0.74	0.59	2.05	1.34	0.93	1.89	0.93	1.03	2.05
	Tm	0.04	0.09	0.29	0.09	0.09	0.26	0.19	0.13	0.26	0.12	0.13	0.28
	Yb	0.35	0.59	1.96	0.57	0.54	1.58	1.04	0.71	1.63	0.73	0.86	1.95
	Lu	0.05	0.06	0.25	0.07	0.06	0.23	0.18	0.09	0.24	0.1	0.12	0.22
	Hf	0.96	1.09	4.39	1.14	1.73	4.76	2.91	1.98	5.13	0.28	0.54	0.45
Ta	0.22	0.28	1.24	0.29	0.54	1.28	0.83	0.38	1.96	0.31	0.4	1.04	
Th	0.80	0.95	2.93	0.86	1.31	3.62	2.22	1.90	4.14	1.08	1.19	2.59	
U	0.20	0.26	0.81	0.23	0.27	0.89	0.51	0.40	0.93	0.35	0.28	0.65	

注:杨柳坪矿床数据据文献[13];W. 蛇纹石化辉石橄榄岩;G. 辉长岩;D. 含浸染状硫化物;主量元素为(重量)%,微量元素为 $\times 10^{-6}$

表 2 峨眉山大火成岩省典型 Cu-Ni-PGE 矿化岩体岩石与矿石的 PGE、Ni、Cu 含量
Table 2 Contents of PGE, Cu, Ni in the rocks and ores from some typical deposits in ELIP

矿床	样品	样品类型	S (%)	Ni	Cu	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	$\frac{Cu}{Pd}$	$\frac{Pt}{Pd}$	$\frac{Pd}{Ir}$
金宝山	145-3	W(D)	1.02	4599	3019	459	213	318	6089	9626	314	0.6	21
	322-6	W(D)	2.61	1344	411	185	69	131	3672	6305	65	0.6	34.1
	B-33	W	0.21	1306	9.4	2.52	2.39	0.96	13.2	22.1	425	0.6	8.8
朱布	31-15	W	0.105	939		0.68	3.36	0.36	8.9	8.8		1	12.9
	Z5	W	0.14	1254	168	1.41	3.34	0.55	17.7	5.9	28571	3	4.2
	P4U1	W(D)	0.115	1857	695	37.5	16.0	16.4	1064	475	1464	2.2	12.7
力马河	LM1-9	W	0.2	929	37.9	0.95	1.74	0.30	6.8	5.2	7258	1.3	5.5
	Lm1-4	W(D)	1.76	4513	2057	0.87	1.38	0.30	6.1	3.8	541316	1.6	4.4
	Lm1-1	W(N)	12.29	17743	5548	6.89	10.7	2.79	18.0	15.1	366446	1.2	2.2
杨柳坪	ZD-7	W	0.4	1800	1070	2.3	15.4	45.8	79.6	91.5	11694	0.9	39.8
	ZD-8	W(D)	0.1	1380	73.5	5.2	14.9	62.9	623	19.1	3848	32.6	3.7
	ZD-22	M	36.4	51000	266	222	161	232	730	2254	118	0.3	10.2
原始地幔				2000	28	3.4	5	0.95	7	3.97	7053	1.76	1.17

注: PGE 为 $\times 10^{-9}$; Ni 和 Cu 为 $\times 10^{-6}$; 杨柳坪、金宝山、原始地幔数据分别据文献[13]、[14]、[15]; M. 块状硫化物矿石; 其他同表 1



1. 蛇纹石化辉石橄榄岩, 2. 辉长岩; 阴影部分示低钛峨眉山玄武岩微量元素分布区间, 数据据文献[16]; 原始地幔数据文献[17]

