

doi:10.3799/dqkx.2014.126

# 岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床和 Fe-Ti-V 矿床的关键控矿因素评述:兼论与峨眉山玄武岩的关系

骆文娟

中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037

**摘要:** 峨眉山大火成岩省中广泛分布着赋存 Fe-Ti-V 氧化物矿的层状辉长岩体和赋存 Cu-Ni-PGE 硫化物矿的镁铁超镁铁岩体,系统归纳并分析了这两类成矿岩浆在控矿因素、岩浆性质、岩浆过程等方面存在的差异。对比 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和 Fe-Ti-V 氧化物矿床差异,认为岩浆分异程度、部分熔融程度、挥发分(S 和 P)以及是否存在地壳混染是造成这两类矿床成矿差异的原因。一系列的矿床实例分析表明高 Ti 或低 Ti 性质并不是玄武质岩浆成矿专属性的决定性因素,Fe-Ti-V 氧化物矿床和 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成与各自的控矿因素有关。

**关键词:** Fe-Ti-V 氧化物矿;Cu-Ni-PGE 硫化物矿;控矿因素;峨眉山玄武岩;火成岩;矿床。

中图分类号: P611.1

文章编号: 1000-2383(2014)10-1343-12

收稿日期: 2014-02-25

## Magmatic Cu-Ni-PGE Sulfide and Fe-Ti-V Oxide Deposits and Their Relationship to Emeishan Basalt in Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China: A Review

Luo Wenjuan

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract:** The Late-Middle Permian (about 260 Ma) Emeishan large igneous province in SW China contains two ore-forming magma series, i.e., small ultramafic subvolcanic sills that host magmatic Cu-Ni-PGE sulfide ores and large mafic layered intrusions that host giant Fe-Ti-V oxide deposits. The differences between these two types of ore-forming magma series in the factors controlling mineralization, the nature of magma and magmatic processes, etc., are systematically summarized and analyzed. And the comparisons between Cu-Ni-PGE sulfide-bearing intrusions and Fe-Ti-V oxide-bearing intrusions confirm that Cu-Ni-PGE sulfide mineralization or Fe-Ti-V oxide mineralization depend on the degrees of fractionation crystallization, partial melting, crustal contamination and volatiles (e.g. S and P). The combination of other deposits in the Emeishan large igneous province suggests that the high Ti affinity and low Ti affinity of the Emeishan basalts are not the key factors controlling Cu-Ni-PGE sulfide or Fe-Ti-V oxide mineralization, which are associated with individual factors respectively.

**Key words:** Fe-Ti-V oxide deposit; Cu-Ni-PGE sulfide deposit; factor controlling mineralization; Emeishan basalt; igneous rock; mineral deposit.

### 0 引言

峨眉山大火成岩省位于扬子地台西缘,为中二叠世末地幔柱岩浆活动产物。迄今为止,峨眉山大火成岩省已发现超大型 Fe-Ti-V 磁铁矿矿床 4 处,大

中型岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床近 10 处。峨眉山大火成岩省中,根据岩体特征和成矿类型差异,可分为与钒钛磁铁矿有关的大型层状辉长质岩体和与岩浆硫化物矿有关的小型镁铁质—超镁铁质岩体(宋谢炎等,2009),前者如攀枝花、红格、新街和白马,后

**基金项目:** 中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金(Nos.K1412,K1202);中国地质调查局地质调查工作项目(Nos.12120113090300,1212011220894-2)。

**作者简介:** 骆文娟(1986—),女,助理研究员,主要从事岩浆岩及相关矿产研究。E-mail: luowenjuan05@126.com

者如金山、力马河、朱布、杨柳坪和青矿山。有学者认为岩浆硫化物矿床与低 Ti 玄武岩有关,钒钛磁铁矿矿床则与高 Ti 玄武岩有关(胡瑞忠等, 2005; Zhou *et al.*, 2008; 宋谢炎等, 2009)。然而, 贵州东部的高钛玄武岩地区却没有发现钒钛磁铁矿; 赋存 Cu-Ni-PGE 硫化物矿的力马河镁铁-超镁铁岩特征微量元素比值大致与峨眉山高钛玄武岩相当, 与低钛玄武岩有明显区别(陶琰等, 2007)。所以, 钒钛磁铁矿与高 Ti 玄武岩, 岩浆硫化物矿和低 Ti 玄武岩的对应关系有待进一步商榷。此外, 是什么因素控制了这两类岩浆的成矿差异。这些都是目前地质学家比较关注的问题。因此, 本文将总结前人的一些认识和观点, 系统分析这两类矿床的成矿差异和控制因素以及这两类成矿岩浆与峨眉山玄武岩的关系。

## 1 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床

### 1.1 控制成矿的关键因素

对 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成, 前人有不同的认识: Naldrett (1999) 认为形成世界级 Cu-Ni-PGE 矿床的要素有: (1) 成矿岩浆中 S 要饱和, 并且硫化物发生熔离; (2) 熔离出来的硫化物与大量的岩浆相互作用, 从而使亲硫元素富集达工业品位; (3) 硫化物自身在有限的区域内富集, 并且该区域足以使硫化物成矿。而 Arndt *et al.* (2005b) 认为岩浆形成 Cu-Ni-PGE 矿床很大程度上取决于与地壳围岩的相互作用, 而小程度上与岩浆的 Ni、Cu 和 PGE 含量有关。Song *et al.* (2008) 认为岩浆硫化物矿床的形成与母岩浆性质、Ni、Cu、PGE 的含量、熔离硫化物的量以及硫化物熔浆结晶过程中元素间的分异均有关。Zhang *et al.* (2009a) 认为来自幔源的岩浆遭受了地壳物质的混染, 从而导致岩浆中 Si 的增加、Fe 的减少以及氧逸度的增加, 最终岩浆中 S 饱和并使硫化物发生不混溶现象。

由上述观点可以得出, Cu-Ni-PGE 矿床的形成主要取决于岩浆体系 S 是否达到饱和, 从而使硫化物发生熔离。有研究表明, PGE 的硫化物熔浆/硅酸盐熔浆分配系数高达  $10^3 \sim 10^5$ , 所以硫化物的熔离可以使残留岩浆中 PGE 急剧亏损 (Peach *et al.*, 1990; Bezmen *et al.*, 1994; Fleet *et al.*, 1996; 宋谢炎等, 2005, 2009), 并且 Ni 和 Cu 的硫化物/硅酸盐分配系数同样高达  $10^2 \sim 10^3$  (Francis, 1990; Peach *et al.*, 1990)。所以, 硫化物对 Cu-Ni-PGE 矿床的形成至关重要。

Mavrogenes and O'Neill (1999) 和 宋谢炎等 (2009) 认为导致岩浆中 S 饱和的因素可能为: (1) 外来 S 的加入; (2) 温度的降低导致岩浆 S 溶解度降低; (3) 压力的降低导致岩浆 S 溶解度增大; (4) 岩浆中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  的增加和 FeO 的降低, 导致 S 溶解度降低; (5) 氧逸度的增高和硫逸度的降低。也有研究表明  $\text{CO}_2$  的加入和压力的降低可以引起 S 在硅酸盐熔体中溶解度的降低, 从而使 S 饱和 (Gorbachev and Kashirceva, 1986)。所以, 控制硅酸盐岩浆中硫化物溶解度的主要因素可以概括为: 压力、温度、熔体的 FeO 含量和氧化还原状态以及熔体中镁铁质组分和酸性组分的比例 (Naldrett, 2004)。

### 1.2 可改变岩浆中 S 的地质过程

由上文可知, Cu-Ni-PGE 硫化物矿床形成的关键过程就是硫化物发生熔离, 那么什么样的过程可以改变上述控制 S 溶解度的因素, 从而使岩浆体系 S 的溶解度发生变化? 主要的地质过程有地壳混染, 岩浆混合和分离结晶作用。

