

综述与评述

# 地球深部流体与油气生成及运移浅析<sup>\*</sup>

孙 楷, 谢鸿森, 郭 捷, 苏根利, 秦业  
(中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

**摘 要:**近年来的研究工作表明, 流体不仅存在于地球表层及上地壳, 而且也大量存在于地球深部(下地壳及地幔), 其成分以  $H_2O$  和  $CO_2$  为主。由于特定的温度和压力条件, 流体均呈超临界状态存在, 它们是能量与物质的运移载体。由于其独特的性质, 因而它们不仅参与了深部油气的无机生成, 而且也对油气的富集及向上运移成藏起了重要作用。

**关 键 词:** 地球深部; 超临界流体; 无机成因; 油气富集及运移

**中图分类号:** P618.130.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8166(2000)03-0283-06

由于近年来的科学进展和发现, 现已认识到流体是固体地球的重要组成部分, 在地球演化过程中发挥着重要作用, 对其研究已成为当今地球科学的重要的前沿课题。本文通过对地球深部(下地壳及地幔)流体活动及其特征的分析, 浅析了其与油气无机成因的关系及在油气富集、运移过程中的作用。

## 1 地球深部流体

### 1.1 深部流体活动

美国国家研究委员会(1993)在《固体地球科学与社会》报告中对流体的定义是: 流体包括水、烃、来自地球极深处至火山喷发的岩浆, 以及主要分布于地壳, 但在地幔中也可见到的溶液和气体。

通过近年来的研究工作, 大量事实表明: 流体不仅存在于地球表层及上地壳, 而且也大量存在于下地壳及地幔中。流体是以 C-H-O 为主的体系, 而且其种类受环境氧逸度、岩石矿物稳定性及深度的控制。Holloway 计算  $f_{O_2}$ , 在 FQM 和 WM(方铁矿-磁铁矿)之间时, C-H-O 流体以  $H_2O$  和  $CO_2$  为主, 较低时(IV)则接近以  $CH_4-H_2O$  为主。根据 Olafsson<sup>[1]</sup>和 Wyllie<sup>[2]</sup>的资料: 在较浅处(约 90 km)时, 随着角闪石等含水矿物的形成, 大量的  $H_2O$  被

消耗, 气相中  $H_2O$  与  $CO_2$  含量比值随之减小; 在 66 ~ 300 km 时金云母、白云石或菱镁矿可稳定存在, 金云母的形成可消耗水, 但受  $H_2O/K_2O$  比值的影响, 在该比值大于 0.3 时其形成并不消耗全部的  $H_2O$ , 此时可形成含  $H_2O$  的流体相, 白云石或菱镁矿的形成可消耗  $CO_2$ , 因而  $H_2O$  与  $CO_2$  含量比值会增大; 在深度大于 300 km 时, 由于水镁石、DHMS(高密度含水镁硅酸盐)及菱镁矿的存在, 此时  $H_2O$  和  $CO_2$  很难形成独立的流体相。

自 20 世纪 80 年代以来, 随着世界上一些国家超深钻计划的实施, 现已找到地壳深部流体存在的切实可信的重要证据。科拉半岛超深钻探发现深度在 12 km 的地壳范围内各个深度存在大量以自由水为主的流体, 这些水有分层存在的现象, 并采集到了 2 km 深度流体的样品。德国大陆钻探发现在 8 km 以下的深度仍然象上部一样存在大量含矿热卤水, 并至今进行着强烈的地质作用<sup>[3]</sup>。此外, 流体包裹体一直被认为是了解深部流体的重要方法。Belkin 等(1987)研究意大利某地火山岩的流体包裹体时, 发现大多以  $CO_2$  为主, 但有 3 个  $CO_2+H_2O$  的原生包裹体; 在地幔岩包体和地幔派生岩浆岩的斑体矿物中发现了大量含有高密度二氧化碳的流体

