

峨眉大火成岩省钒钛磁铁矿矿床地质特征及成因

宋谢炎 陈列锰 于宋月 陶琰 余宇伟 栾燕 张晓琪 何海龙

中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550081

摘要: 峨眉大火成岩省内带的攀西地区发现了攀枝花、红格、白马、太和等超大型钒钛磁铁矿矿床,是世界上最大的钒钛磁铁矿矿集区。与世界其他类似的钒钛磁铁矿矿床不同,攀西地区的这些矿床都呈层状赋存在大型层状镁铁-超镁铁岩体的下部和中部岩相带,而不是上部岩相带。最近十多年的系统研究表明,这些矿床形成的主要机制有:①幔源岩浆在深部岩浆房发生硅酸盐矿物的分离结晶形成了富钛铁岩浆;②富钛铁岩浆进入浅部含矿岩体后,钛铁氧化物成为近液相线矿物,较早结晶并经过流动分选,使得钛铁氧化物在下部和中部岩相带聚集成矿。

关键词: 大火成岩省; 磁铁矿; 钛铁氧化物

中图分类号: P618.2 文章编号: 1007-2802(2018)06-1003-16 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.112

Geological Features and Genesis of the V-Ti Magnetite Deposits in the Emeishan Large Igneous Province, SW China

SONG Xie-yan, CHEN Lie-meng, YU Song-yue, TAO Yan, SHE Yu-wei, LUAN Yan, ZHANG Xiao-qi, HE Hai-long

State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: A series of large V-Ti magnetite deposits, such as the Panzhihua, Hongge, Baima and Taihe, have been discovered in the Panxi area, which is the largest V-Ti magnetite ore-concentrated area, in the central zone of the Emeishan LIP. Different from the analogous deposits, these deposits occur as ore layers in the lower and middle zones of the layered intrusions, rather than in the upper zone. The systematic studies in recent ten years have indicated the following dominant formation mechanism of the deposits: ①the evolution of basaltic magma derived from the mantle through fractionation of silicate minerals in a magma chamber at deep level resulted in the formation of the Fe-Ti enriched magma; ②when the Fe-Ti enriched magma entered into a shallower magma chamber, Fe-Ti oxides in the semi liquidus state were crystalized early and then were concentrated in the lower and middle zones of the chamber via flow sorting to have formed the deposit.

Key words: largeigneous province; magnetite; Fe-Ti oxides

1 引言

岩浆型钒钛磁铁矿矿床主要有两种赋存形式:①赋存于大型层状岩体上部的辉长岩、辉长苏长岩和闪长岩中的矿床(南非的 Bushveld 杂岩体,加拿大 Sept Iles 岩体);②赋存于斜长岩套中的钒钛磁铁矿矿床和钛铁矿矿床(加拿大的 Lac Tio 和挪威的 Tellnes 矿床)。前者与地幔柱有关,其母岩浆为富铁的拉斑质或苦橄质玄武岩浆(Barnes and Hoatson,

1994; McBirney, 1996; Mathison and Ahmat, 1996);后者通常形成于造山后伸展环境,母岩浆多为富铁的闪长质岩浆(Wilmart *et al.*, 1989; Charlier *et al.*, 2010)。该类铁矿床的突出特点是富含钒和钛,世界钒资源的 98%、钛资源的 92% 来源于钒钛磁铁矿床,因此,是重要的铁矿床类型。

对层状岩体中钒钛磁铁矿矿床的成因争论由来已久,具有代表性的观点主要有富铁钛熔浆液态不混溶(Philpotts, 1967; Reynolds, 1985)、重力结

收稿编号: 2018-073 2018-05-06 收到 2018-06-28 改回

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0600503); 中科院战略先导专项(B类)(XDB18030200, XDB18030203)

第一作者简介: 宋谢炎(1962-),男,研究员,研究方向: 岩浆岩矿床。E-mail: songxieyan@vip.gyig.ac.cn.

晶分异(Emslie , 1975; Ashwal , 1978; Charlier *et al.* , 2006)、压力或氧逸度周期性变化(Cawthorn and Ashwal , 2009) 等。

Bateman(1951) 最早提出演化的基性岩浆分离出富 Fe 和富 Si 两种不混溶熔体并由前者形成磁铁矿富集层。这一模式被用来解释 Bushveld 杂岩体(Reynolds , 1985; Von Gruenewaldt , 1993) 和 Skaergaard 侵入体(Jakobsen *et al.* , 2011) 上部辉长岩带中 Fe-Ti 氧化物层的成因。

Fenner(1931) 认为拉斑质岩浆在低氧逸度(f_{O_2}) 下, 经橄榄石、斜长石、辉石结晶分异使残余岩浆向富 Fe 的方向演化, 最终导致铁钛氧化物的结晶和重力堆积, 并在大型层状岩体上部岩相带形成钒钛磁铁矿层(Wager and Brown , 1968; Toplis and Carroll , 1995; Charlier *et al.* , 2006)。

Cawthorn 和 McCarthy (1980)、Cawthorn 和 Ashwal(2009) 认为, 压力的增加会导致层状岩体中磁铁矿的较早结晶和磁铁矿层的形成, 压力的反复变化可以形成多个磁铁矿层位。Toplis 和 Carroll (1995)、Botcharnikov 等(2008) 等的实验研究表明, 在玄武质岩浆体系中, 氧逸度的变化对 Fe-Ti 氧化物的结晶温度和相对时间起着明显的控制作用。因此, 由围岩中流体的加入而导致岩浆中氧逸度升高和磁铁矿的饱和与结晶(Ganino *et al.* , 2008; Bai *et al.* , 2012)。

很难想象有什么机制可以造成天然岩浆房压力和氧逸度的周期性变化。因此, 更多的争论集中在富铁钛熔浆液态不混溶和重力结晶分异两种成因观点上。富铁钛熔浆液态不混溶成因观点的问题在于, 熔融包裹体成分分析(Namur *et al.* , 2010; Jakobsen *et al.* , 2005 , 2011) 以及实验岩石学模拟结果证明这种 Fe-Ti 熔浆不混溶发生在镁铁质岩浆演化晚期较低温的条件下(小于 1100 °C) (Philpotts , 1967 , 1979; Naslund , 1983; Bogaerts and Schmidt , 2006; Veksler *et al.* , 2006 , 2007; Veksler , 2009) , 该温度接近基性岩浆的固相线温度。重力结晶分异成矿模式的挑战在于岩浆重力结晶分异是否有足够的效率形成规模庞大而又高品位的矿层。

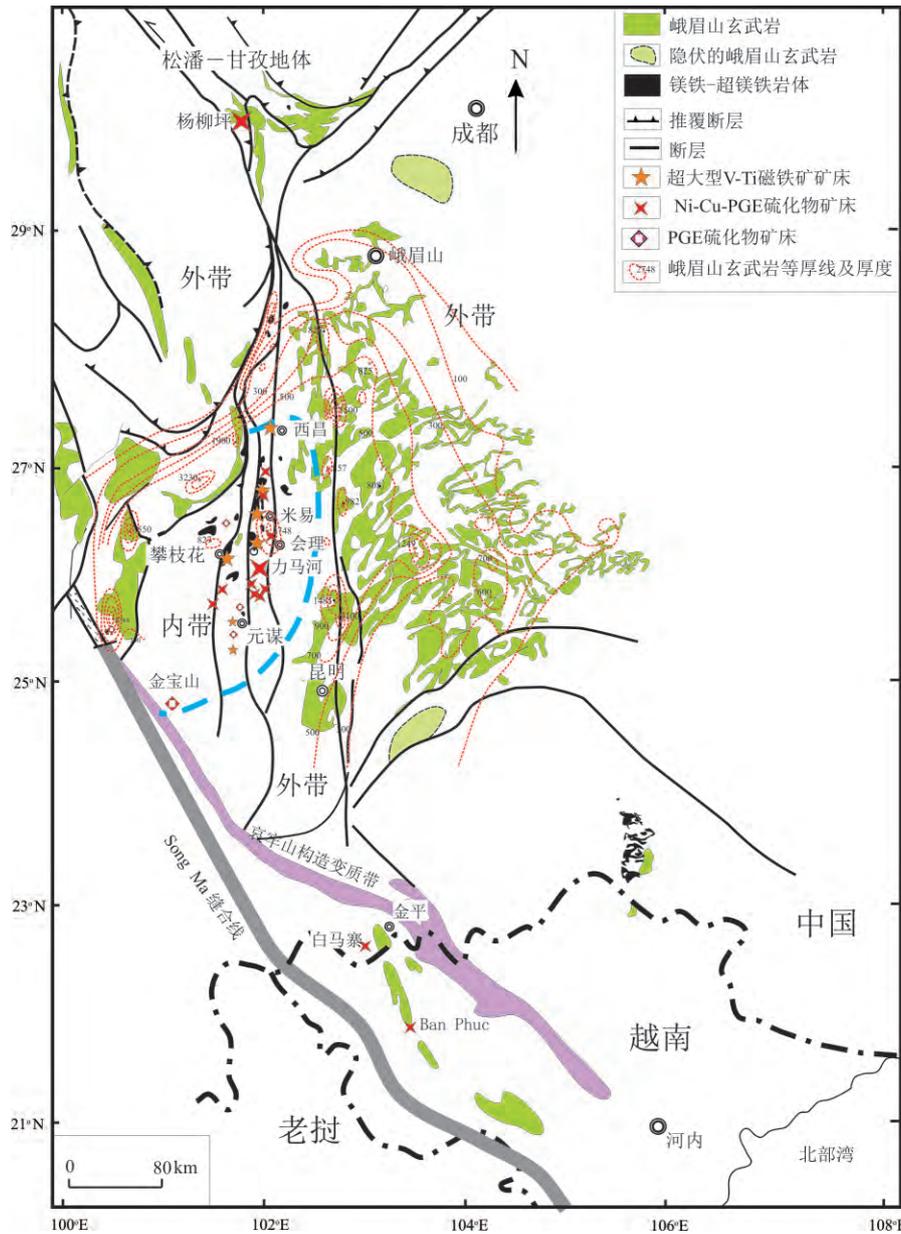
中国峨眉大火成岩省内带的四川攀西地区是世界最大的钒钛磁铁矿集区, 自北向南分布有太和、白马、攀枝花、红格及新街等岩体。这些矿床蕴藏着 30 亿吨 Fe、1580 万吨 V_2O_5 、8.7 亿吨 TiO_2 , V 和 Ti 分别占世界储量的 11.6% 和 35.17%, 中国总储量的 62.6% 和 90.54%, 为研究层状岩体钒钛磁

