

# Mantle Fluids and Their Geological Processes

Tiantian Qiu<sup>1,2</sup>

1. Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

## Abstract

Mantle fluid is an important medium existing in the earth's interior, which can provide material and energy for the continuous mineralization and the formation of large deposits and ore concentration areas. This paper introduces the basic characteristics, sources, types and metasomatism of mantle fluids, analyzes the mineralization of mantle fluids, and improves the understanding of the geological research of ore deposits in order to provide convenience for further prospecting.

## Keywords

mantle fluid; basic characteristics; metasomatism; mineralization

# 地幔流体及其地质作用

邱甜甜<sup>1,2</sup>

1. 西安石油大学, 中国·陕西 西安 710065

2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 中国·陕西 西安 710065

## 摘要

地幔流体是一种存在于地球内部的重要介质, 可以为成矿作用的持续进行和形成大型矿床以及矿集区提供物质和能量。论文通过介绍地幔流体的基本特征、来源、类型及其交代作用, 分析地幔流体的成矿作用, 旨在为进一步找矿提供参考。

## 关键词

地幔流体; 基本特征; 交代作用; 成矿作用

## 1 引言

地幔流体是一种在温度、压力、物相等方面与地幔环境处于相对平衡的超临界流体, 主要成分为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和大离子等不相容元素。地幔流体的溶解和运输能力较强, 研究表明板块俯冲伴随的脱气作用、脱水作用能对地幔物质产生较强的溶解和运输能力, 地幔和地核的脱气作用又进一步增强了地幔流体的溶解和运输能力。论文就地幔流体组成及其成矿作用进行简要阐述。

## 2 地幔流体的基本特征

地幔流体是由富含地球内部原始的气体元素(如 He、Ar 等)和富挥发分(如地幔  $\text{CO}_2$ 、陨石 S、深源  $\text{H}_2\text{O}$  等)组成的气体、稀溶液和富碱(K、Na、Li 等)硅酸盐熔体。

### 2.1 地幔流体的物理化学性质

临界态的地幔流体物理化学性质具有独特的溶解和运输能力, 极强的渗透能、化学反应能及反应速度极高的热容、萃取能力和分相不混溶性, 是地球内部能量与物质向外

传输的重要载体, 其化学组成随地幔演化过程的不同而具有明显的差异, 可划分出上地幔原始流体和交代作用流体等。

上地幔原始流体组成与地幔源区密切相关, 原始地幔源区以  $\text{CO}$  为主, 其次为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ , 亏损地幔源区以  $\text{CO}_2$  为主, 其次为  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ , 富集地幔源区含有较高的  $\text{H}_2$ ; 地幔流体自身含有一定数量的  $\text{CH}_4$  和  $\text{C}_2\text{H}_6$  等烷烃组分及重烃组分, 包括一定数量的原始烷烃组分; 地幔流体同时含有较高的  $\text{H}_2$  和热量, 可为有机质生烃作用提供充足的氢源、热源及运移源动力。

### 2.2 地幔流体的地球化学性质

地幔流体的地球化学性质是多方面的, 主要包括: ①易溶于硅酸盐熔体。这是因为地幔挥发分具有较高的熔体, 从而促进低熔点并饱和挥发分的富钾原始岩浆以及地幔交代熔体的形成。②净化作用。绝大部分不相容元素和活动元素具有很高的流体/固体分配系数, 地幔流体对于弱亏损或富集地幔中的“杂质元素”起净化作用。③地幔流体具有使溶质及各种微量元素沉淀、聚集的特性, 即再沉淀作用。地幔流体和地幔熔体通过地幔交代作用使已亏损的地幔重新获得活动元素和不相容元素的补给和充填, 导致地幔富集事件。

