

杨柳坪岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物 矿床 PGE 地球化学特征

郑建斌¹, 曹志敏¹, 宋谢炎², 安伟¹, 刘激¹

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院省级海底资源与探测技术重点实验室,
青岛 266003; 2. 香港大学地球科学系, 香港)

[摘要]杨柳坪岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床与大石包组玄武岩的 PGE 原始地幔标准化配分模式为向左倾斜的 PPGE 富集型。PGE 特征参数表明, 正子岩窝岩(矿)体与大石包组玄武岩具有负 Pt 异常和 Rh 的富集的特征, 这可能反映了岩浆早期 Pt - Fe 合金的析出以及未发生尖晶石相的结晶分离的演化历史。大石包组玄武岩的 PGE 参数与正子岩窝岩(矿)体的总体趋势具有很好的吻合性, 暗示着两者之间具有一定的成生联系。

[关键词] 岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床 PGE 配分模式 Pt 异常 杨柳坪

[中图分类号] P618.53; P59 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495 - 5331(2004)05 - 0016 - 05

0 引言

Cu - Ni - S - Pt - Pd 序列是 PGE 成矿的重要序列之一^[1]。Naldrett A J 认为, 岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床的形成应具有以下的条件: ①能晶出大量橄榄岩的岩浆, ②显著的地壳断裂, ③能提供大量 S 的围岩(或下层岩石), ④相关岩浆岩中亲 Cu 元素的亏损, ⑤与围岩反应的证据, ⑥矿床产于岩浆通道或附近^[2]。Brooks C K 等也认为, 含 Platinova reef 的 Skaergaard 侵入体与东格陵兰广泛分布的第三系玄武岩有着成因上的联系, 岩浆与富 S 岩石的混染是该富 PGE 硫化物层形成的基础^[3]。显然, 这在有着大量玄武岩出露的地区寻找岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床提供了理论依据, 同时也提供了方法上的指导, 即通过对火山岩的岩石化学成分的分析 and 火山机构的研究来寻找该类矿床。

与 Uitkomst^[4,5]、Noril'sk - Talnakh^[2,6]、Voisey's Bay^[7] 等岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床相似, 杨柳坪岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床也产出在相对较小的侵入岩体中。本文旨在通过对正子岩窝侵入体及其附近大石包组玄武岩的 PGE 配分曲线的研究, 寻找杨柳坪岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床与峨眉山玄武岩之间联系的 PGE 地球化学方面的证据, 以

期对在川西地区寻找与峨眉山玄武岩有关的岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床有所帮助。

1 杨柳坪岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床的地质概况

杨柳坪岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床位于四川丹巴县城南东 178°方位, 直距 20 km。东经 101°54'10" ~ 101°55'00", 北纬 30°41'30" ~ 30°42'20"。该矿床的一般地质特征^[8,9]、PGE 矿物组合^[10,11] 已有报道。这里仅作择要介绍。

杨柳坪地区处于川滇南北向构造带, 甘孜松潘褶皱系东南缘的丹巴复背斜南端。基性—超基性岩体沿东谷—鱼海子断裂分布, 主要有杨柳坪、正子岩窝、协作坪、鱼海子、打枪岩窝等岩体(图 1)。矿区内规模较大且具控矿意义的断裂是由 NNW 向的东谷断裂与 NW 向的玉科断裂组成的东谷—鱼海子垭口大断裂, 区内已知的铂矿床均位于其上盘。银厂沟背斜是一个位于东谷—鱼海子垭口大断裂上的 NE 向的短轴穹状构造, 杨柳坪、正子岩窝、协作坪岩体以及众多基性超基性岩脉均围绕该穹隆的核心分布。

正子岩窝岩体(图 1)位于丹巴复背斜的次级银厂沟背斜西翼近轴部部位, 岩体走向近南北, 水平长度大于 2120 m, 平均厚度 175 m, 最大厚度 298 m,

