

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

宋谢炎^{1,2} 张成江², 胡瑞忠¹,
钟 宏¹, 周美夫³, 马润则², 李佑国²

1. 中国科学院 地球化学研究所矿床地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
2. 成都理工大学应用核技术及自动化工程学院, 四川 成都 610059;
3. 香港大学地球科学系, 香港 博扶林道

【摘 要】 峨眉火成岩省位于扬子地块西部, 为中二叠世末地幔柱活动产物。迄今为止, 峨眉火成岩省已发现超大型 V-Ti 磁铁矿矿床 4 处, 大中型岩浆硫化物型 Ni-Cu-(PGE) 矿床近 10 处。这些矿床的含矿镁铁-超镁铁岩体为 260 Ma \pm , 与峨眉山玄武岩为同一地幔柱的产物。系统归纳和分析上述两类含矿镁铁-超镁铁岩体在空间分布、岩体规模、岩石组合和造岩矿物组成等方面存在明显的差异: 可以分为内带和外带, 内带以巨厚的峨眉山玄武岩、大型层状岩体和众多小型镁铁-超镁铁岩体、低 Ti 玄武岩、碱性岩体和丰富的成矿作用为标志。外带则玄武岩厚度降低, 以高-Ti 玄武岩为主, 很少有侵入岩体。在对这两类岩浆矿床的分布及其与低 Ti 和高 Ti 玄武岩地质和地球化学联系的归纳和分析基础上, 结合对杨柳坪 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床成矿过程与峨眉山玄武岩岩浆起源和演化相互关系的研究结果, 认为峨眉山火成岩省这些不同类型的矿床是地幔柱动力学过程不同阶段的产物。V-Ti 磁铁矿矿床的形成于高 Ti 玄武岩岩浆有关, 主要受控于岩浆的分离结晶作用; 而 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床成矿主要取决于 3 个因素: 高程度的部分熔融, 下地壳同化混染和分离结晶。Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床是地幔柱活动早期阶段的产物, 而 V-Ti 磁铁矿矿床则形成则晚于岩浆硫化物矿床。

【关键词】 峨眉山火成岩省; 地幔柱; 岩浆矿床; 动力学过程

中图分类号: P588.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-6872(2005)04-0035-10

0 引 言

地幔柱活动可以在短时间内(一般 1 Ma~2 Ma)引发大规模的玄武岩浆活动, 形成大量镁铁-超

镁铁岩侵入体、岩墙和大面积的连续的溢流玄武岩喷发, 构成巨大的火成岩省^[1,2]。地幔柱活动是大陆垂向增生的重要方式之一, 还可能导致岩石圈大规模的隆升、伸展, 甚至大陆裂解, 如晚元古代 Rodinia 超级大陆, 晚古生代 Panga 大陆的裂解被认为与地

收稿日期: 2005-05-11; 改回日期: 2005-08-21

基金项目: 中国科学院“百人计划”; 国家自然科学基金项目(40373030; 40573014); 中国科学院知识创新工程(KZCX3-SW-125)

作者简介: 宋谢炎, 男, 43 岁, 研究员, 地球化学专业, 研究方向: 岩石、矿床地球化学。

幔柱活动有关^[3,4]。因此,地幔柱活动不但是了解地幔岩石学、地球化学和地幔地质过程的“岩石探针”,对研究和认识大陆动力学演化过程也有十分重要意义。

地幔柱还有非常重要的岩浆矿床成矿效应,大量连续供给的岩浆参与成矿使得形成大型-超大型矿床成为可能。地幔柱成矿作用的多样性和空间分带性与地幔柱的时空间结构和动力学过程有着密切联系。俄罗斯西伯利亚大火成岩省的 Noril'sk-Talnakh 超大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床是地幔柱成矿作用的典型范例,该矿床是仅次于南非 Busheveld 的世界第二大铂族元素矿床和加拿大 Sudbury 之后的世界第二大镍矿。美国 Keweenaw 裂谷带的 Duluth 杂岩体的硫化物矿化,非洲 Karoo 火成岩省 Insizwa 硫化物矿床也与地幔柱活动有关^[5,6]。需要强调的是,大量玄武岩浆参与成矿意味着要深入认识地幔柱成矿作用,准确把握玄武岩的成因,正确判断其与成矿作用的关系同样是非常必要的。

近十年国内外学者对峨眉火成岩省的深入研究使得对该火成岩省的范围、玄武岩的地球化学特点、岩浆起源和演化、以及地幔柱动力学都形成了更为系统和全面的认识^[7~16]。虽然峨眉火成岩省面积不大,岩浆硫化物矿床也远小于 Noril'sk-Talnakh Ni-Cu-PGE 硫化物矿床,但峨眉火成岩省却以罕见的成矿作用多样性成为地幔柱成矿研究的最佳场所。峨眉火成岩省有 3 类矿床与地幔柱有直接关系:(1)大型-超大型 V-Ti 磁铁铁矿床;(2)Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床;(3)玄武岩系内的自然铜矿;(4)火成岩省晚期“A型”花岗岩体中的 Nb-Ta 矿化。丰富的岩浆矿床是峨眉火成岩省重要的组成部分。这些矿床还具有鲜明的区域性特点。虽然一些学者对这些矿床与峨眉山玄武岩成因联系已作了初步分析^[17~21]。然而,这些矿床的时空序列特点,以及它们的形成与地幔柱动力学过程的内在联系仍然是未解之谜。研究试图从这些矿床空间分布与峨眉火成岩省的分带性,含矿岩体与高 Ti、低 Ti 玄武岩的地球化学联系入手,着重探讨 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床和 V-Ti 磁铁铁矿床成矿作用与峨眉地幔柱动力学过程的耦合关系。

1 峨眉火成岩省的基本特点

1.1 峨眉火成岩省的空间范围

传统上的峨眉山玄武岩是指分布在云贵川三省陆相喷发的晚二叠系溢流玄武岩,分布面积约 $3 \times$

10^5 km^2 ^[22]。然而,地层和地球化学特征的对比性表明松潘-甘孜造山带的中二叠统玄武岩是峨眉山玄武岩的一部分,因此,峨眉火成岩省的西部边缘应为青藏高原东缘金沙江缝合带^[9]。同位素年代学和地球化学研究证明广西北部的二叠系玄武岩也为峨眉山玄武岩的一部分^[23],峨眉山玄武岩还出现在越南北部“Song Da”地块^[24]。所以,峨眉火成岩省覆盖了古生代扬子板块西部的广大区域。同时,考虑到中生代以来松潘-甘孜造山带的剧烈褶皱、向东推覆和横向收缩,峨眉火成岩省当时的面积应该超过 $5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)^[8,9]。