\* 国家自然科学基金项目“高温高压下熔体与流体混溶和分离实验研究”(编号: 49772111)资助

第一作者简介: 孙楷, 男, 1970 年 3 月生于山东, 博士生, 主要从事流体地球化学研究。

收稿日期: 1999-05-03; 修回日期: 1999-08-23

包裹体<sup>[4]</sup>;在钾镁煌斑岩的早阶段橄榄石斑晶的包裹体中,测到高达 0.89 g/ml 的 CO<sub>2</sub> 流体<sup>[6]</sup>;对于缺乏富 H<sub>2</sub>O 流体包裹体的原因, Bakker<sup>[5]</sup>通过实验证实,随压力的变化, H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 包裹体的 H<sub>2</sub>O 会沿矿物中的位错面优先泄漏,而使流体中 CO<sub>2</sub> 摩尔含量从 20% 增加到 54%。此外,陈丰等<sup>[7,8]</sup>还在金刚石中观察到微米—亚微米级的钾盐、钠盐和铜盐;杜乐天<sup>[9-11]</sup>通过研究将幔源 C-H-O 流体称为幔汁 (HACONS),强调流体中挥发分、热及碱金属等,并强调壳、幔流体间的相互作用。

综合各种资料,可以认为在下地壳及地幔中,流体成分以 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 为主,并含有少量的 CO、H<sub>2</sub>、F、Cl、H<sub>2</sub>S 等挥发份及一些常量、微量元素和熔体。

对于地球深部流体的来源,众多学者一直从事这方面研究与探索。从现有资料看,上地幔流体来源有两种方式:一是来自于组成地球固有物质在地核或地幔的脱挥发分作用<sup>[12]</sup>;二是来自于洋壳俯冲作用所带入的大量富含挥发份物质的再循环<sup>[13]</sup>。Scambelluri 等<sup>[14]</sup>强调蛇绿岩楔状体内蛇纹石化橄榄岩的俯冲作用是把水带入地幔深处的有效机制之一。据估计<sup>[15,16]</sup>,洋壳俯冲每年可将大约 10<sup>15</sup> g 的水带到岩石圈的不同深度。这些水能否被带到地幔取决于俯冲洋壳的成熟度、俯冲速度和俯冲角度。Peacock<sup>[17,18]</sup>指出,成熟洋壳(大于 5 × 10<sup>7</sup> a)俯冲或快的俯冲速度可避免洋壳本身过早脱水使其自身及上地幔发生部分熔融,有利于流体进入地幔。成熟度低的洋壳(10<sup>7</sup>~2 × 10<sup>7</sup> a)和洋壳缓慢地俯冲将会使洋壳在进入地幔之前,在地壳不同深度层次上脱水或发生重熔从而阻碍流体进入地幔。此外, Kaneokai 等<sup>[19]</sup>通过稀有气体 He-Ar 的同位素研究后认为,地幔流体有 3 种来源: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。

至于地球深部流体的存在形式,综合各种研究资料认为:地球深部 H<sub>2</sub>O 至少有 3 种存在状态,即以 OH 形式贮存在矿物中、溶解于熔体中或以自由相形式存在。研究表明:地幔中的常见含水矿物如蛇纹石、滑石、金云母、绿泥石、硬柱石等是上地幔重要的储水库<sup>[20,21]</sup>,另外高密度含水镁硅酸盐(含水 A 相至含水 B 相、硅镁石等)则是地幔过渡带中重要的储水矿物<sup>[22]</sup>,此外,最近研究还肯定了一些化学式无水的幔矿物(石榴子石、辉石、橄榄石、柯石英、金刚石等)把水带入地幔过程中的意义<sup>[21,23]</sup>。对于水在熔体中的溶解机制, Stolper 等<sup>[24,25]</sup>通过拉曼光谱、红外光谱及核磁共振等研究认为水以 OH 和

