

与地幔柱有关的成矿作用及其主控因素*

徐义刚¹ 王焰² 位荀¹ 何斌¹

XU YiGang¹, WANG Yan², WEI Xun¹ and HE Bin¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室 广州 510640

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院矿物学和成矿学重点实验室 广州 510640

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2013-07-01 收稿, 2013-09-02 改回.

Xu YG, Wang Y, Wei X and He B. 2013. Mantle plume-related mineralization and their principal controlling factors. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3307–3322

Abstract As one of the most important geodynamic systems, mantle plumes are not only responsible for the generation of large igneous provinces, but are also associated with many economically important mineral deposits. Plume-related magmatic sequences are found to host some specific mineralization, notably, mafic-ultramafic layered intrusions and deposits of Cr-Ti-Fe oxides and Ni-Cu-PGE sulfides, komatiite and related Fe-Ni-Cu deposits, anorthosite and Fe-Ti-V oxide deposits, peralkaline complex and Nb-Ta-Zr-REE deposits, and kimberlite and diamond. We are able to identify the following as key controlling factors in plume-related mineralization: structure of a plume, magma source, crystal fractionation, sulfide saturation, crustal contamination, and intrusion processes. Reviews are also given for outstanding issues on the studies of plume-related mineralization and for some potential diagnostic geochemical indicators of mineral prospecting/evaluation (e.g., Ni in olivine, Cr in clinopyroxene and magnetite, PGE concentration and Re-Os isotopes of layered intrusions).

Key words Mantle plume; Large igneous provinces; Magmatic sequences and mineralization; Metallogeny; Controlling factors; Diagnostic indicators

摘要 地幔柱是地球动力系统中重要的组成部分, 不仅形成规模巨大的大火成岩省, 也形成了众多具有重要经济价值的矿床类型。由地幔柱形成不同的岩浆系列显示了特有的成矿专属性, 如镁铁-超镁铁质层状岩体与钒钛磁铁铁矿床和铜镍硫化物矿床, 科马提岩与铜镍硫化物矿床, 斜长岩与钒钛磁铁铁矿床, 过碱性花岗岩系列与铌-钽-锆-稀土矿床, 金伯利岩与金刚石矿等。在分析与地幔柱相关矿床的基础上, 我们认为地幔柱结构、岩浆源区特征、结晶分异过程、硫化物饱和、地壳混染和岩浆侵位过程等是地幔柱成矿的关键控制因素。本文还对矿床成因研究中的存在问题以及几种潜在的地球化学找矿/评价指标(如橄榄石的 Ni 含量、单斜辉石和磁铁矿中的 Cr 含量, 层状岩体的 PGE 含量和 Re-Os 同位素联合示踪等)进行了评述。

关键词 地幔柱; 大火成岩省; 岩浆系列与成矿作用; 矿床成因; 关键控矿因素; 找矿指标

中图法分类号 P542.5; P611

* 本文受国家重点基础研究规划项目(2011CB808906、2011CB808903)和中国科学院广州地球化学研究所 135 项目(Y234051001)联合资助。

第一作者简介: 徐义刚, 男, 1966 年生, 研究员, 岩石地球化学专业, E-mail: yigangxu@gig.ac.cn

1 引言

地幔柱学说是弥补板块构造理论重视水平运动、忽略垂向运动的不足而提出的,是板块构造理论的重要补充。它较好地解释了大火成岩省、热点、大陆裂谷、大规模成矿和生物灭绝事件等很难用板块构造理论解释的现象。从1971年Morgan(1971)最初提出地幔柱的概念开始,经过近40年的发展,地幔柱依然是当代地学研究的前沿和热点。在过去5年(2008~2012年)Nature发表的文章中,其中118篇是有关地幔柱研究的,197篇是有关板块构造的,说明地幔柱理论在有关地球系统科学研究中的重要性可与经典板块构造理论相比拟。

地幔柱研究涉及深部动力学和地幔柱成矿系统两个研究前沿。关于前者笔者曾经撰文进行过讨论(徐义刚,2002;徐义刚等,2007),本文重点阐述地幔柱成矿系统的相关研究进展。与板块构造理论强调水平运动不同,地幔柱学说强调物质和能量的垂向运动。地幔柱活动是大规模的物质和能量由地球深部向地表迁移的过程,不仅导致大火成岩省的形成,且伴随铜、镍、钨、铂、钯、银、金等战略资源的超常富集(汤中立和李文渊,1995;陈毓川等,2000)。对全球主要赋含钒钛磁铁矿床的层状岩体和铜镍硫化物矿床的镁铁-超镁铁质岩体的统计表明,地幔柱成因的大火成岩省是形成岩浆铜镍硫化物矿床和钒钛磁铁矿床的主要场所。理解地幔柱成矿过程并揭示关键的控矿因素是地幔柱研究的重要内容之一。本文首先简要总结与地幔柱相关的岩浆系列及其相关的成矿作用,然后介绍与地幔柱相关的成矿作用的类型和基本特征,最后初步探讨相关成矿作用的主要控制因素并提出相关研究中存在的薄弱环节。在此基础上,尝试总结一些找矿的地球化学指标。

2 地幔柱岩浆系列及伴生矿床

大火成岩省主要由溢流玄武岩、镁铁-超镁铁质层状岩体、岩墙群、碱性杂岩体、碳酸岩等形式多样的岩浆系列组成,主要通过地幔柱头的减压熔融、产出岩浆的结晶分异、热传递引发地壳熔融等方式形成。大量研究证明,大火成岩省中的这些岩浆系列均与地幔柱活动有关。虽然还存在争论,但金伯利岩也可能与地幔柱有关,不同的岩浆系列具有明显的成矿专属性(表1)。

2.1 镁铁-超镁铁质岩体与钒钛磁铁矿床和铜镍硫化物矿床

人们熟知的钒钛磁铁矿床和铜镍硫化物矿床主要产于镁铁-超镁铁质岩体中。在大多数情况下,这些岩体与大规模溢流玄武岩在时空上紧密伴生,例如,俄罗斯西伯利亚

表1 大火成岩省岩浆系列与伴生的成矿作用

Table 1 Magmatic series in large igneous provinces and associated mineralization

岩浆系列	成矿作用	实例
镁铁-超镁铁质层状岩体	Cr-Fe-Ti-V PGE-Ni-Cu	Bushveld 攀枝花 Bushveld, Pechenga, Skaergaard, Stillwater
大陆溢流玄武岩	Ni-Cu- (PGE)	Siberian Traps
科马提岩	Fe-Ni-Cu	Zimbabwe greenstone belt, Alexo-Texmont-Langmuir
斜长岩	Fe-Ti-V	Labrador, Havre-Saint-Pierre, Rogaland, 大庙
碱性岩(环状碱性杂岩、碳酸盐岩)	Nb-Ta-Zr- REE-F-P	Brandberg, Amba Dongar
金伯利岩	金刚石	Premier, Kimberley, Finsch, Koffiefontein, Jwaneng

暗色岩体中的 Noril'sk-Talnakh 岩体、峨眉山大火成岩省中的攀西层状岩体、Karoo 大火成岩省中的 Insizwa 岩体以及东格林兰的 Skaergaard 岩体等。对于一些形成年代古老的岩体,如南非的 Bushveld 杂岩体,津巴布韦的 Great Dyke,中国的金川岩体等,因剥蚀作用同时代的玄武岩可能已荡然无存。但反演计算得到的母岩浆成分均为高镁玄武质的、甚至苦橄质的,而且稀有气体地球化学暗示其源区有下地幔组分参与,因此,层状岩体的地幔柱成因广为接受,与之相伴生的矿床显然也与地幔柱活动直接相关(Pirajno, 2000)。

世界上最大的层状岩体是南非 Bushveld 杂岩体,总厚度约 7~9km,分布面积 65,000km²,体积约 4 × 10⁵km³。Bushveld 杂岩体之所以著名不只是因为其体积大,更因为它赋存了世界上最大的铬铁矿床和铂族元素矿床,并富含 Fe, Ti, Sn, Cu, Au, W 等金属元素。因此层状岩体代表了具有重要经济价值的一类岩浆矿床,对层状岩体形成的物理-化学过程、岩浆演化和不混溶过程等对矿床成因的探讨具有重要意义。

与层状岩体相关的岩浆矿床有两类:钒钛磁铁矿床和铜镍硫化物矿床。后者与岩浆演化过程中岩浆的硫化物过饱和有关。大量新的研究发现,地壳硫化物加入是造成岩浆硫化物饱和的重要方式。钒钛磁铁矿床可与铜镍硫化物矿床出现在同一层状岩体中,但二者出现在岩体的不同部位。铬铁矿床和铜镍硫化物矿床通常与高 Mg/Fe、贫 Ca 和碱族元素的岩浆相伴生,而钒钛磁铁矿床则与富 Fe、Ca 和碱族元素的岩浆相伴生。因此,铬铁矿床和铜镍硫化物矿床通常出现在层状岩体超镁铁质岩单元的底部,而钒钛磁铁矿床则在岩体顶部的辉长岩单元出现。

Noril'sk-Talnakh 铜镍硫化物矿床是世界上规模第二大的岩浆型铜镍硫化物矿床,仅次于加拿大 Sudbury 矿床。由

于 Sudbury 矿床的形成与陨石撞击有关,因此 Noril'sk-Talnakh 铜镍硫化物矿床的形成机制在地幔柱成矿系统研究中的重要性不言而喻。该矿体储存在西伯利亚暗色岩系西北部边缘的供给岩席中,矿石量为 1257Mt 1.84% Ni 和 3.75% Cu (Naldrett, 2011)。喷出岩浆位于巨厚古生代陆相地层中,主要包括泥盆纪泥灰岩、灰岩和蒸发岩。研究表明,地壳硫的加入是导致玄武质岩浆硫化物饱和、形成超大型 Noril'sk-Talnakh 铜镍硫化物矿床的主要原因(Lightfoot and Hawkesworth, 1997; Ripley *et al.*, 2010)。

2.2 科马提岩与 Fe-Ni-Cu 硫化物矿床

津巴布韦克拉通 2.75Ga 绿岩带上部的科马提岩伴生 Fe-Ni-Cu 硫化物矿床,加拿大苏必利尔地盾发育 Alexo-Textmont-Langmuir 矿床等。但是在一些更老的(3.0 ~ 3.8Ga)绿岩带中,如南非 Kaapvaal 克拉通和西澳 Yilgarn 克拉通绿岩带中类似的硫化物矿床就相对少见。其中的原因目前还不得而知,可能有二个原因:(1) >3.0Ga 的科马提岩更亏损 Al (Arndt *et al.*, 1997),暗示两者源区性质的不同;(2) 如果与科马提岩相关的 Fe-Ni-Cu 硫化物矿床中有地壳硫化物的加入,那么这种差异可能是地球演化过程中生物成因硫逐渐增高所致。

2.3 斜长岩与钒钛磁铁矿床

元古代(1.5 ~ 1.3Ga)非造山型斜长岩分布广泛,形成一条 5000km 长、1000km 宽穿越劳伦大陆的斜长岩带。对斜长岩体的成因和动力学机制仍不清楚。Windley (1995) 认为斜长岩的形成与地幔柱作用下超大陆的裂解有关,是下地壳熔融的产物。尽管在元古代斜长岩-纹长二长岩-紫苏花岗岩-环斑花岗岩(AMCG)组合中发现了 Voisey's Bay 型铜镍硫化物矿床(Kerr and Ryan, 2000),钒钛磁铁矿依然是元古代斜长岩带中最主要的矿床类型。我国大庙铁矿也属这一类型,其形成于早元古代(1.7Ga, Zhao *et al.*, 2009)。目前正在开采的两个世界级斜长岩体钒钛磁铁矿矿床分别是加拿大魁北克 Havre-Saint-Pierre 斜长岩体中的 Tio 矿(钛铁矿含量超过 10%)、挪威 Rogaland 斜长岩省中的 Tellnes 矿。

2.4 碱性岩系列与 Nb-Ta-Zr-Sn-U-REE 矿床

碱性岩系列是大火成岩省中重要组成部分,包括正长岩、过碱性花岗岩和碳酸岩等。由于这些岩石具有演化特征,其形成的深部动力学背景往往不易确定。但是碱性杂岩体往往在时空上与大火成岩省的其他组分紧密相关,因此也是地幔柱的产物(Ernst and Bell, 2010)。例如, Bushveld 层状杂岩体与 Schiel 碱性杂岩体、Palabora 碳酸岩在时间上一致,空间上密切关联(Wu *et al.*, 2011);世界上有 1/3 的碳酸岩发现于东非裂谷系(Ernst and Bell, 2010)。非洲纳米比亚和安哥拉南部发育众多非造山环状碱性杂岩体和碳酸盐岩,代表了晚中生代(138 ~ 132Ma)冈瓦纳大陆裂解,以及新

