

# 晚二叠世峨眉山幔柱岩浆成矿作用

汤庆艳 张铭杰 余明 王启立 尚慧

(兰州大学地质科学与矿产资源学院, 西部矿产资源甘肃省重点实验室, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 晚二叠世峨眉山幔柱岩浆作用同时形成了 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床等不同类型的岩浆矿床。从硫化物矿床的 PGE 富集型、Cu-Ni-PGE 富集型到 Cu-Ni 富集型, 再到钒钛磁铁矿矿床, 成矿基性-超基性岩体中基性岩石比例逐渐增加, PGE 含量降低。铜镍铂族硫化物矿床具 Nb 和 Ta 负异常, 岩浆流体组分含量较高, 含有较高的 H<sub>2</sub>, 而钒钛磁铁矿矿床具 Nb、Ta 和 Ti 正异常, Zr 和 Hf 负异常, 岩浆流体组分含量较低, 含有较高的 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>。两类矿床强不相容元素和轻稀土元素 (LREE) 富集, Sr-Nd 同位素组成与峨眉山玄武岩的演化趋势一致。Sr-Nd-Os-C-He 同位素组成揭示岩浆上升过程中经历了不同程度的地壳混染, 高钛玄武岩和钒钛磁铁矿矿床成矿岩体的地壳混染程度较低, 部分低钛玄武岩和铜镍硫化物矿床存在明显的地壳混染。这两类岩浆矿床的形成与峨眉山幔柱玄武岩浆有关, 岩浆介质环境中 H<sub>2</sub> 含量较高, V-Ti-Fe 氧化物矿床的形成与分离结晶、高含量的水和氧逸度的升高有关, Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成与还原性流体介质、结晶分异和地壳混染作用有关。

**关键词:** 成矿作用, 镁铁-超镁铁质岩体, Cu-Ni-PGE 硫化物矿床, V-Ti-Fe 氧化物矿床, 峨眉山幔柱

中图分类号: P588.1; P611.1<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)05-0680-13

## The magmatic ore-forming system of late-Permian Emeishan mantle plume

TANG Qing-yan, ZHANG Ming-jie, YU Ming, WANG Qi-li and SHANG Hui

(School of Earth Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory of Western Mineral Resources of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Different types of magmatic deposits, such as Cu-Ni-PGE sulfide deposits and V-Ti-Fe oxide deposits, have been formed in the late-Permian Emeishan mantle plume magmatic system. They show the trends of increase of basic rock proportion and the decrease of PGE content from PGE-rich, Cu-Ni-PGE, through Cu-Ni-rich sulfide deposits, to V-Ti-Fe oxide deposits. Cu-Ni-PGE sulfide deposits are characterized by negative anomalies of Nb and Ta, relatively high contents of H<sub>2</sub> and magmatic volatiles, whereas V-Ti-Fe oxide deposits are characterized by positive anomalies of Nb, Ta and Ti, and negative anomalies of Zr and Hf, as well as higher contents of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>, and lower contents of magmatic volatiles. They both are enriched in strongly incompatible elements and light REE. Sr-Nd isotopic compositions of whole rocks from these deposits are similar to those of Emeishan basalts. Sr, Nd, Os, C and He isotopic compositions indicate different degrees of crustal contamination. High Ti basalts and V-Ti-Fe oxide deposits show low degrees of crustal contamination, whereas some low Ti basalts and Cu-Ni-PGE sulfide deposits display high degrees of crustal contamination during magmatic evolution. These data suggest that the formation of these magmatic deposits might have been related to the Emeishan basaltic system. The formation of oxide deposits was probably related to fractional crystallization, high

收稿日期: 2013-08-26; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(41072056, 41372095); 中国地质调查局(1212011121092); 高等学校博士学科点专项科研基金(201202111110023); 矿床地球化学国家重点实验室基金(2011110)

作者简介: 汤庆艳(1986-), 女, 博士研究生, 主要从事岩石学与矿床地球化学研究, E-mail: tangqy07@lzu.edu.cn; 通讯作者: 张铭杰(1965-), 教授, E-mail: mjzhang@lzu.edu.cn.

contents of  $H_2O$  and elevated oxygen fugacity, whereas sulfide mineralization might have been formed in reduced magmatic media by fractionation and crustal contamination during the magmatic evolution.

**Key words:** mineralization; mafic-ultramafic intrusion; Cu-Ni-PGE sulfide deposit; V-Ti-Fe oxide deposit; Emeishan mantle plume

地幔柱沟通了地核、地幔与地壳之间的物质与能量交换,大量的岩浆排气诱发地表环境事件及生物大灭绝等(Li *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2013a),大规模岩浆作用形成大火成岩省、超大型 Cu、Ni 和铂族元素(PGE)硫化物矿床与 Fe、Ti 和 V 等氧化物岩浆矿床,如 Bushveld、Noril'sk、Great Dyke、Duluth 和攀枝花等地幔柱超大型岩浆矿床提供了相关金属矿产资源的绝对储量(Pirajno, 2000; Ernst and Buchan, 2003)。Bushveld 杂岩体是世界上已知最古老的地幔柱岩浆成矿系统的产物(2 054 Ma, Scoates and Friedman, 2008),PGE 储量 65 487 t, 磁铁矿 10 亿 t, Ni 1 501 万 t, Cu 692 万 t, Au 1 152 t, Cr 矿石 40 亿 t, V( $V_2O_5$ ) 1 680 万 t (Naldrett, 1999, 2009)。可见大陆环境下地幔柱岩浆作用是超大型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床形成的重要成矿机制。

峨眉山幔柱(~260 Ma, Zhou *et al.*, 2006, 2008; Fan *et al.*, 2008) 西伯利亚地幔柱(~251 Ma; Renne and Basu, 1991; Kamo *et al.*, 1996; Saunders *et al.*, 2005) 和德干地幔柱(~66 Ma; Chenet *et al.*, 2007) 形成了世界上 3 个重要的大陆环境大火成岩省。二叠纪的峨眉山和西伯利亚地幔柱岩浆作用形成了世界级岩浆矿床,西伯利亚的 Noril'sk-Talnakh 超大型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的 Ni 矿储量(2 000 万 t)居世界第一,PGE 储量居世界第二,Cu 3 000 万 t (Naldrett, 1999); 攀枝花超大型钒钛磁铁矿矿床的钒钛磁铁矿储量超过 1 010 t。但德干大火成岩省却没有形成岩浆矿床(Keays and Lightfoot, 2010; 夏林圻, 2012)。因此地幔柱岩浆形成演化过程中的成矿控制因素有所差异,需要系统认识。

分布在我国扬子克拉通西部及越南等地的峨眉山晚二叠世地幔柱为全球最显著的晚古生代地幔柱之一,尤为特别地同时形成了 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床两种类型完全不同的矿床,与塔里木和西伯利亚地幔柱形成时间相近,同一地幔柱体系内硫化物矿床和氧化物矿床的成矿岩浆体系可能与地幔柱成矿岩浆演化、壳幔相互作用的

差异有关(Xiao *et al.*, 2004)。本文对峨眉山幔柱 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床的成矿作用控制因素进行分析,以探讨地幔柱成矿系统的成矿环境和控制因素。

## 1 峨眉山幔柱岩浆作用

峨眉山幔柱二叠纪时位于赤道附近,活动中心位于大理—丽江—攀枝花一带,地幔柱岩浆作用形成了峨眉山溢流玄武岩和大量的基性—超基性侵入岩体(Zhou *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2009; 徐义刚和钟孙霖, 2001; 宋谢炎等, 2005; 张招崇等, 2007), 伴生有少量苦橄岩、凝灰岩、流纹岩、花岗岩和正长岩等(图 1)(邵辉等, 2007)。大火成岩省分为内带、过渡带和外带(Xu *et al.*, 2001, 2004; Song *et al.*, 2005), 内带由巨厚(1 000~5 000 m)的低钛—高钛玄武岩、大型层状镁铁质侵入体和正长岩侵入体组成(张云湘等, 1988; Zhong *et al.*, 2004, 2009), 过渡带及外带由较薄(<1 000 m)的高钛玄武岩层及镁铁质—超镁铁质侵入体组成。

峨眉山大火成岩省溢流玄武岩下伏地层为中二叠统茅口组灰岩,上为下三叠统沉积岩或晚二叠世吴家坪组灰岩。峨眉山玄武岩西厚东薄(张云湘等, 1988),西部宾川上仓地区厚达 5 000 余米,东部贵州盘县一带厚几百至几十米。地震测深推算峨眉山玄武岩的原始总体积可能达  $3.8 \times 10^6 \text{ km}^3$ (Xu *et al.*, 2007)。

不同类型岩石锆石 U-Pb 定年厘定地幔柱活动时期为 259~262 Ma (Zhou *et al.*, 2002, 2005, 2006; Zhong and Zhu, 2006; Zhong *et al.*, 2007; He *et al.*, 2007; Fan *et al.*, 2008), 玄武岩主喷发期限定在 256 Ma 左右(Boven *et al.*, 2002; Lo *et al.*, 2002; Fan *et al.*, 2004), 喷发时限约为 1 Ma (Huang and Opdyke, 1998)。

### 1.1 苦橄岩

峨眉山大火成岩省苦橄岩仅发现于大理、丽江、木里、金平及越南 Songda 地区。苦橄岩中富镁橄橄榄石斑晶 Fo 高达 93%, 铬尖晶石  $Cr^{\#}$  值(73~75)较