铁矿床的成因提供了得天独厚的条件。2000 年以来, 不少学者对这些含矿岩体开展了岩石学、地球化学、成矿成因等方面的研究, 并取得了许多重要进展, 但是, 对于含钒钛磁铁矿层状岩体的母岩浆特征、岩浆演化过程、韵律层理成因、厚层矿体成因仍存在较多争议(Zhong *et al.* , 2002 , 2004 , 2005; Bai *et al.* , 2012 , 2014; Wang and Zhou , 2013; 钟宏等 2007)。

2 峨眉大火成岩省内带钒钛磁铁矿矿床的基本地质特征

峨眉山大火成岩省位于中国西南部云、贵、川地区, 向南可延伸至越南北部, 覆盖面积超过 50 万 km^2 (Song *et al.* , 2001; 2004; Xu *et al.* , 2001; Xiao *et al.* , 2004; 张招崇等 2005) , 是由峨眉山玄武岩、镁铁-超镁铁侵入岩及同时代中酸性碱性侵入岩构成。峨眉山玄武岩平行不整合覆盖在中二叠统茅口组灰岩之上, 被上二叠统-上三叠统、侏罗系的地层所覆盖。根据峨眉山玄武岩类型和侵入岩组合, 峨眉山大火成岩省可分为内带和外带。内带不仅高钛和低钛玄武岩均发育, 而且具有玄武岩-层状岩体-正长岩“三位一体”的岩石组合; 而外带则主要发育高钛峨眉山玄武岩和零星的镁铁-超镁铁岩体(Xu *et al.* , 2001; 2004; Xiao *et al.* , 2004; 宋谢炎等 2005; Song *et al.* , 2008; 图 1、2) 。近年来获得的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄, 白马岩体为(262 ± 2) Ma (Zhou *et al.* , 2008)、新街岩体为(259 ± 3) Ma (Zhou *et al.* , 2002)、红格岩体为(259 ± 1.3) Ma (Zhong and Zhu , 2006; Zhong *et al.* , 2011)、攀枝花岩体为(263 ± 3) Ma (Zhou *et al.* , 2005)、太和岩体为(259 ± 3) Ma (She *et al.* , 2014) , 说明这些层状岩体与二叠世峨眉山地幔柱高钛玄武岩浆活动的成因联系。

位于峨眉山大火成岩省内带的攀西地区, 南北向断裂构造发育, 攀枝花等层状岩体也是沿这些断裂分布(图 2) 。前人将这些断裂构造看作是“攀西裂谷”的证据, 是峨眉山玄武岩浆的上升通道(张云湘等, 1988) 。然而, 一些重要的地质现象并不支持这种看法。首先, 攀西地区峨眉山玄武岩被强烈剥蚀, 顶、底完整的剖面较少; 其次, 同时代的层状岩体、碱性岩体和小型镁铁-超镁铁岩体等侵入岩出露地表, 特别是多数层状岩体的产状发生了强烈倾斜; 第三, 下三叠统砾岩普遍发育, 玄武岩质砾石非常常见; 第四, 早古生代及元古代基底岩石大面积暴露地表。因此, 笔者认为这些南北向断裂更可能是中生代形成的, 使得峨眉山玄武岩遭受强烈剥



修改自 Zhou 等(2002) 和 Song 等(2008)

图1 峨眉山溢流玄武岩及峨眉山大火成岩省中同期镁铁-超镁铁侵入岩分布图

Fig.1 Distribution of the Emeishan flood basalts and contemporaneous mafic-ultramafic intrusions in the Emeishan Large Igneous Province

蚀,也使得层状岩体等侵入岩暴露地表。

3 层状岩体的岩相学及矿床学特征

攀西地区几个钒钛磁铁矿含矿岩体在岩相学和矿床学特征上既有很多共性,也存在一些差异。其中攀枝花岩体是最典型和具有代表性的含矿岩体,其岩相分带清晰、矿石类型多样,特别是致密块状富铁矿层厚度巨大且延伸稳定,对于正确理解攀西地区层状岩体和钒钛磁铁矿矿床的成因具有重要的意义。因此,本文以攀枝花岩体为例描述

这些层状岩体的岩相学及矿床学特点,对其它岩体的特点进行简单介绍。

攀枝花岩体为单斜岩体,走向北东-南西,倾向北西,倾角 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$,侵入于新元古代灯影组白云质大理岩、片岩、片麻岩、变质砂岩中(图3)。岩体顶部与三叠纪沉积岩、正长岩等呈断层接触(攀西地质大队,1987)。Song等(2013)根据攀枝花岩体的岩石-矿物组合和结构构造的变化,鉴别出11个岩性旋回,并划分出边缘带、下部、中部和上部岩相带,每个岩相带由数个岩性旋回构成。图3显示攀



据 Song 等(2008, 2009) 和张晓琪等(2011)

图2 峨眉山大火成岩省内带攀西地区岩浆矿床分布图

Fig.2 Distribution of various magmatic deposits in the central zone of the Emeishan Large Igneous Province

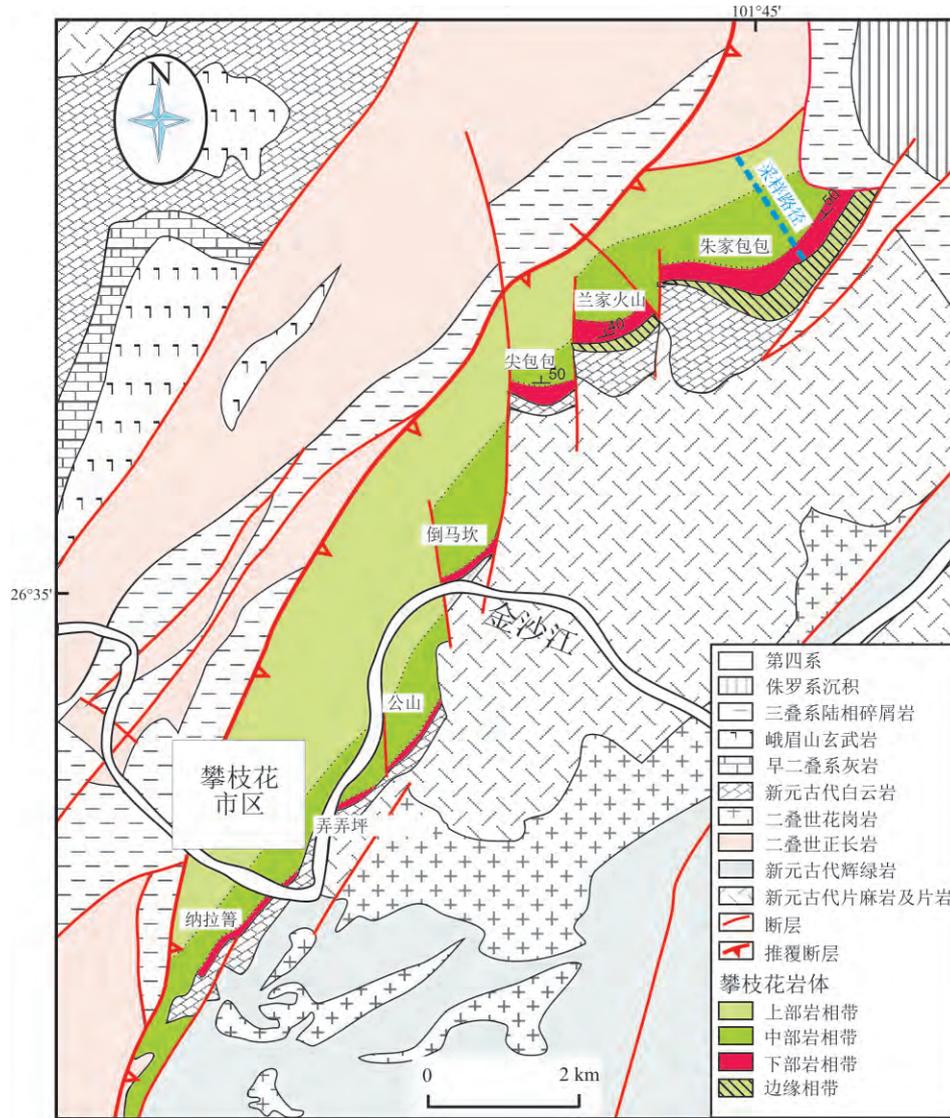
枝花岩体的“边缘带”仅出现在岩体北部,向南缺失,没有观察到从边缘“淬冷”的隐晶质或细晶结构向内部细粒或中粒结构的过渡。因此,该“边缘带”是否能够代表攀枝花岩体的母岩浆,还需要进一步研究。

3.1 下部岩相带

如图4所示,下部岩相带与“边缘带”呈突变接触关系,由5个岩性旋回构成。旋回I由粗粒磁铁辉长岩及辉长岩组成,旋回II-V均由块状钒钛磁铁矿层和上部中粒磁铁辉长岩构成。在朱家包包-尖山矿段,旋回II和V下部的致密块状钒钛磁铁矿富矿层厚度达40~60 m,是攀枝花矿床最重要的赋矿层位,不仅是攀西地区富铁矿最为发育的矿段,在

世界其它层状岩体中也未见类似报道。而在南部公山和纳拉箐矿段,致密块状钒钛磁铁矿富矿层的厚度很薄而且不连续。

致密块状富矿石钛铁氧化物含量一般超过85%,硅酸盐矿物(单斜辉石、斜长石和橄榄石)含量小于10%,充填状磁黄铁矿和镍黄铁矿约2%~3%。磁铁矿呈中粒状或镶嵌粒状集合体,占钛铁氧化物的85%~90%,钛铁矿出溶条纹十分发育;钛铁矿呈自形或半自形中细粒状,占钛铁氧化物总量的10%~15%,磁铁矿出溶条纹少见。硅酸盐矿物呈细粒状或不规则状,矿物颗粒边缘出现因熔蚀形成的“港湾状”;还可以见到一些异常的“反应边”结构,例如斜长石边缘的角闪石“反应边”。单斜辉石



据 Song 等(2013)

图3 攀枝花岩体地质简图

Fig.3 Simplified geological map of the Panzhihua intrusion

席列构造非常发育(图 5b; Song *et al.*, 2013)。尽管旋回 II 和 V 底部致密块状钒钛磁铁矿富矿层厚度巨大,但 10~30 cm 厚、横向延伸稳定的磁铁辉长岩夹层普遍存在,构成宏观的条带状构造,其钛铁氧化物含量小于 50%,其中未见致密块状钒钛磁铁矿的细脉(图 5a)。

