

地幔流体及其成矿作用

丁振举 姚书振 方金云

(中国地质大学资源学院, 武汉, 430074)

摘 要 地幔流体作为一种重要成矿介质在某些矿床形成过程中起到过重要作用。根据目前地幔流体研究的某些成果, 介绍了地幔流体可能参与成矿的方式和成矿机制, 并举例说明地幔流体与超大型、大型矿床之间的成因联系。

关键词 地幔流体, 成矿作用, 大型与超大型矿床

流体作为地球内部的一种重要介质, 其重要性愈来愈被更多的人所认识^[1~6]。流体的存在和迁移是形成各种矿床的必要条件, 是矿质聚集和发生成矿作用的前提。地幔流体因可携带大量可溶物质并且是能量的重要载体, 其成矿作用已成为地质学家所关注的热点之一。研究地幔流体的成分、性质及与大型和超大型矿床的关系, 可加深对成矿作用的了解, 扩大矿床研究的领域, 同时可对超大型矿床形成条件等提供更深刻的理解。

1 地幔流体组成和特点

地幔流体是指赋存于地球内部由原始气体元素(He^3 、 Ar^{36} 等)、挥发分(幔源 CO_2 、 S 、 H_2O 等)所组成的气体、稀溶液及具挥发分的富碱的硅酸盐熔体。现代火山喷气、玄武岩圈闭气体、地幔镁铁质和超镁铁质包体成分分析及金刚石包裹体分析表明, 地幔流体是以 C-H-O 为主的体系, 并且含有一定的金属氧化物^[6], 其流体种类受地幔氧逸度 f_{O_2} 及深度的制约^[7], 当 f_{O_2} 在 QFW—MW(氧缓冲反应限定的范围)时, 流体种类以 CO_2 — H_2O 为主; 接近 IW 时以 CH_4 — H_2O 为主。Wyllie^[8]用微量 CO_2 、 H_2O 和橄榄岩(假定地幔中 $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) = 0.8$)进行的成岩试验表明, H_2O 、 CO_2 含量在深度上是分层的, 以地盾区地热曲线、固相线位置、矿物稳定组合区间三者之间关系, 推测 120 km 深度以下时金云母、白云石、橄榄石与富 H_2O 气相共存; 较浅处(约 90 km)时, 随着角闪石等含水矿物形成, 大量的 H_2O 被消耗, 气相中 CO_2 与 H_2O 含量比值随之增大, 形成上地幔中相对富 CO_2 的区域; 在 260~120 km 之间则为碳酸盐、金云母、 C-H-O 挥发分溶解于熔体中, 无独立的 H_2O 和 CO_2 相存在。Shiano 等^[9]在研究 Kerguelen 地区超镁铁质捕虏体时发现了富硅质熔体、富碳酸盐的熔体和富 CO_2 流体包裹体共生, 显示是地幔深部均一的熔融相在到达上地幔温压条件时形成不混溶的三相, 并充填于橄榄岩形成的

第一作者简介: 丁振举, 男, 1965 年 10 月生, 工程师, 现正攻读矿床学专业博士学位
收稿日期: 1996-03-27 修改稿收到日期: 1996-09-10 编辑: 谢荣举

裂隙中。这同样证明了 C-H-O 随深度变化的推断。

包裹体一直被作为了解深部流体的重要窗口,然而已有的资料表明地幔流体包裹体在随寄主岩上升过程中已发生了次生变化,并且显示出几乎所有的捕虏体中多为纯 CO_2 包裹体,缺少甚至没有 H_2O 的成分。对此认为主要由 4 种原因引起:①在硅酸盐熔体中 H_2O 的溶解度比 CO_2 更大,熔融时 H_2O 比 CO_2 优先进入熔体中,形成相对富集的 CO_2 相;②氢的扩散作用引起在低 f_{O_2} 时流体主要成分是 CH_4 ,在达到一定温度和压力时 H 发生迁移,留下相对较富的 CO_2 ;③与围岩发生水岩反应再平衡的结果, H_2O 比 CO_2 更易与含氧的硅酸盐发生反应,剩下相对较富的 CO_2 ;④变形过程中 H_2O 比 CO_2 更易进入位错而被泄漏掉。因此,多数地幔包体中的流体包裹体在被寄主岩从深部带到地表过程中已发生了次生变化,其成分已有所改变。由于我们对地幔流体还缺乏详细研究和了解,大多数地幔流体性质仍是有待研究的前沿课题。