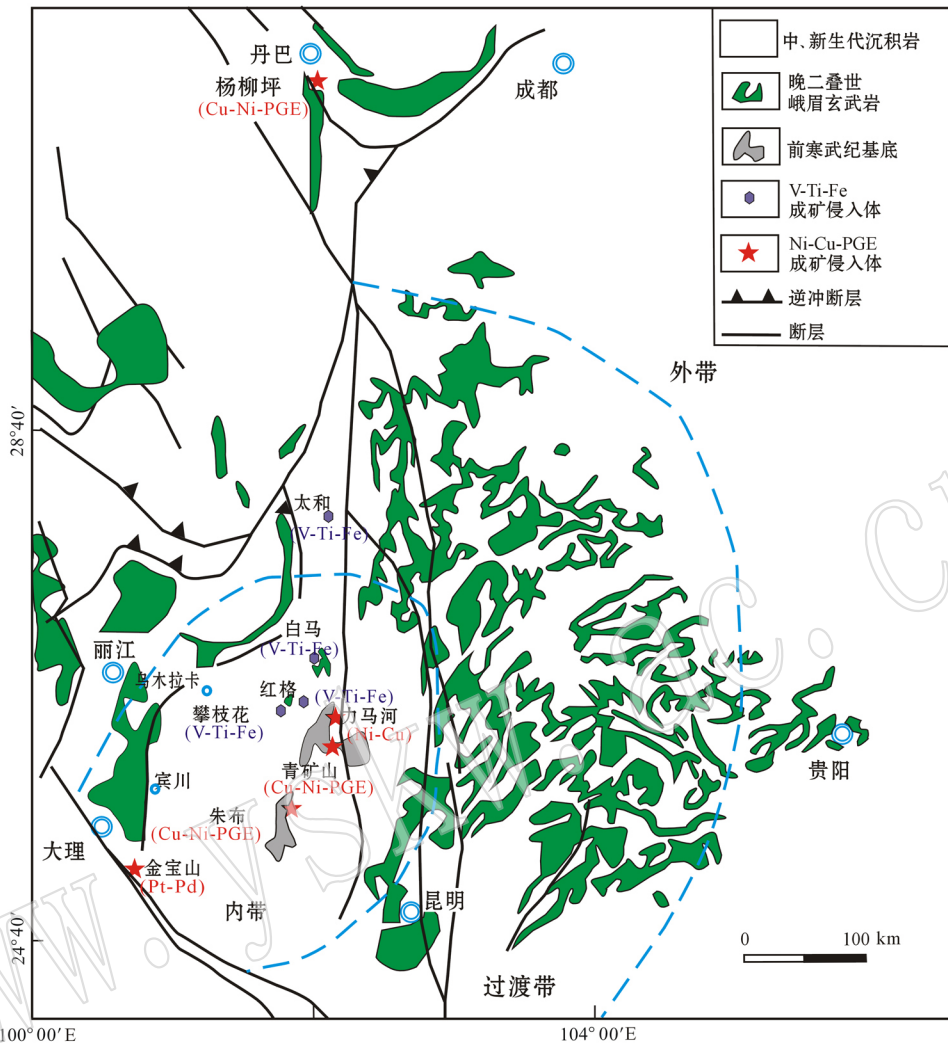


图 1 峨眉大火成岩省 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床区域地质简图[据 Xu 等 (2004) 和 Tao 等 (2008) 修改]  
 Fig. 1 Simplified geological map of Cu-Ni-PGE sulfide deposits and V-Ti-Fe oxide deposits in Emeishan large igneous province  
 (modified after Xu *et al.*, 2004; Tao *et al.*, 2008)

高, 熔体包裹体成分揭示原始岩浆 MgO 含量  $> 16\%$  (徐义刚和钟孙霖, 2001)。初始岩浆的 MgO 含量模拟计算约为  $21\%$  (Li *et al.*, 2012), 初始熔融温度为  $1590^\circ\text{C}$ 。微量元素原始地幔标准化图解与洋岛玄武岩相似 (Zhang *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2013c), 苦橄岩具 Pt-Pd 富集的特征。

峨眉山大火成岩省分布在不同地区的苦橄岩在地球化学特征方面有所不同, 大理、丽江和木里地区的苦橄岩 LREE 富集,  $\epsilon\text{Nd}(t)$  低 ( $-1.3 \sim +4.0$ ),  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  高 ( $0.704\,071 \sim 0.704\,851$ ) (Zhang *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2012),  $\gamma\text{Os} = -0.3 \sim -4.2$  (Zhang *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2010), 表明存在大陆岩石圈地幔的混染, PGE 元素分馏不明显。金平

和越南 Songda 地区的苦橄岩 LREE 亏损,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.704$ ,  $\epsilon\text{Nd}(t) = +7.0$  (Wang *et al.*, 2007), 表明起源于亏损地幔, 没有地壳物质的加入 (Li *et al.*, 2012), PGE 元素中等分馏, PPGE (Rh、Pt 和 Pd) 相对 IPGE (Os、Ir 和 Ru) 富集。

## 1.2 溢流玄武岩

根据 Ti/Y 比及  $\text{TiO}_2$  含量 ( $2.5\%$ ), 峨眉山玄武岩可分为低钛和高钛玄武岩 (Xu *et al.*, 2001)。低钛玄武岩的  $\text{Ti}/\text{Y} < 500$ , 具有高的  $\text{SiO}_2$  含量 ( $48\% \sim 53\%$ ) 和  $\text{Mg}^\#$  值 ( $0.52 \sim 0.64$ ),  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 12\%$ ,  $\text{Nb}/\text{La} = 0.6 \sim 1.4$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.704\,621 \sim 0.706\,420$  和  $\epsilon\text{Nd}(t) = -4.8 \sim +1.4$  (Xu *et al.*, 2001), 其中单斜辉石的氧同位素为  $6.2\text{‰} \sim 7.86\text{‰}$  (肖龙等,

2003a, 2003b)。高钛玄武岩的  $Ti/Y > 500$ , 具有低的  $SiO_2$  含量(45%~51%)和  $Mg^\#$  值(0.31~0.63),  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.703\ 932 \sim 0.707\ 587$ ,  $\epsilon Nd(t) = -0.71 \sim 4.8$  (Xu *et al.*, 2001; 肖龙等, 2003a, 2003b)。

峨眉山玄武岩的 Co、V、Cr 和 Ni 等相容元素显著亏损(肖龙等, 2003a, 2003b; 姜寒冰等, 2009)。PGE 含量相对苦橄岩和镁铁-超镁铁质侵入体较低(Li *et al.*, 2012)。铂族元素配分模式为“Pt-Pd”富集型(张成江和李晓林, 1998)。低 Ti 玄武岩 Pd 亏损随 Ir 的降低, Pd、Pt 和 Rh 显著减少, Cu/Pd 比值迅速增高, 表明在深部岩浆房可能存在硫化物的熔离。高 Ti 玄武岩和部分低 Ti 玄武岩随着 Ir 的降低 Pt 和 Rh 微弱降低, Pd 微弱增加, 表明经历了 S 不饱和条件下的分离结晶(Song *et al.*, 2009)。

峨眉山玄武岩与苦橄岩相比具有较高的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  比值和较低的  $\epsilon Nd(t)$  值, 具有富集地幔源区的特点。高钛和低钛玄武岩被认为是不同地幔源区物质在不同条件下的熔融产物。低钛玄武岩形成于岩石圈最薄、温度最高的地幔柱轴部, 经历了较高程度(约 16%)的部分熔融, 下地壳混染程度较高。高钛玄武岩的母岩浆形成于石榴子石稳定区( $> 70$  km), 可能是地幔柱边部或消亡期地幔源区低程度部分熔融(1.5%)的产物(徐义刚和钟孙霖, 2001), 地壳混染程度较低。然而, 峨眉山大火成岩省溢流玄武岩  $TiO_2$  含量连续变化, 地幔柱溢流玄武岩初始岩浆经过橄榄石和单斜辉石分离结晶。高钛与低钛玄武岩的相关特征差异可能是分馏机制的差异造成的(张招崇, 2009; Hou *et al.*, 2012), Fe-Ti 氧化物的分离结晶是造成残余熔体中 Ti 丰度以及 Ti/Y 降低的关键因素(Hou *et al.*, 2011)。

## 2 峨眉山幔柱岩浆矿床

地幔柱岩浆成矿作用具有多样性, 如布什维尔德地幔柱既有岩浆结晶分异的铜镍硫化物矿床(如 Nkomati), 也有热液成因硫化物-铂族元素矿床(如 Potgietersrust)及岩筒型矿床(如 Mooihoek 和 Driekop), 剪切带热液型硫化物矿床(如 Tweefontein Hill)和石英脉型铂族元素矿床(王登红等, 2002)。峨眉山幔柱也形成了多种类型的矿床, 除上述地幔柱岩浆作用矿床外, 还有与溢流玄武岩火山喷气作用有关的火山岩型 Cu-Fe 矿床, PGE 热液矿床、岩

浆热液矿床(稀有元素 Be、Li、Nb、Ta 矿床, REE 矿床)和 Au-Pb-Zn 中低温热液矿床等(胡瑞忠等, 2005)。但部分矿床的成矿作用与峨眉山幔柱的相关性还存在争议, 这里重点讨论地幔柱岩浆作用矿床。