【作者简介】邱甜甜, 女, 中国陕西西安人, 本科, 助理工程师, 从事天然气开发研究。

### 3 地幔流体的来源及源区

#### 3.1 俯冲板块发生的脱水脱气

新元古代以来,壳幔的循环机制由地壳底板垫托作用转为板块的俯冲作用,大陆增生模式由垂向增生向水平增生过渡。洋壳俯冲作用过程中,大洋岩石圈弯曲形成的构造盆地诱导了深海沉积物及洋壳玄武岩进入俯冲带,俯冲板块发生的脱水脱气作用是地幔流体产生的一个重要原因。俯冲板块使大量的水进入了更深的地幔环境,这些水可能以含水矿物或自由水的形式到达地幔不同深度,甚至加入了软流圈中的物质循环。由于俯冲作用为显生宙以来最主要的壳幔循环机制,俯冲带也就成为地幔流体最为活跃的场所。

#### 3.2 地幔原始残留挥发分及地幔熔融作用

地幔环境受多因素控制,表现出非平衡地球化学状态,存在着流体运移、交代及地幔熔融作用等物理化学因素。在非平衡条件下将产生非线性的地球化学组织现象,挥发分的存在与地幔熔融这两者互为作用。在地幔熔融过程中,存在于地幔环境中的  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $S^{2-}$  (指与重金属离子构成硫化物赋存于深部地幔或地核中的  $S^{2-}$ )、气态的 C 和 N 逃逸出来,它们往往高度溶解于地幔硅酸盐熔体中,从而形成性质独特的地幔熔体或流体。

#### 3.3 地幔流体的源区

通过对稀有气体的 He-Ar 同位素体系研究表明,地幔流体主要有 3 种源区:①地幔柱型源区;②洋中脊玄武岩型源区;③岛弧型源区。此外,地幔流体还受两个浅部源区混染,即大气圈型源区和地壳型源区。

### 4 地幔流体的类型

#### 4.1 超深流体

较深的地幔相当于外地核氦气圈。根据金伯利岩中所发现的缺氧矿物和自然元素,以及在金刚石中发现了自然元素与合金的包裹体等推测,这种超深流体的组成至少包括 C、H、O、N、S、F、Cl、碱金属等。氧的数量难以确定,但流体的氧逸度很低,不易与其他元素发生反应。流体自深部向上硫逸度增大,运移时形成硫化物。超深流体可对地幔发生交代作用,即相当于前驱交代,致使地幔熔点下降并诱发熔融作用。

#### 4.2 软流层起源的熔/流体

上地幔软流层熔融岩浆后,一部分可凝聚上升侵入或喷出地表,另一部分因数量少或不具备通道仍存留于地幔内部,被称为“夭折的岩浆”。这些熔体在高压条件下结晶,往往形成粗大的晶体,被称为“地幔伟晶岩”。它们可对周围的地幔发生交代,交代产物的 Zr、Ti、Y、Ga 含量高。

#### 4.3 与幔源岩浆有关的晚期流体

夭折的岩浆在深部结晶时晚期可分异出以水或 CO 为主的流体,它们在深部也可发生交代作用。其中金云母、钾碱镁闪石、富钛矿物、磷灰石、碳酸盐都可以出现。

地幔内部的流体有时难以明确判断其所属的类型,上述三种类型可以出现混合或反应。一般来说,前两种主要活动于岩石圈内部,第三种属于来源深并经历了长期的演化过程。

### 5 地幔交代作用

地幔交代作用最早定义是指在不发生部分熔融的情况下,通过流体(富  $H_2O$  或富  $CO_2$  流体)与地幔岩石或矿物相互作用而发生的物质带入、带出现象。

后来有学者认为地幔交代作用是指外来新物质的加入造成地幔岩石成分富集变化的过程。虽然在大多数情况下交代渗透的物质是富  $H_2O$  或  $CO_2$  流体,但熔体也可使岩石发生交代作用,这种熔体渗透交代不同于简单的岩浆挤入以及由此引起的原始岩石与熔体之间相互作用造成的浸染现象,并且将地幔交代作用分为两种:①金伯利岩型;②碧玄岩型。