[收稿日期] 2003 - 10 - 09; **[修订日期]** 2004 - 01 - 06; **[责任编辑]** 余大良。

[基金项目] 国家重点基础研究 973 项目(编号: G1999043200)、国家自然科学基金项目(编号: 40072037、40273025) 联合资助。

[第一作者简介] 郑建斌(1971 年 -), 男, 2004 年毕业于中国海洋大学, 获博士学位, 现主要从事研究资源与环境地球化学应用工作。

含矿地段岩体厚度一般均在 130 ~ 250 m 间。岩体倾向南西,沿倾向延深一般为 300 ~ 400 m,之后便分叉变薄至尖灭。其具体岩性见图 2。野外岩体与地层之间的接触关系表明该岩体的侵入时间的下限为 D₂。

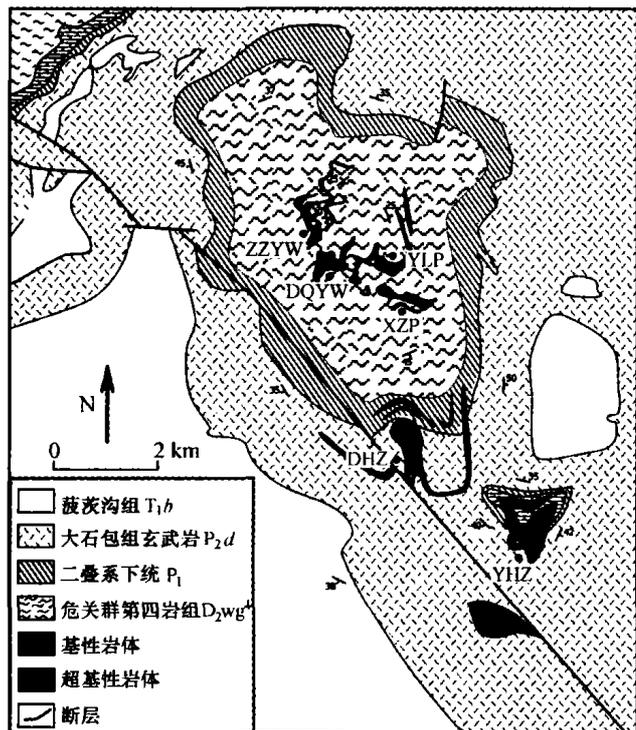


图 1 杨柳坪岩浆 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床地质略图

(据四川地勘局 402 队详、普查报告综合编制)

ZZYW - 正子岩窝; YLP - 杨柳坪; DQYW - 打枪岩窝;

XZP - 协作坪

2 样品、测试方法及结果

本次所作 PGE 分析的 8 个样品采自正子岩窝岩(矿)体(图 2)及其大石包组玄武岩。样品 ZD -

12、ZD - 10 为滑石片岩,含硫化物。ZD - 8、ZD - 7 采自蛇纹岩相带,为浸染状矿石。ZD - 22 为块状矿石。DB - 4、DB - 7、DB - 11 为大石包组玄武岩。

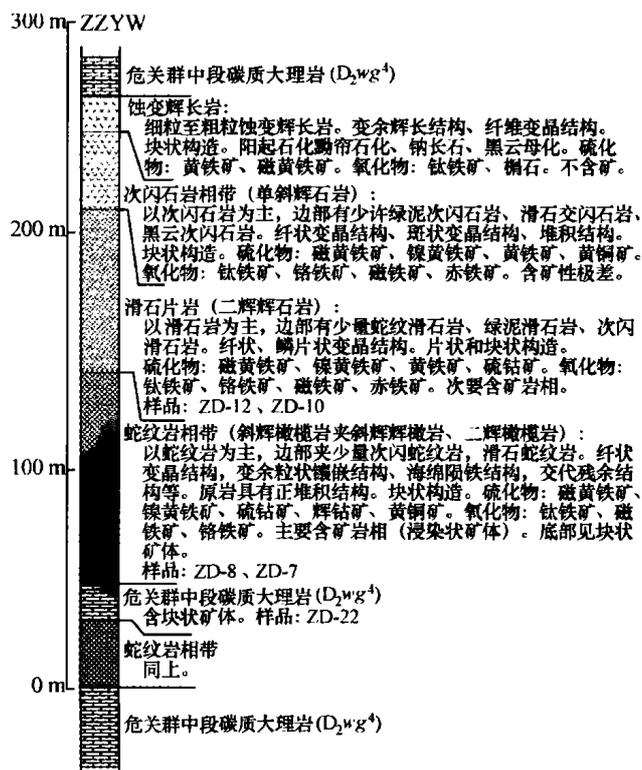


图 2 正子岩窝岩体柱状剖面示意图

(据四川地勘局 402 队详、普查报告综合编制)