生代在 Tristan Da Gunha 地幔柱的影响下南大西洋打开过程中的岩浆产物。在峨眉山大火成岩省,攀西地区发育的玄武岩、层状岩体和碱性杂岩体共生的“三位一体”现象早被前人所识别(张云湘等, 1998)。对峨眉山大火成岩省碱性杂岩体的高精度定年也证明其侵位年龄与层状岩体完全一致(Luo *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2008; Zhong *et al.*, 2009; Shellnutt *et al.*, 2012; 王汾连等, 2013)。

与碱性岩系列伴生的成矿作用包括 Sn, W, Cu, Au 和 REE(Pirajno, 1994)。例如 Brandberg 花岗岩杂岩体中含有丰富的 REE、Zr 和 Nb;碳酸盐岩通常富集 REE、Zr、P 和 F,有时达到工业品位。印度大陆碳酸盐岩及相关的碱性杂岩也是重要的 P、Fe、Nb、F、REE、Th、U 和 Ba 产地。例如 Ambadongar 碳酸盐杂岩体中 CaF₂ 平均品位为 30% 的矿石储量达 11.6Mt,是世界上最大的萤石矿(Krishnamurthy *et al.*, 2000)。

Sillitoe (1974) 提出尼日利亚焦斯高原侏罗纪的含锡钠闪石碱性花岗岩是地幔热点活动的产物,该类矿床还富含 Nb(铌铁矿)。巴西朗多尼亚锡矿以及美国密苏里州东南部锡矿也都与地幔热点相关的晚元古代花岗岩环状杂岩有关。阿拉斯加东南 Bokan 山铀矿产于中生代钠闪石碱性花岗岩中,赋矿花岗岩及 U 均源自地幔,被称为热点型铀矿(Rogers *et al.*, 1978)。

2.5 金伯利岩与金刚石矿

金伯利岩也是一种碱性岩石,由于它的特殊性和重要性本节做单独的叙述。相比与大火成岩省相关的岩浆系列不同,金伯利岩的产出显得有些“独来独往”。在 20 世纪 90 年代以前,金伯利岩均被认为是大陆下岩石圈地幔熔融的结果。Ringwood *et al.* (1992) 最早推测金伯利岩形成于深度为 410 ~ 660km 的上地幔。这为后来在金伯利岩中一些超高压矿物(如镁铁榴石 majorite)的发现所证实。实验岩石学揭示镁铁榴石的形成深度为 400 ~ 600km,因此金伯利岩至少来源于地幔过渡带。后来在金刚石固体包裹体中发现了斯石英、Ca-钙钛矿和 Mg-钙钛矿等超深矿物(Walter *et al.*, 2011),暗示金伯利岩可来源于下地幔(>700km)。根据金伯利岩中超深矿物组合, Haggerty (1994) 提出金伯利岩是超级地幔柱产物的观点。金伯利岩中一些含有下地幔超高压矿物的超深金刚石的碳同位素组成具有有机碳同位素特征(Walter *et al.*, 2011),说明存在地表有机碳通过俯冲进入到下地幔,再由地幔柱捕获上升至地壳的循环过程。此外,最新的关于古地磁板块重建的进展(Burke and Torsvik, 2004; Torsvik *et al.*, 2008) 为该观点提供了进一步的佐证。

深部地球物理探测发现地球核幔边界存在两个低剪切波速异常区(Large Low Shear Wave Velocity Provinces-LLSVPs),一个在非洲,一个在西南太平洋(图 1a)。结合古地磁构造重建,这两个低速异常区至少最近 5 亿年以来没有发生大的漂移,一直保持不动(Torsvik *et al.*, 2008),因此人

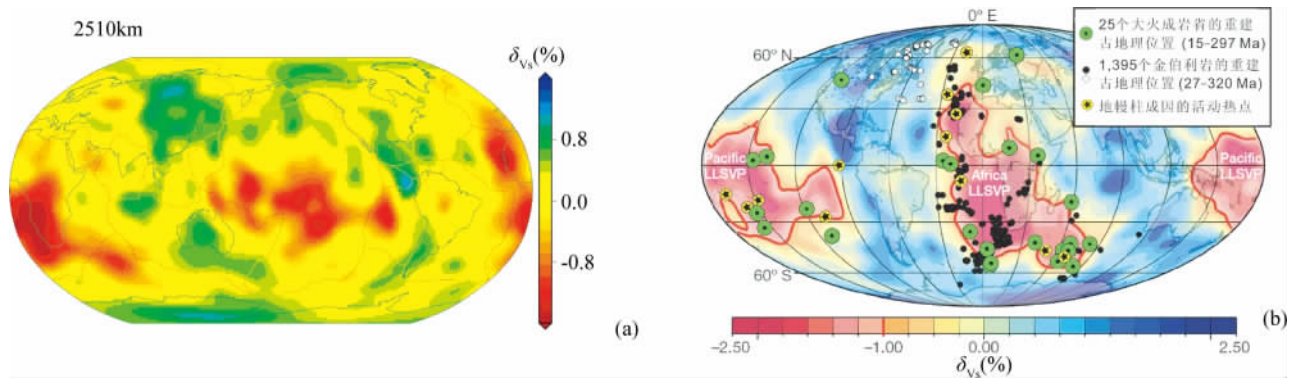


图1 2510km 深地球内部地震图像(SMEAN 模型)显示在非洲和太平洋出现两个大的低速异常区(LLSVP)(a, 据 Becker and Boschi, 2002)和3.2 亿年以来大火成岩省和金伯利岩的重建古地理位置与地幔底部 S-波异常区的关系图(b, 据 Torsvik *et al.*, 2010)

绝大多数的大火成岩省位于两个 LLSVP 的边缘 80% 的含金刚石金伯利岩位于非洲低速异常区附近或内部

Fig.1 Global seismic image (SMEAN model) at 2510km showing the two large low-shear-wave-velocity provinces (LLSVPs) underneath Africa and Pacific (a, after Becker and Boschi, 2002) and reconstructed large igneous provinces and kimberlites for the past 320Myr with respect to shear-wave anomalies at the base of the mantle (b, after Torsvik *et al.*, 2010)

Note that the majority of large igneous provinces are located at the periphery of the two LLSVPs, and 80% of all reconstructed kimberlite locations of the past 320Myr erupted near or over the sub-African PGZ

们将其认为是超级地幔柱(Burke and Torsvik, 2004; Torsvik *et al.*, 2008)。更有意思的是,通过古地磁研究可以获得显生宙大火成岩省喷发时的古地理位置,并将重建的古地理位置投影到两大超级地幔柱图上(因为它们基本保持不动),发现几乎所有的大火成岩省在喷发时位于两大超级地幔柱的边缘(图1b, Burke and Torsvik, 2004)。这一现象不仅有力地支持了超级地幔柱的“固定”概念以及地幔柱的核幔边界来源的传统认识,而且为大火成岩省的地幔柱成因提供了强有力的证据。至于为什么大火成岩省出现在超级地幔柱的边缘而不是在地幔柱的内部,目前还没有定论,我们猜测这可能和超级地幔柱的陡峭边缘有关。将重建的含金刚石的金伯利岩的古地理位置投影到两大超级地幔柱,发现全球85%的金伯利岩落在两大超级地幔柱范围内,强烈暗示金伯利岩的形成可能与超级地幔柱的活动有关(图1b, Torsvik *et al.*, 2010)。当然,导致金伯利岩形成的地幔柱为什么没有形成相关的大火成岩省依然是一个难以回答的问题(Condie, 2001)。金伯利岩一般产于太古代克拉通,其下岩石圈厚度>200km。巨厚的岩石圈可能阻挡了上升的地幔柱而抑制其减压熔融,只发生低程度部分熔融形成富CO₂的金伯利岩熔体,这些小体积岩体在穿越岩石圈过程中可能与其交代富集组分发生反应而不断增加其碱性程度(Mitchell, 1986)。

金刚石本身不能定年,但其中的硅酸盐矿物的定年结果变化于3300~990Ma之间(Richardson *et al.*, 1984),明显老于寄主金伯利岩筒的年龄(如白垩纪),因此,金刚石是金伯利岩中的捕虏晶(Xenocrysts),而不是斑晶(Phenocryst)。金伯利岩中的金刚石可能有多种成因(Richardson *et al.*,

1993),但根据绝大部分金伯利岩出现在古老克拉通的事实,我们推测岩石圈成因的金刚石占多数。金刚石可以形成于不同的时代(Kirkley *et al.*, 1991),储存在稳定的、冷的岩石圈深部的金刚石稳定区,等待后来的、来源更深的金伯利岩将其带到地表。Dawson(1999)曾形象地把金刚石称为金伯利岩汽车上的地幔乘客(mantle passengers on the kimberlite bus)。由此可见,金伯利岩中金刚石成矿可能需要两个条件,一是古老克拉通,其冷、厚的岩石圈根适合金刚石的生长与保存;二是地幔柱,其超深来源可携带金刚石至地表。因此超级地幔柱上方有古老克拉通是金刚石成矿的重要条件,反过来说,金刚石矿是地幔柱成矿体系的一个组成部分,尽管两者之间是间接的关系。

3 地幔柱成矿作用的主要特征与成因模型

与地幔柱相关的成矿作用可分成两类:(1)与地幔柱直接相关的成矿作用;(2)与地幔柱间接相关的成矿作用。本节简要总结与地幔柱直接相关和间接相关的各种矿床的主要特点和现有的成矿模型(图2)。

3.1 与地幔柱产出岩浆直接相关的矿床

人们熟知的钒钛磁铁矿床和铜镍硫化物矿床主要产于镁铁-超镁铁质岩体中。如前所述,这些岩体多与大规模的大陆溢流玄武岩在时空上紧密伴生,而且其母岩浆多为高镁玄武质或苦橄质的,因此与镁铁-超镁铁质岩体相关的岩浆矿床与地幔柱活动直接相关(Pirajno, 2000)。

钒钛磁铁矿床是全球金属钒和钛的主要来源,全球主

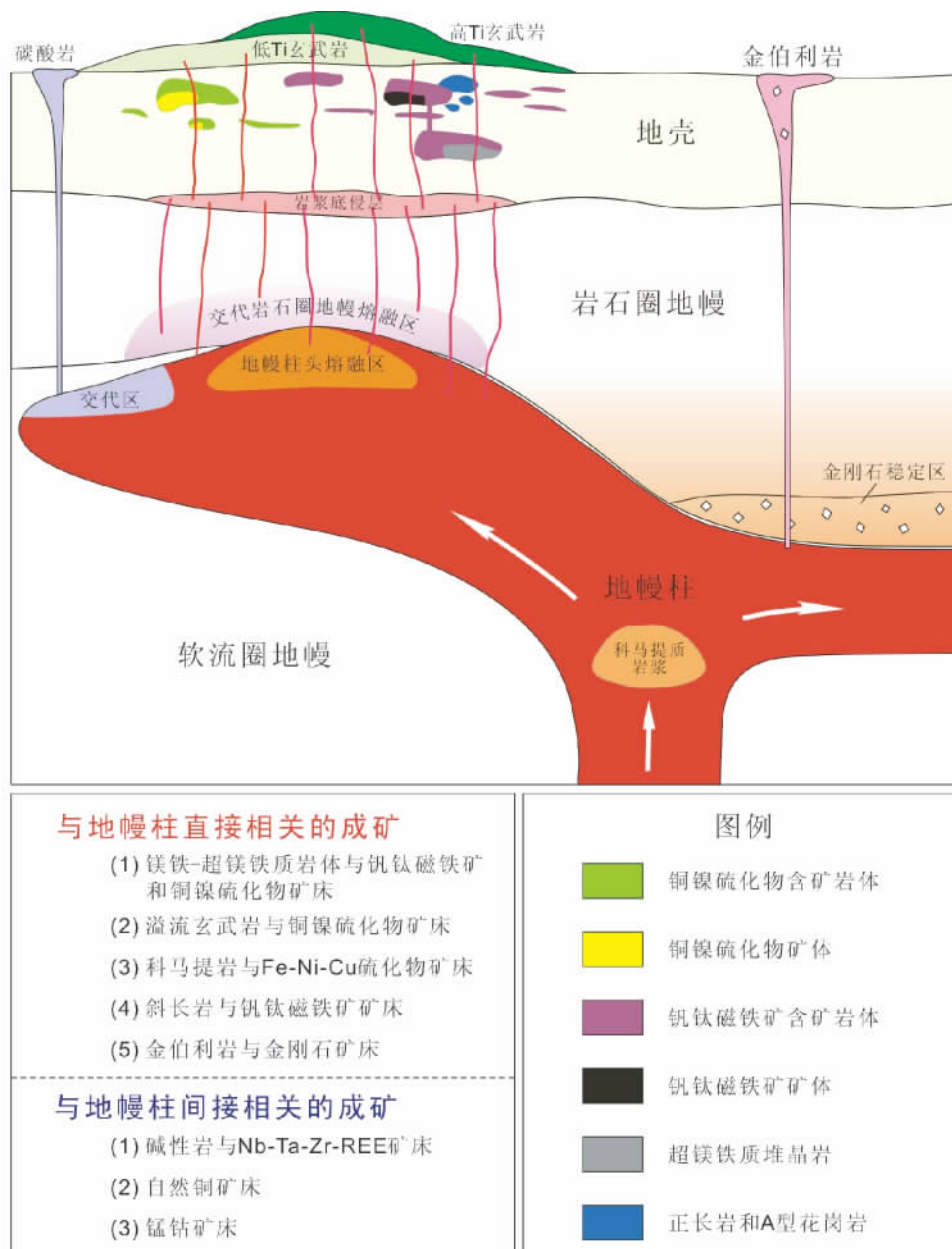


图2 地幔柱成矿系统示意图
Fig.2 Schematic illustration of mantle plume-related mineralization systems