H<sub>2</sub>O 分子两种形式存在,即在溶解初期以 OH 为主,而在水含量增高时则以 H<sub>2</sub>O 为主要形式。根据 Liu<sup>[26]</sup>的研究,在洋底自由水存在于水线和角闪石的温度区域之间,而在大陆底部自由水存在于水线和金云母的温度区域之间,低速带就是自由水带,而水线代表着低速带的底部边界。至于 CO<sub>2</sub> 的存在形式,根据来自天然样品(从地幔岩到地壳中的各类岩石)的测定表明 CO<sub>2</sub> 类气体基本上是以自由气体的形式出现。

## 1.2 深部流体的性质

根据目前对地球内部压力和温度的估算结果,可以得出:在下地壳及深部,流体均处于超临界状态。因而,了解超临界流体特性对于认识深部流体的性质是非常重要的。

所谓流体的临界点,在相图上是气体—液体共存曲线的终点,在该点气相和液相之间的差别消失,物质呈一种均匀的流体相存在。该点的压力、温度分别称为临界压力和临界温度(表 1 示出部分物质的临界常数)。当体系的压力和温度超过临界点值时,该流体就称为“超临界流体”。

表 1 部分流体物质的临界常数

Table 1 Critical properties of selected fluids

物质	临界压力 $P_c (\times 10^9 \text{ Pa})$	临界温度 $T_c (\text{K})$	物质	临界压力 $P_c (\times 10^9 \text{ Pa})$	临界温度 $T_c (\text{K})$
H <sub>2</sub> O*	22.06	647	CH <sub>4</sub>	4.64	190.7
CO <sub>2</sub> *	7.38	301	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> *	4.88	305
H <sub>2</sub>	1.300	33.3	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> *	4.25	370
CO	3.49	133	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> *	5.4	282
H <sub>2</sub> S	9.00	373.6	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> *	2.97	507

注: \* 号数据引自参考文献 [27, 28]

超临界流体具有许多独特的性质,这里就部分主要特性简述如下:

(1) 状态方程。目前普遍采用的是 Redlich 和 Kwong 对 Van der Waals 气体状态方程的修正方程,即 RK 方程:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m(V_m + b)T}$$

其中:  $a = 0.42748 T_c^{2.5} R^2 / P_c \text{ barK}^{1/2} \text{ cm}^6 / \text{mol}^2$ ,  $b = 0.08664 R T_c / P_c \text{ cm}^3 / \text{mol}$ , 此处  $P_c$ 、 $T_c$  分别为临界压力和临界温度。

为了适应地质学研究的需要, Holloway<sup>[29]</sup>对 RK 方程中的参数  $a$  处理成温度的函数,即:  $a = a_0$

+  $a_1(T)$ , 其中  $a_0$  为常数。

对  $H_2O$   $a_0 = 35 \times 10^6, b = 14.6$

$$a_1(T) = 166.8 \times 10^6 - 1.9308 \times 10^5 (T - 273.15) + 186.4(T - 273.15)^2 - 7.1288 \times 10^2 (T - 273.15)^3;$$

对  $CO_2$   $a_0 = 46 \times 10^6, b = 29.7$

$$a_1(T) = 73.03 - 7.140 \times 10^4 (T - 273.15) + 21.57(T - 273.15)^2;$$

(2) 溶解特性 超临界流体具有独特的溶解特性。在超临界环境下, 常温下难溶的化合物变得易

溶, 而一些常温下易溶的化合物则变得难溶。对于流体的主要成分水, 与常温条件下相比, 超临界水的介电常数很低, 使其表现出类似非极性溶剂的性质, 所以有机物在其内的溶解度较高, 而盐的溶解度较小。此外, 溶解度对压力、温度的变化敏感, 压力或温度的微小变化可导致溶解度明显降低。

(3) 输运性质。超临界流体的密度介于气体和液体之间, 因而其许多物理性质也介于二者之间。从表 2 可以看出, 其密度、扩散系数和粘度均介于气、液之间。因而, 超临界流体是一种理想的输运媒介。