1.2 峨眉地幔柱活动时限

峨眉山玄武岩平行不整合于中二叠系茅口组灰岩之上,茅口组灰岩顶部的煤线和红色的风化壳表明峨眉山玄武岩喷发前扬子板块经历了上千米的地壳抬升^[15]。峨眉山玄武岩系顶部有数米至数十米厚的风化壳,其上为晚二叠系宣威组陆相砂岩。根据地层层序可以确定峨眉山玄武岩喷发始于中二叠世茅口期之后,结束于乐平世宣威期。峨眉地幔柱活动更确切的时限证据来自与峨眉山玄武岩有关的侵入岩体的锆石离子探针年龄测定,四川新街、攀枝花和红格等岩体的锆石年龄测定表明峨眉地幔柱的活动介于 $258 \text{ Ma} \sim 263 \text{ Ma}$ ^[12,25],即中二叠世末,这与峨眉山玄武岩的地层时代高度吻合。

1.3 峨眉山玄武岩的岩石地球化学特点及其成因含义

大量地球化学数据显示峨眉山玄武岩大多数属于拉斑玄武岩和碱性玄武岩之间的过渡系列。张招崇等在云南丽江地区还发现了苦橄岩的存在^[26]。根据 TiO_2 含量和 Ti/Y 比值将峨眉山玄武岩分为高 Ti 和低 Ti 两类,前者 $w(\text{TiO}_2) > 2.0$, $\text{Ti}/\text{Y} > 400$, 后者则相反^[10]。高 Ti 玄武岩遍布整个峨眉火成岩省,而低 Ti 玄武岩仅分布在四川盐源地区、云南大理、宾川和富宁地区,构成峨眉山玄武岩系的下段或中下段。高 Ti 峨眉山玄武岩一般具有较稳定的微量元素成分,并且显示类似洋岛玄武岩的地球化学特征,反映出较弱的地壳混染^[8]。而低 Ti 玄武岩具有明显的 Nb-Ta 负异常,变化较大的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($= 0.43 \sim -6.7$) 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 ($= 0.7049 \sim 0.7078$), 显示出较强列的地壳混染。根据云南宾川地区峨眉山玄武岩的地球化学特征计算推测低 Ti 玄武岩浆为尖晶石二辉橄榄岩地幔经 16% 的部分熔融形成的,而高 Ti 玄武岩浆为石榴石二辉橄榄岩地幔经 1.5% 的部分熔融形成的^[10]。

1.4 峨眉山火成岩省的分带性

根据峨眉山玄武岩系厚度、成分、岩性变化、以及侵入岩的岩石组合和规模在空间上的规律性变化可以将峨眉山火成岩省具分为内带和外分带。首先,峨

眉山玄武岩从火成岩省的中心向外逐渐减薄(图 1)。在火成岩省的内带玄武岩厚度超过 2000m,在云南宾川一带最厚达 5 000 m;而在火成岩省的边缘,玄武岩减薄为数十至百余米。攀西地区峨眉山玄武

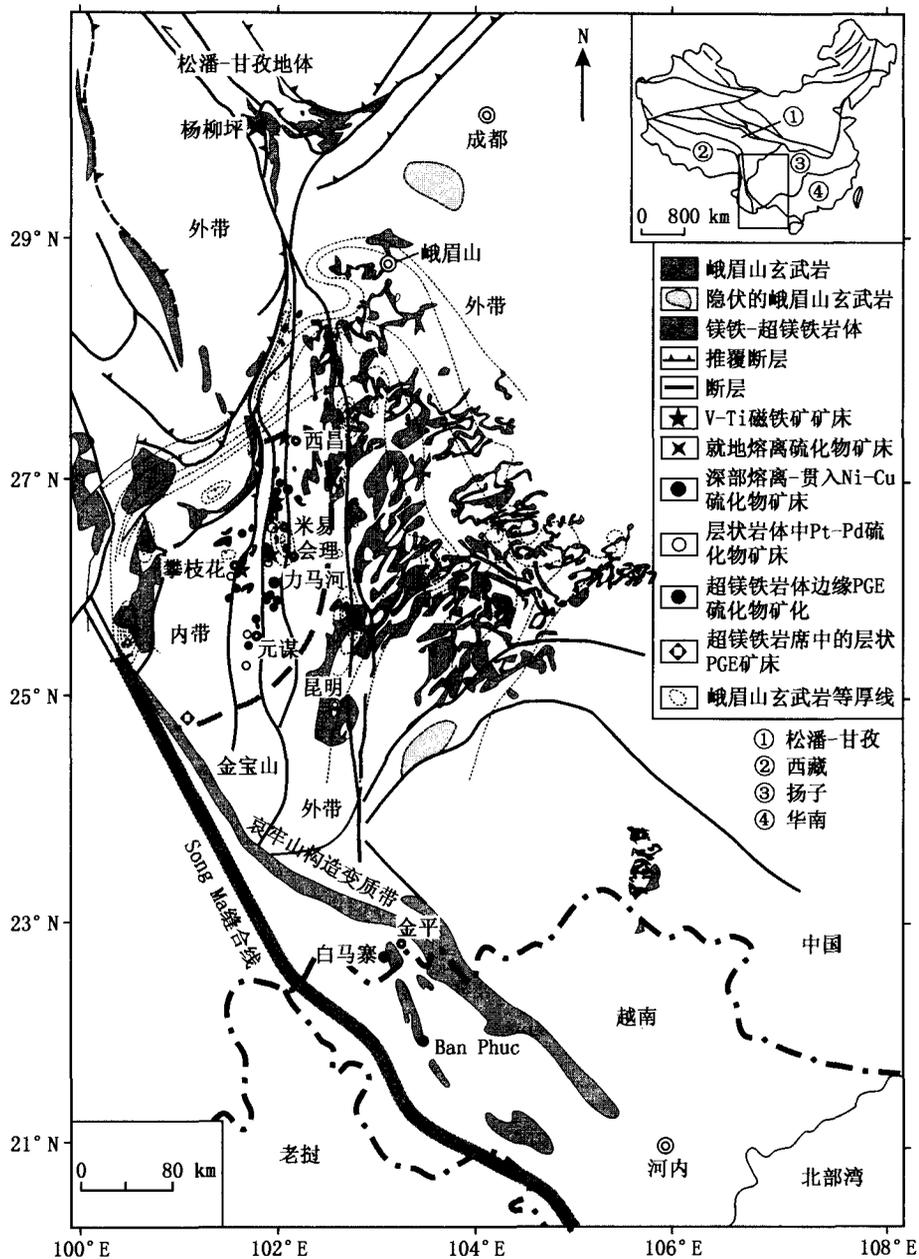


图 1 峨眉山火成岩省岩浆矿床分布图 [8,27,28]