**1.2.1 地壳混染** 大量研究表明地壳混染对于 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成具有很关键的作用, 是引起岩浆 S 饱和从而使硫化物熔体发生不混溶现象的重要过程之一 (Lightfoot *et al.*, 1990, 1993; Naldrett *et al.*, 1992, 1995; Brugmann *et al.*, 1993; Wooden *et al.*, 1993; Hawkesworth *et al.*, 1995; Lightfoot and Keays, 2005)。地壳混染的作用主要有: (1) 使岩浆温度降低, 从而使 S 溶解度降低; (2) 降低岩浆中的 Fe 含量, 从而降低 S 的溶解度; (3) 带入地壳中的 S; (4) 增加氧逸度, 从而降低 S 溶解度; (5) 使岩浆中 Si 增高, 降低 S 溶解度等。这些过程最终导致岩浆中 S 饱和, 从而发生硫化物不混溶。可见地壳混染是硫化物矿床形成的重要过程, 而评价地壳混染的程度对寻找硫化物矿床有重要的意义。

**1.2.2 分离结晶** 分离结晶过程是仅次于地壳混染的另一个重要的引发硫化物饱和的过程, 既可使岩浆体系中 S 浓度升高, 又可以改变岩浆的温度和组成。在分离结晶过程中, S 的溶解度主要与岩浆温度和 FeO 含量有关 (Li *et al.*, 2001b):  $S = 1.431 + 221 \times (\text{FeO} - 9) + 5 \times (\text{T} - 1200)$ 。比如铬铁矿和磁铁矿结晶时, 岩浆中的 FeO 含量迅速降低, 从而使 S 溶解度降低而达到饱和 (Haughton *et al.*, 1974)。这可以解释布什维尔德矿层状岩体中铬铁矿中含有大量金属硫化物这一现象。此外, 橄榄石和辉石的分离结晶促使岩浆中  $\text{SiO}_2$  增加, MgO、FeO 减少, 从而降低 S 的溶解度 (Haughton *et al.*, 1974; Irvine,

1975; Keays, 1995; Li *et al.*, 2001b). 并且, 热力学计算表明 20% 的橄榄石+斜方辉石+尖晶石结晶, 会引起镁铁质岩浆中 S 饱和(Li *et al.*, 2001b).

**1.2.3 岩浆混合** Li *et al.* (2001b) 通过热力学计算表明, 硫化物欠饱和的岩浆与适当数量的原始岩浆混合能使硫化物达到过饱和. 并且有大量的研究表明, 布什维尔德 Cu-Ni-PGE 矿床具有岩浆混合成因的特征(Irvine *et al.*, 1983; Naldrett *et al.*, 1986; Hulbert *et al.*, 1988; Lambert *et al.*, 1998; Naldrett, 2004; Arndt *et al.*, 2005a; Mitchell and Scoon, 2007; 吕林素等, 2011), 这些研究成果证实了岩浆混合作用对于 S 的饱和和具有一定的作用. 然而, 有学者认为岩浆混合模式对大多数的硫化物矿床成因并不适用(王焰, 2008).

### 1.3 熔融程度、起源温度和深度

具有形成 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床潜力的幔源岩浆, 应具有较高的 Cu-Ni-PGE 丰度, 而岩浆中 Cu-Ni-PGE 含量与初始岩浆形成时的熔融程度有关. 原始岩浆通常起源于地幔柱或者俯冲情况下的上地幔部分熔融(Li *et al.*, 2001a), 通常为石榴子石相稳定区(图 1), 上地幔的矿物主要有橄榄石、斜方辉石、单斜辉石, 含少量的石榴子石、尖晶石、白云母, 以及极其微量的碳酸盐矿物、磷灰石、榍石、钙钛矿和硫化物矿物(主要是黄铁矿). Cu-PGE 具有亲硫性, 所以这些元素主要赋存于硫化物矿物中. 实验研究表明在地幔压力下, S 在镁铁-超镁铁质岩浆中的溶解度为  $500 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$  (Wendlandt, 1982; Mavrogenes and O'Neill, 1999), 如果地幔源区 S 的丰度为  $200 \times 10^{-6}$ , 在这种条件下部分熔融程度必须达到 20%~40%, 硫化物才能全部被熔在硅酸盐熔体中(Keays, 1995), 这时的岩浆具有极强的富集 Cu-PGE 的能力. 地幔中的 Ni 主要赋存于橄榄石中. 这意味着幔源岩浆中 Ni 的含量受橄榄石熔融量的控制; 而 PGE 和 Cu 的含量则取决于硫化物是否能够全部被熔融出来. 因此, 部分熔融程度较高的科马提岩和苦橄岩具有较高的 Ni 和 PGE 含量, 而部分熔融程度较低的大洋中脊玄武岩(MORB)中 PGE 含量较低(宋谢炎等, 2009). 所以, 具有成矿潜力的岩浆一般具有较高的熔融程度, 而要达到较高的熔融程度, 较高的岩浆熔融温度( $>1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )是必不可少的, 其中新街岩体的原始岩浆形成温度为  $1\,240 \sim 1\,450\text{ }^{\circ}\text{C}$  (艾羽等, 2005), 其原始岩浆形成的压力为  $1.9 \sim 2.3\text{ GPa}$  (艾羽等, 2005), 为石榴子石相稳定区.

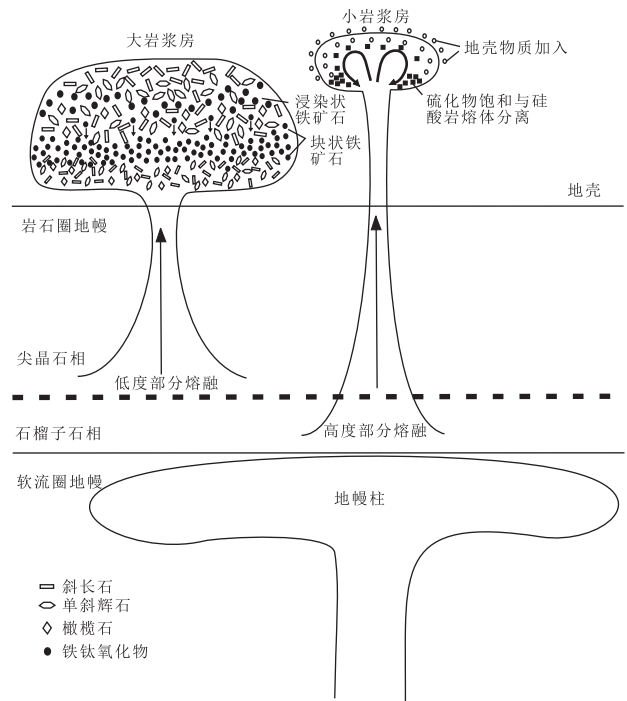


图 1 峨眉山大火成岩省中 Fe-Ti-V 氧化物矿床与 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿模式简图

Fig.1 The metallogenic model of the Fe-Ti-V oxide and Cu-Ni-PGE sulfide deposits in Emeishan large igneous province, SW China

### 1.4 Cu-Ni-PGE 硫化物矿的成矿岩浆性质

由上文可知, Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成与岩浆体系 S 是否能饱和有关. 要使大量的 S 加入到幔源岩浆体系, 则该岩浆需要与壳源物质发生充分的相互作用. 岩浆与围岩是否能发生相互作用, 取决于围岩的性质, 岩浆侵位的模式, 岩浆的组分、温度、粘度、挥发分含量(Huppert and Sparks, 1985; Leshner and Burnham, 2001)等. 在 3 种情况下(Arndt *et al.*, 2005b), 岩浆可以同化大量的地壳岩石: (1) 过热的岩浆在绝热条件下快速上升; (2) 在地壳岩浆房中, 岩浆很长一段时间处于液体状态, 并且与围岩接触; (3) 紊流流动的岩浆热侵蚀同化岩浆通道围岩或底部岩石. 因此, 具有 Cu-Ni-PGE 硫化物矿成矿潜力的岩浆为大流量低粘度高密度的高温岩浆.