### 2.1 岩浆矿床成矿作用类型

#### 2.1.1 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床

主要产于峨眉山幔柱活动内带低钛玄武岩分布区的元谋和会理小关河超镁铁质杂岩群等(图 1), 矿化岩体规模较小(图 1), 呈线形分布出露在整个川滇构造带上。Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成与玄武质岩浆的硫化物熔离作用有关, 根据矿化特征可分为 PGE 富集型、Cu-Ni-PGE 富集型和 Cu-Ni 富集型 3 种类型。PGE 富集型硫化物矿床中铜镍硫化物含量低, 如金宝山铂钨矿、朱布、阿布郎当等。Ni-Cu-PGE 硫化物矿床有杨柳坪、正子岩窝和清矿山 Cu-Ni-PGE 矿床等。Ni-Cu 富集型硫化物矿床有力马河镍矿和白马寨镍矿等。

3 类岩浆硫化物矿床矿石硫化物中 Ni、Cu 和 PGE 的含量有着显著的差异, 亲铜元素与硫含量显示正相关性(Zhou *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2003, 2005; Wang *et al.*, 2005, 2006, 2007; Sun *et al.*, 2008; 陶琰等, 2006, 2007; 王生伟等, 2007)。金宝山、朱布和力马河矿床分别代表峨眉山幔柱 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿作用不同成矿机制的端员类型。金宝山 PGE 富集型矿床和朱布铜镍铂族硫化物矿床以 PPGE 富集为特征, 金宝山铂族元素的富集程度最高。力马河 Cu-Ni 富集型矿床富集 Cu 和 Ni, 显著亏损铂族元素。PGE 矿床以 PGE 品位高、铜镍含量和 Cu/Pd 比值极低为特点。Ni-Cu 硫化物矿床铜镍品位和 Cu/Pd 比值高, 但 PGE 含量极低。

#### 2.1.2 V-Ti-Fe 氧化物矿床

主要赋存在峨眉山大火成岩省内带的层状侵入体中, 特别是攀枝花-西昌(攀西)地区的层状镁铁-超镁铁质杂岩带, 岩体规模较大, 与玄武质岩浆结晶分异作用有关。侵入于新元古代变质岩或古生代地层中。攀枝花、白马、红格和太和 4 个层状岩体赋存的 V-Ti 磁铁矿储量超过 1 010 t (Zhou *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2008; Pang *et al.*, 2009; Shellnutt *et al.*, 2009)。含矿层状岩体 V、Ni 和 Cr 的含量变化范围广, V 含量从硅酸盐中  $100 \times 10^{-6}$  左右变化到 Fe-Ti 氧化物中达  $4\ 800 \times 10^{-6}$ , 受钛磁铁矿、橄榄石和铬尖晶石的控制(Pang *et al.*, 2010)。与玄武岩

相比 PGE 严重亏损,含量极低( $>>5 \times 10^{-9}$ , Howarth and Prevec, 2013)。

峨眉山地幔柱岩浆矿床锆石 U-Pb 年龄测定表明,朱布成矿岩体年龄为  $261.0 \pm 2.0$  Ma (Zhou *et al.*, 2008),力马河岩体为  $263 \pm 3$  Ma (Zhou *et al.*, 2008),白马寨岩体为  $258 \pm 3.5$  Ma (Wang *et al.*, 2005),攀枝花、白马、红格和太和 V-Ti 氧化物矿床成矿岩体年龄分别为  $263 \pm 3$ 、 $262 \pm 2$ 、 $259.3 \pm 1.3$  和  $258.0 \pm 1.9$  Ma (Zhong *et al.*, 2009),其形成时代基本相同,与峨眉山玄武岩的形成年龄一致 (Fan *et al.*, 2008)。

## 2.2 成矿岩体岩石类型

### 2.2.1 铜镍铂族硫化物矿床

峨眉山地幔柱 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿岩体主要为基性-超基性岩体,岩体规模较小,岩石从橄榄岩、辉石岩、辉长岩到闪长岩逐步过渡,从 PGE 富集型、Cu-Ni-PGE 富集型到 Cu-Ni 富集型矿床成矿岩体,中基性岩石的比例逐步增加。

金宝山铂-钨矿床是 PGE 富集型矿床,为我国最大的铂族元素矿床,成矿岩体为似层状(岩席)超镁铁岩,由橄榄岩、辉橄岩、橄辉岩及辉石岩异离体组成,岩体的底部及边部可见一些小的辉橄岩、橄辉岩及辉石岩异离体。无完整的相带分异,缺乏分异堆积特征。

朱布铜镍铂族矿床为 Cu-Ni-PGE 富集型矿床,成矿基性-超基性岩体呈不对称漏斗状,不整合侵入前震旦系荇林群变质岩(云英片麻岩)中。由一个 10~40 m 的边部带包裹一个层状序列组成,边部带主要由二辉橄岩、橄辉岩、辉石岩和混染辉长岩组成。层状序列从底部二辉橄岩和橄辉岩渐变过渡到顶部的辉长岩和辉长闪长岩,不同岩石单元渐变接触。边部带与层状序列呈不整合接触 (Tang *et al.*, 2013b)。

力马河镍矿床为 Cu-Ni 富集型矿床,成矿岩体由不对称环带状分布的超镁铁质橄岩(含长辉石橄岩和斜长橄辉石岩)和镁铁质岩(包括辉长岩和闪长岩)组成。矿体产出在超镁铁岩中,与超镁铁岩产状一致 (Tao *et al.*, 2010)。

### 2.2.2 钒钛磁铁铁矿床

钒钛磁铁氧化物矿床成矿层状岩体多呈大中型岩床或岩盆状,岩体长数公里至 20 km 不等,厚度数百米至 2 km 以上,由单辉橄岩、辉石岩、橄长岩、辉长岩和闪长岩等岩石构成。主要造岩矿物有橄

石、富钛普通辉石、斜长石和普通角闪石,无斜方辉石。层状岩体可分为镁铁质和镁铁-超镁铁质两种类型。

镁铁-超镁铁质层状侵入体由辉长岩、辉石岩和橄辉岩组成,如红格和新街钒钛磁铁矿床,成矿层状岩体下部或底部的铁矿层和硫化物中有铂族元素矿化。红格钒钛磁铁矿床赋存于层状基性和超基性的辉石岩和辉长岩岩体中。

镁铁质层状侵入体以辉长岩为主,含少量橄辉长岩、橄长岩和斜长岩,岩体下部和韵律层底部可见少量超镁铁质岩石,如攀枝花、白马和太和等钒钛磁铁矿床成矿镁铁质层状岩体。白马为层状橄长岩体。

两类含矿层状岩体的岩相韵律旋回及层理发育。自下而上岩石的基性程度逐渐降低,铁镁造岩矿物和铁钛氧化物含量递减,含矿性渐弱,矿石变贫,矿层变薄,钒钛磁铁矿体主要赋存于岩体中下部,呈层状、似层状产出,与火成层理产状一致。浑圆状的橄石、富钛普通辉石和斜长石颗粒在矿石中被磁铁矿包裹,普通辉石和斜长石边缘常出现普通角闪石反应边。矿石以稠密浸染状和浸染状为主。

## 2.3 成矿岩体地球化学特征

峨眉山地幔柱岩浆矿床成矿岩体主要元素 MgO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、K<sub>2</sub>O 及 Na<sub>2</sub>O 含量主要受橄石、单斜辉石、斜方辉石及斜长石堆积作用的控制。TiO<sub>2</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 主要受 Fe-Ti 氧化物矿物的控制 (Pang *et al.*, 2010)。攀枝花、白马、太和、红格和新街钒钛磁铁矿床 Mg<sup>#</sup> 比值变化范围为 47~64 (Wang *et al.*, 2008; Pang *et al.*, 2009, 2010)。

### 2.3.1 微量元素特征

峨眉山地幔柱岩浆矿床成矿岩体微量元素和 REE 标准化配分模式图与峨眉山低钛玄武岩(LT)和苦橄岩相似(图 2、图 3),表现出良好的地球化学亲缘性。微量元素成分分异显著,强不相容元素明显富集,轻稀土元素富集,与峨眉山玄武岩相似。

硫化物和氧化物矿床的微量元素有所不同,铜镍铂硫化物矿床具明显的 Nb 和 Ta 负异常,钒钛磁铁矿床多数样品具明显的 Th-U 和 Zr-Hf 负异常、Nb、Ta 和 Ti 正异常及 Eu 正异常,可能与磷灰石的堆积有关 (Pang *et al.*, 2010; Howarth and Prevec, 2013)。REE 含量变化可能与晶体堆积过程中捕获的液相多少有关 (Zhou *et al.*, 2008)。

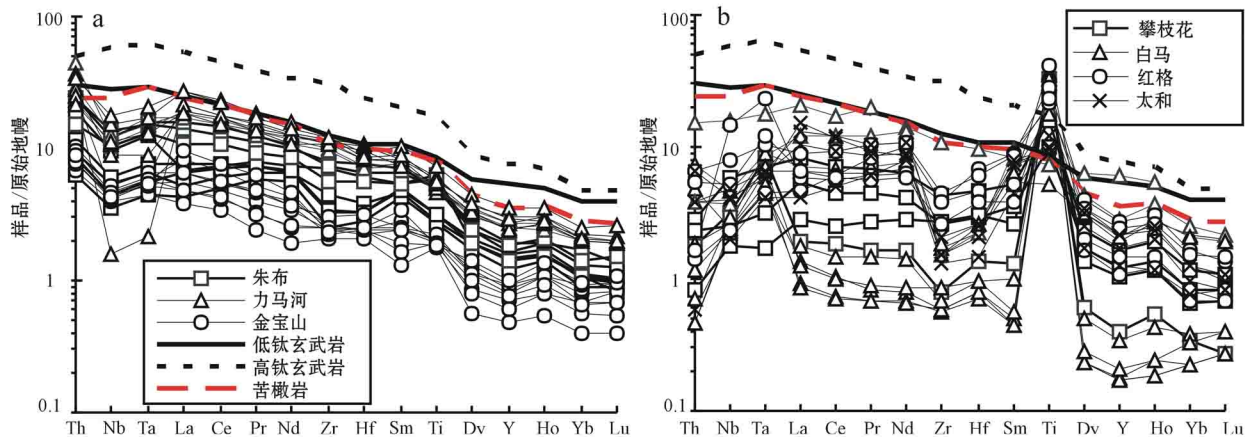


图 2 峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床(a) 和 V-Ti-Fe 氧化物矿床(b)微量元素配分模式图