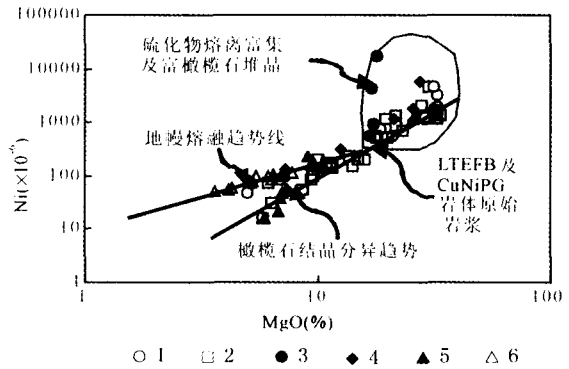
图2 峨眉山大火成岩省典型 Cu-Ni-PGE 矿化岩体岩石与低钛峨眉山玄武岩微量元素组成对比图

Fig. 2 Primitive mantle normalized trace element distribution patterns of the rocks and ores of the typical deposits in ELIP in comparison with those of the high-Ti ECFB

峨眉山地幔柱模型^[5], 成矿岩浆应为地幔柱作用早期地幔柱轴部地区岩浆活动高峰时, 岩石圈高度拉伸减薄环境下大量地幔上涌、高程度部分熔融作用的产物。

图3的 MgO-Ni 关系图很好地表现了两类峨眉山玄武岩与典型 Cu-Ni-PGE 成矿岩体成分变化趋势。高钛玄武岩组成表现了地幔部分熔融作用趋势, 低钛玄武岩则与矿化岩体构成另一条与之相交的趋势线, Cu-Ni-PGE 矿石在地幔部分熔融趋势线之上, 体现硫化物熔离富集作用效果, 成矿岩体的部分基性岩分异相及低钛峨眉山玄武岩落在地幔部分熔融趋势线之下, 是硫化物熔离亏损及结晶分异的组合效果。两条趋势线的交点明显指出 MgO 含量大于 10%, 表明成矿岩体均为 MgO 含量在 10% 以上的高镁玄武岩的演化结果。由于 Ni 的相容性, 即使原始岩浆在有残余硫化物相的条件下熔融, Ni 在熔体中的含量与熔融程度也应基本保持正相关关系。低钛玄武岩熔融程度远远高于高钛玄武岩^[19], 因此, 部分熔融作用无法解释低钛玄武岩 Ni 含量普遍低于高钛玄武岩的现象, 可能是普遍经历了橄榄石结晶分异及硫化物熔离亏损, 与 Cu-Ni-PGE 成矿

岩体硫化物熔离富集相对应。



1. 金宝山; 2. 朱布; 3. 力马河; 4. 杨柳坪; 5. 低钛玄武岩; 6. 高钛峨眉山玄武岩。

部分原始数据待发表, 峨眉山数据据文献[16]

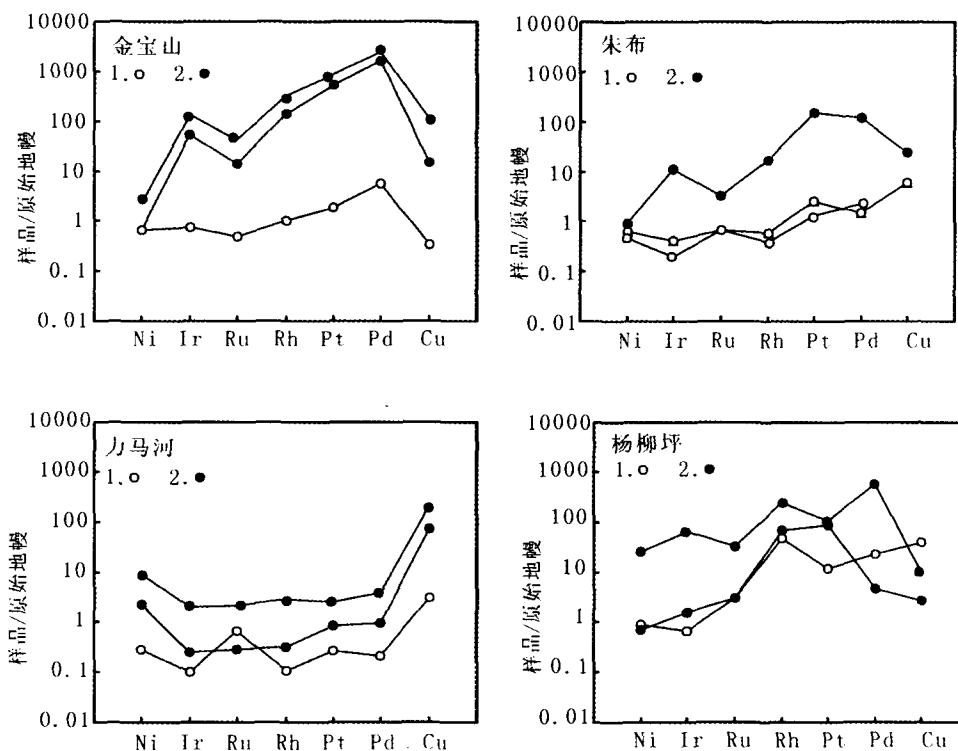
图3 峨眉山大火成岩省玄武岩及典型 Cu-Ni-PGE 成矿岩体岩石、矿石 MgO-Ni 关系与变化趋势