表 2 超临界流体(临界点附近)与气体、液体部分物理参数的对比

Table 2 Comparison of typical SCF, liquid and gas properties

物性参数	气 体	超临界流体	液 体
密度 ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )	$0.6 \sim 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$	0.2~0.9	0.6~1.6
扩散系数 ( $\times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ )	0.1~0.4	$0.2 \times 10^{-3} \sim 0.7 \times 10^{-3}$	$0.2 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-5}$
粘度 ( $\times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )	$1 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2} \sim 9 \times 10^{-2}$	0.2~3.0

(4) 化学反应性质。研究表明, 超临界流体能加快发生在其内的化学反应速率, 这与超临界流体的特性密切相关。对超临界水而言, 与常态水相比其介电常数减小且活性体积变大等。此外, 超临界流体的“笼效应”(cage effects) 也加快发生在其内的化学反应速率, 也即在反应类型周围溶剂分子局部密度增强而加快反应的进行。

## 2 深部流体与油气的生成及运移

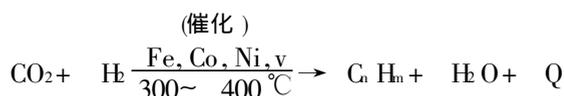
### 2.1 深部流体与油气的无机成因

油气生成的有机与无机之争已有百余年历史。长期以来, 有机成因的干酪根热降解说一直处于无可争辩的主流。然而, 随着近年来油气勘探与研究工作的深入, 油气无机生成的证据越来越多。Gold<sup>[30-32]</sup>是油气非生物成因的支持者之一, 他在瑞典锡利扬环状构造——一个花岗岩的大陨石坑中, 设计了钻孔。该深钻只打了 6.6 km(垂直深度 6.337 km), 但是, 在整个井孔中都发现了甲烷和氢, 且数量随深度加大而增多。虽然不具工业意义, 但在一定程度上证实了他的理论。Wakita 等<sup>[33]</sup>在研究日本一些富  $CH_4$  气井时, 发现  $^3He/^4He$  比值接近日本岛弧带火山喷气, 最高值见于 4.6 km 深处碎屑岩中, 认为  $CH_4$  是上地幔来源的。此外, 王先彬等<sup>[34]</sup>通过对位于我国东部大陆裂谷区中松辽盆地的天然气碳同位素研究后指出, 该区沿深大断裂分布的 13 口天然气井的  $\delta^{13}C$  值变化从  $-12.8\text{‰} \sim 24.2\text{‰}$ , 显示

出非生物成因  $CH_4$  碳同位素组成, 而且其  $CH_4$  同系物碳同位素组成  $\delta^{13}C$  值反序排列, 即  $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3$ , 反映原始甲烷无机合成烃的特征。此外, 该区  $^3He/^4He = 2.34 \times 10^6 \sim 2.97 \times 10^6$ , 显示了慢源的特征。

目前, 无机成因说较著名的观点有两种<sup>[35,36]</sup>:

一是费托法 (FTT), 即油气是由  $CO_2$  和  $H_2$  反应生成  $CH_4$ , 并通过进一步聚合和加氢作用形成各种烃类:



目前, 已用该方法合成石油。在该过程中, 氢和二氧化碳是必需物质, 而它们在地球深部的存在也被证实, 因而, 通过该法生成油气应该成立。但是, 在大陆岩石圈中, 不是所有地方均可产生费-托合成的 Szatmari<sup>[37,38]</sup>认为最适宜的部位是: 俯冲板块的接触带、蛇绿岩推覆体中、裂谷作用所薄化的地壳中。具体而言, 这种俯冲沉积岩含有大量碳酸盐, 而蛇绿岩仰冲到陆架碳酸盐上, 俯冲碳酸盐沉积物中所排出的水与脱碳作用所生成的  $CO_2$ , 将沿着上覆的地幔岩石圈及蛇绿岩的底面, 为蛇纹石化、 $H_2O$  与  $CO_2$  的还原以及烃类的合成创造条件。此外, 该类大型推覆体本身的质量有助于将产生的流体驱向克拉通内部。