PGE 的测试采用镍硫试金预富集 ICP - MS 方法,在香港大学完成,其具体操作方法见 Zhou 等^[12]。测试精度 Rh、Pd、Ir 为 ±5%, Pt 为 ±10%。测定限为 Ir 0.005 × 10⁻⁹、Rh 0.07 × 10⁻⁹、Pt 0.04 × 10⁻⁹、Pd 0.47 × 10⁻⁹。分析结果见表 1, PGE 原始地幔标准化配分模式及其参数见图 3。

表 1 正子岩窝岩(矿)体及附近玄武岩 PGE 测试结果及参数值

样号	DB - 4	DB - 7	DB - 11	ZD - 12	ZD - 10	ZD - 8	ZD - 7	Zd - 22	Ref ^[13]
岩性	蚀变玄武岩		滑石片岩(辉石岩)		蛇纹岩(辉橄岩,浸染状矿石,硫化物 10% ~ 12%)		致密块状硫化物矿石		
Ir	0.6	0.2	0.2	2.5	0.6	5.3	2.4	221.9	289
Ru	2.3	0.2	0.4	10.7	0.7	15	15.5	160.9	210
Rh	2.8	20.9	5.4	6	2.2	63.5	46.4	232.2	240
Pt	17.7	129.6	22	15.8	17.9	623.2	80.1	730.7	1500
Pd	16.5	13	20.2	18.3	15.8	24.5	96.9	2359.1	2510
Pd/Ir	27.50	65.00	101.00	7.32	26.33	4.62	40.38	10.63	8.69
Pt/Pt* ^②	0.47	4.30	0.31	0.16	0.64	17.38	0.10	0.07	0.26
(Pd/Ir) _N	22.56	53.33	82.87	6.01	21.61	3.79	33.13	8.72	7.13
(Rh/Ir) _N	16.59	371.56	96.00	8.53	13.04	42.60	68.74	3.72	2.95
(Pd/Rh) _N	1.36	0.14	0.86	0.70	1.66	0.09	0.48	2.34	2.41
(Pt/Pd) _N	0.59	5.48	0.60	0.47	0.62	13.97	0.45	0.17	0.33

注:①香港大学地球科学系 ICP - MS 实验室,2002;②Pt/Pt* = (Pt_N)² / (Pd_N × Rh_N),原始地幔数据 McDonough and Sun^[14]。