Fig. 3 Variation of Ni versus MgO for the Emeishan basalts and the rocks and ores of the typical deposits in ELIP

(2) 矿化特征及矿化类型变异: 从表 2 可见, 金宝山、朱布、力马河、杨柳坪矿化岩体的铂族元素组成相对富集 Pt 与 Pd, Pd/Ir 值为 10 左右, 与地幔较 高程度熔融、形成的高镁玄武岩浆相当^[22]。但不同

岩体岩石与矿石硫化物富集程度差异很大,成矿元素也有很大变化,不同岩体岩石与矿石成矿元素的原始地幔标准化配分曲线型式如图 4 所示。各矿床在成矿元素组成、矿体形态和矿石结构构造上的差别对比如表 3。金宝山铂族元素的相对富集程度最

高,力马河显著亏损铂族元素,朱布和杨柳坪矿床贵贱金属比值及 Pt/Pd 值与原始地幔接近,Cu-Ni 与 PGE 相对原始地幔没有显著分异,杨柳坪矿床个别矿石样品 Cu 含量的相对亏损可能与岩体强烈蚀变改造引起的含 Cu 热液活化迁移有关^[23]。



1. 非矿化岩石样品;2. 矿化岩石或矿石;原始地幔数据据文献[15]

图 4 峨眉山大火成岩省典型 Cu-Ni-PGE 矿化岩体岩石、矿石原始地幔标准化的 Cu、Ni、PGE 分配型式

Fig. 4 Primitive mantle normalized Cu, Ni, PGE pattern of the rocks and ores of the typical deposits in ELIP

表 3 峨眉山大火成岩省典型 Cu-Ni-PGE 矿床特征对比

Table 3 Characteristics of the typical Cu-Ni-PGE deposits in ELIP

矿床	岩体形态	矿体产状	矿石结构构造	成矿元素组成
金宝山	岩席	似层状、凸镜状	浸染构造状构造	贫 Cu、Ni 富 PGE; Pt<Pd
朱布	株状	边缘矿体(漏斗状)	浸染构造状构造	Cu-Ni-PGE 型; Pt>Pd
力马河	株状	囊状	块状构造、陨铁构造	富 CuNi 贫 PGE
杨柳坪	岩席	似层状、凸镜状	块状构造、浸染状构造	Cu-Ni-PGE 型; Pt<Pd

研究表明,岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床矿化类型的变异可以是岩浆演化过程或硫化物熔离富集过程差异的结果^[24,25]。根据贵贱金属的分异,峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 矿床可以区分为富 Cu-Ni 贫 PGE 型(力马河)、贫 Cu-Ni 富 PGE 型(金宝山)和铜镍铂钯富集型(朱布)(表 3)。根据岩体地质地球化学特征、矿体产状和矿石结构构造综合分析,金宝