要赋含钽铀磁铁矿床/矿化的层状岩体如表2所示。全球钽铀磁铁矿床中的钽资源量为22~26亿吨,占全球钽资源量的~80%,钽资源量为1.36亿吨,超过全球钽资源量的70%。世界上最大的钽铀磁铁矿床赋存在Bushveld杂岩体中,含有260万吨钽和2.1亿吨钽,我国攀西地区以攀枝花、红格和白马岩体为代表的层状岩体中赋含880万吨钽和8.7亿吨钽,分别占到世界资源量的11%和38%,是目前世界上最大的钽铀磁铁矿矿集区(据宋谢炎,2013^①)。

层状岩体中的钽铀磁铁矿矿体通常成层分布,矿体由不同比例的硅酸盐矿物(斜长石、辉石、橄榄石、磷灰石)和铁钛氧化物(磁铁矿和钛铁矿)组成的韵律条带组成,有时出现块

状矿石(铁钛氧化物>85%)。磁铁矿层可以发育在层状岩体的上部,如Bushveld杂岩体、Spet Iles岩体和Skaergaard岩体的磁铁矿层(McBirney and Noyes, 1979; Cawthorn and McCarthy, 1980; Namur et al., 2010);也可以发育在层状岩体的中下部,如攀西地区层状岩体中的磁铁矿层(Zhou et al., 2005; Shellnutt et al., 2009; Wang and Zhou, 2013)。经典的磁铁矿成因是通过研究Bushveld杂岩体中磁铁矿的成因得到的:在Bushveld杂岩体上部26个磁铁矿>50%的磁铁矿层累积厚度20.4m,相比厚达6500m的Bushveld杂岩体,

① 宋谢炎. 2013. 地球深部过程与成矿作用广州研讨会

表2 世界主要大型层状岩体及其矿化类型(据 Namur *et al.*, 2010 修改)Table 2 Characteristics and mineralization of some important layered intrusions in the world (after Namur *et al.*, 2010)

岩体	国家	年龄 (Ma)	面积 (km ²)	厚度 (km)	矿化类型
Bushveld Complex	南非	2060	65000	7~9	PGE, Cr, V, Fe, Ti, P
Sept Iles	加拿大	564	5000	6	Fe, Ti, P
Duluth	美国	1100	5000	1~5	PGE, Cu, Ni, Fe, Ti, P, V
Muskox	加拿大	1267	4400	1.8	PGE, Cu, Ni, Cr
Windimurra	澳大利亚	2800	2300	13	PGE, V
Bjerkreim-Sokndal	挪威	930	230	7.5	Fe, Ti, P, V
Skaergaard	格陵兰	55	90	3.5	PGE, Au
Rhum	英国	60	50	1	PGE, Cr
攀枝花	中国	263	30	2~3	Fe, Ti, V
Fedorivka	乌克兰	1760	3	0.3	Fe, Ti, P, V

整个磁铁矿层只占岩体很小的比例,因此,被认为是典型的岩浆分离结晶作用晚期的产物(Cawthorn and McCarthy, 1980)。随着近年来矿物微区结构和成分分析技术的提高以及实验岩石学的进展,很多学者认为岩浆不混熔过程对层状岩体如 Bushveld、Skaergaard、Sept Iles、以及攀西地区红格、新街岩体中的磁铁矿成因具有重要的作用(Jakobsen *et al.*, 2005, 2011; Charlier *et al.*, 2011; VanTongeren and Mathez, 2012; Wang and Zhou, 2013; Dong *et al.*, 2013)。传统观点认为,不混熔作用仅能发生在岩浆刚好达到 1000°C 时,因此,只能发生在玄武质岩浆分离结晶作用的晚期(Philpotts and Doyle, 1983),但最近也有实验岩石学结果表明不混熔可以发生在 1100°C 的岩浆中(Veksler *et al.*, 2007)。当然,这仍然是一个争议的问题。最新的实验表明,在 1atm、干体系下的拉斑玄武质岩浆中,不混熔可以在 1000~1020°C 之下发生(Charlier and Grove, 2012)。在我国攀西地区的层状岩体中,主要矿石层大多发育在岩体的中下部,而不是在岩体的上部,暗示磁铁矿可能不是岩浆分离结晶作用晚期的产物。因此,探讨这些含矿岩体形成过程中岩浆不混熔过程与铁矿石形成的关系显得尤其有意义。

铜镍硫化物矿床按照金属组合可以分成三种类型:以铜镍为主、以铂族元素为主和同时富集铜镍和铂族元素的矿床。世界主要铜镍硫化物矿床的主要特征和矿化类型见表 3。Bushveld 杂岩体赋含世界上最大的铂族元素矿床,赋存在 Merensky Reef 和 UG-2, UG-1, MG-3 和 MG-2 铬铁矿石层中的铂、钯和铑分别占到全球 Pt、Pd 和 Rh 产量和储量的 67.5%、43% 和 77% (Mungall and Naldrett, 2008)。世界上没有第二例如此大型的岩浆型铂族元素矿床,如此大量的铂族

表3 世界主要大型铜镍硫化物矿床含矿岩体的特征

Table 3 Characteristics and mineralization of some important Ni-Cu-PGE sulfide deposits in the world

岩体	国家	年龄 (Ma)	面积 (km ²)	厚度 (km)	矿化类型
Bushveld	南非	2060	65000	7~9	PGE
Dufek	南极洲	182	6600	8~9	PGE
Stillwater	美国	2700	4400	6.5	PGE, Cu, Ni
Great Dyke	津巴布韦	2460	3300	3	PGE, Cu, Ni, Cr
Thompson	加拿大	1890	6000	0.15	Ni, Cu, PGE
Duluth	美国	1100	5000	1.5	Ni, Cu, PGE
Noril'sk	俄罗斯	251	144	0.1~0.5	Ni, Cu, PGE
金川	中国	831	3.25	0.2~1.3	Ni, Cu, PGE
Kiglapait	加拿大	1305	560	8.5	Ni, Cu
Newark Island	加拿大	1305	150	43	Ni, Cu
Pechenga	俄罗斯	1980	60	0.05~0.6	Ni, Cu
Voisey's Bay	加拿大	1340	6	0.2~1	Ni, Cu

元素如何聚集成矿一直存在争论,众多的成因模式可以归纳为两类:一是铂族元素来源于下部的堆晶岩,当粒间熔体中的富水矿物释放的富 Cl 流体穿过这些堆晶岩时将铂族元素带到堆晶岩上部成矿(Boudreau and McCallum, 1992);二是铂族元素是上覆岩浆遭受岩浆混合(Campbell *et al.*, 1983)或压力变化(Cawthorn, 2005)硫化物造成铂族元素富集。

Naldrett *et al.* (1996) 在研究 Noril'sk 矿床成因时提出,铜镍硫化物矿床是岩浆在一个动态的岩浆通道系统(dynamic magma plumbing system)中形成的,矿床通常形成在岩浆通道(magma conduit)突然变宽的部位、或岩浆进入岩席的部位、或在熔岩流的底部。岩浆通道系统成矿模式可以很好的解释所谓“小岩体成大矿”的现象,例如我国最大的镍矿-金川岩体(Chai and Naldrett, 1992; Song *et al.*, 2009)、加拿大的 Voisey's Bay 岩体(Li and Naldrett, 1999)、以及峨眉山大火成岩省中众多含矿的小岩体等。随着硫化物的 S 同位素和 Re-Os 同位素测试成为一个常规的分析手段,近年来有关铜镍硫化物矿床成因研究一个热点的问题是,岩浆硫化物饱和是否需要外来地壳硫的加入(Ripley and Li, 2013)。目前在 Noril'sk 岩体、我国东天山和攀西地区与塔里木和峨眉山大火成岩省相关的一些含矿岩体中均发现了地壳硫加入的证据(Li *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012; Ripley and Li, 2013; Sun *et al.*, 2013; Xia *et al.*, 2013) 因此,外来地壳硫的加入可能是形成具经济价值矿床的一个非常重要的因素。

3.2 与地幔柱产出岩浆间接相关的矿床

地幔柱及其岩浆产物是巨大的热源,因此对上覆地壳形成热液循环系统,促进成矿元素的活化和矿床的形成。与地幔柱有关的成矿作用种类日益丰富,例如,峨眉山大火成岩省除了发育以钒钛磁铁矿床和铜镍硫化物矿床为主的多种岩浆-热液成矿作用之外,还发育与过碱性花岗岩脉有关的铌钽铍矿化、以及玄武质岩浆后期热液活动相关的锰钴矿、自然铜矿、自然砷矿等,构成了世界其它大火成岩省中很少见的、成矿类型多样的地幔柱成矿系统。

20世纪60年代初期在攀西地区发现了近30个铌钽铍矿床(矿化点)(贺金良,2004),它们多赋存在过碱性岩脉中,在空间上与攀西地区广泛分布的长英质岩体密切相关。最新的锆石定年结果显示,这些过碱性岩脉的形成年龄均在258Ma左右,与攀西地区的层状岩体和花岗岩体等为同期岩浆作用产物,但有可能是岩浆演化至晚期高分异阶段的产物(王汾连等,2013)。Nb和Ta主要赋存在烧绿石、褐钨铌矿等矿物中,但Nb-Ta的富集机制仍有待进一步研究。

在美洲中部Keweenaw大陆溢流玄武岩和我国峨眉山大火成岩省均发育自然铜矿(Butler and Burbank, 1929; White, 1968; Zhu *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2006a)。自然铜常常发育在火山角砾岩的裂隙中、或玄武岩的气孔中构成杏仁体。在云南昭通地区玄武岩中发育的自然铜常与沥青等有机物质共生,被认为是在低温热液并缺乏还原性硫的情况下、强烈的有机-无机物质反应形成的(Wang *et al.*, 2006a)。虽然这些自然铜矿化远没有达到经济价值,但作为与地幔柱岩浆活动有关的热液体系的演化研究具有重要意义。此外,在峨眉山大火成岩省,与玄武岩伴生的矿化还包括锰钴矿化、自然砷矿等,由于之前没有人认为这些矿化与峨眉山地幔柱岩浆活动有关,因此,这些矿化与地幔柱岩浆的关系、以及元素的富集机制都不清楚。

4 地幔柱成矿作用的主要控制因素

成矿作用是一个特殊的地质过程,可能的控制因素包括:地幔柱结构、岩浆源区特征、结晶分异、硫化物熔离、地壳混染和侵位过程等。

4.1 地幔柱结构、岩石圈-地幔柱相互作用对成矿的影响

地幔柱结构(柱头还是边缘)是控制岩浆形成的重要因素,因此也可能是相关成矿作用的一级控制。地幔柱结构主要表现在热和成分的分带,热结构控制了地幔柱熔融程度、产出岩浆的成分以及岩浆的供给率。与地幔柱边缘相比,地幔柱核部通常具有更高的温度,因此熔融程度大、岩浆供给率大,产出岩浆类型多样,有利于大型矿床的形成。例如,Bushveld杂岩体是多期岩浆灌入的结果;位于峨眉山大火成