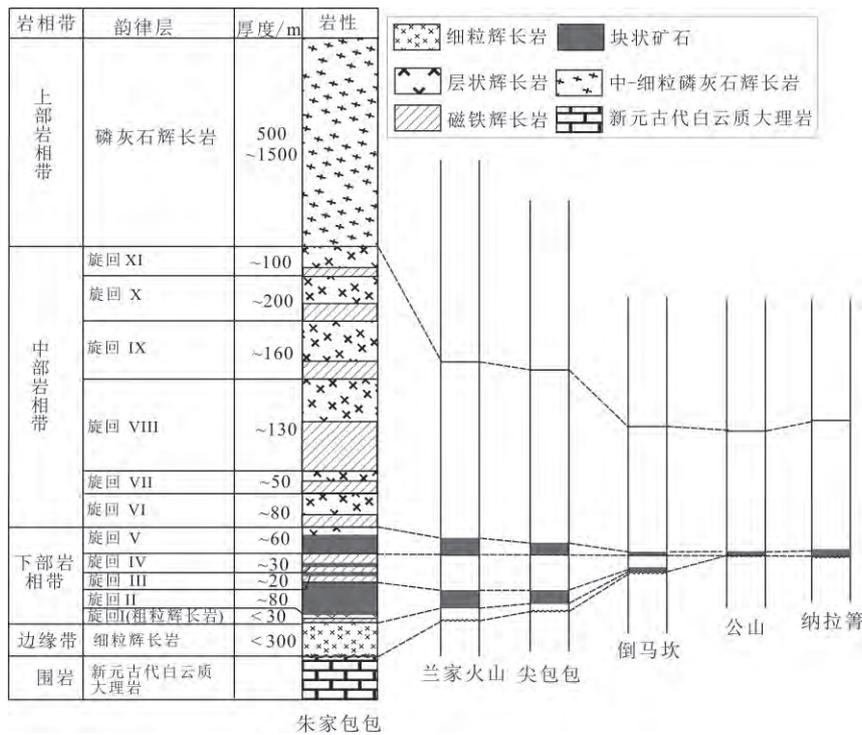
3.2 中部岩相带

该岩相带由 6 个旋回(VI-XI)构成(图 4),以辉长岩韵律层理发育为其突出特征,由暗色矿物(包括单斜辉石和钛铁氧化物)含量的周期性增多和减少反映出暗色和浅色条带的韵律式变化。每个韵律层理的厚度从数厘米至 30 cm 不等,同时,斜长石的定向排列也非常显著(图 6; 宋谢炎等,1994)。每个旋回都由下部中粒磁铁辉长岩和上部中粒辉长

岩构成,旋回的底部以钛铁氧化物的突然增多为标志,与下面的旋回界限清晰截然。与下部岩相带磁铁辉长岩相比,中部岩相带的磁铁辉长岩钛铁氧化物的含量较低(20%~45%),硅酸盐矿物组成相似。中粒辉长岩含有 40%~50%的斜长石,30%~40%的单斜辉石,和 10%~20%的钛铁氧化物。单斜辉石的磁铁矿出溶条纹也非常发育。

3.3 上部岩相带

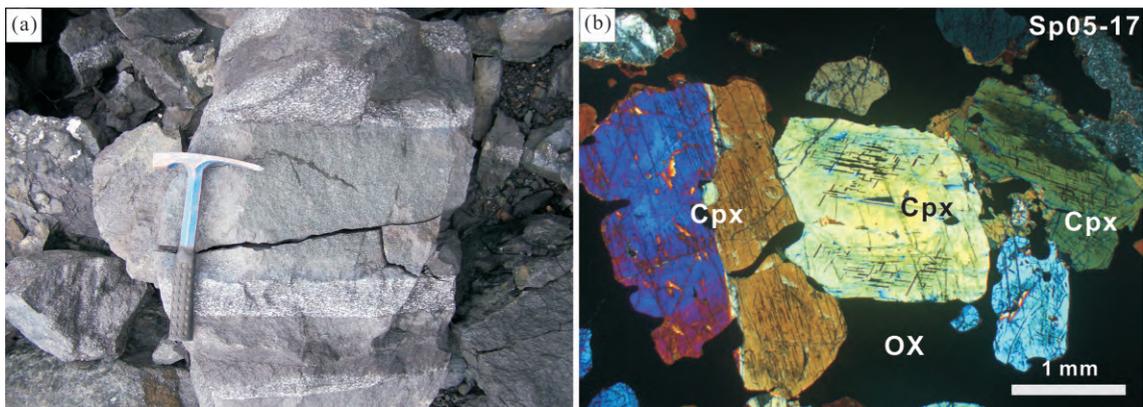
该岩相带由中粒磷灰石辉长岩组成(图 7),韵律层理不发育。磷灰石呈细粒自形柱状,可以嵌晶包含在单斜辉石和斜长石中,也可以形成于其它矿物的颗粒之间,含量达 3%~5%;钛铁氧化物含量一般小于 10%;单斜辉石中席列构造不发育。由于岩体顶部与围岩为断层接触,该岩相带的真实厚度



据 Song 等 (2013)

图 4 攀枝花岩体岩相带及旋回划分及其变化

Fig.4 Petrographic columns of the Panzhihua intrusion



(a) 块状钒钛磁铁矿中的暗色辉长岩夹层; (b) 单斜辉石的熔融结构及席列构造 (正交偏光)。Cpx-单斜辉石; OX-磁铁矿及钛铁矿

图 5 攀枝花岩体下部岩相带典型的岩相结构

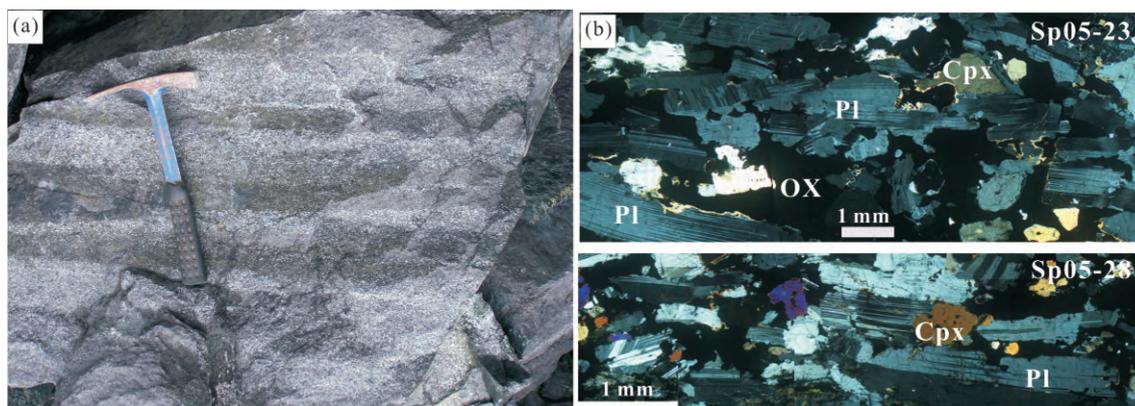
Fig.5 Lithological structures and textures of rocks in the Lower Zone of the Panzhihua intrusion

不详。

白马岩体南北走向, 倾向西, 倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 除东北部可见与会理群变质岩呈侵入接触外, 其它部位均被后期正长岩侵位或包裹。下部岩相带主要由磁铁橄长岩构成, 岩性旋回由钛铁氧化物含量的变化反映出来; 上部岩相带则由橄长岩和辉长岩构成。浸染状矿层产于下部岩相带, 没有块状矿石 (Zhang *et al.*, 2012, 2013; Chen *et al.*, 2014)。

红格岩体呈岩盆状, 顶部辉长岩与峨眉山玄武

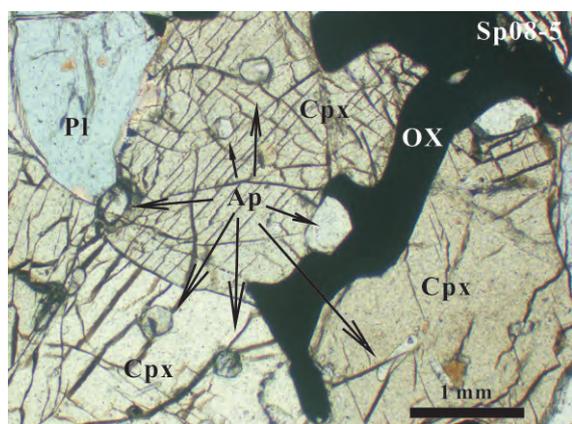
岩直接接触, 底板围岩为新元古界震旦系上统灯影组灰岩及中元古界会理群绢云母片岩、石英绢云母片岩、绿泥石石英片岩等。与攀枝花岩体不同, 红格岩体大量出现橄辉岩和辉石岩, 块状矿层产于下部岩相带 (Luan *et al.*, 2014; Liao *et al.*, 2015, 2016)。其下部岩相带可分为 4 个旋回, 每个旋回由下部的角闪(磁铁)橄辉岩和上部的角闪(磁铁)辉石岩构成, 角闪石含量高达 $5\% \sim 15\%$ 。中部岩相带以块状矿石的出现为特征, 也有 4 个旋回, 每个旋回



Cpx-单斜辉石; OX-磁铁矿及钛铁矿; Pl-斜长石

图6 攀枝花岩体中部岩相带中粒辉长岩韵律层理(a)及斜长石定向排列显微结构(b)

Fig.6 The rhythmic layering (a) and microtextures of directional alignment of plagioclase (b) of the medium-grained gabbro in the Middle Zone of the Panzihua intrusion



Cpx-单斜辉石; OX-磁铁矿及钛铁矿; Ap-磷灰石; Pl-斜长石

图7 上部岩相带磷灰石辉长岩

Fig.7 The apatite gabbro in the Upper Zone of the Panzihua intrusion

由下部的块状矿石,向上渐变过渡为磁铁橄辉岩、磁铁辉石岩或者(磁铁)辉长岩。上部岩相带以大量自形磷灰石的出现为特征,可分为2个旋回,分别由磷灰石磁铁辉长岩和磷灰石辉长岩组成(Zhong and Zhu, 2006; Bai *et al.*, 2012; Luan *et al.*, 2014)。

太和岩体呈北东东-南西西向展布,倾向北东,倾角 $30^{\circ}\sim 55^{\circ}$,围岩为正长岩。岩体也可分为下部、中部和上部岩相带。下部岩相带由橄辉岩、橄长岩、辉长岩构成,顶部出现一层块状矿石。中部岩相带有多个旋回,每个旋回由下部磷灰石磁铁辉石岩和上部磷灰石辉长岩构成,为太和岩体主要的含矿带,浸染状矿石含大量磷灰石区别于其它岩体。上部岩相带主要由磷灰石辉长岩组成,厚约200 m,

含矿性较差。上部岩相带最重要的特征是富斜长石和贫Fe-Ti氧化物(She *et al.*, 2014, 2015, 2016; Bai *et al.*, 2016)。