科马提岩岩浆, 拉斑玄武岩岩浆和碱性镁铁-超镁铁岩岩浆都有较高的 Cu-Ni-PGE 丰度, 但只有科马提岩和拉斑玄武岩质苦橄岩形成岩浆硫化物矿床. 这与岩浆的性质有关, 形成碱性苦橄岩和麦美奇岩的岩浆为碱性岩浆, 通常含有较多的挥发分, 岩浆密度较低, 从而岩浆上升速度较快, 与地壳岩石相互作



用程度较小,引入的地壳 S 较少 (Anderson, 1995; Arndt *et al.*, 2005b). 有研究表明硫酸盐在镁铁—超镁铁岩浆中的溶解度,随着氧逸度、碱度的增加而增加 (Carroll and Webster, 1994; Naldrett, 2004), 而且,硫酸盐的溶解度要比硫化物的溶解度高出 10 倍 (Jugo *et al.*, 2005); 在  $H_2O$  和  $CO_2$  存在的情况下, S 容易变成硫酸盐,这可能是碱性岩浆不具备成矿潜力的部分原因. 另外,随着部分熔融程度的增加,一些难熔的组分(橄榄石、斜方辉石、单斜辉石)在岩浆体系中逐渐增多,因此,高度部分熔融的岩浆将富集  $MgO$ , 而亏损碱 ( $Na_2O + K_2O$ ). 换言之,碱性岩体不具备成矿的潜力,比如茨达高镁碱性岩体 (骆文娟等, 2011) 和富含挥发分密度较低的碱性苦橄岩 (Arndt *et al.*, 2005b). 此外,峨眉山玄武岩具有一些碱性的特点 (Song *et al.*, 2003), 这可能是峨眉山大火成岩省中没有大型的块状硫化物矿床的部分原因. 其他的大火成岩省也是如此 (如 Deccan, Karoo). 西伯利亚大火成岩省中的 Noril'sk Cu-Ni-PGE 硫化物矿的成矿岩体为拉斑玄武质苦橄岩.

### 1.5 矿床成因实例

Sudbury Cu-Ni-PGE 矿床被认为是由玄武质岩浆与酸性地壳熔体混合而引起硫化物不混溶形成的; Noril'sk 和 Voisey's Bay 矿床则是由地壳混染引起硫化物不混溶成矿的; 金川 Cu-Ni-PGE 矿床经历了橄榄石、辉石先结晶, 金属硫化物后熔离, 并以胶结物形式充填在硅酸盐矿物粒间 (Naldrett, 1997). 金宝山硫化物矿床具有较高的 PGE 品位, 被认为是不混溶的硫化物液滴与通过岩浆通道的新岩浆相互作用, 从而使硫化物中 PGE 富集形成的 (Tao *et al.*, 2007). 力马河与朱布硫化物矿床的形成都与硫化物的熔离有关, 且原始岩浆具有较高的部分熔融程度, 起源于地幔的石榴子石相稳定区 (陶琰等, 2006, 2007). 并且这些硫化物矿床的成矿岩体都为非碱性岩体, 这证实了碱性岩体不具有成矿潜力的结论. 由这些矿床实例可知, Cu-Ni-PGE 矿床的形成过程主要是硫化物的熔离过程, 而引起硫化物熔离的因素千变万化.

## 2 Fe-Ti-V 氧化物矿床

### 2.1 控制成矿的关键因素

对于 Fe-Ti-V 氧化物矿床的成因, 主要有以下几个观点: (1) 其中最流行的观点是 Wager (1960) 提出大规模的岩浆分异会产生富铁熔体, 从而使岩浆

达到 FeO 饱和, 最终在层状碱性侵入岩的上部形成 Fe-Ti-V 氧化物富集的岩石; (2) 也有学者认为其是液态 Fe-Ti 氧化物不混溶成因的 (Zhou *et al.*, 2005), 不混溶氧化物熔体的形成与矿物分离结晶、岩浆混合、氧逸度的突变、或者流体的加入有关; (3) 还有学者认为 Fe-Ti 氧化物的沉降作用是密度分层所致 (Ganino *et al.*, 2008; Pang *et al.*, 2008b), C 和 P 的浓度以及周期性的氧逸度波动对 Fe-Ti 氧化物矿床的形成不是主要因素; (4) Pang *et al.* (2008a) Fe-Ti 氧化物的早期分离结晶可以导致成矿.

由这些观点可以总结得出, 控制 Fe-Ti 氧化物形成的因素主要有: 母岩浆的性质与分异程度、氧逸度和挥发分.

(1) 母岩浆的性质与分异程度: Fe-Ti 氧化物矿床的形成与富集 Fe、Ti 的母岩浆有关, 而这种富集 Fe、Ti 的母岩浆可能与起源于地幔的富 Fe、Ti 熔体有关 (Zhang *et al.*, 2009b), 或者与岩浆分异使 Fe、Ti 的富集有关. Fe-Ti 氧化物开始结晶的温度与岩浆中 FeO 和  $TiO_2$  含量呈正比, 与  $SiO_2$  含量呈反比 (Toplis and Carroll, 1995; Ariskin and Barmina, 1999; Thy *et al.*, 2006). 换言之, 高 Fe、Ti, 低  $SiO_2$  的母岩浆有利于 Fe-Ti 氧化物的早期结晶, Fe、Ti 和  $SiO_2$  含量决定了 Fe-Ti 氧化物的析出时间.

(2) 氧逸度: Fe-Ti 氧化物倾向于在相对氧化的条件下结晶 (Toplis and Carroll, 1995; Juster *et al.*, 1989). 通常在岩浆演化的后期氧逸度会增高, 这可能是 Fe-Ti 氧化物通常在后期结晶的原因.

(3) 挥发分:  $H_2O$  的加入会导致岩浆中硅酸盐矿物的表面温度降低, 但是对磁铁矿的影响较小 (Sisson and Grove, 1993). 比如: 橄榄石 + 含水流体  $\rightarrow$  角闪石 + 黑云母 + 磷灰石 (Pang *et al.*, 2008a), 这表明了  $H_2O$  的加入破坏了无水硅酸盐矿物的稳定性, 使其转变成含水硅酸盐矿物, 降低了硅酸盐矿物的结晶温度, 从而使硅酸盐矿物晚于 Fe-Ti 氧化物结晶.  $CO_2$  的加入会使岩浆的氧逸度增加, 从而促使 Fe-Ti 氧化物结晶 (Ganino *et al.*, 2008). 当岩浆中 S 的作用增强时, 发生反应  $4FeO + S = FeS + Fe_3O_4$  (磁铁矿) (罗照华等, 2000), 这对岩浆型铁矿的形成有重要的意义. 实验研究表明  $P_2O_5$  和  $TiO_2$  可以加强花岗岩熔体和铁质玄武岩熔体间的不相容性, Fe、Ti 和 Ca 离子倾向于进入低硅富磷熔体 (Visser and van Groos, 1979; Ryerson and Hess, 1980; Kolker, 1982), 说明 P 在岩浆型铁矿的形成过程中具有一定的作用.

## 2.2 促使 Fe-Ti 氧化物与岩浆分离的地质过程

由上文可知,岩浆中 Fe-Ti 氧化物分离的关键因素是:母岩浆性质、氧逸度以及挥发分。在各种岩浆过程中,可以改变这些因素的岩浆过程主要有:地壳混染、分离结晶、岩浆混合。(1)地壳混染:可以带入各种挥发分( $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $P_2O_5$ ),从而改变岩浆的物理化学参数( $T$ 、 $P$  以  $f_{O_2}$ )。(2)分离结晶:可改变岩浆中 Fe、Ti、 $SiO_2$  比例,从而决定 Fe-Ti 氧化物的分离结晶时序。(3)岩浆混合:改变岩浆的氧逸度、挥发分含量,岩浆中 Fe、Ti、 $SiO_2$  比例。

然而,这 3 个岩浆过程仅仅是 Fe-Ti 氧化物分离的必要过程,因为不能排除当发生这 3 个岩浆过程时,其他因素的干扰。

## 2.3 熔融程度、起源温度和深度

实验结果表明,在部分熔融作用的初始阶段,铁、钛等成矿元素从矿物中优先进入熔体,使初始熔体具有富集 Fe、Ti 和 P 的特点(Sang *et al.*, 2005)。同时,由于这 3 种阳离子的结构作用使熔体的不混溶作用更易发生(莫宣学, 1993, 1985);或者可以理解为岩浆系统的熵增高,从而降低了系统的自由能,促进液态不混溶作用的发生。因此,部分熔融初始阶段的熔体才是富集 Fe、Ti 的,所以可以推测形成 Fe-Ti 氧化物矿床的岩浆具有较低的部分熔融程度,这被高钛玄武岩源区具有较低的部分熔融程度所证实(徐义刚和钟孙霖, 2001; Xu *et al.*, 2001)。此外,成矿岩浆的原始岩浆形成温度不能太高,也不能太低。温度太高将会使岩浆的部分熔融程度增大,稀释岩浆中的成矿元素(Fe、Ti);温度太低,会使成矿岩浆无法到达近地表而形成深成岩体,从而不能形成具有经济价值的矿床。如攀枝花岩体原始岩浆形成温度为  $1\ 100\sim 1\ 250\ ^\circ C$ , 压力为  $0.5\sim 1.7\ GPa$ , 为尖晶石相地幔源区(艾羽等, 2005)。