由内带向外带峨眉山玄武岩逐渐减薄,岩浆矿床主要集中在内带,反映出成矿作用与玄武岩浆作用强度的密切关系

Fig. 1 Locations of magmatic deposits in the Emeishan Large Igneous Province [8,27,28]

岩的缺失是由于中新世以来的隆升造成的(图 1)。其次,低 Ti 玄武岩主要出现在火成岩省的内带玄武岩系的中下部,而在火成岩省外带,如:四川丹巴杨柳坪地区,仅有少量出现(图 1) [10,11,13,15]。此外,众多的镁铁-超镁铁岩体,包括大规模的层状岩体,以及晚期碱性岩体出现在内带峨眉山火成岩省的 V-Ti 磁铁矿矿床和大部分 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床分布在火成岩省的内带,外带则仅有少量的含铜镍

硫化物矿床或矿化的镁铁-超镁铁杂岩体,如火成岩省北缘四川丹巴地区和南缘云南金平-越南北部地区(图 1),自然铜矿化则较为广泛地分布在外带玄武岩层位中。

2 峨眉山火成岩省的 V-Ti 磁铁矿矿床

大型-超大型的 V-Ti 磁铁矿矿床只形成于峨眉

火成岩省内带,其中攀枝花、红格、白马和太和四个层状岩体赋存的 V-Ti 磁铁矿储量超过 10^{10} T,储量在 10^9 T~ 10^{10} T 的 V-Ti 磁铁矿床有 10 处,攀西地区 V-Ti 磁铁矿探明总储量达到 82×10^8 T^[29]。这些矿床不但是我国重要的 V, Ti, Fe 资源产地,也是峨眉火成岩省成矿作用的重要组成部分。

2.1 层状岩体的基本特征

层状岩体多呈大中型岩床或岩盆状侵入于新元古代变质岩或古生代地层中,岩体长数公里至 20 km 不等,厚度数百米至 2 km 以上^[22,30]。新街岩体和红格岩体的锆石年龄数据表明层状岩体形成于中二叠世末(258 Ma~263 Ma)^[12,25],为峨眉地幔柱产物。这些层状岩体由单辉橄榄岩、辉石岩、橄长岩、辉长岩、闪长岩等岩石构成。主要造岩矿物有橄榄石、富钛普通辉石、斜长石、普通角闪石,无斜方辉石。岩体岩相旋回和韵律层发育。岩相旋回表现为岩相组合的规律性重复,反映了多次补充的岩浆体系的分异特征,而韵律为固化面推进与岩浆化学扩散的耦合的结果^[31,32]。总体而言,从下向上基性程度逐渐降低。

2.2 V-Ti 磁铁矿矿体的主要特征

V-Ti 磁铁矿呈层状或似层状,厚数米至数十米,与围岩呈突变或短程渐变关系。矿石以稠密浸染状和浸染状为主,磁铁矿和钛铁矿为主要矿石矿物。浑圆状的橄榄石、富钛普通辉石和斜长石颗粒在矿石中被磁铁矿包裹说明氧化物熔离作用晚于这些硅

酸盐矿物的结晶。普通辉石和斜长石边缘常出现普通角闪石反应边,说明这些硅酸盐矿物颗粒与氧化物矿浆及其中挥发分的反应关系。这些特征表明其中某些致密块状 V-Ti 磁铁矿层很可能是富铁矿浆的产物,虽然铁矿浆是如何形成的还不清楚^[33]。由分离结晶作用形成的磁铁矿矿石呈浸染状或稀疏浸染状,矿体为层状,产于岩相旋回的下部,矿体与围岩呈渐变过渡关系。

3 峨眉火成岩省 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床的成因类型和分布

据不完全统计,峨眉火成岩省境内已发现岩浆硫化物矿床和矿点 40 余处(图 1),其中包括杨柳坪大型 Ni-Cu-(PGE) 矿床,金山山大型 Pt-Pd 硫化物矿床,力马河大型和白马寨中型 Ni-Cu 硫化物矿床等,累计探明储量 Ni 超过 160 万吨, Cu 超过 45 万吨, PGE 约 100 吨。根据矿体产状、矿石组成和矿石中硫化物含量和 Ni, Cu, PGE 的品位,将这些岩浆硫化物矿床划分为 5 类(表 1)。

3.1 就地熔离 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床

这类矿床仅发现于火成岩省北缘,具有不少可以与著名的俄罗斯 Noril'sk-Talnakh Ni-Cu-PGE 硫化物矿床相对比的特点而备受重视,也是目前研究程度较高的矿床类型^[17,18]。

其代表性矿床是四川丹巴地区杨柳坪和正字岩

表 1 峨眉火成岩省主要岩浆硫化物矿床和矿(化)点一览表

Table 1 Magmatic sulfide ore deposits in the Emeishan Large Igneous Province

硫化物矿化类型	代表性矿床、矿(化)点	含矿岩体岩石组合	矿床主要特征	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
就地熔离 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床	峨眉火成岩省北部边缘四川丹巴杨柳坪、正字岩窝、协作坪、打枪岩窝	由下至上为蛇纹石岩、滑石岩、次闪石岩、蚀变辉长岩	层状矿体产于岩体底部,向下硫化物增多并出现致密块状矿体, Ni, Cu 和 PGE 均达到工业品位	-3.2~0.4
含 V-Ti 磁铁矿的层状岩体内的 PGE 硫化物矿床	火成岩省内带四川新街和云南安益 PGE 硫化物矿床	橄榄岩、单斜辉石岩和辉长岩构成 3 个大的旋回	3 层 PGE 硫化物矿体产于岩体下部,硫化物 < 3%, 含 PGE 1×10^{-3} ~ 3×10^{-3} , Ni 和 Cu 含量低	
深部熔离-贯入型 Ni-Cu 硫化物矿床	火成岩省内带四川力马河、清矿山、秧田沟、清水河、黄草坪、丹桂、垭口、核桃树、拱青山、云南朱布、猛林沟等	橄榄岩、橄榄辉石岩、辉石岩、辉长岩、辉长闪长岩,岩相间可能为多期贯入关系	硫化物矿体呈不规则状产于岩体侧部、中部或上部。Ni 和 Cu 品位高, PGE 低 (< 0.3×10^{-3})	3.6~5.4
	火成岩省南部边缘的白马寨、越南 Ban Phuc	橄榄岩、辉石岩和辉长岩		
超镁铁岩席内层状 PGE 矿床	火成岩省内带的云南金山山、迎风等	单辉橄榄岩、辉橄岩和橄辉岩	多层 PGE 硫化物矿体,主要产于岩体下部,矿层硫化物含量 < 3%, 而铬铁矿含量可高达 20%, 高 Pt + Pd, Ni 和 Cu 低	0.69~5.78, 最高达 15
镁铁-超镁铁岩体边缘 PGE 硫化物矿化	火成岩省内带的四川大槽、杨合五、黄土碛等	橄榄岩、橄辉岩、辉石岩和辉长岩	弱的 PGE 硫化物矿化发育在边缘岩相带	

① Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, et al. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Pangzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan province, SW China, *J. of Petrol.* (In press).