岩省内带的攀西地区产出有低钛玄武岩、高钛玄武岩、碱性岩等(Xu *et al.*, 2004),是我国重要的钒钛磁铁矿产地。

地幔柱可上涌至克拉通岩石圈或者造山带,因此岩石圈-地幔柱相互作用的方式和过程是不同的,会对成矿作用产生影响。岩石圈在影响地幔柱活动的作用是双重的。一方面,刚性岩石圈对上涌地幔柱起阻挡作用,对流地幔发生熔融的前提条件是岩石圈厚度必须小于65~80km(McKenzie and Bickle, 1988)。所以当地幔柱上涌至克拉通时,因克拉通下岩石圈较厚(150~300km)地幔柱不会发生减压熔融。另一方面,岩石圈可在地幔柱作用下发生熔融。一般来说,大陆岩石圈地幔亏损玄武岩质组分,而且岩石圈内以热传导为主,因此相对“冷”的状态不足以引起岩石圈的大规模熔融。理论和物理模型计算也都表明,在岩石圈和软流圈具有相同的熔融行为这一前提下,95%以上的熔融发生在软流圈,而因岩石圈熔融形成岩浆的可能性很小(McKenzie and Bickle, 1988; Arndt and Christensen, 1992)。不过,这些模拟计算都假定岩石圈和软流圈的熔融均是在无水条件下进行的,但当岩石圈地幔中含水或含其他低熔点组分时,地幔柱烘烤作用也可以使岩石圈地幔发生熔融(Gallagher and Hawkesworth, 1992)。南美的Parana大火成岩省就是这一熔融机制的典型代表(Turner *et al.*, 1996; Gibson *et al.*, 2006)。

需要指出的是,由于岩石圈地幔来源的岩浆体积较小、岩浆供给率小,因此形成大矿的可能性不大。由地幔柱形成的岩浆的体积大、岩浆供给率大,因此形成大矿的可能性大。例如,塔里木大火成岩省有两期岩浆活动,第一期(~290Ma)岩浆来源于富集岩石圈地幔,主要分布于塔里木盆地内部,其形成机制与南美Parana大火成岩省相似(Turner *et al.*, 1996);第二期(~280Ma)岩浆来源于对流地幔,主要出现在塔里木盆地的边缘和与造山带的交接部位(徐义刚等,2013; Wei *et al.*, 2014)。这些区域的岩石圈较薄,或是岩石圈薄弱带,因此地幔柱有可能发生减压熔融。值得注意的是,迄今为止发现的矿床主要与第二期岩浆活动有关。

4.2 岩浆源区

岩浆源区特征对成矿的控制是显而易见的。富Fe岩浆显然更可能导致钒钛磁铁矿床的形成,而富Ni岩浆有利于镍矿的形成。近十年来关于地幔柱岩浆源区有很多重要进展,特别是辉石岩在岩浆源区的贡献日益被重视。例如,Lassiter *et al.* (2000)发现夏威夷玄武岩的Os同位素组成与主、微量元素成分呈相关关系,其中具有高放射性成因Os同位素的样品同时具有高Si、高Al,低Ca的特征。他们将这些关系归因为辉石岩和橄榄岩来源的熔体之间的混合。由于Ni在橄榄石中为相容元素,因此当熔融源区有橄榄石残留时形成熔体的Ni含量相对较低,而当熔融源区无橄榄石残留(如辉石岩)时形成熔体的Ni含量相对较高。因此橄榄

石中 Ni 含量的高低或许可用于指示岩浆源区是橄榄岩还是辉石岩。Sobolev *et al.* (2005) 发现夏威夷火山岩中橄榄石斑晶在相同 Fo 时比洋中脊玄武岩 (MORB) 中橄榄石具有更高的 Ni 含量。由此他们推断夏威夷火山岩起源于无橄榄石的地幔源区。在之后的研究中 Sobolev *et al.* (2007) 发现许多大火成岩省中苦橄岩中橄榄石中的 Ni 含量均比 MORB 中的高, 推测地幔柱源区普遍存在经再循环洋壳熔体与橄榄石反应形成的辉石岩。由于辉石岩的熔点比橄榄岩低, 因此在岩石圈较厚的地区地幔柱熔融产生的熔体主要以辉石岩组分为主。由此可推测, 板内大火成岩省中火山岩主要来源于辉石岩, 原始岩浆中 Ni 含量较高, 为形成大型岩浆镍矿提供了基础。事实上, 据 Sobolev *et al.* (2007) 的研究, 西伯利亚暗色岩系的源区为 100% 的辉石岩, 而在 Noril'sk 发育了世界上最大的铜镍硫化物矿床; 相比较而言, 德干高原玄武岩发育在岩石圈较薄的地区 (Rao and Lehmann, 2011) 推测其源区中辉石岩的含量较少, 不利于大型岩浆镍矿的形成。这可能也是德干大火成岩省迄今为止未发现相关矿床的原因之一。

4.3 结晶分异和岩浆不混溶过程

结晶分异作用无疑是地幔柱成矿作用的重要环节。例如, 富 Cr 尖晶石和铬铁矿是镁铁-超镁铁岩浆的早期结晶产物, 之后岩浆中的 Cr 主要被单斜辉石吸纳, 因此岩浆演化后期几乎不出现富 Cr 尖晶石和铬铁矿; 相反, 含 V 的铁钛氧化物 (钛铁矿和含钛磁铁矿) 只有当残留岩浆中 Fe-Ti 浓度演变到一定程度才开始结晶, 通常出现在结晶作用的晚期。因此, 铬铁矿一般来说出现在层状岩体的底部, 而钒钛磁铁矿出现在层状岩体的上部, 例如 Bushveld 层状杂岩体。

拉斑玄武质岩浆通过结晶分异作用可以演化成富 Si 贫 Fe 的流纹质产物 (即 Bowen 分异趋势; Bowen, 1928) 或富 Fe 贫 Si 的产物 (即 Fenner 分异趋势; Fenner, 1929)。磁铁矿从岩浆中晶出的时间, 也就是说岩浆氧逸度的大小决定了岩浆演化会遵循哪种分异趋势 (Osborn, 1959; 徐义刚等, 2003)。氧逸度的升高会扩大玄武质岩浆体系中磁铁矿稳定范围, 促使磁铁矿从岩浆中较早结晶, 从而导致残余岩浆中硅的富集和铁的亏损。相反, 较低的氧逸度会推迟岩浆演化过程中磁铁矿的晶出, 致使残余岩浆中铁的富集。在自然界, 玄武岩的 Bowen 分异趋势较为普遍, 常见于许多大火成岩省 (Hunter and Sparks, 1986), 而 Fenner 分异趋势以及富铁岩浆 (全 FeO > 20%) 较为罕见。格陵兰东部的 Skaergaard 侵入体层被认为是记录了玄武岩岩浆 Fenner 分异趋势的典型例子 (Wager *et al.*, 1960), 但却因其母岩浆性质的反演模型而遭到了 Hunter and Sparks (1987) 的质疑, 认为 Skaergaard 岩浆同样经历了 Bowen 分异趋势, 层状岩体中的富铁现象与岩浆的重力分异有关, 否认富铁低硅岩浆在自然界的存在。徐义刚等 (2003) 发现峨眉山大火成岩省东区的玄武岩也具有 Fenner 分异趋势, 最终分异产物中 Fe₂O₃ 含量高达 23%,

SiO₂ 含量低至 44%, 从而为富 Fe 贫 Si 岩浆在自然界的客观存在提供了直接的证据; 并认为地壳混染程度可能是造成幔源岩浆具有不同分异趋势的重要原因, 具 Bowen 分异趋势的岩浆系列的氧逸度较高, 并经历了较大程度的地壳混染作用, 而具 Fenner 分异趋势的岩浆的氧逸度较低, 地壳混染不明显。

但是, 并不是所有的层状岩体都具有这样的特点, 例如我国攀西地区的层状岩体, 磁铁矿层出现在这些岩体的中下部, 暗示除了结晶分异作用外还有其他岩浆过程导致了钒钛磁铁矿的结晶。最近的研究表明, 岩浆的不混溶过程可能是形成富铁熔体形成磁铁矿的重要过程 (Dong *et al.*, 2013; Wang and Zhou, 2013; Zhou *et al.*, 2013; 王坤等, 2013)。在红格和新街岩体中均发现, 主要矿石层中磁铁矿为低 Cr 磁铁矿, 其 Cr 含量低而且变化不大, 远低于岩体下部的高 Cr 钒钛磁铁矿, 这无法用岩浆的正常分离结晶作用来解释 (Dong *et al.*, 2013; Wang and Zhou, 2013)。Xing *et al.* (2012) 研究了攀西地区含矿岩体中主要矿石类型海绵陨铁矿石中不同矿物的挥发份组成, 发现磁铁矿具有比单斜辉石和斜长石多得多的 CO₂ 和 H₂O 含量, 说明主要矿石层中的磁铁矿不可能是早期分离结晶形成的。通过对岩体中斜长石和磷灰石的熔融包裹体的研究发现, 斜长石中的赋含富 Fe 熔融包裹体 (Dong *et al.*, 2013), 磷灰石中同时发育富 Fe 和富 Si 的熔融包裹体 (王坤等, 2013)。利用这些熔融包裹体计算出的富 Fe 和富 Si 熔体的成分与 Skaergaard 和 Sept Iles 层状岩体、以及实验岩石学获得的不混熔熔体成分非常类似 (Dixon and Rutherford, 1979; Jakobsen *et al.*, 2005; Charlier *et al.*, 2011)。演化的玄武质岩浆经过岩浆不混溶作用形成与结晶相平衡共存的富 Si、富 Fe 两种熔体 (Philpotts, 1979, 1982; Longhi, 1998; Jakobsen *et al.*, 2005, 2011; Charlier *et al.*, 2011), 由于 FeO 和 SiO₂ 在两种熔体中的分配截然相反, 这也为 Bowen 和 Fenner 趋势的争论提供了一种可能的解释。

4.4 地壳混染过程

如前所述, 地壳混染作用有时会控制幔源岩浆的结晶分异趋势, 如地壳混染作用会提高岩浆系统的氧逸度, 提早磁铁矿从岩浆中晶出的时间, 不利于富 Fe 岩浆以及磁铁矿床的形成。但是地壳混染作用对铜镍硫化物矿床的形成非常关键。研究表明, 西伯利亚大火成岩省中含矿侵入岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值大于不含矿侵入岩 (Hawkesworth *et al.*, 1995), 暗示成矿作用与地壳混染过程之间的联系。后续研究表明, Noril'sk 矿床中硫主要来自于岩浆侵入地层的膏盐层, 地壳硫的加入是铜镍硫化物矿床的形成的关键控制因素之一 (Ripley *et al.*, 2010), 岩浆侵位过程中的中、上地壳物质组成应成为今后矿床研究和找矿靶区确定的重要环节。

4.5 岩浆侵位过程

含矿岩体的形状和规模与其侵位时的中、上地壳特质结

构、侵位时的构造位置关系密切,但是由于相关的研究严重滞后,相关认识较为肤浅。

铜镍硫化物矿床含矿岩体可同时出现在板内或造山带中。例如,发育在峨眉山大火成岩省中的含矿岩体位于扬子克拉通边缘,岩浆作用与板内岩浆活动有关,而发育在东天山的大量含矿岩体实际上是位于中亚造山带中。目前对板内环境和造山带环境中的含矿岩体,包括组成岩体的岩石和矿石组成差异、不同构造环境中地壳结构的差异、岩浆房的规模和岩浆侵位的机制、含矿岩体原始岩浆的成分、以及岩浆与地壳物质交换等方面尚缺乏细致、系统的对比,应是今后工作的重点之一。已知铜镍硫化物矿床的铂族元素差异较大,这可能与岩浆在深部的演化过程有关,不同程度的硫化物残留在深部岩浆房有可能是造成矿床硫化物矿床铂族元素差异的主要原因。

岩浆中S的溶解度主要受岩浆成分、温度、氧逸度和压力的控制。在这两种不同的构造背景下,岩浆成分、温度和压力的变化也有所差别,因此,对于岩浆S溶解度的影响也会产生差异。例如,一般认为,岩浆中S的溶解度与压力呈反比,压力越低,岩浆中S的溶解度越大(Mavrogenes and O'Neill, 1999)。在板内和造山带背景下,岩浆上升过程中压力的变化可能是不同的,因为在板内伸展背景条件下,岩浆上升有可能形成大的岩浆房,而在造山带背景下形成的岩浆房通常较小。模拟实验结果表明,体积较大的岩浆房的压力变化相对较小,而体积较小的岩浆房的压力变化可能较大(图3, Melnik and Sparks, 2005)。因此,在这两种构造背景下,岩浆房的形状、规模等均可能造成压力变化的不同,而这些差别与岩浆中S的溶解度之间的关系如何,值得今后的研究深入思考(周美夫, 2013^①)。另外,与Bushveld杂岩体相比,我国峨眉山和塔里木大火成岩省没有发现赋含大型铬铁矿床的岩体,这是否与岩浆侵位深度有关尚不清楚。因此,研究岩浆在深部岩浆房和岩浆通道中的演化过程和岩浆侵位深度对了解含矿岩体成分差异十分必要。

5 与地幔柱相关矿床的找矿地球化学指标

能找到灵敏的找矿指标是我们一直梦寐以求的。但成矿作用是复杂的地质过程,影响成矿的因素众多,这项工作的难度也就可想而知。本节根据文献研读和我们的理解,就镁铁-超镁铁质层状岩体的找矿指标提出一些粗浅的看法,重点针对层状岩体中组成矿物的化学组分来讨论。