攀西地区4个主要层状岩体在岩石学和矿床学特征的上述异同综合在表1中。需要指出的是,尽管红格、太和岩体大量出现橄辉岩和辉石岩,显示较高的基性程度,但这些岩石中橄榄石的Fo牌号与攀枝花岩体相似,均小于82。与Bushveld岩体钒钛磁铁矿层产于岩体顶部闪长岩相不同,攀西地区层状岩体的钒钛磁铁矿层产于下部或中部岩相带(表1),而且厚度巨大,说明具有独特的成矿过程。

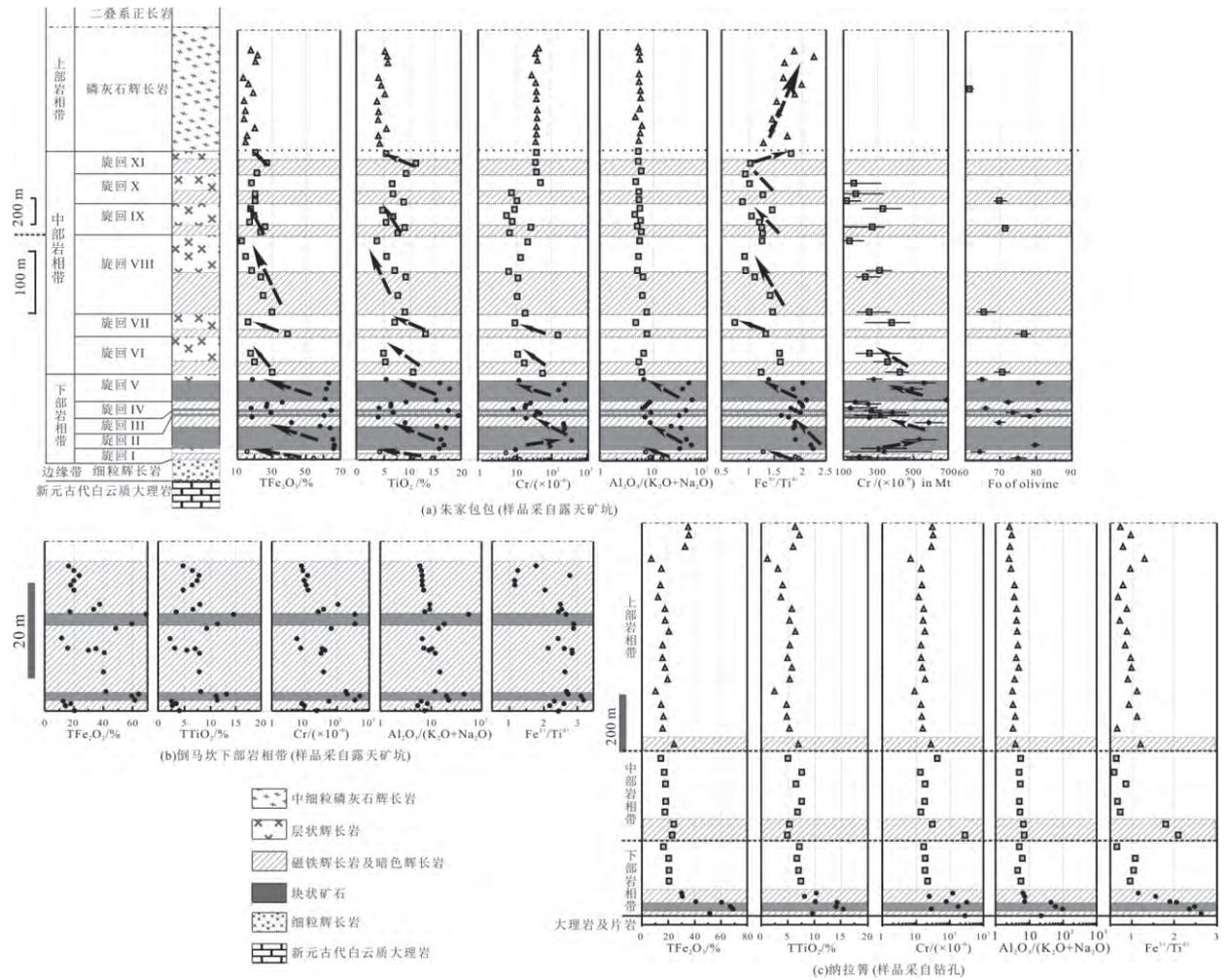
4 层状岩体的地球化学特征

如上所述,攀西地区层状岩体的一个重要的共同特征是含矿岩相带岩相旋回非常发育,不同岩相带中磁铁矿与钛铁矿的比例关系可能存在差异。这些特征也可以由全岩及矿物成分的变化反映出来。以攀枝花岩体为例(图8),每个旋回全岩的 TFe_2O_3 和 TiO_2 含量及 $Al_2O_3/(K_2O+Na_2O)$ 和 Fe^{3+}/Ti^{4+} 值从下至上总体上有降低的趋势,而 SiO_2 和 Al_2O_3 含量则逐渐增高。在旋回II下部的致密块状富铁矿石,无论全岩还是磁铁矿中的Cr含量都是向上增高的,而在其它旋回,全岩和磁铁矿中的Cr含量向上逐渐减小。这种全岩和磁铁矿中Cr含量的协同式变化也出现在Bushveld岩体上部岩相带的磁铁矿层中(Cawthorn and McCarthy, 1980)。在每一个旋回中橄榄石的镁橄榄石端元的含量(Fo)总是从下至上减小的。

表 1 峨眉大火成岩省内带主要含矿岩体地质特征对比

Table 1 Comparison of geological features of major ore-bearing intrusions in the central zone of the Emeishan LIP

| 岩体 | 攀枝花 | 白马 | 红格 | 太和 |
|---------|------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 岩石组合 | 辉长岩 | 橄长岩、辉长岩 | 橄辉岩、辉石岩、辉长岩 | 辉石岩、辉长岩 |
| 角闪石+黑云母 | <2% | | 下部岩相带高达 15% | <5% |
| 主要矿化部位 | 下部岩相带 | | 中部岩相带 | |
| 矿化类型 | 块状矿石+浸染状矿石 (磁铁辉长岩) | 浸染状矿石 (磁铁橄长岩) | 块状矿石+浸染状矿石 (磁铁辉石岩) | 块状矿石+浸染状矿石 (磷灰石磁铁辉石岩) |
| 矿石含磷灰石 | 极低 | | 微量 | >5% |
| 矿化标志 | 磷灰石出现意味着矿化结束 | | | 斜长石大量出现矿化结束 |
| 矿物成分特点 | 单斜辉石和磁铁矿含 Cr 低, 橄榄石含 Ni 低 | | 中下部岩相带单斜辉石和 磁铁矿含 Cr 高 | |
| 同化混染程度 | 最弱 | 较弱 | 最强 | 较弱 |



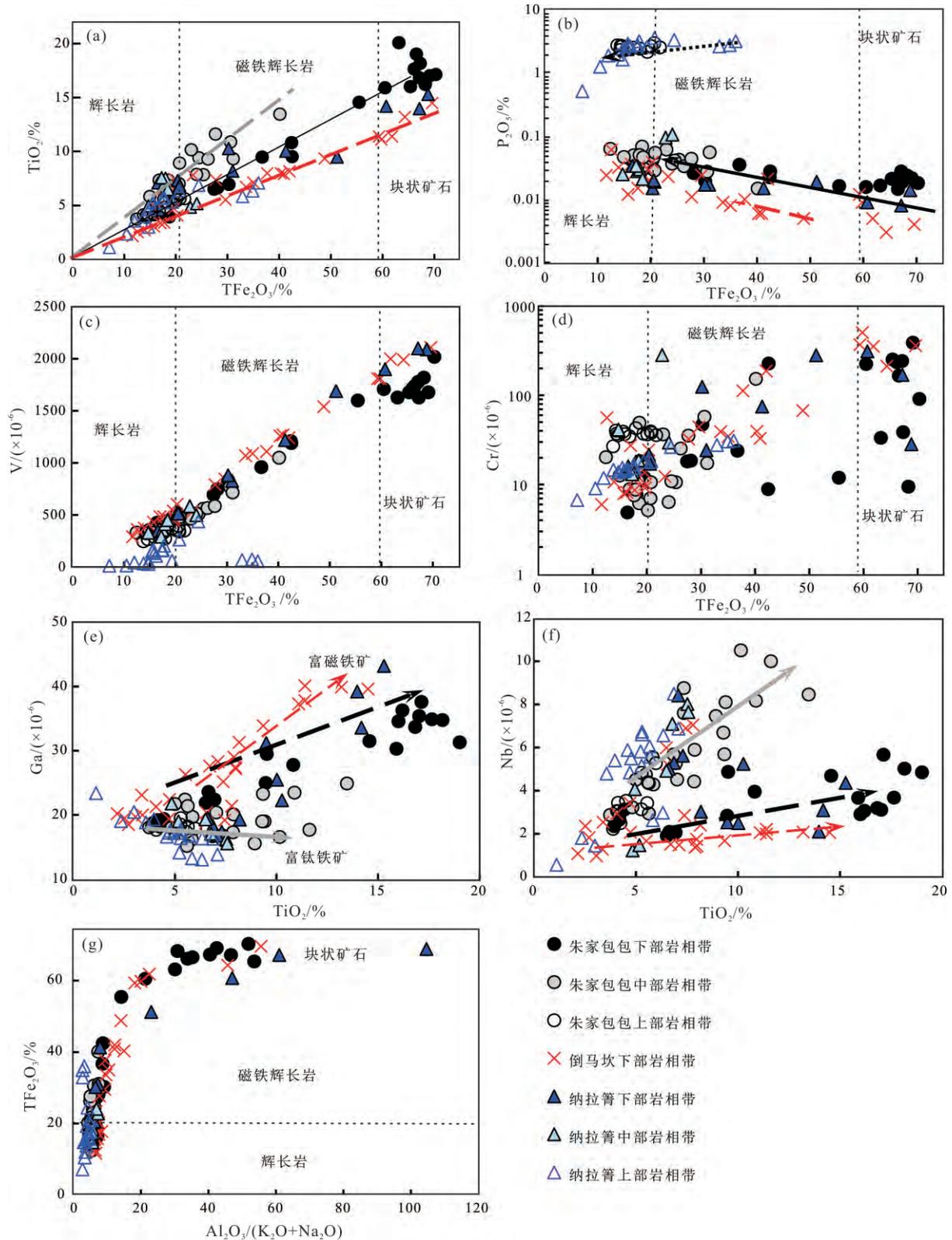
据 Song 等(2013)