目前,大多数学者所谈的地幔交代作用,是指由于熔体或流体的介入使地幔岩石化学组分发生富集并最终导致地幔化学不均一的过程。

不同温度压力下发生的地幔交代作用往往伴随着不同的交代矿物。在高压低温下(类似于金伯利岩形成条件)碳酸盐是最可能出现的矿物,而在高温低压下(类似于碧玄岩形成条件)单斜辉石是最可能出现的交代矿物。金伯利岩、黄长岩及其中的地幔捕虏体中的含水矿物主要为金云母。碧玄岩及其中的地幔捕虏体含水矿物主要为角闪石,暗示了碧玄岩浆起源于地幔较浅部位。总之,交代矿物的类型直接反映了交代作用发生时的温压条件。

### 6 地幔流体成矿作用

由于地幔流体具备形成大型、特大型矿床的必要条件,近年来地幔流体的成矿作用越来越引起人们的关注。

#### 6.1 地幔流体成矿原理

地幔流体本身具有很强的物质溶解能力、充足的物质储量、庞大的流体库和稳定的热源供给,可以为成矿作用的持续进行和形成大型和超大型矿床以及大型矿集区提供物质和能量。

#### 6.2 成矿作用的表现形式

##### 6.2.1 地幔流体本身成矿

主要涉及金刚石的形成和油气的无机成因。目前对金刚石的形成主要有金伯利岩岩浆结晶产物、捕虏晶、多来源多成因等理论,但无论哪种观点都认为金刚石的形成与地幔流体活动密切相关。金刚石结晶主要有 3 种途径:① S 和 N 起触媒作用,  $CO_2$  和  $CH_4$  均能形成金刚石;② C 在硫化物熔体的溶解度达到饱和后结晶形成金刚石;③ 在金伯利岩岩浆中,由  $CO_2$  还原或由  $CH_4$  氧化结晶形成金刚石。由此可见,金刚石很可能是地幔流体本身成矿的结果。

另外, C、H、O 是地幔流体最重要的气相组分,也是油气藏的物质基础,加上地幔流体本身具有稳定的热能、同

时含有对 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub> 形成烃类起催化作用的 Fe、Co、Ni 等溶质成分,因而地幔流体也可能直接形成油气藏。

### 6.2.2 地幔流体提供成矿物质

地幔流体是一种超临界流体,具有独特的溶解和输运能力,因而可以溶解和迁移地幔中许多成矿元素。有学者进行了流体相(饱和 Si-NaCl 的 C-H-O-S 流体)和硫化物相(有 Pt、Au 等金属)之间的分配实验,结果表明 Fe 的溶解度较大,其次是 Cu 和 Au,它们的溶解度与是否存在硫化物无关,说明在高温高压下,两者不是与 S 形成络合物,而是与 Cl 形成稳定的络合物,因此地幔流体可以溶解 Fe、Au、Pt 等元素。目前有证据表明,胶东金矿、冀西北众多金银矿床以及世界各地与碱性岩有关的金矿床等大型矿床、矿集区的成矿物质部分均由地幔流体提供。

### 6.2.3 地幔流体提供成矿流体

许多大型-超大型矿床的成矿物质有多种来源,其中壳源占有重要地位,成矿流体表现出地幔流体与地表水混合来源的特征。世界上一些 Sn、U 矿床,尽管其成矿元素是壳源的,但成矿元素在酸性岩浆中富集与地幔流体有密切联系。近年来许多学者利用稀有气体同位素组成定量估算了某些矿床成矿流体中地幔流体所占比例,其中云南墨江金矿成矿流体中地幔氦占 2%~23%、云南老王寨金矿地幔氦占 11%~52%、湖南万古金矿成矿流体中地幔流体的比例为 45%~90% 等。上述实例均说明,地幔流体在成矿过程中具有提供成矿流体的重要作用。