二是由 Gold<sup>[30-32]</sup>提出的“地球深层气无机成

因”假说。他认为在宇宙形成时便形成烃,各种烃之间发生反应形成  $\text{CH}_4$ ,这些甲烷向上运移,并大量聚集在地壳深度 15 km 左右的地带,形成无机成因的油气藏。当存在地幔柱并有深大断裂时,这些甲烷气便可通过断裂、火山活动或在地壳运动中释放。此外,Gold 还认为:大陆板块边缘褶皱带、大型地壳裂谷、地震活动带、活火山或死活山附近,以及已查明富集油气的外延部位均是油气概率极高的地区,并探讨了深部甲烷气体向上运移的动力学机制。

此外,早在 19 世纪,俄国化学家门捷列夫就提出<sup>[39]</sup>:石油是由地下深处的重金属碳化物与下渗的水相互作用而生成。长期以来,由于对地球深部水和金属碳化物存在的怀疑而遭到否认。但是,从目前看来还是有可能的。当然,对油气无机成因的认可,并不否认油气有机成因的存在。事实上,在自然界发展过程中,有机界和无机界常常是相互作用、相互联系而共同存在发展的。

## 2.2 深部流体与油气富集和运移

目前,学者们已普遍认可油气从生成至成藏过程必发生富集及运移的观点,然而就这一过程特别是深层油气的这一过程中对流体的作用认识不一。我们认为流体在这一过程中特别是对于深层油气的富集、运移中发挥了重要作用。

由于以  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  为主要组分的深部流体均处于超临界状态,对有机物的溶解作用强,因而对分散的油气组分具有明显的富集作用。在其向上运移过程中,由于压力、温度的降低,油气溶解度减小,从而油气从流体中分离出来并被有效构造圈闭而成藏。

石油和天然气是岩石孔隙中的一种液态流体和气态流体,因而其运移和聚集过程是流体在孔隙介质中的运移和聚集过程。油气作为一种流体,其运动并不是简单地由高压区向低压区流动,而应遵循一般流体的基本运动规律,即自发地从能量高处向能量低处运移,也即流体总是从流体势高的地区向流体势低的地区运动。

流体势的概念是由 Hubber(1953)在 20 世纪 50 年代初引入至油气运移和聚集研究中的,但是他所定义的流体势主要考虑了流体的位能和压能,而没有考虑毛细管阻力的作用。England 等<sup>[40]</sup>在考虑了毛细管阻力作用的条件下,将流体势定义为:从基准面传递单位体积的流体至研究点所必需做的功。

$$H = dgz + \int_0^p \frac{dp}{\rho} + \frac{2\sigma \cos \theta}{r}$$

其中,  $\rho$  为流体密度,  $g$  为重力加速度,  $z$  为相对高

程,  $W$  为界面张力,  $r$  为毛细管半径,即岩石孔隙半径,  $\theta$  为可湿性,用界面与管壁间夹角表示,  $p$  为高程  $z$  处孔隙流体的压力。

当前,普遍认为深部流体运移的动力有 4 种来源,即:① 浮力;② 水动力;③ 热力;④ 构造应力。康永尚等<sup>[41,42]</sup>根据不同流体动力系统的流体动力特征,划分出 4 种类型,即:压实驱动型、重力驱动型、流体封存型和滞流型,此外并论述了不同类型流体动力系统中各驱动力的相对重要性。这里就热力略作说明。深部流体不仅是良好的物质传输介质,而且也是有效的热载体和热传输体。Spera<sup>[43]</sup>指出幔源 C-H-O 流体为近似的等温运移,虽然流体与围岩的化学反应及热散失等会导致流体有降温的趋势,但流体与通道壁的摩擦、流体的 Joule-Thompson 效应等又使其有升温的趋势,流体的这种高温特征便会在围岩中产生热应力。Turcott(1987)指出,温度升高  $100^\circ\text{C}$ ,会产生 450 MPa 的热应力。这种应力便会使岩石发生相应的构造变形。此外,还应注意流体与构造变形的相互作用关系。由于流体的存在,一方面会降低岩石的强度,另一方面会使围岩发生水解弱化、压力溶解、颗粒间物质迁移等,从而作为一种“润滑剂”而促进构造变形的发生,反过来,构造变形作用又促使流体沿低势区方向运移。