5.1 橄榄石中Ni含量

Ni在橄榄石中为强相容元素,其分配系数 $D_{Ni}^{Ol/melt}$ 随其结晶熔体的MgO降低而快速升高($D_{Ni}^{Ol/melt} = 124/MgO - 0.9$, Hart and Davis, 1978),在斜方辉石中中等相容($D_{Ni}^{Opx/melt}$ ($D_{Ni}^{Ol/melt}/3$, Straub *et al.*, 2008),在单斜辉石中为相容元素

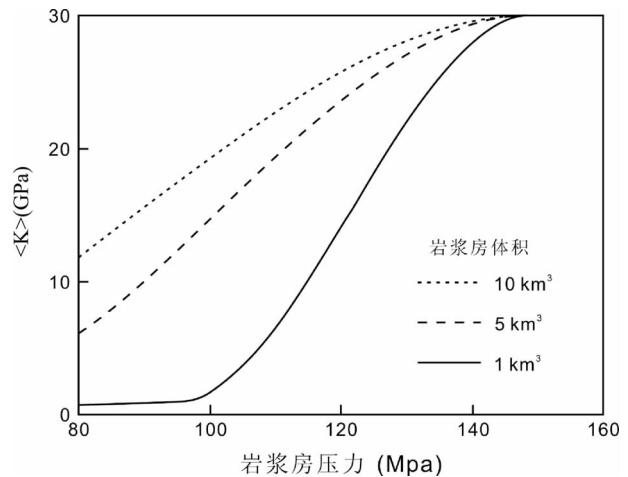


图3 不同规模岩浆房中岩浆整体系数与岩浆房顶部压力的关系(据Melnik and Sparks, 2005),假定起始岩浆含5% H₂O

Fig. 3 Bulk modulus of the magma inside the chamber as a function of the pressure at the top of the chamber for the top of the chamber located at 5km depth and initial water content equal to 5% (after Melnik and Sparks, 2005)

At low chamber pressures, bubble concentration inside the chamber is high, leading to low bulk modulus. As the chamber pressure increases, the bubble fraction in the chamber decreases, and the bulk modulus of the magma reaches the bulk modulus of pure melt

($MgO_{melt} > 16\%$, $D_{Ni}^{Cpx/melt} = \sim 1$, Sobolev *et al.*, 2005; $MgO_{melt} = 5\% \sim 7\%$, $D_{Ni}^{Cpx/melt} = 4 \sim 6$, Norman *et al.*, 2005)。橄榄石、斜方辉石和单斜辉石的分离结晶会导致残余岩浆亏损Ni,不利于铜镍硫化物矿床的形成,因此铜镍硫化物矿床一般发生在岩浆演化的早期。Ni在硫化物中具有较高的分配系数($D_{Ni}^{Sul/melt} = 315 \sim 1300$, Francis, 1990; Peach *et al.*, 1990; Ripley *et al.*, 2002; Sattari *et al.*, 2002),因此硫化物熔离会导致残余熔体强烈亏损Ni,从残余岩浆中结晶的橄榄石也会具较低的Ni含量。由此可见,在层状岩体中存在有高Fo值而低Ni含量的橄榄石时,可能暗示岩体在橄榄石结晶之前经历了硫化物饱和和熔离。

然而实际的观察是,与硫化物成矿有关的镁铁-超镁铁质岩体中的橄榄石在很低的Fo值时仍然具有很高的Ni含量(图4)。造成这种现象的原因可能有二:一是岩浆源区可能是辉石岩而非橄榄岩,如前所述,来源于辉石岩的岩浆结晶的橄榄石的Ni含量较高;二是与开放体系下岩浆的多期供给有关。研究表明铜镍硫化物含矿岩体形成于岩浆通道系统,在这种开放体系下,后期更为原始的岩浆不断补给或者和地壳物质的相互作用,为大规模的铜镍硫化物成矿创造了有利的条件(Naldrett, 1997, 1999, 2004; Ripley *et al.*,

① 周美夫. 2013. 地球深部过程与成矿作用广州研讨会

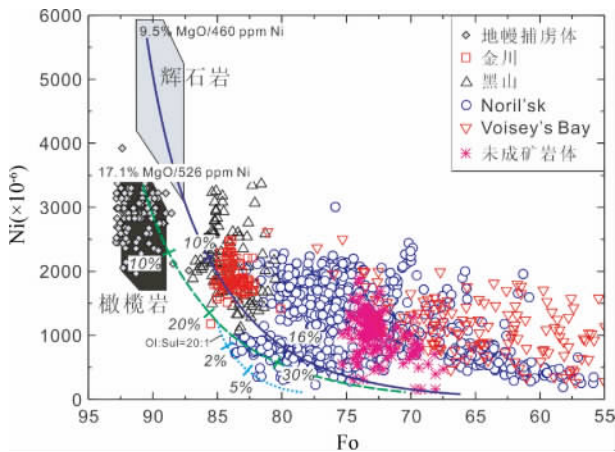


图4 层状岩体中橄榄石 Fo-Ni 相关图解

地幔橄榄岩熔体(黑色区域)和辉石岩熔体(灰色区域)引自 Straub *et al.* (2008, 2011). 实线和虚线代表橄榄石分离结晶的趋势. 点划线代表橄榄石结晶和硫化物熔离(Ol:Sul=20:1)同时进行的模拟曲线. 数据来源: 地幔捕虏体引自 Liu *et al.* (2011); 甘肃金川岩体引自 Chai and Naldrett (1992) 和 Li *et al.* (2004); 北山黑山岩体引自 Xie *et al.* (2012); 俄罗斯 Noril'sk 岩体引自 Arndt *et al.* (2003) 和 Li *et al.* (2003); 加拿大的 Voisey's Bay 引自 Li and Naldrett (1999); 未成矿镁铁质岩体为作者未发表数据

Fig. 4 Plot of Ni versus forsterite content (Fo) of olivine grains from layered intrusions

Melts in equilibrium with mantle peridotite (black field) and pyroxenite (grey field) from Straub *et al.* (2008, 2011). The solid and dashed lines represent olivine fractionation trends, with percentage of olivine loss given in italics. Numbers at starting point indicate MgO (%) and Ni ($\times 10^{-6}$) of initial mantle melts. Dotted line with tick marks represents simultaneous fractionation of olivine and sulfide with a proportion of 20:1. Data sources: Mantle xenoliths from Liu *et al.* (2011); Jinchuan intrusion from Chai and Naldrett (1992) and Li *et al.* (2004); Heishan intrusion in the Beishan rift from Xie *et al.* (2012); Noril'sk intrusion in Russia from Arndt *et al.* (2003) and Li *et al.* (2003); Voisey's Bay intrusion in Canada from Li and Naldrett (1999); Un-mineralized intrusions from authors' unpublished data

1999; Arndt *et al.*, 2005)。如俄罗斯的金川和加拿大的 Voisey's Bay 铜镍硫化物矿床 (Li and Naldrett, 1999; Naldrett, 1999, 2004; Li *et al.*, 2004)。这种开放体系下混合的岩浆, 结晶出的橄榄石具有较高的 Ni 含量, 可以解释低 Fo 值时 橄榄石仍具有较高 Ni 的特征。

5.2 单斜辉石中的 Cr 含量

Cr 在斜长石中为强不相容元素 ($D_{Cr}^{Pl/melt} = 0.02 \sim 0.11$, Bindeman *et al.*, 1998) 在橄榄石中为弱不相容到相容元素 ($D_{Cr}^{Ol/melt} = 0.6 \sim 1.9$, Beattie, 1994) 在单斜辉石中为相容元

素 ($D_{Cr}^{Cpx/melt} = 3.8$, Hart and Dunn, 1993) 在磁铁矿中则为强相容元素 ($D_{Cr}^{Mt/melt} = 50 \sim 230$, Leeman *et al.*, 1978)。因此橄榄石和斜长石的分离结晶不会导致残余熔体明显亏损 Cr。但是大量磁铁矿的分离结晶会使得残余熔体的 Cr 含量急剧降低, 这种熔体中结晶出的单斜辉石的 Cr 含量也会非常低。在没有岩浆补给的体系中, 层状岩体中的单斜辉石如果具有高的 Cr 含量, 那么在这些单斜辉石结晶之前不太可能形成块状磁铁矿层。例如, 加拿大 Sept Iles 层状侵入体中在块状磁铁矿层出现之前的单斜辉石就具有这种高 Cr 含量的特征 (图 5d-f, Namur *et al.*, 2011)。如果单斜辉石具有非常低的 Cr 含量, 可能暗示了块状磁铁矿层的出现。例如我国峨眉山大火成岩省中的攀枝花和红格层状侵入体, 在块状磁铁矿层出现之后结晶的 Cpx 具有非常低的 Cr 含量 (通常低于检出限) (图 5a-c, Bai *et al.*, 2012; Pang *et al.*, 2008, 2009)。

大量铁钛氧化物(钛铁矿和含钛磁铁矿)矿石只有当残留岩浆中 Fe-Ti 浓度演变到一定程度才开始结晶, 因此通常出现在结晶作用的晚期。块状磁铁矿层出现之前, 斜长石和橄榄石的大量分离结晶会导致残余熔体 Cr 含量逐渐升高, 因此结晶的磁铁矿 Cr 含量会逐渐升高 (图 5f, Namur *et al.*, 2010)。而磁铁矿的堆晶会导致残余熔体强烈亏损 Cr, 因此在磁铁矿作为液相线矿物大量结晶之后结晶的磁铁矿中 Cr 含量会逐渐降低。磁铁矿中 Cr 含量随着岩浆演化逐渐降低的趋势, 应该发生在块状磁铁矿层出现之前。加拿大的 Sept Iles 层状侵入体 (Namur *et al.*, 2011) 和峨眉山大火成岩省的新街岩体 (图 6, Dong *et al.*, 2013) 主要磁铁矿层出现之前, 均可以观察到磁铁矿中 Cr 随着岩浆演化逐渐降低的现象, 直至低于仪器的检出限。

5.3 层状岩体的 PGE 含量和 Re-Os 同位素联合示踪

我们通过对峨眉山大火成岩省及东天山一些典型的小型含矿岩体的铂族元素和 Re-Os 同位素研究, 提出了一种潜在的成矿岩体的评价指标。研究发现, 浅部岩浆房中的选择性混染地壳硫可能对成矿十分有利。例如, 南天湾岩体主要由辉长苏长岩和橄榄辉长岩组成, 硫化物含量在两种岩石类型中都较低, 橄榄辉长岩具有较小的 Cu/Pd 比值 (1,500 ~ 32,500), 负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-1.3 ~ -0.1) 和正的 $\epsilon_{Os}(t)$ 值 (5 ~ 15), 而辉长苏长岩具有很高的 Cu/Pd 比值 (54,000 ~ 624,000), 类似的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-0.9 ~ -2.1), 但很高的 $\epsilon_{Os}(t)$ 值 (17 ~ 262)。我们认为, 形成辉长苏长岩的岩浆比形成橄榄辉长岩的岩浆更演化、并更亏损铂族元素, 其相对较高的 $\epsilon_{Os}(t)$ 值说明岩浆在侵位到浅部岩浆房时选择性吸收了外来的地壳硫, 从而达到硫化物饱和, 造成部分辉长苏长岩含有较多的硫化物 (Wang *et al.*, 2012)。虽然南天湾岩体岩石的金属量并没有达到真正意义上的矿床品位, 但从岩浆形成的岩浆过程可以说明, 中等演化程度的岩浆在经历了早期少量硫化物熔离后, 如果在浅部岩浆房选择性混染外来地壳硫, 仍可以发生第二次硫化物饱和, 这也许是形成具潜在在