## 2.4 Fe-Ti-V 氧化物矿的成矿岩浆性质

一般认为  $H_2O$ 、 $H_2S$ 、 $HCl$ 、 $HF$  等与  $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $P_2O_5$  等这 3 类挥发分在硅酸盐熔体中的结构作用完全不同,前者起解聚作用,后者起增聚作用(王永强等, 1999)。熔体的聚合程度高,则桥氧的化学位高,含高电离势阳离子的熔体不稳定,易发生不混溶(莫宣学, 1985)。因此可以推测,如果不混溶成因模式(Zhou *et al.*, 2005)对于解释 Fe-Ti-V 氧化物矿的形成是成立的,那么 Fe-Ti-V 氧化物矿的成矿岩浆应该含有较多的  $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $P_2O_5$  等挥发分(相对于  $H_2O$ 、 $H_2S$ 、 $HCl$ 、 $HF$  等)。然而,迄今为止实验岩石学研究还不能证明基性岩浆(特别是 P 不富集的

岩浆)能熔离出铁钛氧化物矿浆。但是,Fe-Ti-V 氧化物矿的成矿岩浆仍然应该是富含较多挥发分的,因为含挥发分较多的岩浆密度较小,上升速度较快,与围岩相互作用较少,地壳混染程度较低,有利于 Fe、Ti 成矿元素的富集。此外,攀枝花岩体内普遍发育伟晶岩,高品位的铁矿石中铁钛氧化物常见包裹磷灰石,这些特征表明岩浆熔体中含有丰富的挥发分。Fe-Ti-V 氧化物矿的赋矿岩体通常为层状辉长岩(橄榄辉长岩、橄长岩、辉长岩、含长橄榄岩等),比 Cu-Ni-PGE 矿床的赋矿岩体(橄榄岩、辉橄岩、辉石岩等)的分异程度高。综上所述,Fe-Ti-V 氧化物矿的成矿岩浆是富含挥发分且富集 Fe、Ti 的高分异基性岩浆。

## 2.5 矿床成因实例

攀枝花钒钛磁铁矿矿床的形成被认为是有特殊的岩石圈地幔物质(富铁钛熔体)的加入,且被铁钛氧化物较早分离结晶作用控制(Pang *et al.*, 2008a; Zhang *et al.*, 2009b)。对于该观点的前半部分,应该可以理解,但对于后半部分“铁钛氧化物较早的分离结晶作用控制”尚存在难以理解的地方。首先其与攀枝花钒钛磁铁矿矿床中浸染状钛铁矿和钛磁铁矿自形程度较差(晶出时间较晚)不符。其次,如果铁钛氧化物为早期结晶相,那么密度较大的铁钛氧化物晶体是如何运移到近地表。虽然, Pang *et al.* (2008a) 发现攀枝花岩体堆晶橄榄石中含有氧化物包裹体,认为 Fe-Ti 氧化物是较早结晶的,但是也不能排除橄榄石在结晶的过程中包裹了刚刚形成的氧化物矿浆的可能性。值得注意的是单斜辉石和长石中包裹的氧化物包裹体一般为他形,表明该氧化物被包裹时为熔体状态,而且大部分氧化物是以基质的形式分布于各种硅酸盐矿物间,一般来说基质都不可能是先结晶的部分。

Hanski(1992)认为橄榄石、单斜辉石和斜长石的分离结晶会导致残留熔体富集 Fe。因此,铁钛氧化物形成经济矿床可能不是其早期分离结晶所致,而是由于其他硅酸盐的早期分离结晶致使残留熔体富 Fe 而成矿。这不仅有利于残留熔体中 Fe 的富集,而且有利于矿浆的运移。因此,笔者认为很可能是在硅酸盐矿物结晶的同时,在小范围内残余熔体迅速富集 Fe 而发生浸染状铁钛氧化物的熔离,随着沉降作用而凝结成块状矿石,由于硅酸盐矿物结晶和铁钛氧化物熔离之间的时间间隔极短,硅酸盐矿物并没有完全凝固(呈晶粥状),较大比重的铁钛氧化物容易沉淀于岩浆房的底部(Wang *et al.*, 2008, 图 1),从而造成了铁钛

氧化物先结晶的假象.同时,随着岩浆房的固结,之后形成的磁铁矿无法沉淀,形成了浸染状矿石(图 1).而攀枝花岩体没有明显的地壳混染痕迹(Zhang *et al.*, 2009b),可以排除外来物质的加入导致 Fe-Ti 氧化物率先熔离的可能性.所以只能凭借岩浆自身的分异作用使残余熔体富集 Fe-Ti.

### 3 Cu-Ni-PGE 硫化物岩体和 Fe-Ti-V 氧化物岩体对比分析

对于两类岩体在地球化学特征方面的差异,笔者(2013)曾在其博士论文中做了比较系统的分析和对比,在此不再赘述.本文主要分析两类岩体的主要地质特征差异,探讨是哪些因素引起了这两类岩体的成矿差异.

通常,Fe-Ti-V 氧化物矿的赋矿岩体体积较大,而 Cu-Ni-PGE 硫化物矿的赋矿岩体体积较小(表 1),所以在混染相同量的地壳物质情况下,含 Fe-Ti-V 氧化物矿的岩体地壳混染程度较低,而含 Cu-Ni-PGE 硫化物矿的岩体地壳混染程度较高.这就是小体积超基性岩体往往形成 Cu-Ni-PGE 硫化物矿,而大体积层状辉长质岩体形成 Fe-Ti-V 氧化物矿的原因(图 1).此外,含 Cu-Ni-PGE 硫化物矿的岩体中的辉石以斜方辉石为主(如力马河和白马寨岩体, Wang and Zhou, 2006; Sun *et al.*, 2008; Tao *et al.*, 2008),而 Fe-Ti-V 氧化物矿的赋矿岩体中的辉石以单斜辉石为主(如攀枝花岩体, Zhou *et al.*, 2005),这是因为含 Cu-Ni-PGE 硫化物矿的岩体通常经历较大程度的地壳混染(图 1),混染了富硅岩浆,使 SiO<sub>2</sub> 不饱和的橄榄石变为 SiO<sub>2</sub> 饱和的斜方辉石.这与 2 类含矿岩体的地壳混染程度差异相符,因此可以认为地壳混染程度是造成这 2 类矿床成矿差异的原因之一.

值得注意的是 Fe-Ti-V 氧化物矿矿床中有时含

有一些磷灰石(如攀枝花岩体),可能 P 对于岩浆型铁矿床的形成具有一定的控制作用,虽然具体的机制尚不清楚.而含 Cu-Ni-PGE 硫化物矿的岩体则侵入到含少量黄铁矿的硅质灰岩或石英岩中(表 1, Zhang *et al.*, 2009b),因此这些岩体中很可能混染进了 S.笔者推测岩浆体系中 S 和 P 的相对含量可能是这两类矿床成矿差异的因素之一.

在峨眉山大火成岩省中,含 Fe-Ti-V 氧化物矿的岩体通常侵位于前寒武纪地层中(如攀枝花、太和和白马),而含 Cu-Ni-PGE 硫化物矿岩体大多侵位于泥盆系、奥陶系,少数侵位于前震旦系(如金宝山、力马河、杨柳坪)(表 1).相比之下,含 Fe-Ti-V 氧化物矿的岩体侵位深度相对比较深,因此其岩浆冷却速度比较缓慢,有利于岩浆的分异;Cu-Ni-PGE 硫化物矿岩体则侵位深度较浅,岩浆冷却相对快,岩浆结晶分异不充分(图 1).此外,在攀西地区,含 Fe-Ti-V 氧化物矿的辉长岩岩体通常伴生一些中酸性岩体(表 1),且两者之间具有同源演化关系(Shellnutt *et al.*, 2009; Shellnutt *et al.*, 2011);Cu-Ni-PGE 矿床的赋矿岩体的基性程度相对较高,无中酸性岩体相伴生.换言之,相对于 Cu-Ni-PGE 硫化物矿,Fe-Ti-V 氧化物矿的成矿岩浆演化程度较高.鉴于这些差异,可以认为岩浆分异程度也是造成这两类矿床成矿差异的原因之一.