图 8 攀枝花岩体岩石地球化学柱状图

Fig.8 Chemostratigraphic columns of whole rock major oxides , ratios of $Al_2O_3 / (K_2O + Na_2O)$ and Fe^{3+} / Ti^{4+} , Cr contents of magnetite , and forsterite percentages of olivine for the Panzhihua intrusion

图 9 显示,朱家包包、倒马坎和纳拉箐矿段的样品都显示全岩 TiO_2 和 V 含量均与 TFe_2O_3 呈现很好的正相关关系,在相似的 TFe_2O_3 含量区间,中部岩相带样品的 TiO_2 含量明显高于下部岩相带的样品。朱家包包和纳拉箐矿段下部岩相带样品的 TiO_2 含

量高于倒马坎矿段的样品。下部和中部岩相带样品的 P_2O_5 含量随 TFe_2O_3 的增高而降低,而上部岩相带磷灰石辉长岩不仅具有非常高的 P_2O_5 含量(最高达 3.2%),而且与 TFe_2O_3 呈正相关关系,暗示不同的成岩过程。虽然攀枝花岩体样品的 Cr 含量



据 Song 等(2013)

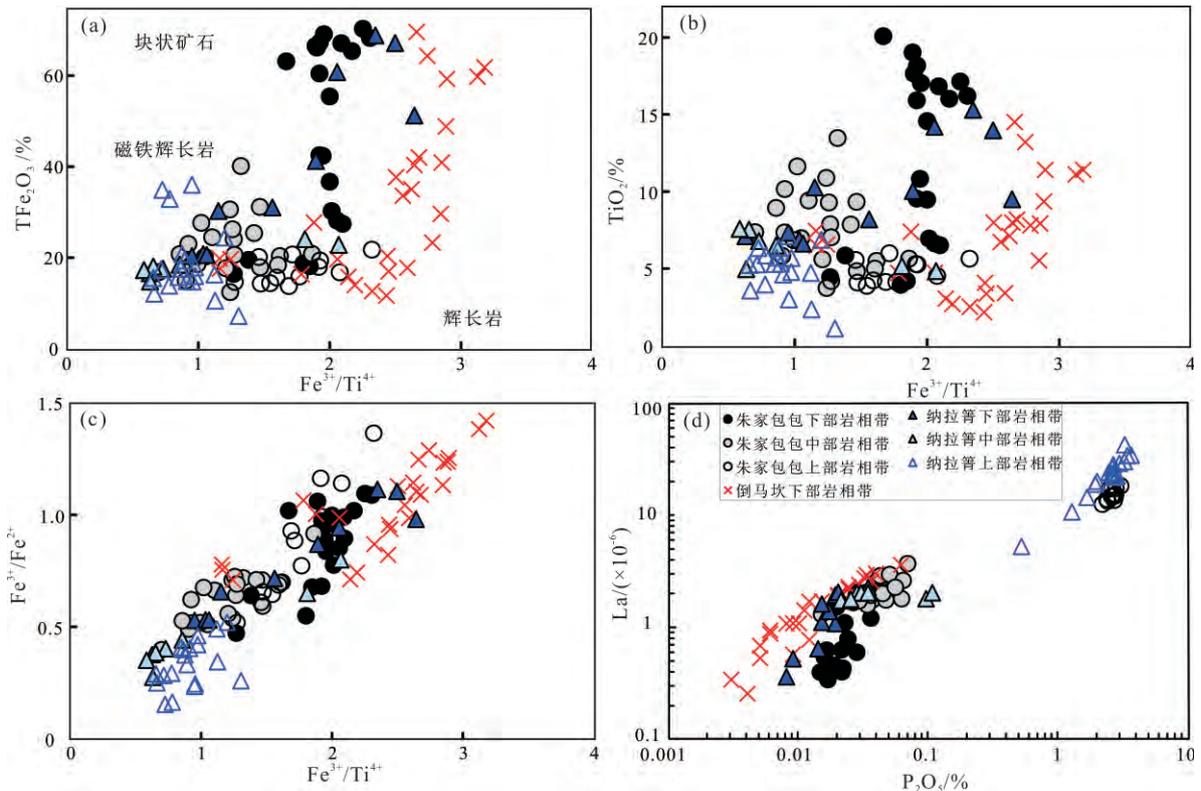
图9 攀枝花岩体全岩氧化物(微量元素)相关图

Fig.9 Binary plots of major and trace elements for rocks of the Panzhilua intrusion

总体上与 TFe_2O_3 含量呈正相关关系。但致密块状富磁铁矿石及浸染状矿石(磁铁辉长岩)的 Cr 含量具有很

宽的变化范围(约 $10 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$; 图9)。

实验岩石学研究表明磁铁矿结晶需要的氧逸



据 Song 等 (2013)

图 10 攀枝花岩体全岩 $\text{Fe}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$ 值与 TFe_2O_3 、 TiO_2 及 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 值 (a, b, c) 和 La 与 P_2O_5 含量相关图 (d)

Fig.10 Binary plots of (a) TFe_2O_3 , (b) TiO_2 , and (c) $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ respectively against $\text{Fe}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$ and (d) La vs. P_2O_5 for rocks of the Panzihua intrusion

度较高,而钛铁矿结晶需要的氧逸度较低。这是因为磁铁矿结晶需要大量的 Fe^{3+} ,而钛铁矿只需要 Fe^{2+} 。因此,磁铁矿/钛铁矿的含量比值可以较好地反映岩浆结晶过程中氧逸度的变化。然而,要准确统计磁铁矿/钛铁矿的含量并不容易。虽然攀枝花岩体的 Ti 主要赋存于钛铁矿中, Fe^{3+} 主要存在于磁铁矿中。因此, $\text{Fe}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$ 值和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 值可以较好地反映岩石样品中磁铁矿与钛铁矿之间的比例关系,这两个比值之间显示很好的正相关关系(图 10c)。图 10 显示以相似的 TFe_2O_3 含量为参考,倒马坎矿段致密块状富铁矿石和磁铁辉长岩的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$ 值明显高于朱家包包和纳拉箐矿段磁铁辉长岩,说明倒马坎矿段磁铁矿在钛铁氧化物中占有更高的比例。另一方面,对于朱家包包和纳拉箐矿段而言,下部岩相带样品的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$ 值明显高于中部岩相带的样品,说明岩石中磁铁矿在钛铁氧化物中所占的比例向上趋于降低。La 与 P_2O_5 的正相关关系表明磷灰石是稀土元素的主要矿物学,特别是上部岩相带磷灰石辉长岩不仅具有特别高的 P_2O_5 含量,也具有最高的 La 含量。这与稀土元素异常高的

磷灰石/硅酸盐熔浆分配系数是一致的。

5 攀枝花矿床成因探讨

大量的实验岩石学工作证明在镁铁质岩浆结晶分异过程中,铁钛氧化物不仅结晶比较晚,还与单斜辉石、斜长石等硅酸盐矿物存在共结关系,并且在结晶相中所占比例较低 (Toplis and Carroll, 1995)。显然分离结晶的观点不能解释致密块状铁矿层的成因。然而,液态不混溶模式也很难解释以下现象: ① 攀枝花岩体致密块状铁矿层 $\text{P}_2\text{O}_5 < 0.1\%$,大量磷灰石出现在上部岩相带的磷灰石辉长岩中,这与实验得到的富铁钛熔浆同时富磷的特征相矛盾 (Philpotts and Doyle, 1983); ② 致密块状铁矿层中普遍存在薄的磁铁辉长岩层,而且延伸非常稳定,但没有发现致密块状铁矿的穿插现象; ③ 如果致密块状铁矿层是由富铁钛熔浆分离结晶形成的,它们应该具有相似的成分变化趋势,然而,如图 8 所示,旋回 II 和旋回 V 底部块状铁矿层从下至上磁铁矿的 Cr 含量分别是升高和降低的。这些现象都说明不混溶的假说并不能很好地解释攀枝花

岩体致密块状铁矿层的成因。

Pang 等(2008a, 2008b, 2009)认为攀枝花岩体下部钒钛磁铁矿层的形成是密度较大的钛铁氧化物重力沉降的结果,但其形成的物理机制并不清楚。Song 等(2013)在岩相学、岩石和矿物地球化学研究基础上提出新的分离结晶-重力流动分选成矿模式。

5.1 富铁钛母岩浆

中下部岩相带单斜辉石非常发育的席列构造(图5)说明攀枝花岩体的母岩浆是一种非常富铁钛的岩浆。橄榄石小于81的Fo牌号(图8)以及很高的全岩Pd/Ir值(14~24),说明岩浆进入岩体之前的确发生过显著的分离结晶(Zhou *et al.*, 2005)。如果假设峨眉山高钛苦橄岩橄榄石斑晶中熔体包裹体成分为原始岩浆(Kamenetsky *et al.*, 2012), MELTS 模拟计算表明约50%的分离结晶可以形成富铁钛的玄武岩浆(TFe₂O₃和TiO₂含量分别为~16.5%和4.9%),从这种岩浆中结晶的橄榄石、单斜辉石及斜长石成分与攀枝花岩体相似(Song *et al.*, 2013)。

5.2 攀枝花岩体代表了开放岩浆房

鉴于铁钛氧化物并不能消耗岩浆中全部的铁和钛,如果铁钛氧化物的结晶会导致岩浆中~3%的TFe₂O₃的减少,仅旋回II和V底部60m和40m厚的块状矿层的形成就分别需要大约3500m厚的岩浆,远大于攀枝花岩体的厚度,这意味着必然有多次岩浆补充。下部岩相带各旋回磁铁矿Cr含量的周期性变化也说明了岩浆的多次、重复补充(图8)。岩浆的多次补充还造成了单斜辉石和橄榄石的熔蚀结构(Song *et al.*, 2013; Xing *et al.*, 2017)。