Fig. 2 Primitive mantle (PM) normalized patterns of trace elements in Cu-Ni-PGE sulfide deposits (a) and V-Ti-Fe oxide deposits (b) in Emeishan large igneous province

数据来源：攀枝花来自 Zhang 等(2009)；白马来自 Zhou 等(2008)；红格来自 Bai 等(2012)；太和来自 Hou 等(2012)；朱布来自 Tang 等(2013b)；力马河来自 Tao 等(2010)；金宝山来自 Wang 等(2010)；低钛玄武岩来自肖龙等(2003a, 2003b)及 Zhang 等(2006)；高钛玄武岩来自 Zhang 等(2006)；苦橄岩来自 Zhang 等(2006)

Data source: Panzhihua from Zhang *et al.* (2009); Baima from Zhou *et al.* (2008); Hongge from Bai *et al.* (2012); Taihe from Hou *et al.* (2012); Zhubu from Tang *et al.* (2013b); Limahé from Tao *et al.* (2010); Jinbaoshan from Wang *et al.* (2010), low Ti basalts from Xiao Long *et al.* (2003a, 2003b) and Zhang *et al.* (2006); high Ti basalts from Zhang *et al.* (2006); picrite from Zhang *et al.* (2006)

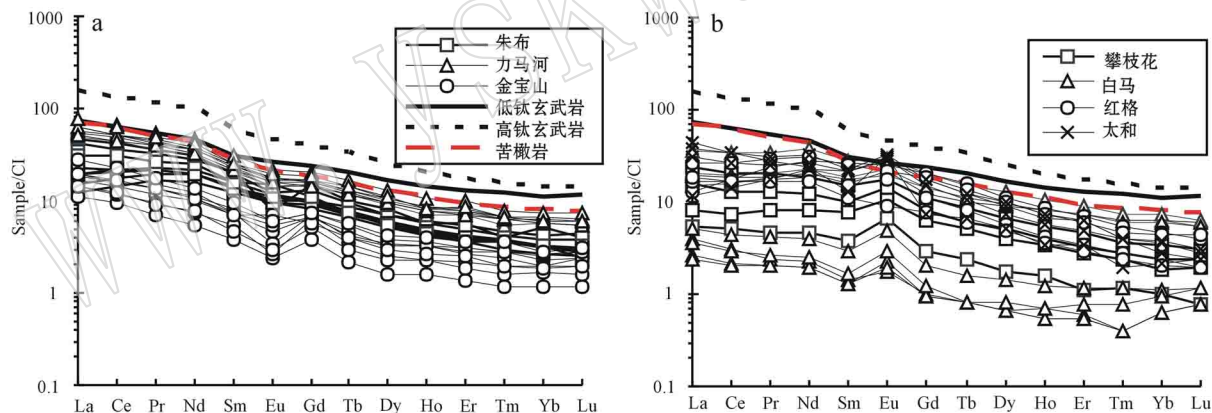


图 3 峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床(a) 和 V-Ti-Fe 氧化物矿床(b)稀土元素配分模式图(数据来源同图 2)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of Cu-Ni-PGE sulfide deposits (a) and V-Ti-Fe oxide deposits (b) in Emeishan large igneous province (data source as for Fig. 2)

### 2.3.2 同位素组成

铜镍铂族硫化物矿床成矿岩体的 Sr-Nd 同位素组成与峨眉山玄武岩的演化趋势一致,表明成矿岩体与地幔柱玄武岩浆作用演化相关。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  变化于 0.704 3~0.710 7 之间; $\epsilon\text{Nd}$  值变化于 -3.1~2.7 之间,成矿岩浆经历了不同程度的上地壳的混染(图 4)。其中朱布岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  最高, $\epsilon\text{Nd}$  值最低。力马河岩体的 Os 含量变化范围相对较窄, $\gamma\text{Os}$  含量变化范围广,从 4.9 到 779.2(图 5),表明存在大量的地壳混染。

攀枝花、白马、太和、红格和新街钒钛磁铁矿矿床的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  和  $\epsilon\text{Nd}$  值分别变化于 0.704 3~0.706 6 和 0~+4 之间(图 4),白马岩体  $\epsilon\text{Nd}$  最低,太和岩体最高,均落在峨眉山玄武岩的范围内,显示与峨眉山高钛玄武岩具有良好的地球化学亲缘性和成因联系。不同岩体经历了不同程度的中地壳的混染(图 4),攀枝花 Sr-Nd 同位素表明地壳混染程度低(艾羽等,2006; Howarth and Prevec, 2013)。新街岩体的 Os 含量变化于 0~599  $\times 10^{-6}$ ,  $\gamma\text{Os} = -0.7 \sim +8.6$ (图 5)。

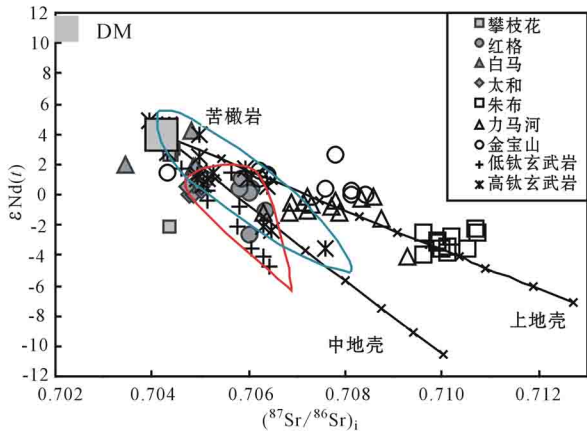


图 4 峨眉山大火成岩省 V-Ti-Fe 氧化物矿床和 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的 Sr-Nd 图解

Fig. 4 Initial (at 260 Ma) Sr and Nd isotopic compositions for Cu-Ni-PGE sulfide deposits and V-Ti-Fe oxide deposits in Emeishan large igneous province

数据来源: 攀枝花来自 Zhang 等(2009); 白马来自 Shellnutt 等(2009); 红格来自 Zhong 等(2002); 太和来自 Hou 等(2012); 朱布来自 Zhou 等(2008)和 Tang 等(2013b); 力马河来自 Tao 等(2010)和 Zhang 等(2009); 金山山来自 Zhou 等(2008); 低钛玄武岩和高钛玄武岩来自 Xu 等(2001)

Data source: Panzhuhua from Zhang *et al.* (2009); Baima from Shellnutt *et al.* (2009), Hongge from Zhong *et al.* (2002); Taihe from Hou *et al.* (2012); Zhubu from Zhou *et al.* (2008) and Tang *et al.* (2013b); Limahé from Tao *et al.* (2010) and Zhang *et al.* (2009); Jinbaoshan from Zhou *et al.* (2008); low Ti basalts and high Ti basalts from Xu *et al.* (2001)

### 2.3.3 成矿岩浆流体组成

与地幔捕虏体和岩石圈地幔相比 (Zhang *et al.*, 2007, 2009), 峨眉山地幔柱岩浆矿床含矿岩体流体组成明显的特征是含有较高的  $H_2$  (Xing *et al.*, 2012), 与西伯利亚地幔柱岩体类似 (Tang *et al.*, 2013a)。铜镍硫化物矿床含矿岩体的流体总量高于钒钛磁铁矿矿床 ( $< 400 \text{ mm}^3/\text{g}$  STP), 铜镍硫化物矿床岩浆矿物流体组成以  $H_2$  为主,  $SO_2$  和  $H_2S$  次之 (汤庆艳等, 未发表)。钒钛磁铁矿矿床岩浆矿物流体组成以  $H_2O$  和  $H_2$  为主,  $CO_2$  和  $H_2S$  次之; 碳同位素组成具有明显的地幔碳同位素特征,  $\delta^{13}C_{CO_2} = -7.7\text{‰} \sim -17.9\text{‰}$ ,  $\delta D = -90\text{‰} \sim -115\text{‰}$  (Xing *et al.*, 2012)。钒钛磁铁矿矿床中岩浆矿物单斜辉石和橄榄石的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  较低 ( $0.078 \sim 4.34 \text{ Ra}$ ), 揭示地壳物质的混染 (Hou *et al.*, 2011)。