除了以上差异,有学者认为攀枝花 Fe-Ti-V 氧化物矿的母岩浆具有富 Fe、Ti 的特征,这与其原始岩浆的低部分熔融程度(1%~10%)有关(张招崇等, 2007),原始岩浆成分类似于铁质玄武岩和铁质苦橄岩(Zhang *et al.*, 2009b);而对于 Cu-Ni-PGE 矿床,要求满足母岩浆含有较高的成矿元素且其自身含有的挥发分不能太多(比如科马提岩和拉斑玄武质苦橄岩)、加上外来 S 的作用以及其原始岩浆具有高的部分熔融程度(>20%)的条件下,才能将地幔中的 Cu-Ni-PGE 元素萃取出来,比如力马河镁

表 1 2 类成矿岩体地质特征对比

Table 1 Comparisons between Cu-Ni-PGE sulfide-bearing intrusions and Fe-Ti-V oxide-bearing intrusions on geological features

|        | Fe-Ti-V 氧化物矿岩体                                  | Cu-Ni-PGE 硫化物矿岩体   |
|--------|---|--|
| 侵位地层   | 大多数前寒武系,少数志留系                                   | 大多数泥盆系、奥陶系,少数前震旦系  |
| 岩体出露面积 | 攀枝花约 30 km <sup>2</sup> ,白马约 50 km <sup>2</sup> | 金宝山约 5 km <sup>2</sup> ,力马河约 0.12~0.16 km <sup>2</sup> ,杨柳坪约 0.5 km <sup>2</sup> |
| 辉石种类   | 单斜辉石  | 斜方辉石   |
| 围岩特征   | 白云质灰岩、玄武岩                                       | 含少量黄铁矿的硅质岩   |
| 磷灰石    | 攀枝花岩体中间带的岩石含 5% 磷灰石                             | 无  |
| 伴生岩体   | 中酸性岩  | 无  |



铁—超镁铁质岩体的原始岩浆的部分熔融程度约为 19% (陶琰等, 2007)。除此之外, 岩浆的部分熔融程度与岩浆温度和起源深度密切相关, 而后两者又决定了岩浆的性质。所以, 成矿母岩浆的部分熔融程度也是控制这两类矿床成矿差异的因素之一 (图 1)。

综上所述, 岩浆分异程度、部分熔融程度、挥发分 (S 和 P)、以及是否存在地壳混染是造成这两类矿床成矿差异的原因。

## 4 两类成矿岩浆与峨眉山玄武岩的关系

大量研究认为峨眉山大火成岩省中岩浆中铜镍铂族元素成矿岩体、钒钛磁铁矿成矿岩体与峨眉山玄武岩有亲缘关系 (Zhu *et al.*, 2003; 陶琰等, 2004; 宋谢炎等, 2005; 管涛等, 2006; Song *et al.*, 2006)。根据对峨眉山玄武岩的地球化学研究, 可以将其划分为高钛和低钛两种类型 (Xu *et al.*, 2001; Xiao *et al.*, 2004)。前人认为岩浆硫化物矿床与低 Ti 玄武岩有关, 钒钛磁铁矿矿床则与高 Ti 玄武岩有关 (胡瑞忠等, 2005; Zhou *et al.*, 2008; 宋谢炎等, 2009)。然而, 笔者认为峨眉山大火成岩省中 2 类成矿岩浆与高钛、低钛玄武岩的关系并不是一种简单的对应关系。

### 4.1 Cu-Ni-PGE 硫化物矿与峨眉山玄武岩的关系

已有研究表明 (陶琰等, 2007), 力马河镁铁—超镁铁岩的岩石特征微量元素比值 (La/Sm、Gd/Yb、Ti/Y) 大致与高钛峨眉山玄武岩相当, 与低钛峨眉山玄武岩有明显的区别, 但原始岩浆强不相容微量元素绝对含量大大低于高钛玄武岩, 其原始岩浆熔融程度远高于高钛玄武岩原始岩浆。所以, 力马河镁铁—超镁铁岩与低钛或高钛峨眉山玄武岩没有直接的联系。然而, 杨柳坪 Cu-Ni-PGE 硫化物矿赋矿岩体的上部覆盖着峨眉山高 Ti 玄武岩, 这些玄武岩强烈亏损 PGE, 可能与杨柳坪 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床形成有关 (Song *et al.*, 2003; 宋谢炎等, 2005)。

岩石学模拟计算表明, 金宝山超镁铁岩体平均组成扣除约 36% 的橄榄石后得到残余熔体的主量元素成分与低钛玄武岩相当, 而且具有相似的微量元素标准化图解配分模式 (陶琰等, 2004)。值得注意的是, 模拟过程中扣除了约 36% 的橄榄石, 笔者在上文提到大量的硅酸盐矿物的结晶会导致岩浆中 S 饱和而发生硫化物熔离, 所以低钛玄武岩可能是经

历了橄榄石结晶分异和硫化物熔离的残余熔体。换言之, 金宝山超镁铁岩体 + 硫化物矿石 = 低钛玄武岩 + 橄榄石 + 早期熔离的硫化物, 所以金宝山超镁铁岩体与该区低 Ti 玄武岩有可能是同源异相产物。

### 4.2 Fe-Ti-V 氧化物矿与峨眉山玄武岩的关系

同时赋存钒钛磁铁矿和铂族元素的新街岩体的稀土和微量元素配分曲线基本上和低钛玄武岩相似, 而与高钛玄武岩差别较大 (赵莉等, 2006), 即表明该成矿岩体与高钛玄武岩没有太大的成因联系。所以该岩体中的 Fe-Ti-V 氧化物矿与高钛玄武岩没有直接的关系, 或者可以理解为 Fe-Ti-V 氧化物矿中的 Ti 并不来源于高钛玄武岩。然而, 岩石学模拟表明攀枝花岩体起源于峨眉山高 Ti 玄武岩的分离结晶作用 (Ganino, 2008), 从而形成 Fe-Ti-V 氧化物矿。

有学者认为, 攀西地区峨眉山玄武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, 2005)。这可能是贵州高 Ti 玄武岩地区没有 Fe-Ti-V 氧化物矿的原因之一。

基于以上讨论, Cu-Ni-PGE 硫化物矿床既可能与低 Ti 玄武岩浆有关, 也可能与高 Ti 玄武岩浆有关, 或者都没有关系; 而 Fe-Ti-V 氧化物矿床既可能与高 Ti 玄武岩有关, 又可能与高 Ti 玄武岩无关。所以, 作者认为高 Ti 或低 Ti 性质并不是玄武岩浆成矿专属性的决定性因素。Fe-Ti-V 氧化物矿床和 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成与高 Ti/低 Ti 玄武岩没有必然联系, 而是与上文所述的一些控矿因素有关。

## 5 结论

峨眉山大火成岩省岩浆 Cu-Ni-PGE 和 Fe-Ti-V 矿化岩体广泛分布, 构成了两类重要的岩浆矿床。Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成主要取决于岩浆中 S 的饱和程度, 而压力、温度、熔体的 FeO 含量和氧化状态, 以及熔体中镁铁质组分和酸性组分的比例是影响 S 饱和程度的关键因素。Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的原始岩浆具有较高的部分熔融程度、温度和较深的起源深度 (石榴子石相地幔源区)。而 Fe-Ti-V 氧化物矿床的形成则与母岩浆的性质、岩浆分异、

氧逸度及挥发分(P、S、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>)有关。Fe-Ti-V 氧化物矿床的原始岩浆具有较低的部分熔融程度、温度和较浅的起源深度(尖晶石相地幔源区)。这两类成矿岩浆与高钛、低钛玄武岩的关系并不是一种简单的对应关系。高 Ti 或低 Ti 性质并不是玄武岩成矿专属性的决定性因素,两类成矿岩浆的成矿差异是其自身岩浆性质和岩浆过程中一系列控矿因素所导致的。