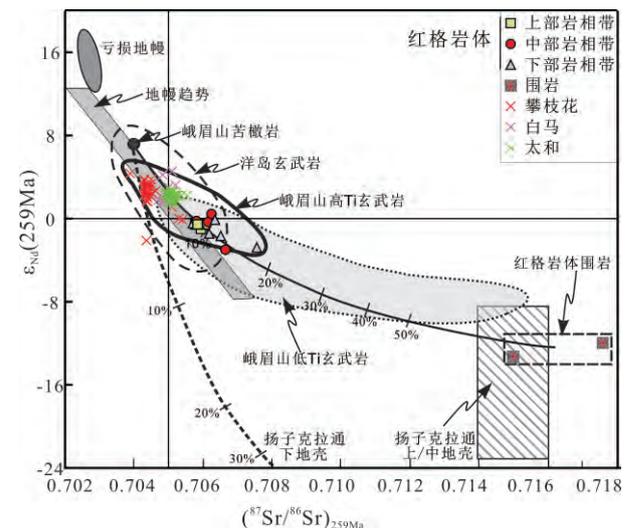
5.3 厚层状致密块状富铁矿层形成的动力学机制

MELTS 计算表明磁铁矿是富铁钛母岩浆橄榄石、单斜辉石、斜长石的共结晶物。在岩浆流动过程中,磁铁矿、橄榄石和单斜辉石将在重力作用将向岩浆房底部沉淀,磁铁矿密度最大,趋于堆积橄榄石及单斜辉石之下,从而导致我们称之为“流动分选”的物理分异现象,并形成矿物定向,而斜长石则趋于悬浮在岩浆流的上部。来自深部岩浆房密度更大的富铁钛岩浆反复补充,便会形成中、下部岩相带的块状矿层及磁铁矿辉长岩,补充频率越高越有利于形成磁铁矿块状矿层。下部岩相带多个块状矿层的出现说明早期岩浆补充的频率较高。朱家包包-尖山矿段致密块状富铁矿层厚度巨大表明岩体北侧是岩浆房下凹的部位,岩浆向下凹部位流动的动力更强,流动分选作用和钛铁氧化物的堆积自然更加充分(Song *et al.*, 2013)。攀枝花岩体的原始产状是近水平的,经后期构造运动变为单斜岩体。

6 白马、红格及太和矿床成因探讨

如前所述,白马、红格和太和岩体与攀枝花岩体在岩相学和矿床学特征上都存在一些差异(表1)。其中白马岩体与攀枝花岩体最为相似,但没有出现块状矿层,这可能是由于富铁钛岩浆补充的频率较低、岩浆房底部较为平缓的缘故。Sr-Nd 同位素组成表明红格岩体遭受地壳混染较强烈(图11), Luan 等(2014)认为同化混染的同时有水的加入,使单斜辉石和磁铁矿的结晶提前,并结晶出大量角闪石,而斜长石结晶推迟,形成了巨厚的含角闪石橄辉岩和单斜辉石岩。地质勘探资料显示红格岩体底部起伏很大,因此,钒钛磁铁矿层的厚度变化较大,在岩体底部的下凹部位形成了块状矿层(攀西地质队,1984)。太和岩体富磷灰石钒钛磁铁矿层的成因最为复杂,She 等(2014, 2015)认为在太和岩体下方可能还存在一个分异程度很高的岩浆房,来源于深部的富铁钛岩浆侵入该岩浆房后,熔蚀了已经结晶的磷灰石及钛铁氧化物,形成了非常特殊的富铁钛磷的岩浆。这种研究进入太和岩体后发生了铁钛氧化物和磷灰石的结晶和堆积,便形成了特殊的磷灰石磁铁矿岩。

综上所述,尽管攀西地区几个层状岩体都具有相似的富铁钛母岩浆,但具体的成岩成矿过程仍然存在不同,这些差异可以用图12表示。



据 Xu 等(2001); Xiao 等(2004); Zhou 等(2006, 2008); Song 等(2008a, 2013); Luan 等(2014); She 等(2014)

图 11 攀西地区层状岩体及峨眉山玄武岩 Sr-Nd 同位素组成

Fig.11 Diagrams of Sr-Nd isotopes of rocks from the layered intrusions and basalts in the Emeishan Large Igneous Province

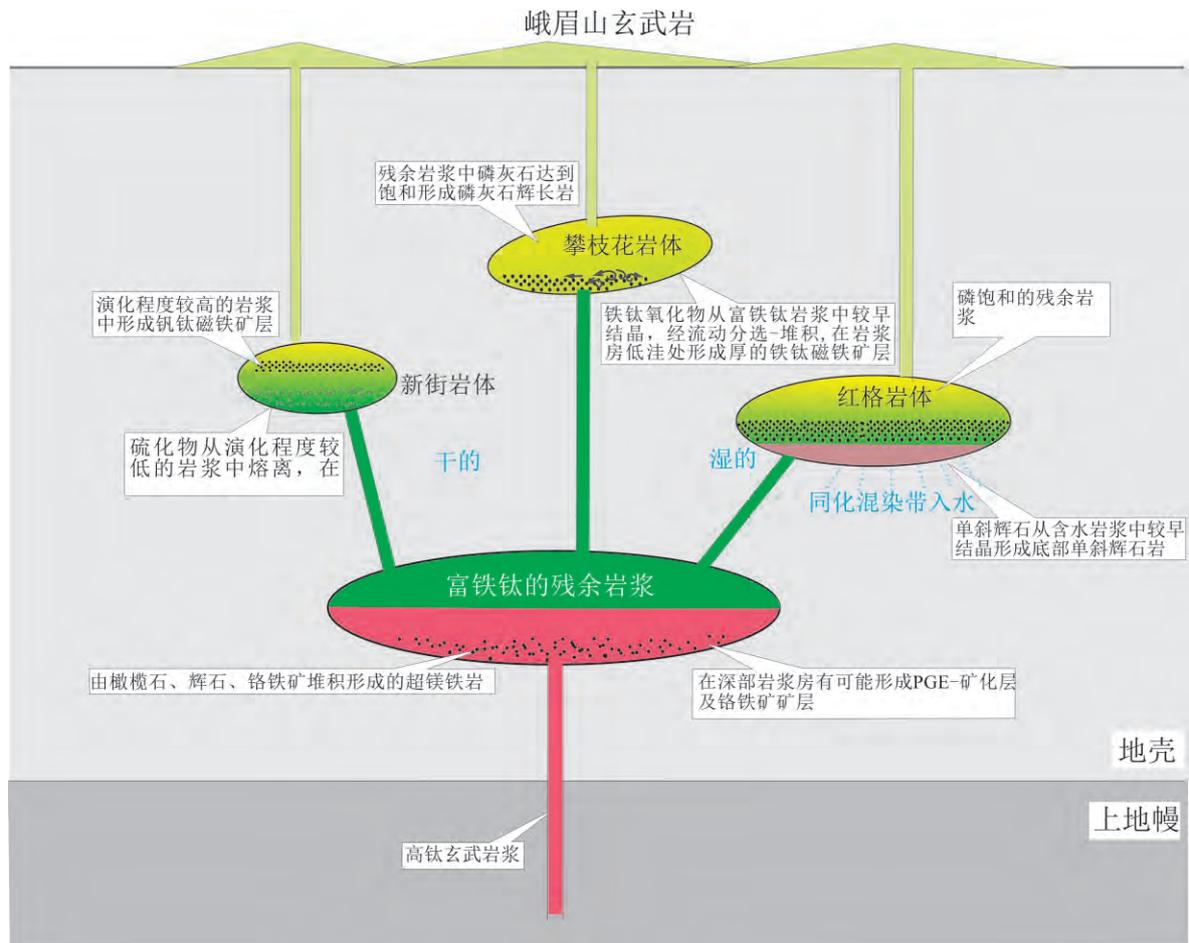


图 12 峨眉山大火成岩省内带钒钛磁铁矿矿床的岩浆通道成矿模式

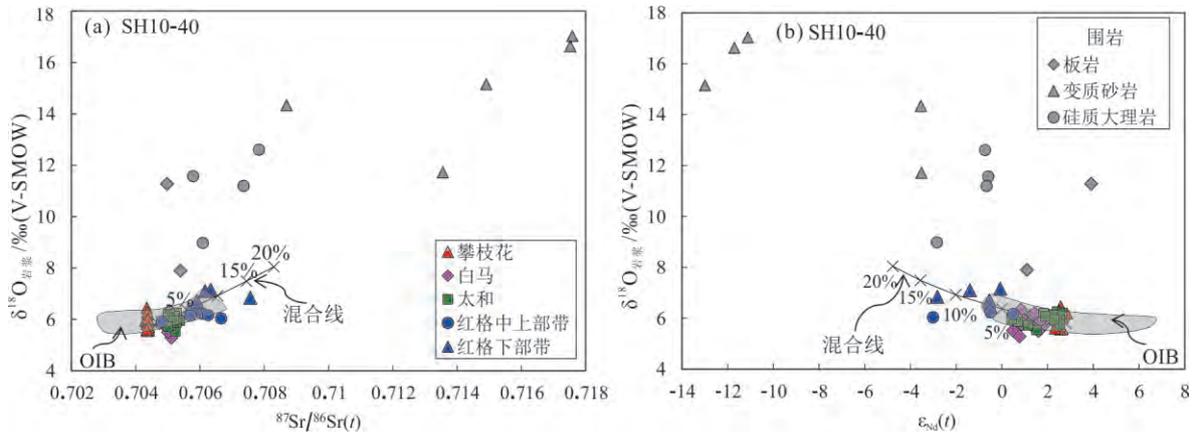
Fig.12 Metallogenic model of the V-Ti magnetite deposits in magma plumbing system in the central zone of the Emeishan Large Igneous Province

7 攀西地区钒钛磁铁矿成矿的关键控制因素

尽管多数研究者更认同分离结晶的观点,但是,导致 Fe-Ti 氧化物较早结晶的关键控制因素尚有较大争议。Bai 等(2012, 2014) 提出围岩分解导致高氧逸度是磁铁矿较早结晶和大量堆积的原因。Ganino 等(2008) 认为岩浆与碳酸盐围岩发生热变质释放出富 CO₂ 流体, CO₂ 分解进入岩浆导致岩浆的氧逸度升高从而使得磁铁矿提前结晶。Song 等(2013) 则认为深部岩浆房硅酸盐矿物分离结晶形成富铁钛的母岩浆才是导致这些含矿层状岩体钒钛磁铁矿较早结晶的主要因素。

针对上述问题,笔者对上述 4 个典型的含矿岩体及其围岩进行了系统的 O-Sr-Nd 同位素研究。数据表明单斜辉石比共生的斜长石和铁钛氧化物受到后期流体与矿物 O 同位素交换的影响更少,能很好地保持其结晶时 O 同位素特征。因此, Yu 等