窝矿床,含矿岩席顺层侵入泥盆-二叠系地层。岩体从下向上由蛇纹石岩、滑石岩、次闪石岩和变质辉长岩构成,恢复原岩为橄榄岩、橄榄辉石岩、单辉岩和

辉长岩,显示出良好的结晶分异系列。主矿体呈层状产于岩体的下部。矿体中硫化物含量向下逐渐增加,透镜状致密块状矿体产于浸染状矿体底部或岩体底板裂隙中,显示原地熔离的特点。杨柳坪和正字岩窝两个矿段合计探明储量 Ni 45.5×10^4 T, Cu 14.8×10^4 T, PGE 56.7 T^[18,34]。

上覆峨眉山玄武岩可分为下、中、上三段,主要由高 Ti 玄武岩构成,仅上段的中亚段为低 Ti 玄武岩。玄武岩的中岩段 PGE 强烈亏损,地球化学特征显示出玄武岩中 PGE 的亏损与硫化物的熔离有关,即与岩席中 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的形成有关^[17,18]。这些特征类似于 Noril'sk 矿床的成矿作用,所不同的是围岩并没有提供成矿作用所需的 S,虽然下地壳的同化混染是岩浆 S 饱和的主要准备,但最终是浅部岩浆房的镁铁质矿物的分离结晶导致硫化物的熔离和成矿^[18]。

3.2 含 V-Ti 磁铁矿层状岩体内的 PGE 硫化物矿床

这类矿床发育于火成岩省内带,特殊之处在于同时出现了 V-Ti 磁铁矿和 PGE 硫化物矿化。代表性的矿床有四川米易新街矿床和云南牟定安易矿床。新街岩体侵入于峨眉山玄武岩系的下部,有 3 个旋回,每一个旋回由下至上由橄榄岩、辉石岩和辉长岩构成。主要的 V-Ti 磁铁矿层产于底部和中部旋回的顶部,至少由三层 3 m~5 m 厚的 Pt-Pd 富集层发育于底部旋回。(Pt-Pd)富集层仅含 <1% 的硫化物, $w(\text{Pt}+\text{Pd})$ 为 $1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$, 同时有富铬铁矿和磁铁矿的薄层,其氧化物含量大 5%~15%, 最高达 20%。目前的研究表明 Pt-Pd 富集层的形成受新岩浆注入混合和氧化物的结晶作用的控制^[25]。安易岩体的 Pt-Pd 富集层出现在岩体的下部,平行岩体底界展布。

3.3 深部熔离贯入型 Ni-Cu 硫化物矿床

这类矿床数量最多,是峨眉火成岩省最重要的岩浆硫化物矿床,分布在四川德昌-会理、云南元谋,和火成岩省南部边缘的云南金平-越南北部^[28]。典型矿床包括会理力马河 Ni-Cu 硫化物矿床和金平白马寨 Ni-Cu 硫化物矿床^[35,36]。矿床赋存于小型镁铁-超镁铁杂岩体内,矿体常分布在岩体的侧部或中上部,与其它岩相呈现的不协调的关系难以用原地分离结晶解释。矿石以 Cu 和 Ni 为主, PGE 含量很低。

力马河岩体的浸染状矿体和致密块状矿体均沿岩体西侧断层分布。矿床的 Ni 储量为 54×10^4 T, Cu 储量 32×10^4 T。浸染状矿体呈直立的透镜状或

脉状,一般产于橄榄岩相内,厚度随橄榄岩厚度增大而增大,可以占橄榄岩相厚度的 1/2~3/4。块状矿体呈不规则状产于岩体的下部和西侧,可以刺穿浸染状矿体而与岩体围岩或橄榄岩直接接触。

力马河矿床的上述特点说明岩浆分异和硫化物熔离发生在深部岩浆房,岩体和矿体为深部岩浆房不含硫化物的岩浆和富含硫化物的熔离依次向上贯入的结果,低的 PGE 含量说明发生过不止一次的硫化物熔离作用。

3.4 超镁铁岩席内层状 PGE 矿床

这类矿床产于超镁铁岩席中。矿化以少硫化物富 PGE 贫 Cu-Ni 为特点, PGE 硫化物矿体和矿化体呈层状或透镜状产出。典型代表是火成岩省内带的云南弥渡金宝山 Pt-Pd 硫化物矿床^[27]。金宝山岩席近顺层侵入于泥盆系地层中,主要由单辉橄榄岩、辉橄岩和橄辉岩构成。单辉橄榄岩、辉橄岩和橄辉岩的交替出现显示出弱的韵律层理^[38]。3 层 Pt-Pd 矿层产于岩体的中下部,平行岩体底板展布,厚度 4 m~16 m,矿石硫化物含量一般小于 3%,但铬铁矿可高达 9%~20%。矿石平均品位(Pt+Pd)为 $1 \times 10^{-3} \sim 1.75 \times 10^{-3}$, PGE 储量约为 45 T, Ni 和 Cu 的质量分数分别小于 0.2% 和 0.3%。这些特征表明金宝山岩体可能为岩浆通道, Pt-Pd 硫化物的熔离与岩浆氧化物的分离结晶导致的硫逸度增加有关。

3.5 镁铁-超镁铁岩体边缘 PGE 硫化物矿化

这类 PGE 硫化物矿化发生在小型镁铁-超镁铁岩体边缘内接触带,主要分布在会理-德昌一带,以大槽和杨合五岩体边缘的硫化物矿化为代表。杨合五岩体侵入于元古代变质岩,呈同心环状,从中心向外依次由单辉橄榄岩、单辉橄辉岩、单斜辉石岩和辉长岩构成,辉石岩和辉长岩构成边缘相。PGE 硫化物矿化发生在内接触带。硫化物呈稀疏浸染状,以 PGE 硫化物矿化为主。 $w(\text{Pt}+\text{Pd})$ 一般为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3}$, Ni 品位一般小于 0.5%。PGE 矿化很可能与围岩同化混染有关。