山为经深部结晶分异和硫化物熔离作用形成的富含橄榄石及熔离硫化物的“晶粥”侵位,在重力堆积作用下,形成似层状的含铂族元素硫化物富集层;深部硫化物熔离作用过程中,熔离的硫化物少而分散,由于熔离硫化物对铂族元素强烈的亲合性,原始岩浆中几乎全部的 PGE 都进入熔离硫化物,而 Cu、Ni 仅部分进入熔离硫化物,因此形成了金宝山相对贫

Cu、Ni 的元素矿化特征^[26]。

朱布岩体为未经深部硫化物熔离分异的岩浆侵位,在岩体冷凝过程中结晶分异和硫化物熔离成矿,矿体产状受温度梯度和浓度扩散所控制,形成岩体边部漏斗状的 Cu-Ni-PGE 硫化物结果,朱丹等^[26]认为边缘矿层是 Soret 分异作用的产物。成矿元素组成基本保持地幔部分熔融的原始岩浆特征,就地结晶分异形成了完整的岩相分带。

力马河矿床也是深部硫化物熔离作用的产物,是高度富含硫化物的岩浆侵位和矿浆贯入的结果,类似于金川镍矿^[21-27]。力马河矿床岩浆硫化物强烈亏损 PGE。高振敏等^[28]认为,PGE 含量低的原因可能是侵位岩浆经历过早期微量熔离硫化物(富 PGE)的丢失,不能以简单的一次熔离模式来解释。模式计算可以说明,0.01% 的硫化物熔离可导致 PGE 含量降低一个数量级,而微量硫化物熔离对岩浆中 Cu-Ni 含量几乎没有影响^[15],经历微量硫化物熔离分异后的岩浆二次熔离成矿可以形成远高于地幔 Cu/Pd 值的矿床或矿体^[29]。

杨柳坪矿床贵、贱金属的相对含量与朱布矿床一样,Cu-Ni 与 PGE 的比例相对于地幔部分熔融形成的原始岩浆没有显著分异,但与朱布矿床的矿体产状明显不同。Song 等^[13]认为,杨柳坪岩体为岩浆通道相成矿,侵位岩浆在深部发生硫化物熔离后在通道中堆积成岩成矿。其成因模式也可能类似于金宝山矿床,为含熔离硫化物的岩浆贯入后堆积形成的岩席,但相对于金宝山而言,硫化物熔离强度较大,原始岩浆中的大部分 Cu-Ni 和 PGE 被熔离硫化物所捕获,Cu-Ni 与 PGE 一起富集,形成富铂族元素的铜镍硫化物矿床。不同矿石类型成矿元素组成的巨大差异是强烈的热液改造作用的结果^[23]。

4 结 论

(1)峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 成矿岩体岩石地球化学特征相似,表现出良好的地球化学亲缘关系,并与低钛玄武岩有成因联系。

(2)Cu-Ni-PGE 成矿岩浆主要为地幔柱早期中心地带高程度部分熔融的高镁玄武岩,Cu-Ni-PGE 矿化主要产于峨眉山地幔柱活动模型的内带低钛玄武岩分布区;地幔柱与裂谷的耦合对铜镍硫化物矿化岩体的产出也有直接的影响。成矿后地壳的隆升与剥蚀是成矿岩体得以揭露的重要条件。

(3)岩浆演化过程和硫化物熔离富集过程的差

异,造成了多种多样的矿化类型。金宝山、朱布、力马河、杨柳坪矿床分别代表了峨眉山地幔柱 Cu-Ni-PGE 矿床的不同成矿机制的端员类型。

参考文献(References):