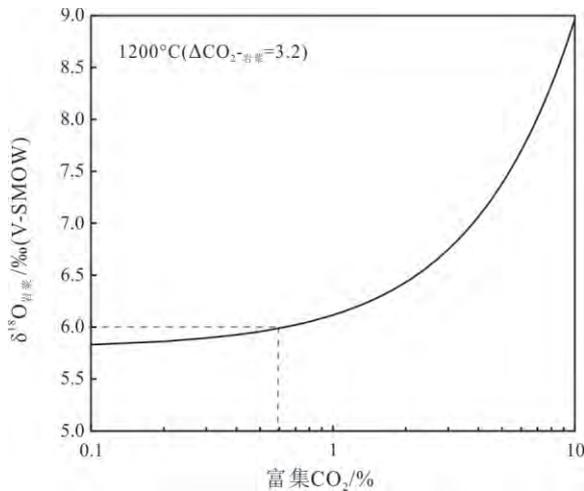
(2015) 根据单斜辉石的 O 同位素数据计算与之平衡的母岩浆的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为: 攀枝花岩体 6.1‰、白马岩体 5.7‰、太和岩体 5.9‰。红格岩体的中上部岩相带母岩浆 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 6.2‰, 这与其他几个岩体类似, 而红格岩体的下部岩相带的母岩浆 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 6.9‰, 明显高于其他岩体(图 13)。这种差异的存在, 并结合红格岩体下部岩相带所具有的富集 Sr-Nd 同位素特征 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7057 \sim 0.7076$; $\epsilon_{\text{Nd}} = -2.82 \sim -0.07$) , 我们认为红格岩体的下部岩相带受到显著的硅酸盐地壳物质的混染。而攀西地区其他含磁铁矿岩体硅酸盐地壳物质的混染不明显。另一方面, 对岩体和围岩的 O-Sr-Nd 同位素对比分析研究表明, 碳酸岩围岩直接混染含矿岩体母岩浆的可能性极小。根据 O-Sr-Nd 数据所做的混合模拟计算表明, 各层状岩体受到硅酸盐地壳混染的程度不同: 攀枝花岩体小于 5%, 白马及太和岩体小于 10%, 红格岩体中上部岩相带小于 10%, 红格岩体下部岩相带小于 15%。上述数值为估算的最大值, 如



据 Yu 等 (2015); 黑色的两端元混合线的两个端元分别为峨眉山苦橄岩及变质砂岩围岩

图 13 层状岩体母岩浆的 δ¹⁸O 值与岩体的 Sr-Nd 同位素图解

Fig.13 Plots of estimated δ¹⁸O values for the parental magmas of several important Fe-Ti oxide ore-bearing mafic-ultramafic intrusions in the ELIP respectively against the Sr (a) and Nd isotopic compositions (b) of whole rocks of the intrusions, the footwall rocks are included for comparison



据 Yu 等 (2015)

图 14 当进入岩浆房的富 CO₂ 流体与玄武质岩浆发生氧同位素交换,计算模拟的岩浆 δ¹⁸O 值随着进入岩浆房中的 CO₂ 流体量的变化图解

Fig.14 Change of δ¹⁸O value in magma as a function of cumulative CO₂ passing through the magma. The initial δ¹⁸O values for the magma and CO₂ are 5.8‰ and 31‰, respectively. The CO₂/magma mass ratio for each increment in the iterative calculation is 1/1000

果考虑到岩体受到选择性地壳混染的可能性,各岩体的实际地壳混染程度应该更低。根据大理岩围岩的氧同位素数据,估算出碳酸岩围岩分解释放出的 CO₂ 的 δ¹⁸O 平均值为 31‰,当这种高 δ¹⁸O 值的富 CO₂ 流体进入岩浆房中会与岩浆发生充分的氧同位素交换,导致岩浆的 δ¹⁸O 升高(图 14)。如果这种差别是由富 CO₂ 流体加入造成,那么需要加入

的 CO₂ 流体量应该小于 0.5%。这比前人估算的导致岩浆氧逸度升高所需的 CO₂ 流体量要小一个数量级(Ganino et al., 2008)。因此,碳酸岩分解和富 CO₂ 流体加入不会造成岩浆氧逸度显著升高,也不会影响攀枝花等层状岩体中 Fe-Ti 氧化物的结晶顺序(Yu et al., 2015)。攀枝花等层状岩体底部的块状矿层的形成与母岩浆富铁钛及分离结晶过程中发生的矿物重力分选和流动分选有关,而与碳酸盐围岩的同化混染无关。

8 结论

(1) 含钒钛磁铁矿层状岩体的母岩浆为富铁钛基性岩浆,是高钛苦橄质岩浆经强烈的硅酸盐矿物分离结晶形成的。

(2) 峨眉山大火成岩省内带各层状岩体的岩相组合和矿化部位和特征存在差异,尽管它们成矿的关键控制因素具有相似性,即铁钛氧化物从富铁钛的镁铁质岩浆中较早结晶是成矿的先决条件,铁钛氧化物的重力流动分选是形成钒钛磁铁矿矿层的物理机制,合适的化学条件和恰到好处的物理机制的耦合导致成矿,但具体的成因模式并不完全一样:

① 攀枝花和白马岩体—基本成矿模式:苦橄质原始岩浆在深部岩浆房发生橄榄石和单斜辉石的分离结晶,使得残余岩浆中 Fe₂O₃、TiO₂ 等含量逐渐升高,形成富铁钛的镁铁质岩浆;当这种富铁钛岩浆进入岩体,铁钛氧化物和橄榄石、斜长石成为近液相线矿物,经重力分异形成钒钛磁铁矿矿层。由于攀枝花岩体底部有明显的下凹区段,使得磁铁矿

的重力流动分选更加充分,加之频繁的岩浆补充造就了朱家包包-蓝尖山矿段巨厚的块状矿层的形成;而白马岩体底部比较平缓,重力流动分选不够充分,岩浆补充也不够频繁,只形成了稠密浸染状矿层。

②红格岩体—水加入的影响:进入红格岩体的母岩浆一方面分离结晶程度较低,具有较高的MgO和较低的 Fe_2O_3 和 TiO_2 ;另一方面同化混染的同时带入了一定量的水,不仅使下部岩相带单斜辉石和铁钛氧化物的结晶明显早于斜长石,还形成了大量角闪石和黑云母等会矿物的结晶,但由于铁钛氧化物结晶的量较小不能形成很好的矿化。此外,残余岩浆中的水则有利于新注入的较为富铁钛的岩浆中铁钛氧化物较早地结晶,从而在中部岩相带每个旋回的下部形成了块状和浸染状矿层。

③太和岩体—中间岩浆房的作用:与攀枝花岩体不同的是,深部岩浆房演化的富铁钛的岩浆在进入太和岩体之前,先进入了另一个岩浆房,并与该岩浆房高度演化的富P的岩浆混合,并熔融了部分低熔的铁钛氧化物,形成了独特的富Fe-Ti-P的岩浆。当这种岩浆进入太和岩体后,铁钛氧化物和磷灰石成为近液相线矿物并较早结晶,从而在每个旋回下部形成了独特的磷灰石磁铁矿辉石岩。

(3)控制钒钛磁铁矿成矿的关键因素包括:硅酸盐矿物强烈的分离结晶形成富铁钛的岩浆;铁钛氧化物成为近液相线矿物而较早结晶;岩浆的流动分选使得铁钛氧化物得以物理聚集。

(4)鉴于铁钛氧化物的结晶和聚集要求岩浆发生非常充分的分离结晶,而且磷灰石的结晶一般晚于铁钛氧化物,因此,岩体上部磷灰石的大量出现表明已经经历了铁钛氧化物的分离结晶,暗示岩体的下部岩相带可能存在钒钛磁铁矿矿化,可以作为找矿的岩石学标志。

参考文献(References):

- Ashwal L D. 1978. Petrogenesis of massif - type anorthosites: Crystallization history and liquid line of descent of the Adirondack and Morin Complexes. Doctoral Thesis. Princeton: Princeton University, 136
- Bai Z J, Zhong H, Naldrett A J, Zhu W G, Xu G W. 2012. Whole-rock and mineral composition constraints on the genesis of the giant Hongge Fe-Ti-V oxide deposit in the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China. *Economic Geology*, 107(3): 507-524
- Bai Z J, Zhong H, Li C S, Zhu W G, He D F, Qi L. 2014. Contrasting parental magma compositions for the Hongge and Panzhihua magmatic Fe - Ti-V oxide deposits, Emeishan large igneous

- province, SW China. *Economic Geology*, 109(6): 1763-1785
- Bai Z J, Zhong H, Li C S, Zhu W G, Hu W J. 2016. Association of cumulus apatite with compositionally unusual olivine and plagioclase in the Taihe Fe - Ti oxide ore-bearing layered mafic-ultramafic intrusion: Petrogenetic significance and implications for ore genesis. *American Mineralogist*, 101(10): 2168-2175
- Barnes S J, Hoatson D M. 1994. The Munni Munni Complex, western Australia: Stratigraphy, structure and petrogenesis. *Journal of Petrology*, 35(3): 715-751
- Bateman A M. 1951. The formation of late magmatic oxide ores. *Economic Geology*, 46(4): 404-426.
- Bogaerts M, Schmidt M W. 2006. Experiments on silicate melt immiscibility in the system Fe_2SiO_4 - $KAlSi_3O_8$ - SiO_2 - CaO - MgO - TiO_2 - P_2O_5 and implications for natural magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(3): 257-274
- Botcharnikov R E, Almeev R R, Koepke J, Holtz F. 2008. Phase relations and liquid lines of descent in hydrous ferrobasalt—implications for the Skaergaard intrusion and Columbia River flood basalts. *Journal of Petrology*, 49(9): 1687-1727
- Cawthorn R G, Ashwal L D. 2009. Origin of anorthosite and magnetite layers in the Bushveld Complex, constrained by major element compositions of plagioclase. *Journal of Petrology*, 50(9): 1607-1637
- Cawthorn R G, McCarthy T S. 1980. Variations in Cr content of magnetite from the upper zone of the Bushveld Complex—Evidence for heterogeneity and convection currents in magma chambers. *Earth and Planetary Science Letters*, 46(3): 335-343
- Charlier B, Duchesne J C, Auwera J V. 2006. Magma chamber processes in the Tellnes ilmenite deposit (Rogaland Anorthosite Province, SW Norway) and the formation of Fe-Ti ores in massif-type anorthosites. *Chemical Geology*, 234(3-4): 264-290
- Charlier B, Duchesne J C, Auwera J V, Storme J Y, Maquil R, Longhi J. 2010. Polybaric fractional crystallization of high-alumina basalt parental magmas in the egersund-ogna massif-type anorthosite (Rogaland, SW Norway) constrained by plagioclase and high-alumina orthopyroxene megacrysts. *Journal of Petrology*, 51(12): 2515-2546
- Chen L M, Song X Y, Zhu X K, Zhang X Q, Yu S Y, Yi J N. 2014. Iron isotope fractionation during crystallization and sub-solidus re-equilibration: Constraints from the Baima mafic layered intrusion, SW China. *Chemical Geology*, 380: 79-109
- Emslie R F. 1975. Major rock units of the Morin complex, southwestern Quebec. *Geological Survey of Canada Paper*, 37: 74-48
- Fenner C N. 1931. The residual liquids of crystallizing magmas. *Mineralogical Magazine*, 22(134): 539-560
- Ganino C, Arndt N T, Zhou M F, Gaillard F, Chauvel C. 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
- Jakobsen J K, Veksler I V, Tegner C, Brooks C K. 2005. Immiscible iron- and silica-rich melts in basalt petrogenesis documented in the Skaergaard intrusion. *Geology*, 33(11): 885-888
- Jakobsen J K, Veksler I V, Tegner C, Brooks C K. 2011. Crystallization of the Skaergaard intrusion from an emulsion of immiscible iron-and