## References

- Ai, Y., Zhang, Z. C., Wang, F. S., et al., 2005. The Panzhihua and Xinjie Mafic-Ultramafic Intrusions; The Products of the Closed and Open Magmatic Systems. The Fourth National Academic Seminar of Volcano, Beihai, 1 (in Chinese).
- Anderson, A. T., 1995. CO<sub>2</sub> and the Eruptibility of Picrite and Komatiite. *Lithos*, 34(1-3): 19-25. doi: 10.1016/0024-4937(95)90005-5
- Ariskin, A. A., Barmina, G. S., 1999. An Empirical Model for the Calculation of Spinel-Melt Equilibria in Mafic Igneous Systems at Atmospheric Pressure: 2. Fe-Ti Oxides. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(3): 251-263. doi: 10.1007/s004100050482
- Arndt, N., Jenner, G., Ohnenstetter, M., et al., 2005a. Trace Elements in the Merensky Reef and Adjacent Norites Bushveld Complex, South Africa. *Mineralium Deposita*, 40(5): 550-575. doi: 10.1007/s00126-005-0030-x
- Arndt, N., Leshner, C. M., Czamanske, G. K., 2005b. Mantle-Derived Magmas and Magmatic Ni-Cu-(PGE) Deposits. Economic Geology, 100th Anniversary Volume, Salt Lake City, 5-23.
- Bezmen, N. S., Asif, M., Brugmann, G. E., et al., 1994. Experimental Determinations of Sulfide-Silicate Partitioning of PGE and Au. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 1251-1260.
- Brugmann, G. E., Naldrett, A. J., Asif, M., et al., 1993. Siderophile and Chalcophile Metals as Tracers of the Evolution of the Siberian Trap in the Noril'sk Region, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(9): 2001-2018. doi: 10.1016/0016-7037(93)90089-F
- Carroll, M. R., Webster, J. D., 1994. Solubilities of Sulfur, Noble Gases, Nitrogen, Chlorine, and Fluorine in Magmas. *Reviews in Mineralogy*, 30: 231-279.
- Fleet, M. E., Crocket, J. H., Stone, W. E., 1996. Partitioning of Platinum-Group Elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and Gold between Sulfide Liquid and Basalt Melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2397-2412. doi: 10.1016/0016-7037(96)00100-7
- Francis, R. D., 1990. Sulfide Globules in Mid-Ocean Ridge Basalts (MORB) and the Effect of Oxygen Abundance in Fe-S-O Liquids on the Ability of Those Liquids to Partition Metals from MORB and Komatiitic Magmas. *Chemical Geology*, 85(3-4): 199-213. doi: 10.1016/0009-2541(90)90001-N
- 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. *Mineralium Deposita*, 43(6): 677-694. doi: 10.1007/s00126-008-0191-5
- Gorbachev, N. S., Kashirceva, G. A., 1986. Fluid-Magmatic Differentiation of Basaltic Magma and Equilibrium with Magmatic Sulfides. In: Experiments in the Study of Important Problems in Geology. Nauka, Moscow, 98-119.
- Guan, T., Huang, Z. L., Xu, D. R., et al., 2006. Lithogeochemistry of the Sulfide-Bearing Mafic-Ultramafic Rock at Baimazhai, Jinping, Southern Yunnan. *Chinese Journal of Geology*, 41(3): 441-454 (in Chinese with English abstract).
- Hanski, E. J., 1992. Petrology of the Pechenga Ferropicrites and Cogenetic, Ni-Bearing Gabbro-Wehrlite Intrusions, Kola Peninsula, Russia. *Geological Survey of Finland, Bulletin*, 367: 192.
- Houghton, D. R., Roeder, P. L., Skinner, B. J., 1974. Solubility of Sulfur in Mafic Magmas. *Economic Geology*, 69: 451-467. doi: 10.2113/gsecongeo.69.4.451
- Hawkesworth, C. J., Lightfoot, P. C., Fedorenko, V. A., et al., 1995. Magma Differentiation and Mineralisation in the Siberian Continental Flood Basalts. *Lithos*, 34(1-3): 61-88. doi: 10.1016/0024-4937(95)90011-X
- Hu, R. Z., Tao, Y., Zhong, H., et al., 2005. Mineralization Systems of a Mantle Plume: A Case Study from the Emeishan Igneous Province, Southwest China. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 42-54 (in Chinese with English abstract).
- Hulbert, L. J., Duke, J. M., Eckstrand, O. R., et al., 1988. Geological Environments of the Platinum Group Elements. *Geological Survey of Canada, Open File*, 1440: 3-99.
- Huppert, H. E., Sparks, R. S. J., 1985. Komatiites I: Eruption and Flow. *Journal of Petrology*, 26(3): 694-725. doi: 10.1093/petrology/26.3.694
- Irvine, T. N., 1975. Crystallization Sequences in the Muskox Intrusion and other Layered Intrusions—II. Origin of Chromitite Layers and Similar Deposits of Other Magmatic Ores. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(6-7): 991-1020. doi: 10.1016/0016-7037(75)90043-5



- Irvine, T. N., Keith, D. W., Todd, S. G., 1983. The J-M Platinum-Palladium Reef of the Stillwater Complex, Montana; II. Origin by Double-Diffusive Convective Magma Mixing and Implications for the Bushveld Complex. *Economic Geology*, 78(7): 1287—1334. doi: 10.2113/gsecongeo.78.7.1287
- Jugo, P. J., Luth, R. W., Richards, J. P., 2005. An Experimental Study of the Sulfur Content in Basaltic Melts Saturated with Immiscible Sulfide or Sulfate Liquids at 1 300 °C and 1.0 GPa. *Journal of Petrology*, 46(4): 783—798. doi: 10.1093/petrology/egh097
- Juster, T. C., Grove, T. L., Perfit, M. R., 1989. Experimental Constraints on the Generation of FeTi Basalts, Andesites, and Rhyodacites at the Galapagos Spreading Centre, 85°W and 95°W. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7): 9251—9274. doi: 10.1029/JB094iB07p09251
- Keays, R. R., 1995. The Role of Komatiitic and Picritic Magmatism and S-Saturation in the Formation of Ore Deposits. *Lithos*, 34(1—3): 1—18. doi: 10.1016/0024—4937(95)90003—9
- Kolker, A., 1982. Mineralogy and Geochemistry of Fe-Ti Oxide and Apatite (Nelsonite) Deposits and Evaluation of the Liquid Immiscibility Hypothesis. *Economic Geology*, 77(5): 1146—1158. doi: 10.2113/gsecongeo.77.5.1146
- Lambert, D. D., Foster, J. G., Frick, L. R., et al., 1998. Geodynamics of Magmatic Cu-Ni-PGE Sulfide Deposits: New Insights from the Re-Os Isotopic System. *Economic Geology*, 93(2): 121—136. doi: 10.2113/gsecongeo.93.2.121
- Leshner, C. M., Burnham, O. M., 2001. Multicomponent Elemental and Isotopic Mixing in Ni-Cu-(PGE) Ores at Kambalda, Western Australia. *Canadian Mineralogist*, 39(2): 421—446. doi: 10.2113/gscanmin.39.2.421
- Li, C. S., Maier, W. D., de Waal, S. A., 2001a. Magmatic Ni-Cu versus PGE Deposits: Contrasting Genetic Controls and Exploration Implications. *South African Journal of Geology*, 104(4): 309—318. doi: 10.2113/gssajg.104.4.309
- Li, C. S., Maier, W. D., de Waal, S. A., 2001b. The Role of Magma Mixing in the Genesis of PGE Mineralization in the Bushveld Complex: Thermodynamic Calculation and New Interpretations. *Economic Geology*, 96(3): 653—662. doi: 10.2113/gsecongeo.96.3.653
- Lightfoot, P. C., Hawkesworth, C. J., Hergt, J., et al., 1993. Remobilisation of the Continental Lithosphere by a Mantle Plume: Major-, Trace-Element and Sr-, Nd-, and Pb-Isotope Evidence from Picritic and Tholeiitic Lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(2): 171—188. doi: 10.1007/BF00307754
- Lightfoot, P. C., Keays, R. R., 2005. Siderophile and Chalcophile Metal Variations in Flood Basalts from the Siberian Trap, Noril'sk Region: Implication for the Origin of the Ni-Cu-PGE Sulfide Ores. *Economic Geology*, 100(3): 439—462. doi: 10.2113/gsecongeo.100.3.439
- Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Gorbachev, N. S., et al., 1990. Geochemistry of the Siberian Trap of the Noril'sk Area, USSR, with Implications for the Relative Contributions of Crustal and Mantle to Flood Basalt Magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(6): 631—644. doi: 10.1007/BF01167284
- Luo, W. J., 2013. Comparisons between Ore-Bearing and Barren Mafic-Ultramafic Intrusions in the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Luo, W. J., Zhang, Z. C., Hou, T., et al., 2011. Geochronology and Geochemistry of the Cida Complex in the Panxi District: Constraints on the Duration of the Emeishan Mantle Plume. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2947—2962 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. H., Marakushev, A. A., Paniakh, H. A., et al., 2000. The Origin of Copper-Nickel Sulfide Deposits—Exemplified by Norilsk (Russia) and Jinchuan (China). *Mineral Deposits*, 19(4): 330—339 (in Chinese with English abstract).
- Lü, L. S., Wang, Y. F., Li, H. B., et al., 2011. Discussion on the Metallogenesis of Bushveld Magmatic Cu-Ni-PGE Sulfide Deposit in South Africa. *Mineral Deposits*, 30(6): 1129—1148 (in Chinese with English abstract).
- Mavrogenes, J. A., O'Neill, H. S. C., 1999. The Relative Effects of Pressure, Temperature and Oxygen Fugacity on the Solubility of Sulfide in Mafic Magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7—8): 1173—1180. doi: 10.1016/S0016—7037(98)00289—0
- Mitchell, A. A., Scoon, R. N., 2007. The Merensky Reef at Winnaarshoek, Eastern Bushveld Complex: A Primary Magmatic Hypothesis Based on a Wide Reef Facies. *Economic Geology*, 102(5): 971—1009. doi: 10.2113/gsecongeo.102.5.971
- Mo, X. X., 1985. The Structure of Magmatic Melt. *Geological Science and Technology Information*, 4(2): 21—31 (in Chinese).
- Mo, X. X., 1993. Study on the Structure of Magmatic Melt. In: Xiao, Q. H., Li, X. B., Liu, S. C., et al., eds., *Contemporary Geological Science Frontiers*. China University of Ge-