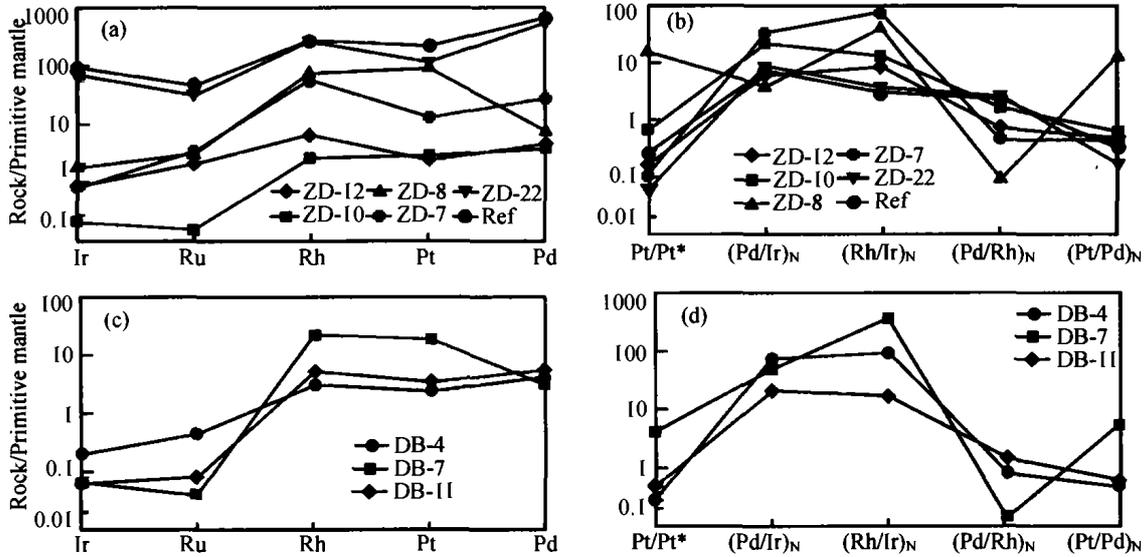


图3 正子岩窝岩(矿)体和大石包组玄武岩 PGE 原始地幔标准化曲线及 PGE 参数图

从表 1 及图 3 可见,正子岩窝岩(矿)体的 PGE 分配曲线具有以下几个方面的特征:

1) 正子岩窝岩(矿)体及大石包组玄武岩的 PGE 原始地幔标准化分配曲线总体上呈现向左缓倾的趋势,表现出 PPGE 的富集。从 Pd/Ir 比值来看,正子岩窝岩(矿)体的 Pd/Ir 比值较低(4.62 ~ 40.38),大石包组玄武岩则具有较高的 Pd/Ir 值(27.5 ~ 101),但总体上仍表现为岩浆型 PGE 的 Pd/Ir 比值特征。

2) PPGE 中,Pt 相对于 Pd 和 Rh 表现出一定程度的亏损,及负 Pt/Pt* 异常。Pt/Pt* 参数最初由 Garuti 等人提出,该参数提供了样品中 Pt 相对于原始地幔标准化后总体偏移趋势的衡量,原始未分异地幔的 Pt/Pt* 值为 1,正(Pt/Pt* > 1)或负异常(Pt/Pt* < 1)反映了不同地质作用所导致的 Pt 相对于 Pd 和 Rh 的分异^[15]。除样品 DB-7、ZD-8 外,其余样品的分配曲线在 Pt 处具有明显的凹点,其 Pt/Pt* 变化范围为 0.07 ~ 0.64。从(Pt/Pd)_N来看,除 DB-7、ZD-8 外,(Pt/Pd)_N变化于 0.17 ~ 0.62。这表明,正子岩窝岩(矿)体及大石包组玄武岩中,Pt 相对于 Rh、Pd 来说,其亏损是存在的。

3) 样品 DB-7、ZD-8 所反映的 Pd 的亏损。

4) 所分析样品的另外一个特征就是 Rh 的相对富集(见表 1 及图 3)。(Rh/Ir)_N值变化于 3.72 ~ 398.22,高于 (Pd/Ir)_N(3.01 ~ 105.03)。

3 讨论

3.1 热液作用对 PGE 分馏的影响

由于 PGE 具有相似的地球化学性质,热液蚀变

一般不会产生 PGE 的分馏^{[15][16]}。从正子岩窝不同类型矿石内 PGE 各元素的含量比值来看(表 2),除熔离致密块状矿石内的 Os、Ir、Ru、Rh 四元素,热液细脉浸染状矿石内的钯的含量明显增高外,其他矿石内的铂族元素间的比值近似相等。由于 Os、Ir、Ru、Rh 更具亲铁性,“四元素”在致密块状矿石中的相对高含量表明该类矿石形成相对较早;而 Pd 含量在热液细脉浸染状矿石中的增高,则表现出 Pd 在热液中相对较强的活动性。可以认为,热液作用对 Pd 的分馏造成了样品 ZD-8、DB-7 的 Pd 的亏损,而其余 PGE 则受其影响较小,及热液作用未造成其余 PGE 的分馏。

表 2 不同类型矿石内铂族元素含量比值表^①

元素含量比	Pt	Pd	Os	Ru	Ir	Rh
熔离浸染状	14	20	1.7	2.7	1.4	1
熔离致密块状	14	24	2.8	3.4	2.2	2
交代斑杂-致密块状	14	23	2.9	2.8	1.8	1
热液细脉浸染状	14	39	1.8	2.7	1.5	1