4 两类含矿岩体的岩石、地球化学特征及其与峨眉山玄武岩的关系

4.1 含 V-Ti 磁铁矿床的层状岩体与含硫化物镁铁-超镁铁岩体的岩石学特征

含 V-Ti 磁铁矿床的层状岩体与含 Ni-Cu-(PGE)硫化物镁铁-超镁铁岩体在规模、岩石组合、造岩矿物成分、和含矿性等几方面均具有较为显著

的区别(表 2),这些区别暗示它们可能具有不同的原始岩浆,经历了不同的演化过程。

表 2 含 V-Ti 磁铁矿的层状岩体与含 Ni-Cu-(PGE)硫化物 镁铁-超镁铁岩体岩石学特征对比

Table 2 Correlation of lithologica characters between V-Ti bearing magnetite and Ni-Cu-(PGE) mafic-ultramafic rocks

含 V-Ti 磁铁矿的层状岩体	含 Ni-Cu-(PGE)硫化物 镁铁-超镁铁岩体
韵律层理发育的大型层状岩体	韵律层理不发育的小型岩席或岩体
一般以镁铁质岩石为岩体主体,显示较充分的岩浆原地分异	超镁铁岩为主,可以是玄武岩的岩体,显示原地分异特征,也可以为多期岩浆或矿浆贯入的产物
主要造岩矿物包括橄榄石、普通辉石和斜长石	主要造岩矿物除橄榄石、普通辉石、斜长石外,还有斜方辉石
包含大型和超大型 V-Ti 磁铁矿床	赋存大型-小型 Ni-Cu-(PGE),Ni-Cu 或 PGE 硫化物矿床或矿化

4.2 两类含矿岩体的地球化学特征及其与高 Ti 和低 Ti 玄武岩的关系

前人的研究工作积累了大量上述两类含矿岩体的岩石化学数据,但高质量的微量元素和放射性同位素数据十分有限。不过,这并不妨碍对这两类含矿岩体与高 Ti 和低 Ti 玄武岩的关系进行初步判断。在氧化物相关图上,含 V-Ti 磁铁矿的层状岩体和高 Ti 玄武岩地显示出与含 Ni-Cu-(PGE)硫化物镁铁-超镁铁岩体和低 Ti 玄武岩明显不同的演化趋势,前者具有高的 TiO_2 , Fe_2O_3 和 P_2O_5 , 比较低的 MgO 和 $\langle FeO \rangle / TiO_2$ 比值,而后者则具有较高的 MgO 含量和低的 TiO_2 , Fe_2O_3 和 P_2O_5 (图 2)。不同的演化趋势分别代表了高 Ti 和低 Ti 玄武岩浆两个岩浆序列。

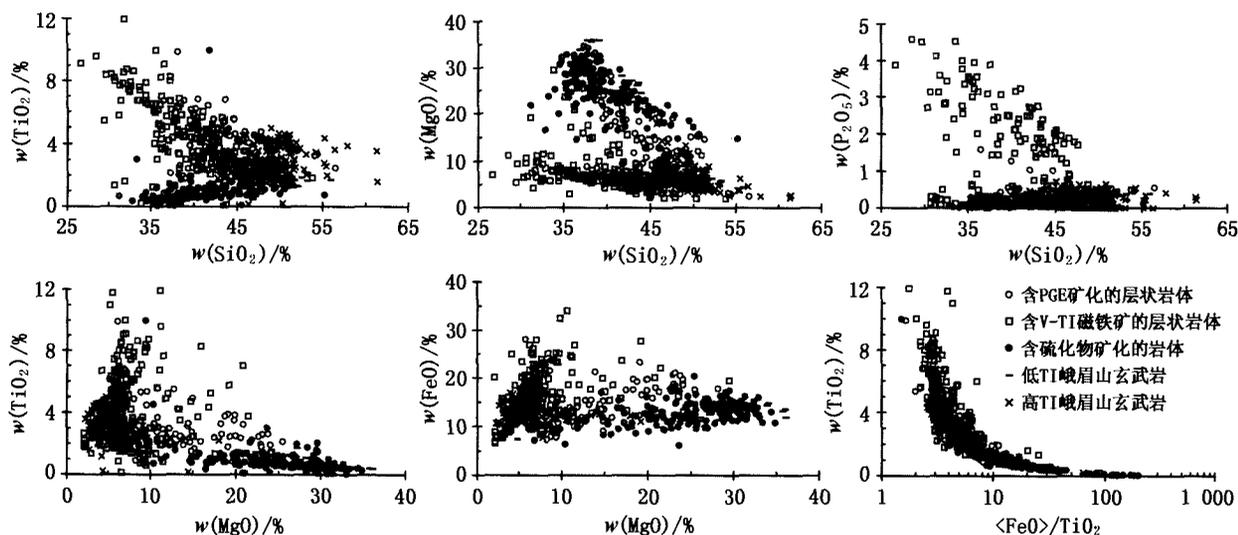


图 2 峨眉山玄武岩及类含矿镁铁-超镁铁岩体的氧化物相关图

含 V-Ti 磁铁矿的层状岩体与高 Ti 玄武岩投影在具有相同的演化趋势含硫化物矿化的镁铁-超镁铁岩体与低 Ti 玄武岩具有相同的演化趋势

Fig. 2 Correlations between oxides of the Emeichsan basalts and the mineralized mafic-ultramafic intrusions

在空间分布上,含 V-Ti 磁铁矿的层状岩体主要出现在内带偏东部地区,这也正是火成岩省内带以高 Ti 玄武岩为主的区域,显示出两者较好的空间耦合关系(图 1)。含 Ni-Cu-(PGE)硫化物镁铁-超镁铁岩体虽然较集中地分布在火成岩省的内带,但同时也出现在火成岩省的南部和北部边缘,说明其空间选择性不强。那么,究竟是什么因素控制着峨眉火成岩省两类矿床的形成及其空间分布? 两类矿床的形成与地幔柱的动力学过程有什么关系?