## 3 峨眉山地幔柱岩浆矿床成矿作用

岩浆矿床的形成受控于诸多重要的因素, 巨量成矿金属的聚集是岩浆矿床形成的首要条件。巨量

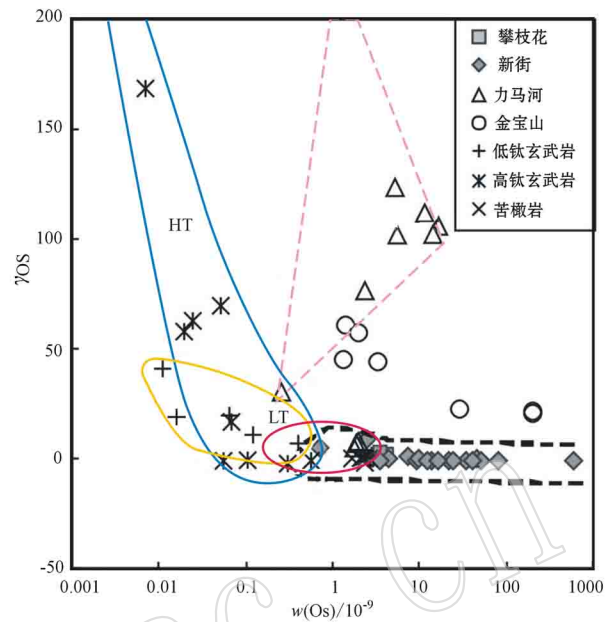


图 5 峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床的  $\gamma Os$  含量与  $\gamma Os$  关系图

Fig. 5 Plot of  $\gamma Os$  versus  $Os$  contents for Cu-Ni-PGE sulfide deposits and V-Ti-Fe oxide deposits in Emeishan large igneous province

数据来源: 攀枝花来自 Hou 等(2013); 新街来自 Zhong 等(2011); 力马河来自 Tao 等(2010); 金山山来自陶琰等(2008); 苦橄岩来自 Zhang 等(2008); 低钛玄武岩和高钛玄武岩来自 Xu 等(2007)

Data source: Panzhuhua from Hou *et al.* (2013); Xinjie from Zhong *et al.* (2011); Limahé from Tao *et al.* (2010); Jinbaoshan from Tao Yan *et al.* (2008); picrite from Zhang *et al.* (2008); low Ti basalts and high Ti basalts from Xu *et al.* (2007)

的成矿金属一方面需要地幔源区高程度的部分熔融, 促使地幔中硫化物熔融进入岩浆; 另一方面, 由于成矿金属在硅酸盐岩浆的饱和度限制 (Peach *et al.*, 1990), 因此需要大量玄武岩浆或苦橄质岩浆参与 (Naldrett, 2004)。地幔柱超大规模岩浆作用为岩浆矿床充足的金属成矿提供了保障。

### 3.1 地幔柱成矿母岩浆

Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床成矿碱性-超碱性岩体与峨眉山玄武岩在空间上相伴产出, 形成时间相近, 微量元素、同位素组成特征相似, 揭示其母岩浆可能来源于相同岩浆源区, 成因相关, 为峨眉山地幔柱活动高峰期的产物 (王登红等, 2007)。但随地幔柱岩浆的系统演化变化, 在源区组成、起源环境、部分熔融程度和岩浆演化过程方面有所差异, 不同地区的苦橄岩和玄武岩在 Ti 含量、地壳混染物质类型和程度等方面有明显的不同, 揭示地幔柱岩浆存在不同的通道和岩浆房。

Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床的成矿母岩浆组成、介质环境有所差异,是地幔柱初始岩浆不同程度结晶分异作用和地壳物质混染等演化的结果。Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿岩体原始岩浆源于地幔较浅部,为高程度部分熔融形成的高镁玄武岩浆,与峨眉山低钛玄武岩可能为同源岩浆,形成于贫 Ti、S 不饱和的环境(Wang *et al.*, 2005)。

攀枝花等钒钛磁铁矿矿床成矿岩体的母岩浆富集 Fe 和 Ti,源于深部源区高程度部分熔融富 Ti 的母岩浆(Zhou *et al.*, 2008) 铁质玄武岩浆(Zhou *et al.*, 2005)或铁质苦橄岩浆(Zhang *et al.*, 2009; Howarth and Prevec, 2013)。富 Fe 的母岩浆源于富 Fe 的地幔源区。铁质苦橄岩浆可以在高压(>5 GPa)和高温(>1 500℃)条件下由石榴子石辉石岩的熔融产生(Tuff *et al.*, 2005)。实验表明,在一定的压力下,随温度及部分熔融程度的升高,原始岩浆中铁含量随之增加(Langmuir and Hanson, 1980),如攀枝花成矿母岩浆可能为苦橄质岩浆,早期结晶分异和壳源物质深部混染导致硫化物的熔离作用使成矿岩浆富集 Ti-Fe,亏损 PGE(Howarth and Prevec, 2013)。

### 3.2 成矿控制因素

Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床与峨眉山苦橄岩-玄武岩为地幔柱岩浆在不同演化阶段经历不同矿物相分离结晶和地壳物质混染的产物。其形成环境、成矿控制因素有所不同。

#### 3.2.1 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床

Cu-Ni-PGE 硫化物矿床形成的物质基础是成矿金属元素及硫。岩浆演化过程中铜镍硫化物矿床的形成要求硫化物熔离富集, S 过饱和是关键因素。因此, Ni-Cu-PGE 硫化物矿床成矿主要取决于高程度的部分熔融和 S 过饱和等因素。地幔环境下硫化物矿床成矿原始岩浆中 S 不饱和,岩浆上升过程中硅酸盐岩浆中硫的溶解度随压力的降低而增加,成矿岩浆 S 过饱和需要外来硫的加入、结晶分异或地壳混染等因素(Zhang *et al.*, 2011, 2013; Tang *et al.*, 2013b)。

金宝山铂-钨硫化物矿床、力马河镍矿及朱布 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿岩体的主量元素特征及橄榄石 Fo 与 Ni 含量的正相关性均显示存在分离结晶作用(Wang *et al.*, 2008; Tao *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2013b)。Nb 负异常、Sr-Nd-Os-S 同位素显示成矿岩浆上升过程中经历了不同程度的上地壳物

质的混染(Wang *et al.*, 2008; Tao *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2013b; 马言胜等, 2009),力马河和金宝山矿床的地壳混染程度较低(约 10%),朱布硫化物矿床的地壳混染程度较高(达 20%, Tang *et al.*, 2013b)。

硫化物矿床中 PGE 含量主要受玄武质母岩浆中成矿金属组成和 R 因子(硫化物与硅酸盐岩浆比值)的控制(Campbell and Naldrett, 1979)。亲铜元素与硫含量正相关表明亲铜元素受硫化物含量的控制,硫化物熔体的结晶分异可影响成矿岩浆中 Ni、Cu 和 PGE 的含量,单硫化物固溶体的分离可造成 IPGE 和 PPGE 的分异(Song *et al.*, 2008)。金宝山矿床的硫化物是从 PGE 不亏损的成矿玄武岩浆中熔离出来的,硫化物熔离强度较小, PGE 的富集程度非常高。力马河和白马寨矿床的硫化物是从 PGE 强烈亏损的成矿玄武岩浆中熔离出来的,熔离程度很高,使硫化物的 PGE 含量极低。杨柳坪和清矿山矿床的硫化物熔离程度虽然也很高,但其母岩浆的 PGE 含量较高,熔离出来的硫化物 PGE 含量也较高(Song *et al.*, 2008)。

#### 3.2.2 V-Ti-Fe 氧化物矿床

V-Ti-Fe 氧化物矿床的形成受分离结晶、岩浆混合、硅酸盐熔体不混溶及  $f_{O_2}$  等因素的影响(Reynolds, 1985; Higgins, 2005; 艾羽等, 2006; Shellnutt *et al.*, 2009)。岩浆 Bowen 演化趋势的分离结晶使岩浆氧逸度增高,并导致氧化物的熔离或结晶。封闭体系中镁铁质岩浆分离结晶使晚期的残余熔体中 Fe、Ti 和 V 的浓度增高(Reynolds, 1985),而 V-Ti-Fe 富集的母岩浆缓慢冷却形成 Fe-Ti 氧化物固溶体(Wang *et al.*, 2008)。因此,分离结晶和氧逸度变化是 V-Ti 磁铁矿床形成的关键控制因素。攀西钒钛磁铁矿矿床的形成与峨眉山玄武岩浆有关,主要受控于岩浆的分离结晶作用(Pang *et al.*, 2008b; Howarth and Prevec, 2013)。

在层状侵入体形成过程中,相对原始的岩浆和演化岩浆混合,或地壳混染可导致氧化物的聚集(Irvine, 1977)。地壳混染可造成氧逸度的迅速提高,引起 Fe-Ti 氧化物的早期结晶(艾羽等, 2006)。攀枝花、白马、红格和太和钒钛磁铁矿床均存在不同程度的中地壳混染(Ganino *et al.*, 2008; Hou *et al.*, 2011)。新街侵入体中硫化物和 V-Ti-Fe 氧化物的熔离可能是地壳混染和岩浆混合造成的(Zhong *et al.*, 2004),但是钒钛磁铁矿  $\epsilon_{Nd}$  值较低,表明



地壳混染在钒钛铁矿床的成矿过程中作用不明显。

### 3.3 成矿岩浆作用介质环境条件

峨眉山地幔柱大规模岩浆作用为巨量成矿物质聚集提供了有利条件。Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床不同类型岩浆矿床形成的氧化还原条件明显不同,成矿岩浆演化的 S 饱和度和  $f_{O_2}$  等介质环境是成矿的关键因素。另外地幔岩浆体系中超临界的  $CO_2$  等流体与 Cu 和 Ni 等成矿金属聚集有关 (Fu *et al.*, 2012)。