### 6.2.4 地幔流体提供碱质和硅质

钾化、钠化等碱交代作用和硅化是许多大型-超大型矿床极为普遍的蚀变作用,目前国内外众多铀矿床及其它金属、非金属矿床均存在碱交代作用,可见碱交代作用是成矿作用最核心的一个机制。地幔流体相对富含 K、Na 等碱金属和硅质,具有提供大量 K、Na 等碱金属和 Si 的潜力。

### 6.2.5 地幔流体提供热源

成矿作用不仅要有成矿物质、成矿流体,而且必须有能量供给。持续的能量供给使成矿环境长期保持在一个热状态,不仅有利于与成矿有关的岩浆岩岩体本身的分异与成矿,而且有助于系列对流循环系统从周围围岩中萃取成矿物质,并在一定的构造环境下成矿。地幔流体不仅是种高温流体,而且是一种热能传输介质,地幔柱活动过程中将分离出大量高温地幔流体,这些高温地幔流体可以使岩石圈发生熔融,形成一系列不同类型的花岗质岩类及其相关的矿产,如扬子中下游地区中生代大量出现的壳幔同熔型花岗岩和与之有关的铁铜金矿床。

## 6.3 成矿交代基本类型

地幔流体是通过大型超壳断裂带、韧性剪切带或幔柱构造上侵,并在这些构造带中发生成矿作用的。根据地幔流

体在成矿作用中所起的重要性,划分了 3 种成矿交代基本类型:

①地幔流体交代地幔岩石,促使某些金属元素富集成矿;②地幔流体溶解地幔物质形成含矿溶液并迁移至浅部成矿;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。但实际情况中成矿过程可能是以一种方式为主,也可能是多种方式联合作用。

## 7 结语

①地幔流体是由富含地球内部原始的气体元素和富挥发分组成的气体、稀溶液和富碱硅酸盐熔体,具有独特的溶解和输运能力、化学反应能及反应速度极高的热容、萃取能力和分相不混溶性等物理化学性质,以及易溶于硅酸盐熔体、净化作用和再沉淀作用的地球化学性质。

②俯冲板块发生的脱水脱气和地幔原始残留挥发分及地幔熔融作用是地幔流体产生的重要来源,通过同位素体系研究表明,地幔流体主要有 3 种源区:一是地幔柱型源区;二是洋中脊玄武岩型源区;三是岛弧型源区。

③地幔流体主要有三种类型,分别是超深流体、软流层起源的熔/流体以及与幔源岩浆有关的晚期流体。

④地幔交代作用是由于熔体或流体的介入使地幔岩石化学组分发生富集并最终导致地幔化学不均一的过程,可分为金伯利岩型和碧玄岩型。

⑤地幔流体成矿作用主要有地幔流体本身成矿、提供成矿物质和成矿流体、提供碱质和硅质、提供热源等表现形式,可划分为 3 种成矿交代基本类型:一是地幔流体交代地幔岩石,促使某些金属元素富集成矿;二是地幔流体溶解地幔物质形成含矿溶液并迁移至浅部成矿;三是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。

## 参考文献

- [1] 张鹏,朱婧,谢海峰,等.浅析地幔流体组成及其成矿作用[J].世界有色金属,2018(2):296-298.
- [2] 邓平,沈渭洲,凌洪飞,等.地幔流体与铀成矿作用:以下庄矿田仙石铀矿床为例[J].地球化学,2003(32):520-528.
- [3] 邓志强,段磊.地幔流体及其成矿作用研究浅述[J].科技资讯,2016(12):136-138.
- [4] 杜乐天.幔汁 H-A-C-O-N-S 流体[J].大地构造与成矿学,1988,12(1):87-94.
- [5] 孙丰月,石准立.试论幔源 C-H-O 流体与大陆板内某些地质作用[J].地学前缘,1995,2(1-2):167-174.
- [6] 刘显凡,蔡水文,卢秋霞,等.滇西地区富碱斑岩中地幔流体作用踪迹及其成矿作用意义[J].地学前缘,2010,17(1):114-136.
- [7] 路风香,郑建平,赵磊,等.有关金伯利岩定义的讨论-来自岩相学的证据.岩石学论文集[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.