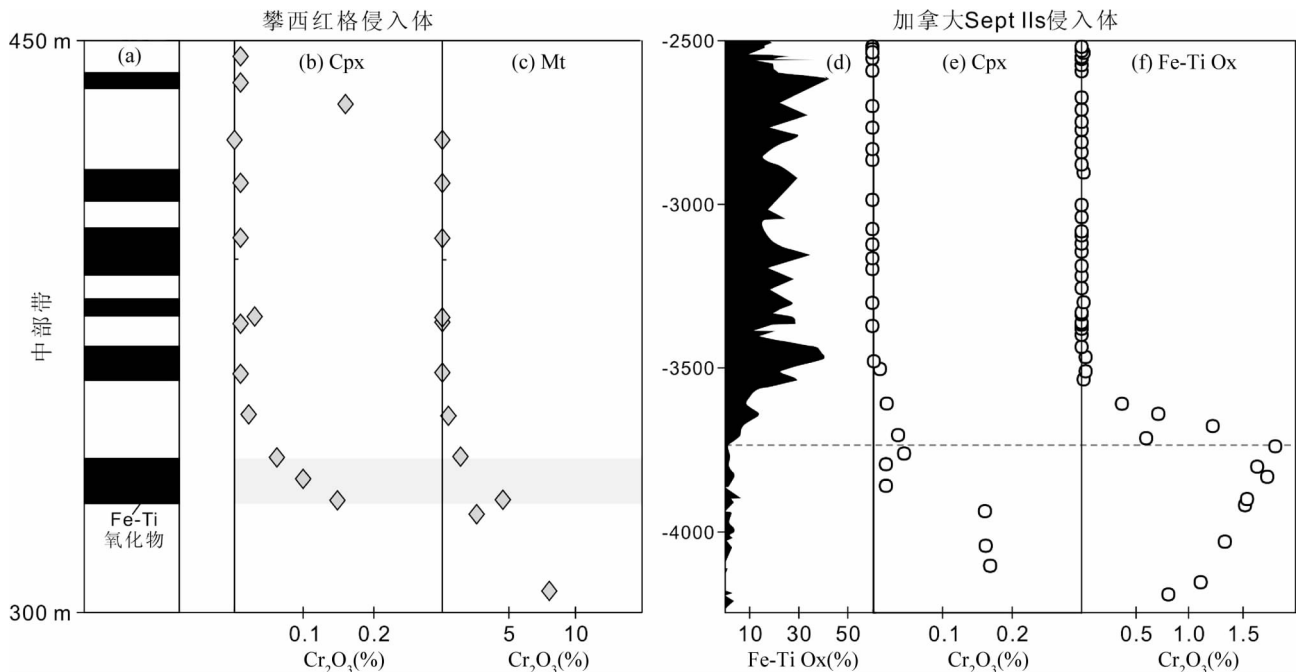


图5 层状岩体中单斜辉石和磁铁矿 Cr_2O_3 的演化趋势

峨眉山大火成岩省红格层状岩体中矿体位置 (a)、单斜辉石 (b) 和磁铁矿 (c) 中 Cr_2O_3 含量随层位变化图解(据 Bai *et al.*, 2012 修改); 加拿大 Sept IIs 侵入体 Fe-Ti 氧化物 (d)、单斜辉石 (e) 和 Fe-Ti 氧化物 (f) 中 Cr_2O_3 含量的随层位变化图解(据 Namur *et al.*, 2010, 2011 修改). (b) 中虚线表示铁钛氧化物开始作为堆晶相矿物出现的位置. Cpx-单斜辉石; Mt-磁铁矿; Fe-Ti Ox.-铁钛氧化物

Fig. 5 Stratigraphic variations of Cr_2O_3 in clinopyroxene and magnetite from layered intrusions showing potential diagnostic indicators for Fe-Ti oxide mineralization

Stratigraphic variation of Fe-Ti oxide layers (a), Cr_2O_3 of Cpx (b) and Mt (c) from the Hongge intrusion in the Emeishan large igneous province (after Bai *et al.*, 2012); Stratigraphic variation of Fe-Ti oxide Mode (d), Cr_2O_3 of Cpx (e) and Fe-Ti oxide (f) of the Sept IIs intrusion in Canada (after Namur *et al.*, 2010, 2011). Cpx-clinopyroxene; Mt-magnetite; Fe-Ti Ox.-Fe-Ti oxide

济价值矿床的重要途径之一。外来地壳硫加入岩浆对岩浆硫化物饱和和被认为是中亚造山带中几个重要铜镍硫化物矿床形成的重要控制因素之一,如红旗岭7号岩体(Wei *et al.*, 2013)、喀拉通克(Li *et al.*, 2012)、黄山西(Zhang *et al.*, 2011)、黄山东(Sun *et al.*, 2013)以及坡北(Xia *et al.*, 2013)等岩体中。

以镍铜为主的铜镍硫化物矿床形成的关键因素之一是大量地壳混染造成岩浆硫化物饱和。我们提出具经济价值的成矿岩体的地球化学指标为: (1) 铂族元素(Os, Ir, Ru, Rh, Pt 和 Pd) 相对 Ni 和 Cu 的强烈亏损。当岩浆达到硫化物饱和、发生硫化物熔离时,由于铂族元素在硫化物中具有非常高的分配系数($10^3 \sim 10^6$, Bezmen *et al.*, 1994; Fleet *et al.*, 1996) 岩浆中的铂族元素会强烈富集在硫化物中,从而造成残余岩浆强烈亏损铂族元素,因此,成矿岩体中不含矿的岩石常常表现为铂族元素相对 Ni 和 Cu 的强烈亏损。同时,由于这类矿床形成时较小的 R 值(硅酸盐熔体/硫化物熔体的质量比, Campbell and Naldrett, 1979), 硫化物矿石的铂族元素含量也较低,因此,也表现出同样的趋势; (2) $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}} - (\text{Nb}/\text{Th})_{\text{PM}}$ 二元图解和 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 等时

线。具有经济价值的含矿岩体一般均形成在非常动态的岩浆通道系统中,在这样一个体系中,地壳物质与岩浆可达到充分混合。岩浆的地壳混染程度可以用原始地幔标准化的 $(\text{Nb}/\text{Th})_{\text{PM}}$ and $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ 比值来估算。 $(\text{Nb}/\text{Th})_{\text{PM}}$ 可以很好的显示 Nb 异常的程度,而 $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ 比值可以很灵敏的反应地壳混染(Wang *et al.*, 2006b)。从地壳物质与幔源岩浆充分混合后的岩浆中形成的岩石在 $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}} - (\text{Nb}/\text{Th})_{\text{PM}}$ 二元图解上均很好的落在幔源岩浆与地壳混染端元的混合线上(如 Wang *et al.*, 2006b)。同时,由于岩浆与地壳物质的充分混合,所有岩石相当于来源于同一源区,因此具有相似的 $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值,因此,矿石可以构成一条很好的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 假等时线(如 Sun *et al.*, 2006); (3) 岩石的 γ_{Os} 值和 ϵ_{Nd} 值。如果硫化物饱和发生在浅部岩浆房,并由外来地壳硫加入所致,则岩石具有变化较大的 γ_{Os} 值,而相对不变的 ϵ_{Nd} 值。浅部外来地壳硫加入可能是造成岩浆二次硫化物饱和的重要因素和形成有经济价值矿床的重要途径之一(Wang *et al.*, 2012)。我们将这些特征的地球化学指标示于图 7,并希望可用于对未知岩体的含矿性识别,当然,这些标志是否实用还要经过更多的实例研究验证。

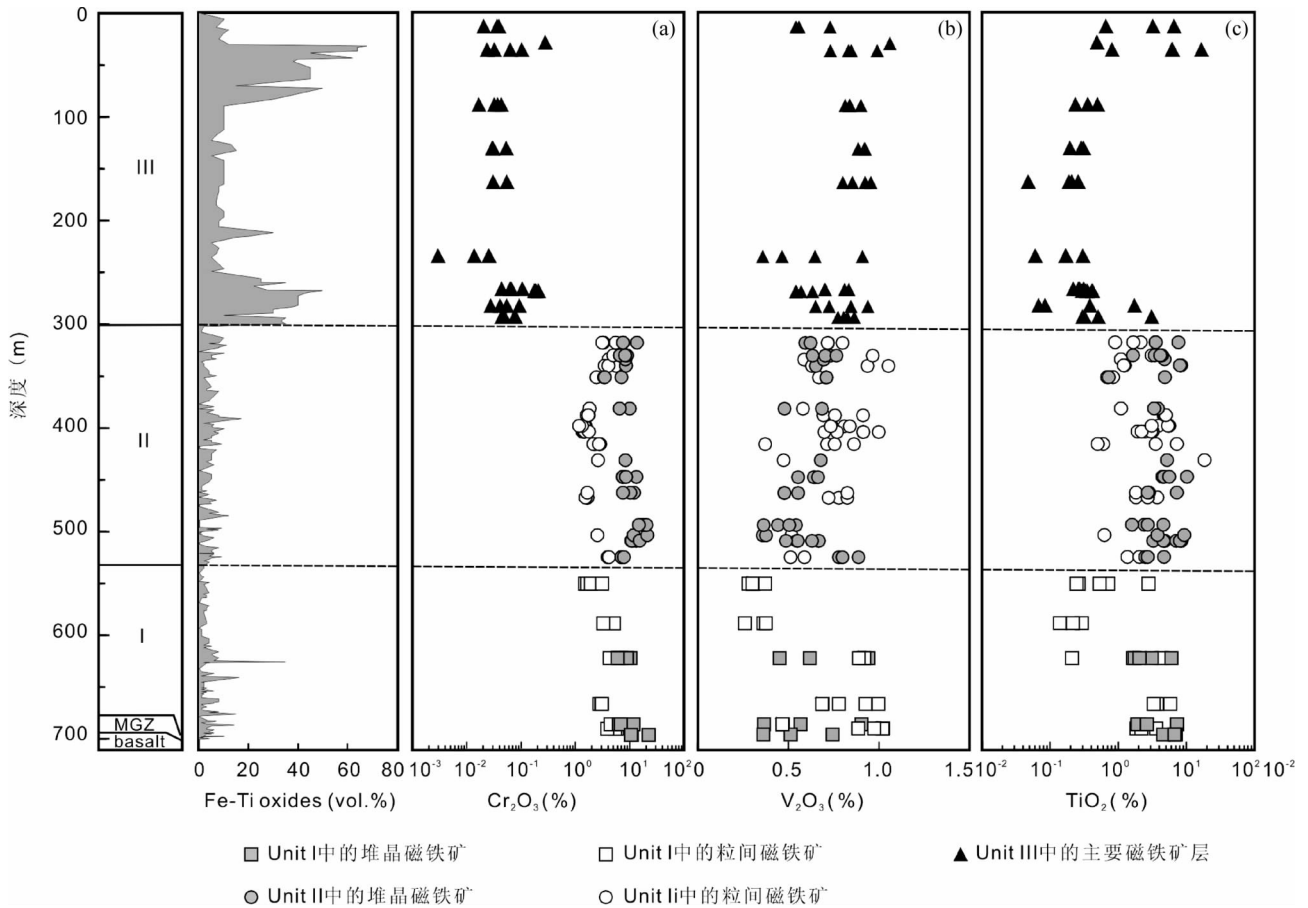


图6 峨眉山大火成岩省新街层状岩体中磁铁矿 Cr 含量的变化趋势(据 Dong *et al.* ,2013 修改)

Fig. 6 Variation of Cr concentrations of magnetite against the stratigraphic column of the Xinjie layered intrusion (modified after Dong *et al.* , 2013)

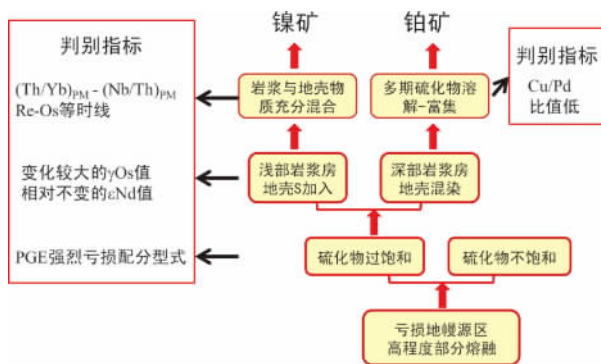


图7 小岩体成矿的岩浆演化过程和判别指标

Fig. 7 Geochemical indexes for magma differentiation processes in the formation of Ni-Cu sulfide deposits and PGE deposits

另一方面 形成铂族元素矿床需要大量 S 不饱和的高镁玄武质或苦橄质岩浆中的铂族元素在一定条件下能够富集在较少量的硫化物熔体中,即在大 R 值条件下,大量硅酸盐岩浆与少量硫化物发生交换才能使得岩浆中的铂族元素进

入硫化物熔体,从而有可能形成铂族元素矿床,例如 Bushveld 杂岩体中的 Merensky Reef (Kerr and Leitch , 2005; Naldrett *et al.* , 2009)、云南金宝山岩体中的富 PGE 条带层 (Wang *et al.* , 2010) 等。我们认为,在岩浆通道系统中大 R 值可以通过早期深部岩浆房熔离的硫化物熔体与后期多次流过岩浆通道中的 S 不饱和玄武质岩浆发生交换而实现,深部岩浆房的硫化物饱和可以由地壳混染或分离结晶导致。多期硫化物溶解-富集的模式可能是岩浆通道系统中小岩体形成以铂族元素为主矿化的重要方式(Wang *et al.* , 2010)。

6 结语与展望

在地球动力系统中 强调水平运动的板块构造学说和强调垂直运动的地幔柱假说是互为补充的。地幔柱活动在形成多种岩浆系列的同时,也伴生了多种具有重要经济价值的成矿作用,因此,与地幔柱活动相关的成矿作用的重要性也日渐受到关注。但是,迄今为止,地幔柱成矿系统理论框架尚未建立,对关键的控矿因素的认识仍有待深化。我国发育两个二叠纪大火成岩省,相伴生的成矿作用种类多样,在世