- [1] Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes[M]. Dordrecht, Neth.: Kluwer Acad.,2000.556.
- [2] Ernst R E,Buchan K L. Recognizing mantle plumes in the geological record[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci.,2003,31: 469-523.
- [3] 胡瑞忠,陶琰,钟宏,黄智龙,张正伟. 地幔柱成矿系统:以峨眉山地幔柱为例[J]. 地学前缘,2005,12(1):42-54.
Hu Ruizhong, Tao Yan, Zhong Hong, Huang Zhilong, Zhang Zhengwei. Mineralization system of mantle plume: A case study on Emeishan mantle plume[J]. Earth Science Frontiers, 2005,12(1):42-54. (in Chinese with English abstract)
- [4] Campbell I H,Griffiths R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts[J]. Earth Planet. Sci. Lett.,1990,99: 79-93.
- [5] Xu Y G,He B,Chung S L,Menzies M A,Frey F A. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province [J]. Geology, 2004,32: 917-920.
- [6] Keays R R. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits[J]. Lithos,1995, 34:1-18.
- [7] 张招崇,郝艳丽,王福生. 大火成岩省中苦橄岩的研究意义[J]. 地学前缘,2003,10(3):105-114.
Zhang Zhaochong, Hao Yanli, Wang Fusheng. Picrites in large igneous provinces and their implications[J]. Earth Science Frontiers,2003,10(3): 105-114. (in Chinese with English abstract)
- [8] 桂林冶金地质研究所,四川冶金地质勘探公司 601 队,四川冶金局 901 矿. 力马河硫化物铜镍矿床研究[A]. 地质科学院地质矿产所编. 铜镍钴铂地质矿产专集(第二集)[M]. 1974.5-95.
Metallurgical Geology Institute of Guilin, 601 Team of Sichuan Exploration Company of Metallurgical Geology, 901 Mine of Sichuan Metallurgical Bureau. Study on the Limahé magmatic sulfide deposit[A]. Academy of Geology Science, China. Spec. Publ. on mineral deposits of Cu-Ni-Co-PGE(Vol. 2)[M]. 1974,2:5-95. (in Chinese)
- [9] 杨星,李行. 中国含铂基性超基性岩体与铂(族)矿床[M]. 西安:西安交通大学出版社,1992.
Yang Xing, Li Hang. Pt-bearing basic and ultrabasic bodies and Pt(group)deposits in China[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,1992. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨廷祥. 云南省弥渡县金宝山铂钨矿典型矿床研究报告[R]. 云南地矿局第三地质大队科研报告,1989.