在还原条件下 ( $\Delta FMQ < +1.5$ ), 硅酸盐熔体中 S 主要以  $S^{2-}$  存在; 在  $1.5 < \Delta FMQ < +2$  时 S 主要以  $S^{2-}$  和  $S^{6+}$  形式存在; 在氧化条件下 ( $\Delta FMQ > +2$ ) S 主要以  $S^{6+}$  存在。Ni-Cu-PGE 硫化物矿床的形成需要  $S^{2-}$  存在的还原条件。玄武质岩浆体系中氧逸度的降低有助于岩浆中硫饱和度的降低, 从而促进硫化物的熔离。铜镍铂族硫化物矿床成矿岩浆流体组分含量较高, 含有较高的  $H_2$  等还原性流体组分。大量的上地壳物质混染促使氧逸度升高, 是峨眉山地幔柱岩浆矿床形成的关键控制因素。

氧逸度的升高会扩大磁铁矿的稳定范围, 使磁铁矿从岩浆中晶出的时间提前, 导致残余岩浆中硅的富集和铁的亏损 (Toplis and Carroll, 1995); 氧逸度的降低推迟磁铁矿的晶出, 致使残余岩浆中铁富集 (徐义刚等, 2003)。而岩浆中氧逸度受  $CO_2$ 、 $CO$ 、 $H_2O$  和  $H_2$  等挥发组分的影响 (Osborn, 1959), 当岩浆中富集大量  $H_2O$  和  $CO_2$  流体时, 岩浆的氧逸度增加, 导致磁铁矿大量结晶 (Osborn, 1959; Hill and Roeder, 1974)。

攀西地区钒钛铁矿含矿岩体侵入到震旦纪灯影组灰岩或古元古代河口组变质沉积-火山岩系中, 成矿岩体流体组成以  $H_2O$ 、 $CO_2$  和  $H_2$  为主 (Xing *et al.*, 2012), 大量  $H_2O$  和  $CO_2$  流体促使氧逸度增加, 导致磁铁矿的大量结晶形成矿床。如攀枝花的氧化物矿是在富碳氧流体的环境中从不混溶的氧化物液相中富钒钛磁铁矿的晚期结晶形成的 (Zhou *et al.*, 2005)。攀枝花岩体侵位过程中围岩组分、尤其是  $CO_2$  的加入可能是磁铁矿结晶的重要因素之一 (Pang *et al.*, 2008a), 但这些流体组分的来源不明。攀枝花岩体的地壳混染程度较低, 流体通过岩浆-围岩交换进入岩浆的可能性较低 (Zhang *et al.*, 2009)。成矿岩浆与围岩反应产生了富  $CO_2$  和  $H_2O$  的流体, 导致岩浆不混熔分离形成了氧化物岩浆

(Zhou *et al.*, 2005), 围岩释放的大量富  $CO_2$  流体增加了岩浆的氧逸度  $f_{O_2}$ , 从而导致了磁铁矿的早期结晶 (Ganino *et al.*, 2008)。岩浆中单斜辉石和斜长石早期结晶导致了残余岩浆中流体如  $H_2O$  的富集, 来自围岩的流体富集在结晶较晚的磁铁矿中 (Xing *et al.*, 2012)。

在峨眉山大火成岩省的东部至今没有发现 V-Ti-Fe 氧化物矿床, 可能是低氧逸度延迟了 V-Ti-Fe 氧化物的出现, 可能具有寻找 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的潜力, 但是目前发现的矿床规模较小, 可能是由于低氧逸度在大陆环境下持续时间较短 (Xu *et al.*, 2003), 或者是不存在富硫地层 (Li *et al.*, 2003; Lightfoot and Keays, 2005; Seat *et al.*, 2009; Hou *et al.*, 2011)。

## 4 结论

(1) 峨眉山地幔柱岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 V-Ti-Fe 氧化物矿床成矿岩体强不相容元素和轻稀土 (LREE) 富集, Sr-Nd 同位素组成与峨眉山玄武岩的演化趋势一致, 与峨眉山玄武岩有较高的地球化学亲缘性。

(2) 铜镍铂族硫化物矿床具 Nb 和 Ta 负异常, 岩浆流体组分含量较高, 含有较高的  $H_2$ ; 而钒钛磁铁矿矿床具 Nb、Ta 和 Ti 正异常, Zr 和 Hf 负异常, 岩浆流体组分含量较低, 含有较高的  $H_2O$ 、 $CO_2$  和  $H_2$ , 二者的形成演化环境不同。

(3) 峨眉山大火成岩省中 Cu-Ni-PGE 硫化物矿化的形成可能与岩浆演化过程中结晶分异、还原性流体介质和地壳混染作用有关, V-Ti-Fe 氧化物的形成可能与分离结晶、高含量的水和氧逸度的升高有关。

致谢 本文为兰州大学“博士研究生学术新人奖”研究成果, 撰写、评审和修改过程中夏群科和钟宏教授提供了大量的帮助和建议, 在此表示感谢。

## References

- Ai Yu, Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2006. Trace Element and Sr-Nd-Pb-O isotopic systems of the Panzhihua layered gabbro intrusion [J]. Acta Geol. Sinica, 80(7): 995~1004 (in Chinese with English abstract).

- Bai Z J, Zhong H, Li C, *et al.* 2012. Platinum-group elements in the oxide layers of the Hongge mafic-ultramafic intrusion, Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 46: 149~161.
- Boven A, Pasteels P, Punzalan L E, *et al.* 2002.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Ar Geochronological constrains on the age and evolution of the Permian-Triassic Emeishan volcanic province, Southwest China[J]. *J. Asian Earth Sciences*, 20: 157~175.
- Campbell I H and Naldrett A J. 1979. The influence of silicate: sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides[J]. *Econ. Geol.*, 74: 1503~1506.
- Chenet A L, Quidelleur X, Fluteau F, *et al.* 2007.  $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$  dating of the Main Deccan large igneous province: Further evidence of KTB age and short duration[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 263: 1~15.
- Ernst R E and Buchan K L. 2003. Recognizing mantle plumes in the geological record[J]. *Annu Rev Earth Planet. Sci.*, 31: 469~523.
- Fan W M, Wang Y J, Peng T P, *et al.* 2004. Ar-Ar and U-Pb geochronology of late Paleozoic basalts in western Guangxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(21): 2318~2327.
- Fan W M, Zhang C H, Wang Y J, *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of Permian basalts in western Guangxi province, southwest China[J]. *Lithos*, 102: 218~236.
- Fu P E, Tang Q Y, Zhang M J, *et al.* 2012. The ore genesis of Kalatongke Cu-Ni Sulfide Deposit, west China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 86(3): 568~578.
- Ganino C, Arndt N T, Zhou M F, *et al.* 2008. Interaction of magma with sedimentary wall rock and magnetite ore genesis in the Panzhihua mafic intrusion, SW China[J]. *Mineral Deposit*, 43: 677~694.
- He B, Xu Y G, Huang X L, *et al.* 2007. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 255: 306~323.
- Higgins M D. 2005. A new interpretation of the structure of the Septiles Intrusive suite, Canada[J]. *Lithos*, 83: 199~213.
- Hill R and Roeder P. 1974. The crystallization of spinel from basaltic liquid as a function of oxygen fugacity[J]. *The Journal of Geology*, 82: 709~729.
- Hou T, Zhang Z C, Encarnacion J, *et al.* 2012. Petrogenesis and metallogenesis of the Taihe gabbroic intrusion associated with Fe-Ti-oxide ores in the Panxi district, Emeishan large igneous province, southwest China[J]. *Ore Geol. Rev.*, 49: 109~127.
- Hou T, Zhang Z C, Encarnacion John, *et al.* 2013. The role of recycled oceanic crust in magmatism and metallogeny[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 165: 805~822.
- Hou T, Zhang Z C, Kusky T, *et al.* 2011. A reappraisal of the high-Ti and low-Ti classification of basalts and petrogenetic linkage between basalts and mafic-ultramafic intrusions in the Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. *Ore Geol. Rev.*, 41: 133~143.
- Howarth G H and Prevec S A. 2013. Trace element, PGE, and Sr-Nd isotope geochemistry of the Panzhihua mafic layered intrusion, SW China[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 120: 459~478.
- Hu Ruizhong, Tao Yan, Zhong Hong, *et al.* 2005. Mineralization systems of a mantle plume[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 42~54 (in Chinese with English abstract).
- Huang K and Opdyke N D. 1998. Magnetostratigraphic investigations of an Emeishan basalt section in western Guizhou Province, China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 163: 1~14.
- Irvine T. 1977. Origin of chromitite layers in the 702 Muskox intrusion and other stratiform intrusions: A new interpretation[J]. *Geology*, 5: 273~277.
- Jiang Hanbin, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, *et al.* 2009. Petrogenesis of high-Ti and low-Ti basalts in Emeishan, Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1117~1134 (in Chinese with English abstract).
- Kamo S L, Czamanske G K and Krogh T E. 1996. A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 3505~3511.
- Keays R R and Lightfoot P C. 2010. Crustal sulfur is required to form magmatic Ni-Cu sulfide deposits[J]. *Mineral. Deposita*, 45: 241~257.
- Langmuir C H and Hanson G N. 1980. An evaluation of major element heterogeneity in the mantle sources of basalts[J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A 297: 383~407.
- Li C, Ripley E M and Naldrett A J. 2003. Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia[J]. *Econ. Geol.*, 98: 69~86.
- Li C, Ripley E M and Naldrett A J. 2009. A new genetic model for the giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts[J]. *Econ. Geol.*, 104: 291~301.
- Li C, Tao Y, Qi L, *et al.* 2012. Controls on PGE fractionation in the Emeishan picrites and basalts[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 90: 12~32.
- Li J, Xu J F, Suzuki K, He B, *et al.* 2010. Os, Nd and Sr isotope and trace element geochemistry of the Muli picrites[J]. *Lithos*, 119: 108~122.
- Lightfoot P C and Keays R R. 2005. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian Trap, Noril'sk Region[J]. *Econ. Geol.*, 100: 439~462.
- Lo C H, Chung S L, Lee T Y, *et al.* 2002. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian-Triassic boundary events[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198: 449~458.
- Ma Yansheng, Tao Yan, Zhu Feilin, *et al.* 2009. The sulfur isotopic characteristics and geological significance of jinbaoshan Pt-Pd deposit and Limabe Nickel deposit[J]. *Bull. Mineral. Petrol. Geochem.*, 28(2): 123~127 (in Chinese with English abstract).
- Naldrett A J. 2004. *Magmatic Sulfide Deposits*[M]. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1~727.
- Naldrett A J. 1999. World-class Ni-Cu-(PGE) deposits[J]. *Mineral. Deposita*, 34: 227~240.
- Naldrett A J. 2009. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[A]. Li