界上少见,为揭示地幔柱成矿作用规律、建立地幔柱成矿系统理论提供难得的材料。

展望未来,以下几个关键问题有待解决:(1)地幔柱岩浆系列及其成矿作用的厘定;(2)地幔柱来源岩浆的源区与演化及其对成矿多样性的控制;(3)地幔柱结构、岩石圈-地幔柱相互作用对成矿的影响;(4)与地幔柱有关的热液成矿系统,岩浆演化与热液阶段的联系和区别。总之,在以往单个矿床研究的基础上,强调成矿序列的研究,有助于建立完整的地幔柱成矿系统。

References

- Arndt NT and Christensen U. 1992. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: Thermal and geochemical constraints. *Journal of Geophysical Research*, 97(B7): 10967-10981
- Arndt NT, Kerr AC and Tarney J. 1997. Dynamic melting in plume heads: The formation of Gorgona komatiites and basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 146(1-2): 289-301
- Arndt NT, Czamanske GK, Walker RJ, Chauvel C and Fedorenko VA. 2003. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits. *Economic Geology*, 98(3): 495-515
- Arndt NT, Leshner CM and Czamanske GK. 2005. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: 179-213
- Bai ZJ, Zhong H, Naldrett AJ, Zhu WG and Xu GW. 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
- Beattie P. 1994. Systematics and energetics of trace-element partitioning between olivine and silicate melts: Implications for the nature of mineral/melt partitioning. *Chemical Geology*, 117(1-4): 57-71
- Becker TW and Boschi L. 2002. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(1), doi: 10.1029/2001GC000168
- Bezmen NI, Asif M, Brugmann GE, Romanenko IM and Naldrett AJ. 1994. Distribution of Pd, Rh, Ru, Ir, Os, and Au between sulfide and silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(4): 1251-1260
- Bindeman IN, Davis AM and Drake MJ. 1998. Ion microprobe study of plagioclase-basalt partition experiments at natural concentration levels of trace elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(7): 1175-1193
- Boudreau AE and McCallum IS. 1992. Concentration of platinum-group elements by magmatic fluids in layered intrusions. *Economic Geology*, 87(7): 1830-1848
- Bowen NL. 1928. *The Evolution of the Igneous Rocks*. Princeton: Princeton University Press, 1-334
- Burke K and Torsvik TH. 2004. Derivation of large igneous provinces of the past 200 million years from long-term heterogeneities in the deep mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 227(3-4): 531-538
- Butler BS and Burbank WS. 1929. The copper deposits of Michigan. *United States Geological Survey, Professional Paper*, 144: 1-238
- Campbell IH and Naldrett AJ. 1979. The influence of silicate: Sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides. *Economic Geology*, 74(6): 1503-1505
- Campbell IH, Naldrett AJ and Barnes SJ. 1983. A model for the origin of the platinum-rich sulfide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes. *Journal of Petrology*, 24(2): 133-165
- Cawthorn RG and McCarthy TS. 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
- Cawthorn RG. 2005. Pressure fluctuations and the formation of the PGE-rich Merensky and chromitite reefs, Bushveld Complex. *Mineralium Deposita*, 40(2): 231-235
- Chai G and Naldrett AJ. 1992. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma. *Journal of Petrology*, 33(2): 277-303
- Charlier B, Namur O, Toplis MJ, Schiano P, Cluzel N, Higgins MD and Auwera JV. 2011. Large-scale silicate liquid immiscibility during differentiation of tholeiitic basalt to granite and the origin of the Daly gap. *Geology*, 39(10): 907-910
- Charlier B and Grove TL. 2012. Experiments on liquid immiscibility along tholeiitic liquid lines of descent. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 164(1): 27-44
- Chen YC, Zhao X and Zhang ZY. 2000. *Geoscience on Crosscut of the Centuries: Significant Geological Field Evolution*. Beijing: Geological Publishing House, 1-69 (in Chinese)
- Condie KC. 2001. *Mantle Plumes and Their Record in Earth History*. Cambridge: Cambridge University Press
- Dawson B. 1999. Introduction. In: Nixon PH (ed.). *Proceedings, Seventh International Kimberlite Conference. Volume 2*, Cape Town, Republic of South Africa. Town: National Book Printers, 1-947
- Dixon S and Rutherford M. 1979. Plagiogranites as late-stage immiscible liquids in ophiolite and mid-ocean ridge suites: An experimental study. *Earth and Planetary Science Letters*, 45(1): 45-60
- Dong H, Xing CM and Wang CY. 2013. Textures and mineral compositions of the Xinjie layered intrusion, SW China: Implications for the origin of magnetite and fractionation process of Fe-Ti-rich basaltic magmas. *Geoscience Frontiers*, 4(5): 503-515
- Ernst RE and Bell K. 2010. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites. *Mineralogy and Petrology*, 98(1-4): 55-76
- Fenner CN. 1929. The crystallization of basalts. *American Journal of Science*, 18(105): 225-253
- Fleet ME, Crocket JH and Stones WE. 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
- Francis RD. 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 komatiite magmas. *Chemical Geology*, 85(3-4): 199-213
- Gallagher RK and Hawkesworth CJ. 1992. Dehydration melting and the generation of continental flood basalts. *Nature*, 358(6381): 57-59
- Gibson SA, Thompson RN and Day JA. 2006. Timescales and mechanisms of plume-lithosphere interactions: ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and geochemistry of alkaline igneous rocks from the Paraná-Etendeka large igneous province. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1-2): 1-17
- Haggerty SE. 1994. Superkimberlites: A geodynamic diamond window to the Earth's core. *Earth and Planetary Science Letters*, 122(1-2): 57-69
- Hart SR and Davis KE. 1978. Nickel partitioning between olivine and silicate melt. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(2): 203-219
- Hart SR and Dunn T. 1993. Experimental cpx/melt partitioning of 24 trace elements. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(1): 1-8
- Hawkesworth CJ, Lightfoot PC, Fedorenko VA, Blake S, Naldrett AJ, Doherty W and Gorbachev NS. 1995. Magma differentiation and mineralization in the Siberian continental flood basalts. *Lithos*, 34(1-3): 61-88
- He JL. 2004. Ore-forming geological conditions and prospecting potential for Nb-Ta mineral deposits in Panzhihua-Xichang Region, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 24(4): 206-211 (in Chinese with English abstract)
- Hunter RH and Sparks RSJ. 1987. The differentiation of the Skaergaard

- intrusion. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 451–461
- Jakobsen JK, Veksler IV, Tegner C and Brooks CK. 2005. Immiscible iron- and silica-rich melts in basalt petrogenesis documented in the Skaergaard intrusion. *Geology*, 33(11): 885–888
- Jakobsen JK, Veksler IV, Tegner C and Brooks CK. 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
- Kerr A and Ryan B. 2000. Threading the eye of the needle: Lessons from the search for another Voisey's Bay in Labrador, Canada. *Economic Geology*, 95(4): 725–748
- Kerr A and Leitch AM. 2005. Self-destructive sulfide segregation systems and the formation of high-grade magmatic ore deposits. *Economic Geology*, 100(2): 311–332
- Kirkley MB, Gurney JJ and Levinson AA. 1991. Age, origin, and emplacement of diamonds: Scientific advances in the last decade. *Gems and Gemology*, 27(1): 2–25
- Krishnamurthy P, Hoda SQ, Sinha RP, Banerjee DC and Dwivedy KK. 2000. Economic aspects of carbonatites of India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(2): 229–235
- Lassiter JC, Hauri EH, Reiners PW and Garcia MO. 2000. Generation of Hawaiian post-erosional lavas by melting of a mixed lherzolite/pyroxenite source. *Earth and Planetary Science Letters*, 178(3–4): 269–284
- Leeman WP, Ma MS, Murali AV and Schmitt RA. 1978. Empirical estimation of magnetite/liquid distribution coefficients for some transition elements. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65(3): 269–272
- Li CS and Naldrett AJ. 1999. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: Reaction of olivine with sulfide and silicate liquids. *Lithos*, 47(1–2): 1–31
- Li CS, Ripley EM and Naldrett AJ. 2003. Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia: Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits. *Economic Geology*, 98(1): 69–86
- Li CS, Xu ZH, de Waal SA, Ripley EM and Maier WD. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 39(2): 159–172
- Li CS, Zhang MJ, Fu PE, Qian ZZ, Hu PQ and Ripley EM. 2012. The Kalatongke magmatic Ni-Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Product of slab window magmatism? *Mineralium Deposita*, 47(1–2): 51–67
- Lightfoot PC and Hawkesworth CJ. 1997. Flood basalts and Magmatic Ni, Cu, and PGE sulphide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Traps) and West Greenland sequences. In: Mahoney J and Coffin F (eds.). *Large Igneous Provinces: Continental Oceanic and Planetary Flood Volcanism Geophysical Monograph*. Washington: AGU, 100: 357–380
- Liu JG, Rudnick RL, Walker RJ, Gao S, Wu FY, Piccoli PM, Yuan HL, Xu WL and Xu YG. 2011. Mapping lithospheric boundaries using Os isotopes of mantle xenoliths: An example from the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3881–3902
- Longhi J. 1990. Silicate liquid immiscibility in isothermal crystallization experiments. In: *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 20: 13–24
- Luo ZY, Xu YG, He B, Shi YR and Huang XL. 2007. Geochronologic and petrochemical evidence for the genetic link between the Maomaogou nepheline syenites and the Emeishan large igneous province. *Chinese Science Bulletin*, 52(7): 949–958
- Mavrogenes JA and O'Neill HSC. 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
- McBirney AR and Noyes RM. 1979. Crystallization and Layering of the Skaergaard Intrusion. *Journal of Petrology*, 20(3): 487–554
- McKenzie D and Bickle MJ. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *Journal of Petrology*, 29(3): 625–679
- Melnik O and Sparks RSJ. 2005. Controls on conduit magma flow dynamics during lava dome building eruptions. *Journal of Geophysical Research*, 110(B2): B02209, doi: 10.1029/2004JB003183
- Mitchell RH. 1986. *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. New York: Plenum Press, 1–442
- Morgan WJ. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230(5288): 42–43
- Mungall JE and Naldrett AJ. 2008. Ore deposits of the platinum-group elements. *Elements*, 4(4): 253–258
- Naldrett AJ, Fedorenko VA, Asif M, Lin SS, Kunilov VE, Stekhin AI, Lightfoot PC and Gorbachev NS. 1996. Controls on the composition of Ni-Cu sulfide deposits as illustrated by those at Noril'sk, Siberia. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 91(4): 751–773
- Naldrett AJ. 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
- Naldrett AJ. 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*, 34(3): 227–240
- Naldrett AJ. 2004. *Magmatic sulfide deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1–727
- Naldrett AJ, Wilson A, Kinnaird J and Chunnett G. 2009. PGE tenor and metal ratios within and below the Merensky Reef, Bushveld Complex: Implications for its genesis. *Journal of Petrology*, 50(4): 625–659
- Naldrett AJ. 2011. Fundamentals of magmatic sulfide deposits. In: Li C and Ripley EM (eds.). *Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry and Genesis*. Society of Economic Geology, *Reviews in Economic Geology*, 17: 1–50
- Namur O, Charlier B, Toplis MJ, Higgins MD, Liegeois JP and Auwera JV. 2010. Crystallization sequence and magma chamber processes in the ferrobaltic septiles layered intrusion, Canada. *Journal of Petrology*, 51(6): 1203–1236
- Namur O, Charlier B, Pirard C, Hermann J, Liégeois JP and Auwera JV. 2011. Anorthosite formation by plagioclase flotation in ferrobalt and implications for the lunar crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(17): 4998–5018
- Norman M, Garcia MO and Pietruszka AJ. 2005. Trace-element distribution coefficients for pyroxenes, plagioclase, and olivine in evolved tholeiites from the 1955 eruption of Kilauea Volcano, Hawaii, and petrogenesis of differentiated rift-zone lavas. *American Mineralogist*, 90(5–6): 888–899
- Osborn EF. 1959. Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magma. *American Journal of Science*, 257(9): 609–647
- Pang KN, Zhou MF, Lindsley D, Zhao D and Malpas J. 2008. Origin of Fe-Ti oxide ores in mafic intrusions: Evidence from the Panzihua intrusion, SW China. *Journal of Petrology*, 49(2): 295–313
- Pang KN, Li CS, Zhou MF and Ripley EM. 2009. Mineral compositional constraints on petrogenesis and oxide ore genesis of the Late Permian Panzihua layered gabbro intrusion, SW China. *Lithos*, 110(1–4): 199–214
- Peach CL, Mathez EA and Keays RR. 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
- Philpotts AR. 1979. Silicate liquid immiscibility in tholeiitic basalts. *Journal of Petrology*, 20(1): 99–118
- Philpotts AR. 1982. Compositions of immiscible liquids in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(3): 201–218
- Philpotts AR and Doyle CD. 1983. Effect of magma oxidation state on the extent of silicate liquid immiscibility in a tholeiitic basalt. *American Journal of Science*, 283(9): 967–986