4.3 V-Ti 磁铁矿床的控矿因素

徐义刚等认为攀西地区 V-Ti 磁铁矿床与该地区高 Ti 玄武岩岩浆的分离结晶作用有密切的成因联

系。攀西地区峨眉山玄武岩岩浆的结晶分异符合 Bowen 趋势,随着橄榄石和辉石的分离结晶,岩浆中氧逸度逐渐增高,最终导致 Ti-Fe 氧化物的结晶成矿。而贵州的峨眉山玄武岩结晶分异遵循 Fenner 趋势,分离结晶作用始终没有导致氧逸度达到 Ti-Fe 氧化物结晶所需要的临界值。宋谢炎等根据攀枝花岩体 V-Ti 磁铁矿矿石的结构特征,提出两期成矿的观点。第一期为 Ti-Fe 氧化物矿浆成矿,形成岩体底部主要的厚大矿体;第二期为分离结晶成矿,形成了岩体中部的薄矿层。这两期成矿虽然机制不同,但均受控于岩浆氧逸度的增高和分离结晶作用过程中岩浆中 TiO_2 和 Fe_2O_3 含量的增高。无论如何,分

离结晶和氧逸度的变化是控制 V-Ti 铁矿床形成的关键因素^[33]。

4.4 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的关键控矿因素

国内外研究表明大型-超大型岩浆 Ni-Cu 硫化物矿床的形成有 3 个重要的控制因素:(1)原始岩浆 S 不饱和^[40];(2)岩浆演化使得岩浆 S 过饱和^[17,41];(3)大量玄武岩浆参与^[42]。这说明高 Ti 或低 Ti 性

质并不是玄武岩浆成矿专属性的决定性因素。

如前所述,杨柳坪 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的形成与高 Ti 玄武岩有关,而在峨眉火成岩省内带 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床主要与低 Ti 玄武岩浆有关。图 3A 中,杨柳坪地区峨眉山玄武岩中岩段具有明显高于上下岩段的 Zr/Nb 比值和较小的 Nb/Y 比值,显示出明显的下地壳混染特点,这种同化混染

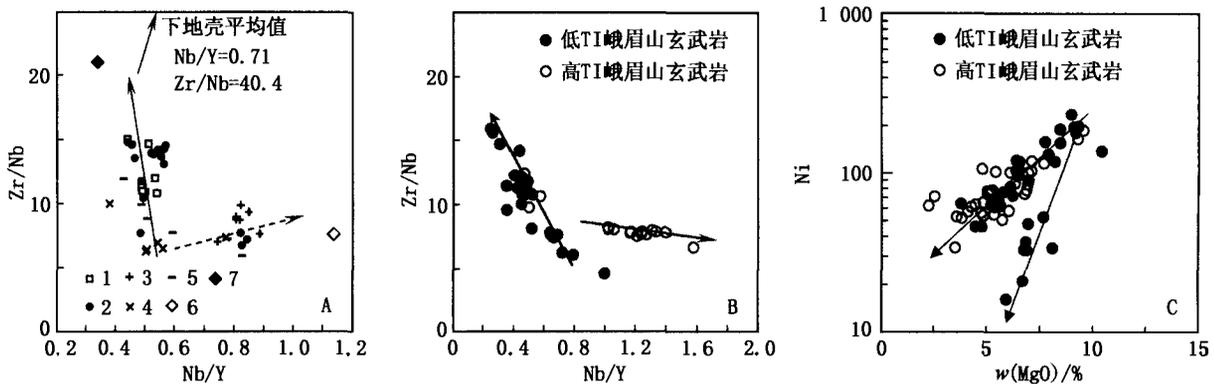


图 3 峨眉火成岩省内带和杨柳坪地区峨眉山玄武岩岩浆演化特征

A. 杨柳坪地区峨眉山玄武岩 Nb/Y-Zr/Nb 相关图,显示中岩段遭受了强烈的下地壳同化混染,而上、下岩段则以分离结晶为主;B. 火成岩省内带低 Ti 玄武岩也经历了较强烈的下地壳同化混染,而高 Ti 玄武岩则受分离结晶控制;C. 一些低 Ti 玄武岩显示出 Ni 的亏损,说明由硫化物的熔离,这可能与内带岩浆硫化物成矿作用有关;1. 玄武岩下段;2. 玄武岩中段;3. 玄武岩上段下亚段;4. 玄武岩上段中亚段;5. 玄武岩上段上亚段;6. 上地壳平均值;7. 扬子西缘结晶基底平均值

Fig. 3 Magmatic evolution of the Emeishan flood basalts in the Inner-and Outer-Zones of the Emeishan Large Igneous Province

是硫化物熔离的重要准备^[18]。虽然火成岩省内带玄武岩岩石组合与杨柳坪地区有较大区别,但根据图 3B 的投影显示内带低 Ti 玄武岩也经历了强烈的同化混染,而高 Ti 玄武岩则受分离结晶控制,同时,一些低 Ti 玄武岩也确实出现了 Ni 的亏损(图 3C)。这暗示火成岩省内带岩浆硫化物矿化很可能与低 Ti 玄武岩浆因同化混染作用导致的硫化物过饱和和有关。因此,认为就整个峨眉火成岩省而言,岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿化既可以与低 Ti 玄武岩浆有关,也可以与高 Ti 玄武岩浆有关,成矿作用的关键因素是原始岩浆 S 不饱和,以及强烈的地壳物质的同化混染。

5 峨眉火成岩省岩浆矿床与地幔柱动力学

综上所述,峨眉火成岩省两类岩浆矿床的空间分布及其与高 Ti 和低 Ti 玄武岩的成因联系有如下规律:(1)全部的 V-Ti 铁矿床和多数岩浆硫化物矿床发生在火成岩省的内带。(2)V-Ti 铁矿成矿

受高 Ti 玄武岩的分离结晶控制。(3)岩浆硫化物矿床在内带与低 Ti 玄武岩浆有关,在外带则可能与高 Ti 玄武岩浆有关。

峨眉火成岩省岩浆矿床的这些特征说明成矿作用与地幔柱的动力学过程有非常密切的联系,V-Ti 铁矿床和岩浆硫化物矿床是地幔柱不同阶段的产物。由于火成岩省内带低 Ti 玄武岩浆喷发早于高 Ti 玄武岩^[11],所以,岩浆硫化物矿化早于 V-Ti 铁矿床的形成。在火成岩省的北缘,杨柳坪地区玄武岩的下岩段很薄,而上岩段厚度约占整个玄武岩系厚度的 50%,因此,与硫化物成矿有关的中岩段也是玄武岩浆活动早期阶段的产物。所以,整个峨眉火成岩省岩浆硫化物成矿作用都早于 V-Ti 铁矿床的成矿作用。

当来自地幔深处的地幔柱到达岩石圈底部横向弥散开来形成“蘑菇状头冠”,因压力降低发生广泛的减压熔融。由于地幔柱的中心部位较高的温度使得地幔柱内带不同深度的地幔发生了广泛的较高级度的熔融,首先产生了 S 不饱和的低 Ti 玄武岩浆,而远离地幔柱的外缘,部分熔融深度较大,但仍然形