2 地幔流体的来源及成矿作用

按照目前的了解,地幔流体主要以两种方式形成:一种由地核及下地幔脱气作用;另一种为洋壳俯冲作用带入大量富含挥发分物质的再循环^[1,3,4]。稀有气体的 He-Ar 同位素体系研究表明地幔流体主要有 3 种源区^[10]:①地幔柱型源区;②洋中脊玄武岩型源区;③岛弧型源区。其中最值得一提的是地幔柱源区,推测地幔柱构造起源于地幔深部热边界层,具有 800~1 200 km 直径的头部和 100~200 km 的尾部^[11,12],由地幔深部穿越不同的上覆圈层直抵地表,且因直接来自富集地幔,含有大量挥发分和不相容元素,其成矿意义值得重视。

流体在上地幔的富集是地幔流体成矿的基础,前已述及流体是由深部地幔或地核脱气作用和再循环物质脱水作用形成,形成的流体可能在上地幔顶部附近富集,特别是在软流圈上隆引起减压变薄时,溶解于地幔橄榄岩高压围岩矿物相中的挥发分出溶,形成细小的早期流体包裹体,并在地幔蠕变过程中往有利的部位迁移^[13],从而促进流体的更进一步富集。聚集的挥发分可在地幔形成高挥发分含量的所谓“湿斑”(wet spot),这种“湿斑”可形成小尺度的对流,促使挥发分沿有利部位向上迁移^[14]。特别是有深切上地幔断层存在时更为明显。地幔流体通道对成矿的重要性已广为人知,不再赘述。

由于传统上认为地幔缺少流体,故其成矿作用未被重视。随着同位素技术的进步,越来越多的地幔流体被识别并发现其在某些矿床形成过程中扮演着重要角色。如美国新墨西哥州哈丁县一口 CO_2 气井中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值高达 4.4×10^{-6} ,显示地幔成因^[15]。Wakita^[15]在研究日本一些富 CH_4 天然气井,发现 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 接近日本岛弧带火山喷气,最高值见于 4.6 km 深处火山碎屑岩中,认为 CH_4 是上地幔来源的。Mamyrin 和 Tolstichin^[16]在研究活动裂谷系时也证明地幔流体存在。Stephen 等^[17]根据氧同位素、碳同位素研究,表明 Lizzies 盆地方解石大理岩曾与地幔流体发生过同位素交换作用。澳大利亚 Yilgarn 地块太古代金矿和加拿大 Central Superior 省含金剪切带形成均有地幔流体参与成矿的证据^[18,19]。我国的一些金矿床如小秦岭、胶东金矿田、白云鄂博稀土矿、华南铀矿带等均有证据说明地幔流体参与了成矿作用。

根据地幔流体在成矿作用中所起的重要性可总结为以下 3 种成矿方式:①地幔流体交代地幔岩石,促使某些稀土元素富集;②地幔流体溶解地幔物质形成含矿溶液,迁移到浅部成矿;③地幔流体交代地壳物质,激发、活化地壳中的成矿元素,导致地壳物质成矿。上述 3 种方式仅是最理想的分类,实际情况要复杂得多,成矿过程中可以一种方式为主,也可以多种方式联合作用。