- Yang Tingxiang. Report on the typic deposit research of the Jinbaoshan Pt-Pd deposit, Midu County, Yunnan, China[R]. Unpublished report of the Geological Team 3, Yunnan Province, 1989, 236. (in Chinese)
- [11] Qi L., Grégoire D C. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *J. Geostand. Geoanal.*, 2000, 24; 51-63.
- [12] Zhong H., Zhou X H., Zhou M F., Sun M., Liu B G. Platinum-group element geochemistry of the Hongge Fe-V-Ti deposit in the Pan-Xi area, southwestern China[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37; 226-239.
- [13] Song X Y., Zhou M F., Cao Z M., Sun M., Wang Y L. Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38; 831-843.
- [14] 陶琰, 朱丹, 高振敏, 罗泰义. 金山铂族元素矿床铂族元素的热液活动研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(1); 32-37.
Tao Yan, Zhu Dan, Gao Zhenmin, Luo Taiyi. Study on PGE remobilization in Jinbaoshan PGE deposit[J]. *Bull. Mineral. Petrol. Geochem.*, 2003, 22(1); 32-37. (in Chinese with English abstract)
- [15] Barnes S J., Maier W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids[A]. Keays R R., Leshner C M., Lightfoot P C., eds. *Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application in mineral exploration* [Z]. Geological Association of Canada, Short Course, 1999, 13; 69-106.
- [16] Xu Y., Chung S L., Jahn B M., Wu G. Petrological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Permo-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 58; 145-168.
- [17] Sun S S., McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D., Norry M J., eds. *Magmatism in the ocean basins*[M]. Oxford: Spec. Publ., 1989, 42; 313-345.
- [18] Zhou M F., Yang Z X., Song X Y., Keays R R., Leshner C M. Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China[A]. Cabri L J., The geology, geochemistry, mineralogy, mineral beneficiation of the platinum-group elements[M]. *Can. Inst. Mining Metall. Petrol. Spec.*, 2002, 54; 619-636.
- [19] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. *地球化学*, 2001, 30(1); 1-9.
Xu Yigang, Chung Sunlin. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. *Geochimica*, 2001, 30(1); 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱丹, 罗泰义, 徐义刚, 陶琰, 黄智龙. 朱布岩体 Soret 分异成矿模型[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(增刊): 109-110.
Zhu Dan, Luo Taiyi, Xu Yigang, Tao Yan, Huang Zhilong. Soret fractionation - A novel process for origin of the PGE mineralization in the Zhubu mafic-ultramafic intrusion in SW China[J]. *Bull. Mineral. Petrol. Geochem.*, 2004, 23(suppl.); 109-110. (in Chinese)
- [21] 陶琰, 罗泰义, 高振敏, 朱丹. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系——以云南金山山超镁铁岩为例[J]. *地质论评*. 2004, 50(1); 9-15.
Tao Yan, Luo Taiyi, Gao Zhenmin, Zhu Dan. The relation between emeishan continental flood basalts and Cu-Ni-PGE deposits of Xinan trap—A case Study on Jinbaoshan Ultramafic intrusion, Yunnan[J]. *Geological Review*, 2004, 50(1); 9-15. (in Chinese with English abstract)
- [22] Rehkamper M., Halliday A N., Fitton J G., Lee D C., Wieneke M., Arndt N T. Ir, Ru, Pt, and Pd in basalts and komatiites: New constraints for the geochem. behavior of the platinum-group elements in the mantle[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, 63; 3915-3934.
- [23] 王登红, 楚莹石, 罗辅勋, 卢治安, 唐志铎. 四川杨柳坪 Cu-Ni-PGE 富矿体的成因及意义[J]. *地球学报*, 2000, 21; 260-265.
Wang Denghong, Chu Yingshi, Luo Fuxun, Lu Zhian, Tang Zhixin. The origin of the Cu-Ni-PGE Orebody in Yangliuping, Sichuan Province, and the significance of its the discovery [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2000, 21; 260-265. (in Chinese with English abstract)
- [24] 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. *地质学报*, 1996, 70(3); 237-243.
Tang Zhongli. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in china[J]. *Acta Geological Sinica*, 1996, 70; 237-243. (in Chinese with English abstract)
- [25] Barnes S J., Zientek M L., Severson M J. Ni, Cu, Au and platinum-group element contents of sulphides associated with intraplate magmatism[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1997, 34; 337-351.
- [26] 陶琰, 高振敏, 罗泰义, 杨竹森, 祁敬东, 不英军. 云南省金山铂钨矿成矿机制探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4); 337-338.
Tao Yan, Gao Zhenmin, Luo Taiyi, Yang Zhusen, Qi Jingdong, He Yingjun. Investigation on mineralization mechanism of Jinbaoshan Pt-Pd deposit[J]. *Bull. Mineral. Petrol. Geochem.*, 2000, 19(4); 337-338.
- [27] Li C., Xu Z H., Waal S A. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China; Implications for ore genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39; 159-172.
- [28] 高振敏, 张乾, 陶琰, 罗泰义. 峨眉山地幔柱成矿作用分析[J]. *矿物学报*, 2004, 24(2); 99-104.
Gao Zhenmin, Zhang Qian, Tao Yan, Luo Taiyi. An analysis of the mineralization connected with Emeishan mantle plume [J]. *Acta Min. Sinica*, 2004, 24(2); 99-104. (in Chinese)
- [29] Theriault R D., Barnes S J., Severson M J. The influence of country-rock assimilation and silicate to sulfide ratios (*R* factor) on the genesis of the Dunka Road Cu Ni-Platinum-group element deposit, Duluth Complex, Minnesota[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1997, 34; 375-388.