- osciences Press, Wuhan, 270—274 (in Chinese).
- Naldrett, A. J., 1997. Key Factors in the Genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and Other World-Class Ni-Cu-PGE Deposits: Implications for Exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3): 283—315. doi: 10.1080/08120099708728314
- Naldrett, A. J., 1999. World-Class Ni-Cu-PGE Deposits: Key Factors in Their Genesis. *Mineralium Deposita*, 34(3): 227—240. doi: 10.1007/s001260050200
- Naldrett, A. J., 2004. Magmatic Sulfide Deposit: Geology, Geochemistry and Exploration. Springer, Berlin, 137—277, 481—522, 727.
- Naldrett, A. J., Fedorenko, V., 1995. Ni-Cu-PGE Deposits of the Noril'sk Region, Siberia: Their Formation in Conduits for Flood Basalt Volcanism. *Trans. Inst. Mining Metallurgy, Section B Applied Earth Science*, 104: B1—B86.
- Naldrett, A. J., Gasparrini, E. C., Barnes, S. J., et al., 1986. The Upper Critical Zone of the Bushveld Complex and the Origin of Merensky-Type Ores. *Economic Geology*, 81(5): 1105—1117. doi: 10.2113/gsecongeo.81.5.1105
- Naldrett, A. J., Lightfoot, P. C., Fedorenko, V., et al., 1992. Geology and Geochemistry of Intrusions and Flood Basalts of the Noril'sk Region, USSR, with Implication for the Origin of the Ni-Cu Ores. *Economic Geology*, 87(4): 975—1004. doi: 10.2113/gsecongeo.87.4.975
- Pang, K. N., Li, C. S., Zhou, M. F., et al., 2008a. Abundant Fe-Ti Oxide Inclusions in Olivine from the Panzhihua and Hongge Layered Intrusions, SW China: Evidence for Early Saturation of Fe-Ti Oxides in Ferrobasaltic Magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156(3): 307—321. doi: 10.1007/s00410-008-0287-z
- 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. *Journal of Petrology*, 49(2): 295—313. doi: 10.1093/petrology/egm082
- Peach, C. L., Mathez, E. A., Keays, R. R., 1990. Sulfide Melt-Silicate Melt Distribution Coefficients for Noble-Metals and Other Chalcophile Elements as Deduced from MORB: Implications for Partial Melting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(12): 3379—3389. doi: 10.1016/0016-7037(90)90292-S
- Ryerson, F. J., Hess, P. G., 1980. The Role of  $P_2O_5$  in Silicate Melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(4): 611—624. doi: 10.1016/0016-7037(80)90253-7
- Sang, Z. N., Xia, B., Zhou, Y. S., et al., 2005. Experimental Study of Ore Gabbro Liquid Immiscibility. *Science in China (Series D)*, 48(4): 496—505. doi: 10.1360/02yd0034
- Shellnutt, J. G., Wang, K. L., Zellmer, G. F., et al., 2011. Three Fe-Ti Oxide Ore-Bearing Gabbro-Granitoid Complexes in the Panxi Region of the Emeishan Large Igneous Province, SW China. *American Journal of Science*, 311(9): 773—812. doi: 10.2475/09.2011.02
- Shellnutt, J. G., Zhou, M. F., Zellmer, G. F., 2009. The Role of Fe-Ti Oxide Crystallization in the Formation of A-Type Granitoids with Implications for the Daly Gap: An Example from the Permian Baima Igneous Complex, SW China. *Chemical Geology*, 259(3—4): 204—217. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.10.044
- Sisson, T. W., Grove, T. L., 1993. Experimental Investigations of the Role of  $H_2O$  in Cal-Alkaline Differentiation and Subduction Zone Magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(2): 143—166. doi: 10.1007/BF00283225
- Song, X. Y., Hu, R. Z., Chen, L. M., 2009. Geochemical Natures of Copper, Nickel and PGE and Their Significance for the Study of Origin and Evolution of Mantle-Derived Magmas and Magmatic Sulfide Deposits. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 287—305 (in Chinese with English abstract).
- Song, X. Y., Zhang, C. J., Hu, R. Z., et al., 2005. Genetic Links of Magmatic Deposits in the Emeishan Large Igneous Province with Dynamics of Mantle Plume. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(4): 35—44 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Mineralium Deposita*, 38(7): 831—843. doi: 10.1007/s00126-003-0362-3
- Song, X. Y., Zhou, M. F., Keays, R. R., et al., 2006. Geochemistry of the Emeishan Flood Basalts at Yangliuping, Sichan, SW China: Implications for Sulfide Segregation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(1): 53—74. doi: 10.1007/s00410-006-0094-3
- 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. *Chemical Geology*, 253(1—2): 38—49. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.04.005
- Sun, X. M., Wang, S. W., Sun, W. D., et al., 2008. PGE Geochemistry and Re-Os Dating of Massive Sulfide Ores from the Baimazhai Cu-Ni Deposit, Yunnan Province, China. *Lithos*, 105(1—2): 12—24. doi: 10.1016/j.lithos.2008.02.002