3 地幔流体与大型、超大型矿床的形成

大型、超大型矿床研究是国内外地质界关注的问题之一,目前围绕超大型矿床形成的动力学背景和成矿机理研究已达到了一个新的水平。由于成矿物质多来自深部或最初来自地幔,地幔流体活动又主要受所处的构造动力学背景制约,其主要活动在与裂谷、洋中脊及俯冲带等壳幔物质交换的构造环境中。特定的环境下特殊流体作用可能是超大型、大型矿床形成的有利因素。从成矿赖以发生的物质来源、热液来源和维持热液活动的热源来考察,大型、超大型矿床形成必须具备更多的物质储备、更大的流体库和稳定的热源。另外长时期稳定的成矿环境或多次成矿作用的同时发生也是必不可少的。从上述基本条件考虑,我们认为地幔流体可能具备了形成大型、超大型矿床的可能条件,其原因在于:①地幔流体在深部具较高的溶解能力,并含有丰富的矿化剂;②有充足的流体来源和稳定的热源条件,成矿体系能够较长时间维持;③地幔流体向上迁移时穿越巨厚的地层岩性柱,既可由原生流体激发、活化地壳中的矿质,同时亦可促进浅部流体的循环对流,萃取更多的成矿物质;④地幔流体运移主要受深部构造作用控制,受浅部地质因素影响较小,流体供给稳定等等。

西澳大利亚 Yilgarn 地块太古代脉金矿^[18]和加拿大 Central Superior 省金矿^[19]均与地壳规模的大型韧性剪切带有关,依构造层次从浅表的脆性构造域到深部的韧性构造域,变质程度对应着次绿片岩相、低绿片岩相、高绿片岩相、角闪岩相和麻粒岩相;流体组成以地幔和下地壳来源为主,向浅部则有更多的天水参与成矿;矿床类型从深部层次的麻粒岩相金矿、中部的角闪岩相金矿,到上部层次的绿片岩相金矿等,成矿时代相同,是峰期变质之后的产物。成矿物质研究表明前者主要来自地幔或下地壳物质,后者主要来自先存的围岩。来自地幔的流体携带着成矿物质 Au 或从围岩中淋滤出 Au,在流体压力驱动下向上迁移,构成从深层次到浅层次连续变化的大型、超大型规模矿床。金矿床形成与地幔流体形成的超级地热循环对流系统有密切的成生关系。我国的白云鄂博稀土矿,占世界储量的一半左右,这个世界最大的 REE-Nb 矿也被认为是与地幔流体交代作用有关^[5]。其主要特点是富稀土、Nb、碱质、挥发分和其它不相容元素;Sm/Nd 比值异常低(0.066~0.618,平均为 0.107),不相容元素异常富集,这些现象不可能由原始地幔或球粒陨石成分源岩的部分熔融形成,而预示着有过流体的交代作用发生。实验资料证明高压下富水流体是不相容元素的有效搬运介质。同位素示踪结果也指示地幔交代作用存在,如¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 很低(0.039~0.105,平均为 0.089 74)明显低于地壳平均值(0.12),含有稀土溶液的 C-H-O-S 同位素研究表明,流体来源于地幔流体体系。稀土矿物、矿石的初始铈 $I_{\text{Ce}}(t) < 0.703$,初始钕 $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = 8.4$,表明稀土来自地幔,而非地壳源^[20]。张宗清等^[21]认为本区亏损的地幔年龄和球粒陨石模式年龄分别代表了两次地质事件的同位素示踪信息,即在 1 658 Ma 左右从交代亏损地幔中分离出富 CO₂、F、碱金属和稀土元素的流体,于 1 300 Ma 前后上升成矿。Sm-Nd 等时线的资料还表明本区存在另外一次成矿高峰期(424~402 Ma)(曹荣龙等,1995),持续时间接近 1 000 Ma。同地区由地幔流体交代作用形成富集稀土含矿地幔流体,在持续长时间内地幔不断地供给成矿物质和流体,造就了世界超级大矿床,这可能正是白云鄂博矿所具有的独特特征。