成了熔融程度较高的 S 不饱和的高 Ti 玄武岩浆。当这些玄武岩浆进入下地壳时,发生同化混染-分离结晶。这个过程可能直接导致硫化物饱和熔离,形成不同成分的岩浆分层,这时岩浆依次继续上侵形成力马河和白马寨式的 Ni-Cu 硫化物矿床或不含矿的岩体。这类硫化物矿床低的 PGE 含量说明发生过硫化物的重复熔离。

深部岩浆房的同化混染-分离结晶过程也可能并没有造成硫化物熔离,这种岩浆继续上侵到浅部岩浆房中后又经历了一定程度的分离结晶终于到达硫化物饱和,形成杨柳坪式 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床或金宝山式的 PGE 硫化物矿床。如果围岩条件适宜,还可能在岩体边缘由于同化混染形成 PGE 硫化物矿化,如大槽和杨合五岩体。上述分析说明玄武岩浆高的部分熔融程度以及强烈的同化混染和分离结晶是峨眉火成岩省岩浆硫化物成矿的关键控制因素。地幔柱活动中晚期形成高 Ti 玄武岩浆,尽管其部分熔融程度可能较 Ti 玄武岩为低,但峨眉火成岩省外带高 Ti 玄武岩较高的 PGE 丰度说明其原始岩浆是 S 不饱和的,如:峨眉山地区和川黔交界地区高 Ti 玄武岩 Pt 和 Pd 丰度均可超过 10×10^{-6} [43,44]。另一方面,新街和安益岩体即有 V-Ti 磁铁矿矿床,又有 PGE 硫化物矿化说明部分熔融程度较高的玄武岩经分离结晶同样可以导致 V-Ti 磁铁矿成矿。这说明 V-Ti 磁铁矿床的形成并不一定要求原始岩浆

具有低的部分熔融程度,Bowen 趋势的分离结晶是使得岩浆氧逸度增高并最终导致氧化物的熔离或结晶,形成 V-Ti 磁铁矿矿床的关键因素。由于地幔柱中心部分岩浆产量巨大,因此,在峨眉火成岩省内带不但玄武岩厚度最大,也提供了充足的成矿物质,成矿作用也最强烈。

6 结 论

- 6.1 峨眉火成岩省的成矿作用具有明显空间分带和时序先后,反映出与地幔柱动力学过程密切的联系。
- 6.2 全部的 V-Ti 磁铁矿床和多数岩浆硫化物矿床发生在火成岩省玄武岩浆活动最为剧烈的内带,反映出大量连续的玄武岩浆供给对大规模成矿的重要意义。
- 6.3 岩浆硫化物成矿发生在地幔柱活动早期阶段,而 V-Ti 磁铁矿床的形成发生在中晚期阶段。
- 6.4 岩浆硫化物矿床成矿有三个主要控制因素:(1)原始岩浆高的部分熔融程度和 S 不饱和,(2)强烈的下地壳物质同化混染,(3)一定程度的分离结晶。
- 6.5 V-Ti 磁铁矿床仅与高 Ti 玄武岩浆有关,受 Bowen 趋势的分离结晶作用控制。

参考文献

- [1] White R S, McKenzie D P. Mantle plume and flood basalts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 17 543-17 585.
- [2] Ernst R E, Buchan K L. Recognizing mantle plume in the geological record[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2003, 31: 469-523.
- [3] Torsvik T H, Smethurst M A, Meert J G, et al. Continental break up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic - A tale of Baltica and Laurentia[J]. *Earth-Science Reviews*, 1996, 40: 229-258.
- [4] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents; evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122 (1-4): 85-109.
- [5] Naldrett A J, Lightfoot P C. Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk region, Siberia: A model for giant magmatic sulfide deposits associated with flood basalts[A]. In: Whiting B H, Hodgen C V, Mason R eds; *Giant Ore Deposits Sep Publ 2*[C]. 1993, 81-123.
- [6] Lightfoot P C, Hawkesworth C J. Flood basalts and magmatic Ni, Cu, and PGE sulphide mineralization; comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Traps) and west Greenland sequences[A]. In: Mahoney, Coffin eds; *Large Igneous Province-continental, oceanic, and planetary flood volcanism*[C]. Geophysical Monograph, 1997, 100: 357-380.
- [7] Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23: 889-892.
- [8] Song X Y, Zhou M F. Geochemical constraints on the mantle source of the Upper Permian Emeishan Continental Flood Basalts, Southwestern China, Inter[J]. *Geol Rev*, 2001, 43: 213-225.
- [9] Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, et al. Late Permian Rifting of the South China Craton Caused by the Emeishan Mantle Plume[J]. *J Geol Soc*, 2004a, 161: 773-781.
- [10] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 58: 145-168.
- [11] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. *Geology*, 2004, 32: 917-920.