3.2 负 Pt/Pt* 异常

Kepezhinskas 等^[17]、Garuti 等^[15]认为,Pt-Fe、Pt-Fe 合金是 Pt 相对于 Pd 和 Rh 分异的物相。造成 Pt 相对于 Pd 和 Rh 分馏的机制有二:一是地幔在部分熔融过程中,低度熔融及其伴随熔体的排出,导致难熔的 Pt-Fe 合金在地幔残留体中的富集,而与其对应的熔体中则相对贫 Pt。二是岩浆演化过程中 Pt-Fe 合金的析出,形成残余岩浆中的负 Pt/Pt*

① 四川地质局 402 地质队.《四川丹巴县杨柳坪 Pt、Ni 矿床正子岩窝矿段详细普查地质报告》,1982。

异常。尽管 Pt - Fe 合金的形成机制尚不清楚,但广泛存在的 Ural - Alaskan 型岩体中的堆积纯橄岩相中的正 Pt 异常和以 Pt - Fe、Pt - Ir、Ir - Os 为主的 PGE 矿物相都表明,Pt - Fe 合金可以在低硫逸度的条件下形成^[15]。Amosse 等的实验同样表明,Pt - Fe 合金可以在 S 不饱和的玄武质岩浆中形成^[18]。考虑到地幔低度熔融所形成的岩浆中的 PGE 的低含量,正子岩窝侵入体及大石包组玄武岩的负 Pt/Pt* 异常应该反映了岩浆演化过程中经历了 Pt - Fe 合金析出的历史。

3.3 Rh 的相对富集

通常,Rh 的地球化学性质被认为与 Pt、Pd 相似,但 Von Gruenewaldt G 等也发现 Rh 与 Ir 在铬铁矿层中的高度相关性^[19]。Copobianco CJ 等的实验表明,Rh 在尖晶石/硅酸盐熔体间具有很高的分配系数,此时,Rh 以固溶体的形式进入尖晶石^[20]。Von Gruenewaldt G 等据此解释了 Rh 在铬铁矿层中的富集(与 Ir 的高相关)^[19]。这表明,在贫硫的硅酸盐岩浆的结晶演化过程中,Rh 可在岩浆结晶早期进入尖晶石相,从而与 Pd、Pt 发生分异。故有理由认为,正子岩窝岩体与大石包组玄武岩中 Rh 的高浓度暗示着其母岩浆未发生尖晶石相的晶出。

3.4 正子岩窝岩(矿)体与大石包组玄武岩之间的联系

除具有 Pd 亏损的两个样品(DB - 7、ZD - 8)外,所有样品的 PGE 特征参数基本吻合(图 4),暗示着大石包组玄武岩与正子岩窝岩(矿)体之间的成生联系。结合岩浆型 Ni - Cu - PGE 硫化物矿床的成矿特征,值得对大石包组玄武岩作进一步的岩石地球化学方面的研究。

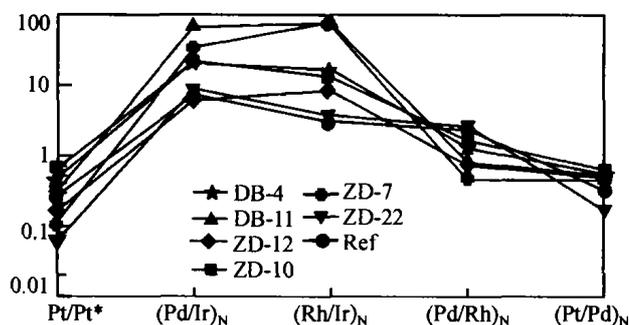


图 4 正子岩窝及大石包组玄武岩 PGE 参数曲线图

4 结论

1) 正子岩窝岩(矿)体与大石包组玄武岩 PGE 原始地幔标准化配分模式为向左倾斜的 PPGE 富集

型,其 Pd/Ir 比值反映出岩浆成矿作用的特征。

2) 正子岩窝岩(矿)体与大石包组玄武岩的负 Pt/Pt* 异常可能反映了岩浆早期 Pt - Fe 合金的析出历史,而其 Rh 的富集则暗示了岩浆未发生尖晶石相的结晶分异。