Plimer(1985,1986)对不同类型硅铝层裂谷的地幔脱气和共生岩浆作用研究后,用富含 CO₂、F、B、H₂、P、Mn、Fe、Pb、Zn、REE 的地幔流体沿裂谷一侧断裂上升,解释了澳大利亚布罗肯山和 Isa 山复杂气成岩的原因。澳大利亚奥林匹克坝 Cu-Au-U-REE 矿床、罗布希尔(Bro-

ken hill)Pb-Zn 矿床也均有证据表明这些超大型矿床的成矿与地幔流体参与有关。

另外与火山岩有关的块状硫化物矿床,流行的模式是对流环模式,即认为流体主要是加热的海水或大气水,成矿元素则主要来自围岩火山岩,成矿是由加热的下渗海水或大气水淋滤围岩中的成矿元素,并沿火山通道再喷出到海底,与海水混合后成矿。然而最新的 He、Ne、Ar、Xe 同位素资料表明^[22],作为海相硫化物矿床代表的黑矿与火山岩成因相似,75%的成矿流体来自于俯冲楔之上的幔源岩浆,源于海水的流体不超过 25%。由此我们推测,原很多以大气水为主的矿床,很可能随着新的同位素方法应用被识别出,地幔流体成矿作用可能比原来想像的要广泛得多,原有的成矿模式需要重新认识。

我国华南著名的铀矿产地,前燕山期多次岩浆活动提供了铀矿的成矿物质,但均未达到一定规模。到了燕山期末随着东部大陆构造体制由挤压向伸展的转换,产生了一系列北东方向延展的断陷盆地和变质核杂岩构造^[23],并沿控盆断裂发育一系列岩浆活动带。铀矿成矿作用主要与伸展构造引起的地幔隆升和加热重熔岩浆热事件有关。有资料表明铀成矿物质是深源的,是由岩浆作用从深部带入浅部的。中新世以来的伸展构造引起的地幔活动,在地幔流体和碱质上升过程中激发活化了先存地壳中的铀,并沿有利的构造上升到浅部沉淀成矿。某些主要矿体就是沿大型剥离断层分布的。这次地幔的隆升、加热和流体活动导致了华南东部广泛的铀矿成矿事件。铀矿成矿过程中地幔流体的碱质交代和提供的巨大热量为本区成铀作出重大贡献。

由以上所举的例子可以看出地幔流体以其独有的规模、性质,可穿越不同的含矿层位,为形成大型、超大型矿床提供了更大的机率。因此深入研究地幔流体成矿机理具有重要意义。

地幔流体成矿的沉淀机制也是制约形成大型、超大型矿床的重要因素。按照目前流体成矿机制研究,沉淀可以 3 种形式实现,即①含矿热液随着温压条件逐渐降低,成矿物质从溶液中不断析出沉淀;②含矿热液上升过程中遇到其它来源的流体并混合,导致成矿物质不混溶沉淀成矿;③含有大量挥发分的含矿热液遇到减压环境时常会导致溶液减压沸腾,从而使成矿物质从溶液中沉淀析出。根据上述 3 种沉淀机制的成矿效率来看,第①种是渐变过程,其沉淀过程可能是低效的。因此推测地幔流体形成大型和超大型矿床的成矿机制以后两种为主。

4 结束语

地幔流体是一种重要成矿介质,因与幔源流体有关的矿床具有丰富的深源流体贮存库,可携带大量成矿物质,并且成矿时间的长期持续为大型、超大型矿床形成奠定了物质基础,因而研究地幔流体成矿作用是大型、超大型找矿工作有所突破的有效途径。地幔流体活动是幔核、壳幔各圈层相互作用的结果,并受上述作用制约,因此将地幔流体与特定的构造环境结合起来研究,是深刻理解地幔流体活动规律、聚集机制及成矿作用的有效途径,同时也可通过研究地幔流体成矿作用过程来加深地球动力学过程的研究,将深部地质、成矿作用纳入到全球统一的动力学体系中,从更深层次上把握成矿的本质。综观已有的成果也可看出,地幔流体的成矿是极其复杂的,因后期改造的影响使我们对地幔流体成矿还不能完全了解,加上对于与地幔流体成矿有关的流体在超临界状态下的性质、状态,因缺乏高温、高压条件下的资料,很多结论多具推测性质,影响了对地幔流体成矿的理解。总之,地幔流体成矿研究是一个有希望但远未成熟的前沿领域,只有加深基础研究,才能使地幔流体研究达到一个新的高度。