- Pirajno F. 1994. Mineral resources of anorogenic alkaline complexes in Namibia: A review. *Australian Journal of Earth Sciences*, 41(2): 157–168
- Pirajno F. 2000. *Ore Deposits and Mantle Plumes*. London: Kluwer Academic Publisher, 1–556
- Rao NVC and Lehmann B. 2011. Kimberlites, flood basalts and mantle plumes: New insights from the deccan large igneous province. *Earth-Science Reviews*, 107(3–4): 315–324
- Richardson SH, Gurney JJ, Erlank AJ and Harris JW. 1984. Origin of diamonds in old enriched mantle. *Nature*, 310(5974): 198–202
- Richardson SH, Harris JW and Gurney JJ. 1993. Three generations of diamonds from old continental mantle. *Nature*, 366(6452): 256–258
- Ringwood AE, Kesson SE, Hibberson W and Ware N. 1992. Origin of kimberlites and related magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(4): 521–538
- Ripley EM, Park YR, Li CS and Naldrett AJ. 1999. Sulfur and oxygen isotopic evidence of country rock contamination in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada. *Lithos*, 47(1–2): 53–68
- Ripley EM, Brophy JG and Li CS. 2002. Copper solubility in a basaltic melt and sulfide liquid/silicate melt partition coefficients of Cu and Fe. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(15): 2791–2800
- Ripley EM, Li CS, Moore CH and Schmitt AK. 2010. Micro-scale S isotope studies of the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region, Siberia: Constraints on the genesis of coexisting anhydrite and sulfide minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(2): 634–644
- Ripley EM and Li CS. 2013. Sulfide saturation in mafic magmas: Is external sulfur required for magmatic Ni-Cu-(PGE) ore genesis? *Economic Geology*, 108(1): 45–58
- Rogers JJW, Ragland PC, Nishimori RK, Greenberg JK and Hauck SA. 1978. Varieties of granitic Uranium deposits and favorable exploration areas in the eastern United States. *Economic Geology*, 73: 1539–1555
- Sattari P, Brenan JM, Horn I and McDonough WF. 2002. Experimental constraints on the sulfide- and chromite-silicate melt partitioning behavior of rhenium and platinum-group elements. *Economic Geology*, 97(2): 385–398
- Shellnutt JG, Zhou MF and Zellmer G. 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
- Shellnutt JG, Denyszyn SW and Mundil R. 2012. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China). *Gondwana Research*, 22(1): 118–126
- Sillitoe RH. 1974. The mineralisation above mantle hot spots. *Nature*, 248(5448): 497–499
- Sobolev AV, Hofmann AW, Sobolev SV and Nikogosian IK. 2005. An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts. *Nature*, 434(7033): 590–597
- Sobolev AV, Hofmann AW, Kuzmin DV, Yaxley GM, Arndt NT, Chung SL, Danyushevsky LV, Elliott T, Frey FA, Garcia MO, Gurenko AA, Kamenetsky VS, Kerr AC, Krivolutsкая NA, Matvienkov VV, Nikogosian IK, Rocholl A, Sigurdsson IA, Sushchevskaya NM and Teklay M. 2007. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science*, 316(5823): 412–417
- Song XY, Keays RR, Zhou MF, Qi L, Ihlenfeld C and Xiao JF. 2009. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(2): 404–424
- Straub SM, LaGatta AB, Pozzo A and Langmuir CH. 2008. Evidence from high-Ni olivines for a hybridized peridotite/pyroxenite source for orogenic andesites from the central Mexican Volcanic Belt. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(3): doi: 10.1029/2007gc001583
- Straub SM, Gomez-Tuena A, Stuart FM, Zellmer GF, Espinasa-Perena R, Cai Y and Iizuka Y. 2011. Formation of hybrid arc andesites beneath thick continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3–4): 337–347
- Sun T, Qian ZZ, Deng YF, Li CS, Song XY and Tang Q. 2013. PGE and isotope (Hf-Sr-Nd-Pb) constraints on the origin of the Huangshandong magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Central Asian Orogenic Belt, NW China. *Economic Geology*, in press
- Sun XM, Wang SW, Sun WD, Shi GY, Sun YL, Xiong DX, Qu WJ and Du AD. 2006. 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
- Tang ZL and Li WY. 1995. Contrast on the Genesis Model and Geological Characteristic of Jinchuan Copper-Nickel Sulfide Deposit. Beijing: Geological Publishing House, 14–209 (in Chinese)
- Torsvik TH, Smethurst MA, Burke K and Steinberger B. 2008. Long term stability in deep mantle structure: Evidence from the ~300Ma Skagerrak-Centered Large Igneous Province (the SCLIP). *Earth and Planetary Science Letters*, 267(3–4): 444–452
- Torsvik TH, Burke K, Steinberger B, Webb SJ and Ashwal LD. 2010. Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary. *Nature*, 466(7304): 352–355
- Turner S, Hawkesworth C, Gallagher K, Stewart K, Peate D and Mantovani M. 1996. Mantle plumes, flood basalts, and thermal models for melt generation beneath continents: Assessment of a conductive heating model and application to the Parana. *Journal of Geophysical Research*, 101(B5): 11503–11518
- VanTongeren JA and Mathez EA. 2012. Large-scale liquid immiscibility at the top of the Bushveld Complex, South Africa. *Geology*, 40(6): 491–494
- Veksler IV, Dorfman AM, Borisov AA, Wirth R and Dingwell DB. 2007. Liquid immiscibility and the evolution of basaltic magma. *Journal of Petrology*, 48(11): 2187–2210
- Wager LR, Brown GM and Wadsworth WJ. 1960. Types of igneous cumulates. *Journal of Petrology*, 1(1): 73–85
- Walter MJ, Kohn SC, Araujo D, Bulanova GP, Smith CB, Gaillou E, Wang J, Steele A and Shirey SB. 2011. Deep mantle cycling of oceanic crust: Evidence from diamonds and their mineral inclusions. *Science*, 334(6052): 54–57
- Wang CY, Zhou MF, Qi L, Hou SH, Gao HG, Zhang ZW and Malpas J. 2006a. The Zhaotong native copper deposit associated with the Permian Emeishan Flood Basalts, Yunnan, Southwest China. *International Geology Review*, 48(8): 742–753
- Wang CY, Zhou MF and Keays RR. 2006b. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion and its Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 309–321
- Wang CY, Zhou MF and Qi LA. 2010. Origin of extremely PGE-rich mafic magma system: An example from the Jinbaoshan ultramafic sill, Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 119(1–2): 147–161
- Wang CY, Zhou MF, Sun YL and Arndt NT. 2012. Differentiation, crustal contamination and emplacement of magmas in the formation of the Nantianwan mafic intrusion of the ~260Ma Emeishan large igneous province, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 164(2): 281–301
- Wang CY and Zhou MF. 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
- Wang FL, Zhao TP, Chen W and Wang Y. 2013. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopic compositions of the Nb-Ta-Zr-bearing syenitic dikes in the Emeishan large igneous province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3519–3532 (in Chinese with English abstract)
- Wang K, Xing CM, Ren ZY and Wang CY. 2013. Liquid immiscibility in the Panzhihua mafic layered intrusion: Evidence from melt inclusions in apatite. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3503–3518 (in Chinese with English abstract)
- Wei B, Wang CY, Li C and Sun YL. 2013. Origin of PGE-depleted Ni-Cu sulfide mineralization in the Triassic Hongqiling No. 7 orthopyroxenite intrusion, Central Asian Orogenic Belt, NE China. *Economic Geology*, 108: 1813–1831

- Wei X, Xu YG, Feng YX and Zhao JX. 2014. Plume-lithosphere interaction in the generation of the Tarim large igneous province, NW China: Geochronological and geochemical constraints. *American Journal of Science*, in press
- White WS. 1968. The native-copper deposits of northern Michigan. In: Ridge JD (ed.). *Ore Deposits of the United States, 1933 - 1967 (Craton-Sales Volume)*: American Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Engineers, 303 - 326
- Windley BF. 1995. *The Evolving Continents*. 3rd Edition. New York: John Wiley Sons
- Wu FY, Yang YH, Li QL, Mitchell RH, Dawson JB, Brandl G and Yuhara M. 2011. In situ determination of U-Pb ages and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Phalaborwa carbonatite Complex, South Africa. *Lithos*, 127(1-2): 309 - 322
- Xia MZ, Jiang CY, Li CS and Xia ZD. 2013. Characteristics of a newly-discovered Ni-Cu sulfide deposit hosted in the Poyi ultramafic intrusion, Tarim Craton, NW China. *Economic Geology*, in press
- Xie W, Song XY, Deng YF, Wang YS, Ba DH, Zheng WQ and Li XB. 2012. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 144 - 145: 209 - 230
- Xing CM, Wang CY and Zhang MJ. 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. *Science China (Earth Sciences)*, 55(11): 1782 - 1795
- Xu YG. 2002. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 341 - 353 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Mei HJ, Xu JF, Huang XL, Wang YJ and Chung SL. 2003. Origin of two differentiation trends in the Emeishan flood basalts, SW China. *Chinese Science Bulletin*, 48(4): 390 - 394
- Xu YG, He B, Chung SL, Menzies MA and Frey FA. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. *Geology*, 32(10): 917 - 920
- Xu YG, He B, Huang XL, Luo ZY, Zhu D, Ma JL and Shao H. 2007. The debate over mantle plumes and how to test the plume hypothesis. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 1 - 9 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Luo ZY, Huang XL, He B, Xiao L, Xie LW and Shi YR. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3084 - 3104
- Xu YG, He B, Luo ZY and Liu HQ. 2013. Study on mantle plume and large igneous provinces in China: An overview and perspectives. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 32(1): 25 - 39 (in Chinese with English abstract)
- Zhang MJ, Li CS, Fu PAE, Hu PQ and Ripley EM. 2011. The Permian Huangshanxi Cu-Ni deposit in western China: Intrusive-extrusive association, ore genesis, and exploration implications. *Mineralium Deposita*, 46(2): 153 - 170
- Zhang YX, Luo YN and Yang CX. 1988. *Panxi Rift*. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 466 (in Chinese)
- Zhao TP, Chen W and Zhou MF. 2009. Geochemical and Nd-Hf isotopic constraints on the origin of the ~ 1.74Ga Damiao anorthosite complex, North China Craton. *Lithos*, 113(3-4): 673 - 690
- Zhong H, Zhu WG, Hu RZ, Xie LW, He DF, Liu F and Chu ZY. 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. *Lithos*, 110(1-4): 109 - 128
- Zhou MF, Robinson PT, Leshner CM, Keays RR, Zhang CJ and Malpas J. 2005. 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 MF, Chen WT, Wang CY, Prevec SA, Liu P and Howarth GH. 2013. Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhihua-type Fe-Ti-V oxide deposits, SW China. *Geoscience Frontiers*, 4(5): 481 - 502
- Zhu BQ, Hu YG, Zhang ZW and Chang XY. 2003. Discovery of the copper deposits with features of the Keweenaw type in the border area of Yunnan and Guizhou provinces. *Science in China (Series D)*, 46(1): 60 - 72

附中文参考文献

- 陈毓川, 赵逊, 张之一. 2000. 世纪之交的地球科学——重大地学领域进展. 北京: 地质出版社, 1 - 69
- 贺金良. 2004. 四川攀西地区钨钼矿床成矿地质条件及找矿前景. *四川地质学报*, 24(4): 206 - 211
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比. 北京: 地质出版社, 14 - 209
- 王汾连, 赵太平, 陈伟, 王焰. 2013. 峨眉山大火成岩省赋 Nb-Ta-Zr 矿化正长岩脉的形成时和锆石 Hf 同位素组成. *岩石学报*, 29(10): 3519 - 3532
- 王坤, 邢长明, 任钟元, 王焰. 2013. 攀枝花层状镁铁-超镁铁质岩体中磷灰石的熔融包裹体成分: 岩浆不混熔的证据. *岩石学报*, 29(10): 3503 - 3518
- 徐义刚. 2002. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应. *地学前缘*, 9(4): 341 - 353
- 徐义刚, 梅厚钧, 许继峰, 黄小龙, 王岳军, 钟孙霖. 2003. 峨眉山大火成岩省中两类岩浆分异趋势及其成因. *科学通报*, 48(4): 383 - 387
- 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 罗震宇, 朱丹, 马金龙, 邵辉. 2007. 地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说. *地学前缘*, 14(2): 1 - 9
- 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 刘海泉. 2013. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 32(1): 25 - 39
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. *攀西裂谷*. 北京: 地质出版社, 1 - 466