3) 大石包组玄武岩的 PGE 参数与正子岩窝岩(矿)体的总体趋势具有很好的吻合性,暗示着两者之间具有一定的成生联系。确定这种联系对于指导川西地区的 PGE 找矿具有重要的意义。

[参考文献]

- [1] 刘秉光. 中国 PGE 矿床类型分析[J]. 地质与勘探, 2002, 38 (4): 1~7.
- [2] Naldrett A J. World - class Ni - Cu - PGE deposits: key factors in their genesis [J]. Mineralium Deposita, 1999, 34: 227~240.
- [3] Brooks C K, Keays R R, Lambert D D, et al. Re - Os isotope geochemistry of Tertiary picritic and basaltic magmatism of East Greenland: constraints on plume - lithosphere interactions and the genesis on the Platinova reef, Skaergaard intrusion [J]. Lithos., 1999, 47: 107~126.
- [4] Li C, Ripley E M, Maier W D, et al. Olivine and sulfur isotopic compositions of the Uitkomst Ni - Cu sulfide ore - bearing complex, South Africa: evidence for sulfur contamination and multiple magma emplacements [J]. Chemical Geology, 2002, 188: 149~159.
- [5] Gauert C. Sulfide and oxide mineralization in the Uitkomst complex, South Africa: origin in a magma conduit [J]. Journal of African Earth Sciences, 2001, 32 (2): 149~161.
- [6] Hawkesworth C J, Lightfoot P C, Fedorenko V A, et al. Magma differentiation and mineralization in the Siberian continental flood basalts [J]. Lithos., 1995, 34: 61~88.
- [7] Li C, Naldrett A J. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: reaction of olivine with sulfide and silicate liquids [J]. Lithos., 1999, 47: 1~31.
- [8] 王登红, 楚莹石, 罗辅勋, 等. 杨柳坪铜 - 镍 - 铂族元素矿床的矿化类型及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19 (4): 323~325.
- [9] 王登红, 骆耀南, 傅德明, 等. 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[J]. 地球学报, 2001, 22 (2): 135~140.
- [10] 胡晓强, 李云泉, 帅德权. 四川丹巴地区 Cu - Ni - Pt 族元素矿床矿石结构与成矿期次[J]. 成都理工学院学报, 2001a, 28 (1): 48~52.
- [11] 胡晓强, 李云泉, 帅德权. 四川丹巴地区 Cu - Ni - Pt 族元素矿床的矿石矿物特征[J]. 矿物岩石, 2001b, 21 (1): 14~18.
- [12] Zhou M F, Malpas J, Sun M, et al. A new method to correct Ni - and Cu - argide interference in the determination of the platinum - group elements, Ru, Rh, and Pd, by ICP - MS [J]. Geochim., 2001, 35: 413~420.
- [13] Yao Y. Geological characteristics of PGE - bearing layered intrusions in Southwest Sichuan Province, China [A]. Economic Geol-

- ogy Research Unit, Information Circular [C], 2001, No. 358.
- [14] McDonough W F, Sun S - s. *The composition of the Earth* [J]. *Chem. Geol.*, 1995, 120: 223 ~ 253.
- [15] Garuti G, Fershtater G, Bea F, et al. . Platinum - group elements as petrological indicators in mafic - ultramafic complexes of the central and southern Urals; preliminary results [J]. *Tectonophysics*, 1997, 276: 181 ~ 194.
- [16] Handler M R, Bennett V C. Behavior of Platinum - group elements in the subcontinental mantle of eastern Australia during variable metasomatism and melt depletion [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, 63 (21): 3597 ~ 3618.
- [17] Kepezhinskas P, Defant M J, Widom E. Abundance and distribution of PGE and Au in the island - arc mantle; implication for sub - arc metasomatism [J]. *Lithos.*, 2002, 60: 113 ~ 128.
- [18] Amosse J, Dable P, Allibert M. Thermochemical behavior of Pt, Ir, Rh and Ru vs. f_{O_2} and f_{S_2} in a basaltic melt; implications for the differentiation and precipitation of these elements [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2000, 68: 29 ~ 62.
- [19] Von Gruenewaldt G, Merkle R K W. Platinum group element proportions in chromitites of the Bushveld complex; implications for fractionation and magma mixing models [J]. *Journal of African Sciences*, 1995, 21 (4): 615 ~ 632.
- [20] Copobianco C J, Drake M J. Partitioning of ruthenium, rhodium and palladium between spinel and silicate melt and implications for platinum - group element fractionation trends [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, 54: 869 ~ 874.