- [12] Zhou M F, Malpas J, Song X Y, *et al.* A temporal link between the Emeishan Large Igneous Province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction[J]. **Earth Planetary Science Letters**, 2002, 196:113-122.
- [13] Xiao L, Xu Y G, Chung S L. Chemostratigraphic correlation of Upper Permian lava succession from Yunnan Province, China; Extent of the Emeishan igneous province[J]. **International Geology Review**, 2003, 45:753-766.
- [14] Ali J R, Lo C H, Thompson G M, *et al.* Emeishan Basalt Ar-Ar overprint ages define several tectonic events that affected the western Yangtze platform in the Mesozoic and Cenozoic[J]. **Journal of Asian Earth Sciences**, 2003, 23:163-178.
- [15] He B, Xu Y G, Chung S L, Xiao L, *et al.* Sedimentary evidence for a rapid crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. **Earth and Planetary Science Letter**, 2003, 213:389-403.
- [16] 徐义刚. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应[J]. **地学前缘**, 2002, 9(4):341-352.
- [17] Song X Y, Zhou M F. The Ni-Cu-(PGE) Magmatic Sulfide Deposits in the Yangliuping Area Within the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. **Mineralium Deposita**, 2003, 38:831-843.
- [18] Song X Y. Geochemistry of Permian Flood Basalts and Related Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing sills in Yangliuping, Sichuan Province, China[D]. Ph. D degree thesis at The University of Hong Kong, 2004b, 274.
- [19] 陶 琰, 罗泰义, 高振敏, 等. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化与峨眉山玄武岩的关系[J]. **地质论评**, 2004, 50(1):9-15.
- [20] 高振敏, 张 乾, 陶 琰, 等. 峨眉山地幔柱成矿作用分析[J]. **矿物学报**, 2004, 24(2):99-104.
- [21] 胡瑞忠, 陶 琰, 钟 宏, 等. 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.
- [22] 张云相, 骆耀南. **攀西裂谷**[M]. 北京:地质出版社, 1988.
- [23] 范蔚茗, 王岳军, 彭头平, 等. 桂西晚古生代玄武岩 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束[J]. **科学通报**, 2004, 49(18):1 892-1 900.
- [24] Hanski E, Walker R J, Huhma H. Origin of the Permian-Triassic komatiites, northwestern Vietnam[J]. **Contrib Mineral Petrol**, 2004, 147:453-469.
- [25] Zhong H, Yao Y, Hu S F, *et al.* Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Hongge layered intrusion, southwestern China[J]. **Inter Geol Rev**, 2003, 45:371-382.
- [26] 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. **地质学报**, 2004, 78(2):171-180.
- [27] Zhou M F, Yang Z X, Song X, *et al.* Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China[A]. In: Cabri L J. **The geology, geochemistry, mineralogy, mineral beneficiation of the Platinum-Group Elements**. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum[C]. Spe. 2002, 54:619-636.
- [28] Glotov A I, Polyakov G V, Tran Trong Hoa, *et al.* Ngo Thi Phuong, Hoang Huu Thanh, Tran Quoz Hung, Petrova T. E. The Ban Phuc Ni-Cu-PGE deposit related to the Phanerozoic komatiite basalt association in the Song Da rift, northwestern Vietnam[J]. **Can Mineral**, 2001, 39:573-589.
- [29] 攀西地质大队. 攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿共生矿成矿规律于预测研究报告[R]. 1984, 273.
- [30] 刘朝基, 曾绪伟, 金久堂, 等. **康滇地区基性超基性岩**[M]. 重庆:重庆出版社, 1988.
- [31] 宋谢炎, 王玉兰, 张正阶. 层状侵入体韵律层理成因的关键因素[J]. **成都理工学院学报**, 1997, 24(4):61-64.
- [32] 攀西地质大队. 攀西裂谷火成岩岩石组合[R]. 1985.
- [33] 宋谢炎, 王玉兰, 张正阶. 层状侵入体韵律层理形成过程的定量模拟——以攀枝花岩体为例[J]. **地质学报**, 1999, 73(1):37-46.
- [34] 宋谢炎, 张正阶, 王玉兰. 攀枝花层状侵入体微韵律层理及岩浆演化特征[J]. **矿物岩石**, 1994, 14(4):37-45.
- [35] 四川省地质调查院. 四川省丹巴地区铂矿评价预查地质报告[R]. 2001.
- [36] 姚家栋. **西昌地区硫化铜(铂)镍矿床成因**[M]. 重庆:重庆出版社, 1988.
- [37] 云南省志编委会. **云南省志卷四地质矿产志**[M]. 昆明:云南人民出版社, 1997.
- [38] 陶 琰, 高振敏. 云南金宝山铂钨矿床成矿机制探讨[J]. **矿物岩石地球化学通报**, 2000, 19.
- [39] Brozdowski R A, Page M L. Jinbaoshan (JBS) Pt-Pd-Ni-Cu deposit, Yunnan, P R China, Recent Advances in magmatic ore systems in mafic-ultramafic rocks[A]. In: Shellnutt J G, Zhou M F, Pang K N eds; **Abstract vol of IGCP 479 Hong Kong workshop**[C]. 2004:67-69.
- [40] 徐义刚, 梅厚钧, 许继峰, 等. 峨眉山大火成岩省钟两类岩浆分异趋势及其成因[J]. **科学通报**, 2003, 48(4):383-387.
- [41] Keays R R. The role of the komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits[J]. **Lithos**, 1995, 34:1-18.
- [42] Lightfoot P C, Naldrett A J, Gorbachev N S, *et al.* Chemostratigraphy of Siberian Flood Basalts lavas, Noril'sk district, Russia; Implication and source of flood basalt magmas ad their associated Ni-Cu mineralisation[A]. In: Lightfoot P C, Naldrett A J eds; **Proceedings of the Sudbury-Noril'sk symposium**. Ontario Geological Survey Special Publication[C]. 1994, (5):283-312.
- [43] Naldrett A J. World-class Ni-Cu-PGE deposits; key factors in their genesis[J]. **Mineralium Deposita**. 1999, 34:227-240.
- [44] 张成江, 李晓林. 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学[J]. **岩石学报**, 1998, 14(3):299-304.
- [45] 李晓敏, 郝立波, 甘树才, 等. 黔西地区峨眉山玄武岩(东岩区)铂族元素地球化学特征[J]. **地质地球化学**, 2003, 31(4):29-34.

GENETIC LINKS OF MAGMATIC DEPOSITS IN THE EMEISHAN LARGE IGNEOUS PROVINCE WITH DYNAMICS OF MANTLE PLUME

SONG Xie-yan^{1,2}, ZHANG Cheng-jiang², HU Rui-zhong¹, ZHONG Hong¹,
ZHOU Mei-fu³, MA Run-ze², LI You-guo²

1. *Key Lab of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;*

2. *College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;*

3. *Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong,
Hong Kong, Pokfulam Road, China*

Abstract: The Emeishan large igneous province in the western Yangtze Block was resulted from a mantle plume at end of the Middle Permian. Four super-large V-Ti-magnetite deposits and 10 large-medium Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits have been explored in the Emeishan large igneous province. Precise age data indicated that these ore-bearing mafic-ultramafic intrusions were produced by the same mantle plume that caused the Emeishan flood basalts at 260 Ma \pm . The mafic-ultramafic intrusion hosting V-Ti-magnetite deposits and Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits are distinguished in localization, scale, rock-assemblages, components of rock-forming minerals.

The Emeishan large province can be divided to Inner- and Outer-Zones. The Inner-Zone is marked by large thickness of the Emeishan flood basalts, large layered intrusions, mafic-ultramafic intrusive bodies, low-Ti basalts, alkaline intrusions, and various mineralizations related to the mantle plume. The basalts become thinner and consist of high-Ti basalts in the Outer-Zone where fewer mafic-ultramafic bodies are exposed. Special and geochemical relationship between the two type of magmatic deposits and high- and low-Ti basalts, the study on petrogenetic links between the Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits and the Emeishan flood basalts in the Yangliuping area indicate that the magmatic deposits formed in different dynamic stages of the mantle plume. The V-Ti-magnetite deposits are associated with the high-Ti basaltic magmas and related to fractional crystallization. In contrast, the Ni-Cu-(PGE) sulfide mineralization may be related to either the high- or low-Ti basaltic magmas and controlled by three factors: high degree partial melting of upper mantle, contamination of the lower crust, and fractional crystallization. The Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits were formed earlier than the V-Ti-magnetite deposits.

Key words: the Emeishan igneous province; mantle plume; magmatic deposits; dynamic process