对于深部流体的运移途径可能有 3 种<sup>[44]</sup>,即① 沿深大断裂向上运移;② 孔隙渗透;③ 沿自身的水压破裂向上运移。第①种方式对流体向上运移是很重要的,这已被众多地质观测所证实。这也是世界上许多大型油气田多分布于裂谷带上的原因。由于在高温高压下,岩石的孔隙度很低,因此,流体以第②种方式运移是次要的。流体第③种方式运移是 Spera 提出的,他认为幔源流体沿厘米级宽度的裂隙运移是存在的,并建立了这种运移方式的动力学机制。

Spera 经过计算指出:一条垂向长 10 km 的裂隙,因水压破裂,只需 2 天时间即可完成,裂隙宽度为  $10^{-2}$  m,流体的驱动压力  $2.6 \times 10^4$  Pa。由此可知,即使在一个没有深大断裂的地区,只要流体具有一定的驱动压力,C-H-O 幔源流体就会在岩石圈中产生厘米级宽度的水压破裂而快速向上运移。

综上所述,在地壳及地幔中存在大量以  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  为主要成分的流体,而且它们均处于超临界状态,因而表现出独特的物理和化学特性。其不仅与油气无机形成有关,而且对油气富集和向上运移起到重要作用。

## 参考文献

- [1] Olafsson M. Phase relations of amphibole-carbonate, and phlogopite-carbonate peridotite petrologic constrains on the asthenosphere [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64: 305~ 315.
- [2] Wyllie P J. Magmatic consequences of volatile fluids from the mantle [A]. In Perchuk L L, ed. *Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology* [C]. London: Cambridge University Press, 1991. 477~ 503.
- [3] Richard A Kerr. German super-deep hole hits bottom [J]. *Science*, 1994, 266(28): 545.
- [4] Genji S, Minoru K. Determination of water and carbon dioxide concentrations of pre-eruptive magmas using a laser microprobe technique [A]. 29th IGC Abstracts [C]. 1992, 1. 207.
- [5] Bakker R J. Experimental post-entrapment water loss from synthetic CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O inclusions in natural quartz [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55: 2215~ 2230.
- [6] Ina Solovova A G, Igor D R. Fluid regime of highly potassic mafic-ultramafic magmas [A]. 29th IGC Abstracts [C]. 1992, 1: 209.
- [7] 陈丰, 郭九皋, 王三学, 等. 金刚石中发现石盐包体 [J]. *科学通报*, 1992, 37(16): 1489~ 1491.
- [8] 陈丰, 王明再, 王三学, 等. 金刚石中首次发现高铜高氯包体 [J]. *科学通报*, 1992, 37(19): 1782~ 1784.
- [9] 杜乐天. 当代地球科学的一项重大前沿课题幔汁研究 [J]. *地球科学进展*, 1990, (1): 42~ 47.
- [10] 杜乐天. 烃碱流体地球化学原理——重论岩浆热液及成矿作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [11] 杜乐天. 地壳流体与地幔流体间的关系 [J]. *地学前缘*, 1996, 3(4): 172~ 180.
- [12] Navon O. High internal pressures in diamond fluid inclusions determined by infrared absorption [J]. *Nature*, 1991, 353: 746~ 748.
- [13] Nadeau S, Philpot P, Pineau F. Fluid inclusions and mineral isotopic compositions (H-O-C) in eclogitic rocks as tracers of local fluid migration during high pressure metamorphism [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 114: 431~ 448.
- [14] Scambelluri M, Muntener Q, Hermann J, et al. Subduction of water into the mantle: History of an Alpine peridotite [J]. *Geology*, 1995, 23: 459~ 462.
- [15] Peacock S M. Fluid processes in subduction zones [J]. *Science*, 1990, 248: 319~ 337.
- [16] Ito E, Harris D M, Anderson A I G R, et al. Alteration of oceanic crust and geologic cycling of chlorine and water [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(9): 1613~ 1624.