- C and Ripley E M. New Developments in Magmatic Ni-Cu and PGE deposits [ C ]. Beijing : Geol. Pub. House , 1 ~ 26.
- Osborn E F. 1959. Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magmas [ J ]. *Am. J. Sci.* , 257 : 609 ~ 647.
- Pang K N , Li C , Zhou M F , *et al.* 2008a. Abundant Fe-Ti oxide inclusions in olivine from the Panzhihua and Hongge layered intrusions , SW China [ J ]. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 156 : 307 ~ 321.
- Pang K N , Zhou M F , Lindsley D , *et al.* 2008b. Origin of Fe-Ti oxide ores in mafic intrusions : evidence from the Panzhihua intrusion , SW China [ J ]. *J. Petrol.* , 49 : 295 ~ 313.
- Pang K N , Li C , Zhou M F , *et al.* 2009. Mineral compositional constraints on petrogenesis and oxide ore genesis of the late Permian Panzhihua layered gabbroic intrusion , SW China [ J ]. *Lithos* , 110 : 199 ~ 214.
- Pang K N , Zhou M F , Qi L , *et al.* 2010. Flood basalt-related Fe-Ti oxide deposits in the Emeishan large igneous province , SW China [ J ]. *Lithos* , 119 : 123 ~ 136.
- 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 MORH [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 54 ( 12 ) : 3 379 ~ 3 389.
- Pirajno F. 2000. Ore Deposits and Mantle Plumes [ M ]. Dordrecht , Netherland : Kluwer Acad , 1 ~ 556.
- Renne P R and Basu A R. 1991. Rapid eruption of the Siberian Traps flood basalts at the Permo-Triassic boundary [ J ]. *Science* , 253 : 176 ~ 179.
- Reynolds I M. 1985. The nature and origin of titaniferous magnetite-rich layers in the upper zone of the Bushveld complex : A review and synthesis [ J ]. *Econ. Geol.* , 80 : 1 089 ~ 1 108.
- Saunders A D , England R W , Reichow M K , *et al.* 2005. A mantle plume origin for the Siberian traps [ J ]. *Lithos* , 79 : 407 ~ 424.
- Scoates J S and Friedman R M. 2008. Precise age of the platiferous merensky Reef , Bushveld Complex , South Africa , By the U-Pb Zircon chemical abrasion ID-TIMS technique [ J ]. *Econ. Geol.* , 103 : 465 ~ 471.
- Seat Z , Beresford S W , Grguric B A , *et al.* 2009. Reevaluation of the role of external sulfur addition in the genesis of Ni-Cu-PGE deposits [ J ]. *Chem. Geol.* , 104 : 521 ~ 538.
- Shao Hui , Xu Yigang , He Bin , *et al.* 2007. Petrology and Geochemistry of the Late Stage acidic volcanic rocks of the Emeishan large igneous province [ J ]. *Bull. Mineral. , Petrol. Geochem.* , 26 ( 4 ) : 350 ~ 358 ( in Chinese with English abstract ).
- Shellnutt J G , Zhou M F and Zellmer G F. 2009. The role of Fe-Ti oxide crystallization in the formation of A-type granitoids with implications for the Daly gap [ J ]. *Chem. Geol.* , 259 : 204 ~ 217.
- Song Xieyan , Zhang Chengjiang , Hu Ruizhong , *et al.* 2005a. Genetic links of magmatic deposits in the emeishan large igneous province with dynamics of mantle plume [ J ]. *J. Mineral. Petrol.* , 25 ( 4 ) : 35 ~ 44 ( in Chinese with English abstract ).
- Song X Y , Keays R R , Long X , *et al.* 2009. Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan large igneous province , SW China [ J ]. *Chem. Geol.* , 262 , 246 ~ 261.
- Song X Y , Zhong H , Zhou M F , *et al.* 2005. Magmatic sulfide deposits in the Permian Emeishan large igneous province , SW China [ A ]. Mao J W and Bierlein F P. *Mineral Deposit Research [ C ]*. Berlin : Springer , 465 ~ 468.
- 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 [ J ]. *Mineral. Deposit.* , 38 : 831 ~ 843.
- Song X Y , Zhou M F , Tao Y , *et al.* 2008. Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province , SW China [ J ]. *Chem. Geol.* , 253 ( 1 ~ 2 ) : 38 ~ 49.
- Sun X M , Wang S W , Sun W D , *et al.* 2008. PGE geochemistry and Re-Os dating of massive sulfide ores from the Bainazhai Cu-Ni deposit , Yunnan province , China [ J ]. *Lithos* , 105 : 12 ~ 24.
- Tang Q Y , Li C , Zhang M J , *et al.* 2013c. Resolving the disputed age of picrites associated with flood basalts in Sichuan and Yunnan , SW China [ J ]. *Mineralogy and Petrology ( under reviewed )*.
- Tang Q Y , Ma Y , Zhang M J , *et al.* 2013b. The origin of Ni-Cu-PGE sulfide mineralization in the margin of the Zhubu mafic-ultramafic intrusion in the Emeishan large igneous province , SW China [ J ]. *Econ. Geol.* , 108 ( in press ).
- Tang Q Y , Zhang M J , Li C , *et al.* 2013a. The chemical compositions and abundances of volatiles in the Siberian large igneous province [ J ]. *Chem. Geol.* , 339 : 84 ~ 91.
- Tao Y , Li C , Hu R Z , *et al.* 2010. Re-Os isotopic constraints on the genesis of the Limahe Ni-Cu deposit in the Emeishan large igneous province , SW China [ J ]. *Lithos* , 119 : 137 ~ 146.
- Tao Yan , Hu Ruizhong , Qi Liang , *et al.* 2007. Geochemical characteristics and metallogenesis of the Limahe mafic-ultramafic intrusion , Sichuan [ J ]. *Acta Petrol. Simi.* , 23 ( 11 ) : 2 785 ~ 2 800 ( in Chinese with English abstract ).
- Tao Yan , Hu Ruizhong , Wang Xingzhen , *et al.* 2006. The Cu-Ni-PGE mineralization in the Emeishan large igneous province-geochemical study on some typical deposits [ J ]. *Bull. Mineral. , Petrol. Geochem.* , 25 ( 3 ) : 236 ~ 244 ( in Chinese with English abstract ).
- Tao Yan , Ma Yansheng , Miao Laicheng , *et al.* 2008. Yunnan Jimbaoshan ultramafic intrusions SHRIMP U-Pb zircon ages [ J ]. *Chinese Science Bulletin* , 53 ( 22 ) : 2 828 ~ 2 832 ( in Chinese with English abstract ).
- Tao Y , Li C , Song X Y , *et al.* 2008. Mineralogical , petrological , and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores , SW China [ J ]. *Miner. Deposita* , 43 , 849 ~ 872.
- Toplis M J and Carroll M R. 1995. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability , phase relations , and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems [ J ]. *J. Petrol.* , 36 : 1 137 ~ 1 170.
- Tuff J , Takahashi E and Gibson S A. 2005. Experimental constraints on