- silica-rich liquids: Evidence from melt inclusions in plagioclase. *Journal of Petrology*, 52(2): 345-373
- Kamenetsky V S, Chung S L, Kamenetsky M B, Kuzmin D V. 2012. Picrites from the emeishan large igneous province, SW China: A compositional continuum in primitive magmas and their respective mantle sources. *Journal of Petrology*, 53(10): 2095-2113
- Liao M Y, Tao Y, Song X Y, Li Y, Xiong F. 2015. Multiple magma evolution and ore-forming processes of the Hongge layered intrusion, SW China: Insights from Sr-Nd isotopes, trace elements and platinum-group elements. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 1082-1099
- Liao M Y, Tao Y, Song X Y, Li Y B, Xiong F. 2016. Study of oxygen fugacity during magma evolution and ore genesis in the Hongge mafic-ultramafic intrusion, the Panxi region, SW China. *Acta Geochimica*, 35(1): 25-42
- Luan Y, Song X Y, Chen L M, Zheng W Q, Zhang X Q, Yu S Y, She Y W, Tian X L, Ran Q Y. 2014. Key factors controlling the accumulation of the Fe-Ti oxides in the Hongge layered intrusion in the Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Ore Geology Reviews*, 57: 518-538
- Mathison C I, Ahmat A L. 1996. The Windimurra Complex, Western Australia. In: Cawthorn R G ed. *Layeded Intrusion*. Amsterdam: Elsevier Science, 485-510
- McBirney A R. 1996. The skaergaard intrusion. In: Cawthorn R G ed. *Layeded Intrusion*. Amsterdam: Elsevier Science, 147-180
- Namur O, Charlier B, Toplis M J, Higgins M D, Liégeois J P, Auwera J V. 2010. Crystallization sequence and magma chamber processes in the ferrobaltic sept illes layered intrusion, Canada. *Journal of Petrology*, 51(6): 1203-1236
- Naslund H R. 1983. The effect of oxygen fugacity on liquid immiscibility in iron-bearing silicate melts. *American Journal of Science*, 283(10): 1034-1059
- Pang K N, Li C S, Zhou M F, Ripley E M. 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 ferrobaltic magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156(3): 307-321
- Pang K N, Zhou M F, Lindsley D, Zhao D, Malpas J. 2008b. Origin of Fe-Ti oxide ores in mafic intrusions: Evidence from the Panzhihua intrusion, SW China. *Journal of Petrology*, 49(2): 295-313
- Pang K N, Li C, Zhou M F, Ripley E M. 2009. Mineral compositional constraints on petrogenesis and oxide ore genesis of the late Permian Panzhihua layered gabbroic intrusion, SW China. *Lithos*, 110(1-4): 199-214
- Philpotts A R. 1967. Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rock. *Economic Geology*, 62(3): 303-315
- Philpotts A R. 1979. Silicate liquid immiscibility in tholeiitic basalts. *Journal of Petrology*, 20(1): 99-118
- Philpotts A R, Doyle C D. 1983. Effect of magma oxidation state on the extent of silicate liquid immiscibility in a tholeiitic basalt, *American Journal of Sciences*, 283(9): 967-986
- Reynolds I M. 1985. Contrasted mineralogy and textural relationships in the uppermost titaniferous magnetite layers of the Bushveld Complex in the Bierkraal area north of Rustenburg. *Economic Geology*, 80(4): 1027-1048
- She Y W, Yu S Y, Song X Y, Chen L M, Zheng W Q, Luan Y. 2014. The formation of P-rich Fe-Ti oxide ore layers in the Taihe layered intrusion, SW China: Implications for magma-plumbing system process. *Ore Geology Reviews*, 57: 539-559
- She Y W, Song X Y, Yu S Y, He H L. 2015. Variations of trace element concentration of magnetite and ilmenite from the Taihe layered intrusion, Emeishan large igneous province, SW China: Implications for magmatic fractionation and origin of Fe-Ti-V oxide ore deposits. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 1117-1131
- She Y W, Song X Y, Yu S Y, Chen L M, Zheng W Q. 2016. Apatite geochemistry of the Taihe layered intrusion, SW China: Implications for the magmatic differentiation and the origin of apatite-rich Fe-Ti oxide ores. *Ore Geology Reviews*, 78: 151-165
- Song X Y, Zhou M F, Hou Z Q, Cao Z M, Wang Y L, Li Y G. 2001. Geochemical constraints on the mantle source of the upper permian emeishan continental flood basalts, Southwestern China. *International Geology Review*, 43(3): 213-225
- Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, Robinson P T. 2004. Late Permian rifting of the South China Craton caused by the Emeishan mantle plume? *Journal of the Geological Society*, 161(5): 773-781
- Song X Y, Qi H W, Robinson P T, Zhou M F, Cao Z M, Chen L M. 2008. Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume; evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunnan, Southwestern China. *Lithos*, 100(1-4): 93-111
- Song X Y, Keays R R, Xiao L, Qi H W, Ihlenfeld C. 2009. Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Chemical Geology*, 262(3-4): 246-261
- Song X Y, Qi H W, Hu R Z, Chen L M, Yu S Y, Zhang J F. 2013. Formation of thick stratiform Fe-Ti oxide layers in layered intrusion and frequent replenishment of fractionated mafic magma: Evidence from the Panzhihua intrusion, SW China. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(3): 712-732
- 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-baltic systems. *Journal of Petrology*, 36(5): 1137-1170
- Veksler I V, Dorfman A M, Danyushevsky L V, Jakobsen J K, Dingwell D B. 2006. Immiscible silicate liquid partition coefficients: Implications for crystal-melt element partitioning and basalt petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(6): 685-702
- Veksler I V, Dorfman A M, Borisov A A, Wirth R, Dingwell D B. 2007. Liquid immiscibility and the evolution of basaltic magma. *Journal of Petrology*, 48(11): 2187-2210
- Veksler I V. 2009. Extreme iron enrichment and liquid immiscibility in mafic intrusions: Experimental evidence revisited. *Lithos*, 111(1-2): 72-82
- Von Gruenewaldt G. 1993. Ilmenite-apatite enrichments in the upper zone of the Bushveld Complex: A major titanium-rock phosphate resource. *International Geology Review* 35(11): 987-1000

- Wager L R, Brown G M. 1968. Layered igneous rocks. Edinburgh and London: Oliver and Boyd.
- Wang C Y, Zhou M F. 2013. New textural and mineralogical constraints on the origin of the Hongge Fe-Ti-V oxide deposit, SW China. *Mineralium Deposita*, 48(6): 787-798
- Wilmart E, Demaiffe D, Duchesne J C. 1989. Geochemical constraints on the genesis of the Tellnes ilmenite deposit, Southwest Norway. *Economic Geology*, 84(5): 1047-1056
- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B, Pirajno F. 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
- Xing C M, Wang C Y, Tana W. 2017. Disequilibrium growth of olivine in mafic magmas revealed by phosphorus zoning patterns of olivine from mafic-ultramafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 479: 108-119
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58(3-4): 145-168
- Xu Y G, He B, Chung S L, Menzies M A, Frey F A. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. *Geology*, 32(10): 917-920
- Yu S Y, Song X Y, Ripley E M, Li C S, Chen L M, She Y W, Luan Y. 2015. Integrated O-Sr-Nd isotope constraints on the evolution of four important Fe-Ti oxide ore-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology*, 401: 28-42
- Zhang X Q, Song X Y, Chen L M, Xie W, Yu S Y, Zheng W Q, Deng Y F, Zhang J F, Gui S G. 2012. Fractional crystallization and the formation of thick Fe-Ti-V oxide layers in the Baima layered intrusion, SW China. *Ore Geology Reviews*, 49: 96-108
- Zhang X Q, Song X Y, Chen L M, Yu S Y, Xie W, Deng Y F, Zhang J F, Gui S G. 2013. Chalcophile element geochemistry of the Baima layered intrusion, Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implications for sulfur saturation history and genetic relationship with high-Ti basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(1): 193-209
- Zhong H, Zhou X H, Zhou M F, Sun M, Liu B G. 2002. Platinum-group element geochemistry of the Hongge Fe-V-Ti deposit in the Pan-Xi area, southwestern China. *Mineralium Deposita*, 37(2): 226-239
- Zhong H, Yao Y, Prevec S A, Wilson A H, Viljoen M J, Viljoen R P, Liu B G, Luo Y N. 2004. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China. *Chemical Geology*, 203(3-4): 237-252
- Zhong H, Hu R Z, Wilson A H, Zhu W G. 2005. Review of the link between the Hongge layered intrusion and Emeishan flood basalts, Southwest China. *International Geology Review*, 47(9): 971-985
- Zhong H, Zhu W G. 2006. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China. *Mineralium Deposita*, 41(6): 599-606
- Zhong H, Campbell I H, Zhu W G, Allen C M, Hu R Z, Xie L W, He D F. 2011. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(5): 1374-1395
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, Robinson P T, Sun M, Kennedy A K, Leshner C M, Keays R R. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(3-4): 113-122
- Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, Keays R R, Zhang C J, Malpas J. 2005. Malpas J Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China. *Journal of Petrology*, 46(11): 2253-2280
- Zhou M F, Zhao J H, Qi L, Su W C, Hu R Z. 2006. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(1): 1-19
- Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, Wang C Y, Kennedy A K. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 103(3-4): 352-368
- 攀西地质大队. 1987. 攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿共生矿成矿规律与预测研究报告(内部资料)
- 宋谢炎, 马润则, 王玉兰, 张正阶. 1994. 攀枝花层状侵入体韵律层理及岩浆演化特征. *矿物岩石*, 14(4): 37-45
- 宋谢炎, 张成江, 胡瑞忠, 钟宏, 周美夫, 马润则, 李佑国. 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
- 张晓琪, 张加飞, 宋谢炎, 邓宇峰, 官建祥, 郑文勤. 2011. 斜长石和橄榄石成分对四川攀枝花钒钛磁铁矿床成因的指示意义. *岩石学报*, 27(12): 3675-3688
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽. 2005. 峨眉山大火成岩省中的苦橄岩: 地幔柱活动证据. *矿物岩石地球化学通报*, 24(1): 17-22
- 钟宏, 胡瑞忠, 朱维光, 刘秉光. 2007. 层状岩体的成因及成矿作用. *地学前缘*, 14(2): 159-172

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)