参 考 文 献

- 1 贾跃明. 地壳中流体作用. 见: 当代地质科学前沿. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 54—56
- 2 金振民. 地球材料物理性质和大陆深部构造意义. 地学前缘, 1995, 2(1—2): 147—158
- 3 孙半月, 石淮立. 初论幔源 C—H—O 流体与大陆板内的某些作用. 地学前缘, 1995, 2(1—2): 165—174
- 4 于在平. 俯冲带的流体作用. 地学前缘, 1995, 2(1—2): 175—181
- 5 赵振华. 超大型矿床的地球化学背景. 见: 当代地质科学前沿. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 371—379
- 6 陆凤香. 大陆地幔研究现状. 地学前缘, 1994, 1(1—2): 70—78
- 7 Arculus R J, Delano J W. Oxidation state of the upper mantle: present conditions, evolution, and controls. In: Nixon P H ed. *Mantle Xenoliths*. 1987. 589—598
- 8 Wyllie P J. Metasomatism and fluid generation in mantle Xenoliths. In: Nixon P H ed. *Mantle Xenoliths*. 1987. 609—621
- 9 Schiano P, Clacchiatti R, Shimizu N et al. Cogenetic silica-rich and carbonate-rich melts trapped in mantle minerals in Kergulen ultramafic xenoliths; implications for metasomatism in the oceanic upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 123: 167—178
- 10 Kaneoka I, Takaoka N. Noble—gas state in the earth's interior—some constraints on the present state. *Chemical Geology*, 1985, 52: 75—95
- 11 Campbell I H, Griffiths R W. The evolution of the mantle's chemical structure. *Lithos*, 1993, 30: 389—399
- 12 Hill R I. Mantle plums and continental tectonics. *Lithos*, 1993, 30: 193—206
- 13 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 女山中更新世碧玄岩岩基起源和演化. 岩石学报, 1994, 10: 223—235
- 14 Ering Vagnes. Late Cenozoic uplift and volcanism on Spitsbergen caused by mantle convection? *Geology*, 1993, 21: 251—254
- 15 Wakita H, Salo Y. $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in CH_4 -rich natural gases suggest magmatic origin. *Nature*, 1983, 305: 792—795
- 16 Tolstikhin M. *Helium Isotopes in Nature*. Amsterdam Elsevier, 1984. 237
- 17 Wickham S M, Peters M T, Fricke H C. Identification of magmatic and meteoric fluid sources and upward-and downward-moving infiltration fronts in a metamorphic core complex. *Geology*, 1993, 21: 81—84
- 18 Groves D I. The crustal continuum model for late-Archaeon lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 1993, 28: 366—374
- 19 Leclair A D. Crustal-scale auriferous shear zones in the central Superior province, Canada. *Geology*, 1993, 21: 399—402
- 20 曹荣龙, 朱寿华, 王峻文. 白云鄂博铁-稀土矿床的物质来源和成因理论问题. 中国科学(B辑), 1994, (12): 1298—1307
- 21 张宗清, 唐素寒, 王进辉. 白云鄂博矿床形成年龄的新数据. 地球学报, 1994, (1—2): 85—94
- 22 Bin Lin, Manuel O K. A noble gas technique for the identification of mantle and crustal materials and its application to the kuroko deposits. *Geochemical Journal*, 1994, 28(1): 47—69
- 23 Chen Yaohui. Meso-cenozoic extensional tectonic process and Uranium metallogenesis in Southeastern China. *The 9th Symposium of International Association on the Genesis of Ore Deposits Abstracts*, 1994, 1: 21—22

MANTLE FLUID AND ITS ORE-FORMING PROCESS

Ding Zhenju Yao Shuzhen Feng Jinyun

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074)

Abstract Mantle fluid, an important metallogenic medium, plays a key role in the ore-forming process of some types of mineral deposits. According to some research results of mantle fluid, the probable metallogenic modes and mechanisms of mantle fluid are introduced, and the genetic relationship between the mantle fluid and the large-superlarge mineral deposits is explained by some examples.

Key words mantle fluid, mineralization, large-superlarge mineral deposits