- the role of garnet pyroxenites in the genesis of high-Fe mantle plume derived melts[J]. *J. Petrol.*, 46: 2 023~2 058.
- Wang C Y, Zhou M F and Qi L. 2010. Origin of extremely PGE-rich mafic magma system[J]. *Lithos*, 119: 147~161.
- Wang C Y, Zhou M F and Keays R R. 2006. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic ultramafic intrusion, SW China[J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 152: 309~321.
- Wang C Y, Zhou M F and Qi L. 2007. Permian flood basalts and mafic intrusions in the Jinping ( SW China ) SongDa ( northern Vietnam ) district[J]. *Chem. Geol.*, 243: 317~343.
- Wang C Y, Zhou M F and Zhao D. 2005. Mineral chemistry of chromite from the Permian Jinbaoshan Pt-Pd- sulphide-bearing ultramafic intrusion in SW China, with petrogenetic implications[J]. *Lithos*, 83: 47~66.
- Wang C Y, Zhou M F and Zhao D G. 2008. Fe-Ti-Cr oxides from the Permian Xinjie mafic-ultramafic layered intrusion in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 102: 198~217.
- Wang Denghong, Li Jiankang, Wang Chenghui, et al. 2007. New advances in geochronologic study related to Emei mantle plume and their significance[J]. *Mineral Deposits*, 26( 5 ): 550~556( in Chinese with English abstract ).
- Wang Denghong, Ying Hanlong, Luo Yaonan, et al. 2002. The platinum group element-chromite metallogenic series related to the bushveld complex in south africa[J]. *Geology and Resources*, 11( 4 ): 243~249( in Chinese with English abstract ).
- Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Shi Guiyong, et al. 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[J]. *Acta Geol. Sin.*, 81( 1 ): 1~16( in Chinese with English abstract ).
- Xia Linqi, Xu Xueyi, Li Xiangmin, et al. 2012. Comparison of three large igneous provinces ( Emeishan, Siberia, Deccan ) in Asia[J]. *Northwestern Geology*, 2: 1~26( in Chinese with English abstract ).
- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 228: 525~546.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, et al. 2003a. Late Permian flood basalts at Jin-ping area and its relation to Emei mantle plume[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 19( 1 ): 38~48( in Chinese with English abstract ).
- Xiao Long, Xu Yigang and He Bin. 2003b. Emei mantle plume—sub-continental lithosphere interaction [ J ]. *Geol. J. China Uni.*, 9( 2 ): 207~217( in Chinese with English abstract ).
- Xing C M, Wang C Y and Zhang M J. 2012. Volatile and C-H-O isotopic compositions of giant Fe-Ti-V oxide deposits in the Panxi region and their implications for the sources of volatiles and the origin of Fe-Ti oxide ores[J]. *Science China -Earth Sciences*, 55( 11 ): 1 782~1 795.
- Xu J F, Suzuki K, Xu Y G, et al. 2007. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 2 104~2 119.
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. 2001. Petrological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Permo-Triassic Emeishan Flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 58: 145~168.
- Xu Y G, He B, Chung S L, et al. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. *Geology*, 32: 917~920.
- Xu Y G, Mei H J, Xu J F, et al. 2003. Origin of two differentiation trends in the Emeishan flood basalts [ J ]. *Chinese Sci. Bull.*, 48: 390~394.
- Xu Yigang and Chung Sunlin. 2001. The Emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions [ J ]. *Geochimica*, 30( 1 ): 1~9( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Chengjiang and Li Xiaolin. 1998. Geochemical characteristics of platinum group elements in Emeishan basalts[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 14( 3 ): 299~304( in Chinese with English abstract ).
- Zhang M J, Hu P Q, Niu Y, et al. 2007. Chemical and stable isotopic constraints on the origin and nature of volatiles in sub-continental lithospheric mantle beneath eastern China[J]. *Lithos*, 96( 1~2 ): 55~66.
- Zhang M J, Niu Y and Hu P Q. 2009. Volatiles in the mantle lithosphere occurrence modes and chemical compositions[ A ]. Anderson J E and Coates R W. *The Lithosphere: Geochemistry, Geology and Geophysics*[ C ]. New York: Nova Science Publishers, Chapter 5: 171~212.
- Zhang M J, Li C, Fu P E, et al. 2011. The Permian Huangshanxi Cu-Ni deposit in western China: intrusive-extrusive association, ore genesis, and exploration implications [ J ]. *Mineral. Deposita*, 46( 2 ): 153~170.
- Zhang M J, Tang Q, Hu P, et al. 2013. Noble gas isotopic constraints on the origin and evolution of the Jinchuan Ni-Cu( PGE ) sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, Western China[J]. *Chem. Geol.*, 339: 301~312.
- Zhang Yunxiang, Luo Yaonan and Yang Chongxi. 1988. Panxi Rift [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 1~325( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Zhaochong. 2009. A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous province[J]. *Geology in China*, 36( 3 ): 634~646( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, et al. 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China[J]. *J. Petrol.*, 47: 1 997~2 019.
- Zhang Z C, Mao J W, Saunders A D, et al. 2009. Petrogenetic modeling of three mafic-ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints[J]. *Lithos*, 113: 369~392.
- Zhang Z C, Zhi X C, Chen L, et al. 2008. Re-Os isotopic compositions

- of picrites from the Emeishan flood basalt province, China[ J ]. Earth Planet. Sci. Lett. , 276 : 30~39.
- Zhang Zhaochong , Li Ying , Zhao Li , *et al.* 2007. Geochemistry of three layered mafic-ultramafic intrusions in the Panxi area and constraints on their sources[ J ]. Acta Petrol. Sin. , 23( 10 ) : 2 339~2 352( in Chinese with English abstract ).
- 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 ]. Mineral. Deposita , 41 : 599~606.
- Zhong H, Yao Y, Prevec S A , *et al.* 2004. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China[ J ]. Chem. Geol. , 203 : 237~252.
- Zhong H, Zhou X H, Zhou M F , *et al.* 2002. Platinum-group element geochemistry of the Hongge Fe-V-Ti deposit in the Pan-Xi area, southwestern China[ J ]. Minerl. Deposita , 37 : 226~239.
- Zhong H, Zhu W G , Hu R Z , *et al.* 2009. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Panzhihua A-type syenitic intrusion in the Emeishan large igneous province, southwest China and implications for growth of juvenile crust[ J ]. Lithos , 110 : 109~128.
- Zhong H, Li S M, Hai Y , *et al.* 2007. Solidification microstructure selection of the peritectic Nd-Fe-B alloys[ J ]. Science in China-Physics, Mechanics and Astronomy , 50 : 432~441.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y , *et al.* 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province ( SW China ) and the end-Guadalupian mass extinction[ J ]. Earth Planet. Sci. Lett. , 196 : 113~122.
- Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M , *et al.* 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan province, SW China[ J ]. J. Petrol. , 46 : 2 253~2 280.
- Zhou M F, Arndt N T, Malpas J , *et al.* 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[ J ]. Lithos , 103 : 352~368.
- Zhou M F, Zhao J H, Qi L , *et al.* 2006. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China[ J ]. Contrib. Mineral. Petrol. , 151 : 1~19.
- 艾羽, 张招崇, 王福生, 等. 2006. 攀枝花层状辉长质岩体的微量元素和锆铅氧同位素系统: 地幔源区和矿床成因的证据[ J ]. 地质学报, 80( 7 ): 995~1 004.
- 姜寒冰, 姜常义, 钱壮志, 等. 2009. 云南峨眉山高钛和低钛玄武岩的岩石成因[ J ]. 岩石学报, 25( 5 ): 1 117~1 134.
- 胡瑞忠, 陶 琰, 钟 宏, 等. 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例[ J ]. 地学前缘, 12( 1 ): 42~54.
- 马言胜, 陶 琰, 朱飞霖, 等. 2009. 金宝山铂-钼矿和力马河镍矿的硫同位素组成特征及地质意义[ J ]. 矿物岩石地球化学通报, 28( 2 ): 123~127.
- 邵 辉, 徐义刚, 何 斌, 等. 2007. 峨眉山大火成岩省晚期酸性火山岩的岩石地球化学特征[ J ]. 矿物岩石地球化学通报, 26( 4 ): 350~358.
- 宋谢炎, 张成江, 胡端忠, 等. 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, 25( 4 ): 35~44.
- 陶 琰, 胡瑞忠, 漆 亮, 等. 2007. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成矿分析[ J ]. 岩石学报, 23( 11 ): 2 785~2 900.
- 陶 琰, 胡瑞忠, 王兴阵, 等. 2006. 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[ J ]. 矿物岩石地球化学通报, 25( 3 ): 236~244.
- 陶 琰, 马言胜, 苗来成, 等. 2008. 云南金宝山超镁铁质侵入体的 SHRIMP U-Pb 锆石年龄[ J ]. 科学通报, 53( 22 ): 2 828~2 832.
- 王登红, 李建康, 王成辉, 等. 2007. 与峨眉山幔柱有关年代学研究的新进展及其意义[ J ]. 矿床地质, 26( 5 ): 550~556.
- 王登红, 应汉龙, 骆耀南, 等. 2002. 试论与布什维尔德杂岩体有关的铂族元素-铬铁矿矿床成矿系列及其对中国西南部的意义[ J ]. 地质与资源, 2002, 11( 4 ): 243~249.
- 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地球化学的差异及其成因意义[ J ]. 地质学报, 81( 1 ): 1~16.
- 夏林圻, 徐学义, 李向民, 等. 2012. 亚洲 3 个大火成岩省对比研究[ J ]. 西北地质, 2 : 1~26.
- 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[ J ]. 岩石学报, 19( 1 ): 38~48.
- 肖 龙, 徐义刚, 何 斌. 2003b. 峨眉山地幔柱-岩石圈的相互作用: 来自低钛和高钛玄武岩的 Sr-Nd 和 O 同位素证据[ J ]. 高校地质学报, 9( 2 ): 207~217.
- 徐义刚, 钟孙霖. 2001. 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, 30( 1 ): 1~9.
- 徐义刚, 梅厚钧, 许继峰, 等. 2003. 峨眉山大火成岩省中两类岩浆分异趋势及其成因[ J ]. 科学通报, 48( 4 ): 383~387.
- 张成江, 李晓林. 1998. 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征[ J ]. 岩石学报, 14( 3 ): 299~304.
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷[ M ]. 北京: 地质出版社, 1~325.
- 张招崇. 2009. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论[ J ]. 中国地质, 36( 3 ): 634~646.
- 张招崇, 李 莹, 赵 莉, 等. 2007. 攀西三个镁铁-超镁铁质岩体的地球化学及其对源区的约束[ J ]. 岩石学报, 23( 10 ): 2 339~2 352.

## 附中文参考文献