PGE GEOCHEMISTRY OF THE YANGLIUPING MAGMATIC Ni - Cu - PGE SULFIDE DEPOSIT

ZHENG Jian - bin¹, CAO Zhi - min¹, SONG Xie - yan², AN Wei¹, LIU Ji¹

(1. *The key lab. of seabed resources & exploration technics, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266003*; 2. *Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong*)

Abstract: Studies of primitive mantle normalized PGE concentration patterns of the Yangliuping magmatic Ni - Cu - PGE sulfide deposit and Dashibao Formation basalts reveal that, PGE concentration patterns for the Zhengziyanwo intrusion and Dashibao Formation basalts are of positive slope, similar to most of world - class magmatic Ni - Cu - PGE sulfide deposits. Characteristics of this deposit and basalts are their negative Pt - anomaly and high concentration of Rh relative to Pt and Pd, which are interpreted to be the results of crystallization and fractionation of Pt - Fe alloy and spinel phase - free crystallization history for the magma, respectively. PGE parameters of the Dashibao Formation basalts are identical to the general trend of the Zhengziyanwo intrusion, and this might infer that there is a genetic link between them.

Key words: Magmatic Ni - Cu - PGE sulfide deposit, PGE concentration pattern, Pt - anomaly, Yangliuping

欢迎订阅 2005 年《黄金》杂志

《黄金》杂志于 1980 年创刊,是由中华人民共和国新闻出版总署批准、中国黄金集团公司主管、长春黄金研究院主办的综合性技术刊物,也是黄金行业惟一的综合性科技期刊。主要报道黄金行业及其相关行业在经济管理、黄金市场、工业应用(黄金及贵金属)、黄金地质、采矿工程、机电与自动控制、选矿与冶炼、分析与环保等方面的科研成果,以及新理论、新技术、新动态、新方法、新工艺、新设备、生产技术经验等内容,同时开辟了首饰之苑、企业之窗、信息纵横、读编往来等栏目。为发展和提高黄金生产技术水平服务,为中国黄金科技进步与创新服务,为厂矿企业、广大读者及用户服务。

《黄金》杂志现为全国中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、美国《化学文摘》(CA)检索文献源、《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊,已被《中国期刊网》、《中国期刊全文数据库》、《万方数据——数字化期刊群》和《中国核心期刊(遴选)数据库》全文收录,入编《中国学术期刊(光盘版)》。《黄金》杂志荣获冶金系统优秀期刊和吉林省优秀期刊奖。

《黄金》杂志内容翔实,信息量大,实用性强,具有权威性。其发行量大,覆盖面广;现已遍布黄金、冶金、地质矿产、有色金属、核工业、化工、金融等系统及金银珠宝首饰行业。

《黄金》广告树立了企业形象,创出了企业名牌,提高了企业知名度,增加了企业效益,是黄金行业的供求信息指南。广告有彩色版和单色版两种,价格合理,效果突出,效益显著。

《黄金》为月刊,刊号:ISSN 1001 - 1277 CN 22 - 1110/TF,彩色封面,64 页,国际开本(297mm × 210mm),国内外公开发行。国内邮发代号 12 - 47,全国各地邮局均可订阅;国外发行代号 M3331,由中国国际图书贸易总公司承办。国内每期定价 10.00 元,全年定价 120.00 元。

需订阅者,可到当地邮局(所)订阅,也可直接通过《黄金》杂志社发行部订阅。我部长年办理零订、邮购业务(在《黄金》杂志社发行部订阅者,若发生邮寄丢失,我部负责及时补寄)。

地 址: 吉林省长春市南湖大路 6760 号《黄金》杂志社发行部

邮 编: 130012

电 话: 0431 - 5529838 0431 - 5514586 转 3066

传 真: 0431 - 5521861

网 址: <http://www.ccgri.com/gold>

E - mail: journal@ccgri.com