- Tao, Y., Hu, R. Z., Qi, L., et al., 2007. Geochemical Characteristics and Metallogenesis of the Limahe Mafic-Ultramafic Intrusion, Sichuan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2785—2800 (in Chinese with English abstract).
- Tao, Y., Hu, R. Z., Wang, X. Z., et al., 2006. The Cu-Ni-PGE Mineralization in the Emeishan Large Igneous Province—Geochemical Study on Some Typical Deposits. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25(3): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Tao, Y., Li, C. S., Hu, R. Z., et al., 2007. Petrogenesis of the Pt-Pd Mineralized Jinbaoshan Ultramafic Intrusion in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(3): 321—337. doi:10.1007/s00410—006—0149—5
- Tao, Y., Li, C. S., 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. *Mineralium Deposita*, 43(8): 849—872. doi:10.1007/s00126—008—0207—1
- Tao, Y., Luo, T. Y., Gao, Z. M., et al., 2004. The Relation between Emeishan Continental Flood Basalts and Cu-Ni-PGE Deposits of Southwestern China Trap—A Case Study on Jinbaoshan Mafic-Ultramafic Intrusion, Yunnan. *Geological Review*, 50(1): 9—15 (in Chinese with English abstract).
- Thy, P., Leshner, C. E., Nielsen, T. F. D., et al., 2006. Experimental Constraints on the Skaergaard Liquid Line of Descent. *Lithos*, 92(1—2): 154—180. doi:10.1016/j.lithos.2006.03.031
- Toplis, M. J., 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. *Journal of Petrology*, 36(5): 1137—1170. doi:10.1093/petrology/36.5.1137
- Visser, W., van Groos, A. F. K., 1979. Effects of  $P_2O_5$  and  $TiO_2$  on Liquid-Liquid Equilibria in the System  $K_2O$ - $FeO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ . *American Journal of Science*, 279(8): 970—988. doi:10.2475/ajs.279.8.970
- Wager, L. R., 1960. The Major Element Variation of the Layered Series of the Skaergaard Intrusion and a Re-Estimation of the Average Composition of the Hidden Layered Series and of the Successive Residual Magma. *Journal of Petrology*, 1(3): 364—398. doi:10.1093/petrology/1.3.364
- Wang, C. Y., Zhou, M. F., 2006. Genesis of the Permian Baimazhai Magmatic Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, Yunnan, SW China. *Mineralium Deposita*, 41(8): 771—783. doi:10.1007/s00126—006—0094—2
- Wang, C. Y., Zhou, M. F., Zhao, D. G., 2008. Fe-Ti-Cr Oxides from the Permian Xinjie Mafic-Ultramafic Layered Intrusion in the Emeishan Large Igneous Province, SW China: Crystallization from Fe- and Ti-Rich Basaltic Magmas. *Lithos*, 102(1—2): 198—217. doi:10.1016/j.lithos.2007.08.007
- Wang, Y., 2008. Origin of the Permian Baimazhai Magmatic Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposits, Yunnan: Implications for the Relationship of Crustal Contamination and Mineralization. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 332—343 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Q., Zhang, Z. C., Xu, P. C., et al., 1999. Advance in the Structure Studies on Silicate Melts. *Advance in Earth Sciences*, 14(1—6): 168—172 (in Chinese with English abstract).
- Wendlandt, R. F., 1982. Sulfide Saturation of Basalt and Andesite Melts at High Pressures and Temperatures. *American Mineralogist*, 67(9—10): 877—885.
- Wooden, J. L., Czamanske, G. K., Fedorenko, V. A., et al., 1993. Isotopic and Trace-Element Constraints on Mantle and Crustal Contributions to Siberian Continental Flood Basalts, Noril'sk Area, Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(15): 3677—3704. doi:10.1016/0016—7037(93)90149—Q
- 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: Implications for Plume-Lithosphere Interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3—4): 525—546. doi:10.1016/j.epsl.2004.10.002
- Xu, Y. G., Chung, S. L., Jahn, B. M., et al., 2001. Petrologic and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan Flood Basalts in Southwestern China. *Lithos*, 58(3—4): 145—168. doi:10.1016/S0024—4937(01)00055—X
- Xu, Y. G., Chung, S. L., 2001. The Emeishan Large Igneous Province: Evidence for Mantle Plume Activity and Melting Conditions. *Geochimica*, 30(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. C., Mao, J. W., Chai, F. M., et al., 2009a. Geochemistry of the Permian Kalatongke Mafic Intrusions, Northern Xinjiang, Northwest China: Implications for the Genesis of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits. *Economic Geology*, 104(2): 185—203. doi:10.2113/gsecongeo.104.2.185
- Zhang, Z. C., Mao, J. W., Saunders, A. D., et al., 2009b. Petro-



- genetic Modeling of Three Mafic-Ultramafic Layered Intrusions in the Emeishan Large Igneous Province, SW China, Based on Isotopic and Bulk Chemical Constraints. *Lithos*, 113(3-4): 369-392. doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.023
- Zhang, Z. C., Li, Y., Zhao, L., et al., 2007. Geochemistry of Three Layered Mafic-Ultramafic Intrusions in the Panxi Area and Constraints on Their Sources. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2339-2352 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L., Zhang, Z. C., Wang, F. S., et al., 2006. Open-System Magma Chamber: An Example from the Xinjie Mafic-Ultramafic Layered Intrusion in Panxi Region, SW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1565-1578 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Lithos*, 103(3-4): 352-268. doi: 10.1016/j.lithos.2007.10.006
- Zhou, M. F., Robinson, P. T., Leshner, C. M., et al., 2005. Geochemistry, Petrogenesis and Metallogenesis of the Panzihua Gabbroic Layered Intrusion and Associated Fe-Ti-V Oxide Deposits, Sichuan Province, SW China. *Journal of Petrology*, 46(11): 2253-2280. doi: 10.1093/petrology/egi054
- Zhu, D., Luo, T. Y., Gao, Z. M., et al., 2003. Differentiation of the Emeishan Flood Basalts at the Base and throughout the Crust of Southwest China. *International Geology Review*, 45(5): 471-477. doi: 10.2747/0020-6814.45.5.471
- 附中文参考文献**
- 艾羽, 张招崇, 王福生, 等, 2005. 四川攀枝花和新街镁铁-超镁铁质岩体: 封闭体系和开放体系岩浆房演化的产物. 全国第四次火山学术研讨会, 北海, 1.
- 管涛, 黄智龙, 许德如, 等, 2006. 云南金平白马寨含矿镁铁-超镁铁岩体岩石地球化学. *地质科学*, 41(3): 441-454.
- 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. *地学前缘*, 12(1): 42-54.
- 骆文娟, 2013. 峨眉山大火成岩省无矿基性超基性岩体与含矿岩体对比研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 骆文娟, 张招崇, 侯通, 等, 2011. 攀西茨达复式岩体年代学和地球化学: 对峨眉山地幔柱活动时间的约束. *岩石学报*, 27(10): 2947-2962.
- 罗照华, Marakushev, A. A., Paniakh, H. A., 等, 2000. 铜镍硫化物矿床的成因——以诺里尔斯克(俄罗斯)和金川(中国)为例. *矿床地质*, 19(4): 330-339.
- 吕林素, 汪云峰, 李宏博, 等, 2011. 南非布什维尔德岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成因探讨. *矿床地质*, 30(6): 1129-1148.
- 莫宣学, 1985. 岩浆熔体结构. *地质科技情报*, 4(2): 21-31.
- 莫宣学, 1993. 岩浆熔体结构研究. 见: 肖庆辉, 李晓波, 刘树臣, 等, 编. 当代地质科学前沿. 武汉: 中国地质大学出版社, 270-274.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰, 2009. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义. *地学前缘*, 16(4): 287-305.
- 宋谢炎, 张成江, 胡瑞忠, 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. *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岩成矿分析. *岩石学报*, 23(11): 2785-2800.
- 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. *矿物岩石地球化学通报*, 25(3): 236-244.
- 陶琰, 罗泰义, 高振敏, 等, 2004. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系: 以云南金宝山岩体为例. *地质论评*, 50(1): 9-15.
- 王焰, 2008. 云南二叠纪白马寨铜镍硫化物矿床的成因: 地壳混染与矿化的关系. *矿物岩石地球化学通报*, 27(4): 332-343.
- 王永强, 张招崇, 徐培苍, 等, 1999. 硅酸盐熔体结构的研究进展和问题. *地球科学进展*, 14(1-6): 168-172.
- 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. *地球化学*, 30(1): 1-9.
- 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. *岩石学报*, 23(10): 2339-2352.
- 赵莉, 张招崇, 王福生, 等, 2006. 一个开放的岩浆房系统: 攀西新街镁铁-超镁铁质层状岩体. *岩石学报*, 22(6): 1565-1578.