- [17] Peacock S M. Large scale hydration of the lithosphere above subducting slabs [J]. *Chemical Geology*, 1993, 108: 49~ 59.
- [18] Peacock S M. The importance of blueschist eclogite dehydration reactions in subducting oceanic crust [J]. *Geological Society American Bulletin*, 1993, 105: 684~ 694.
- [19] Kaneoka I, Takaoka N. Noble-gas state in the earth's interior—some constrains on the present state [J]. *Chemical Geology*, 1985, 52: 75~ 95.
- [20] Thompson A. B. Water in the earth's upper mantle [J]. *Nature*, 1992, 358: 295~ 302.
- [21] Pawley A R, Holloway J R. Water sources for subduction zone volcanism: new experimental constrains [J]. *Science*, 1993, 260: 664~ 667.
- [22] Finger L W, Prewitt C T. Predicted compositions for high density hydrous magnesium silicates [J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, 16: 1395~ 1397.
- [23] Bell D R, Rossman G R. Water in earth's mantle: The role of normally anhydrous minerals [J]. *Science*, 1992, 255: 1391~ 1396.
- [24] Stolper E M, Silver L A. The speciation of water in silicate glasses: The influence of bulk composition [J]. *EOS*, 1985, 66: 1140.
- [25] Stolper E M. Temperature dependence of the speciation of water in rhyolitic melts and glasses [J]. *American Mineralogist*, 1989, 74: 1247~ 1257.
- [26] Liu L G. Effects of H<sub>2</sub>O on the phase behaviour of the forsterite-enstatite system at high pressures and temperatures and implication for the Earth [J]. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 1987, 49: 142~ 167.
- [27] Yasuhiko A, Takeshi F. Characteristics of supercritical fluids [J]. *The Review of High Pressure Science and Technology*, 1993, 2(4): 262~ 264.
- [28] 谢锐生. 热力学原理 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1980. 259.
- [29] Holloway R. Fugacity and activity of molecular species in supercritical [A]. In Fraser D, ed. *Thermodynamic in Geology* [C]. Boston: Reidel, 1977. 161~ 181.
- [30] Gold T. A biogenic methane and the origin of petroleum [J]. *Energy Exploitation and Exploitation*, 1982, 1(2): 89~ 104.
- [31] Gold T. Contribution to the theory of an abiogenic origin of methane and other terrestrial hydrocarbons [A]. In *Proceedings of the 27th International Geological Congress* [C]. 1984. 413~ 442.
- [32] Gold T. The origin of methane in the crust of the Earth, the future of energy gases [J]. *US Geological Survey Professional Paper*, 1993, 1570: 57~ 80.
- [33] Wakita H, Salo Y. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ration in CH<sub>4</sub>-rich natural gases suggest magmatic origin [J]. *Nature*, 1983, 305: 792~ 795.
- [34] 郭占谦, 王先彬. 松辽盆地非生物成因气的探讨 [J]. *中国科学 (B辑)*, 1994, 24(3): 303~ 309.
- [35] 冲津文雄著. 深层油气资源的勘探与前景 [J]. 伊培荣译. *天然气勘探与开发*, 1996, 19(4): 72~ 75.
- [36] 张景廉, 张平中, 吕锡敏, 等. 油气无机成因的新进展 [J]. *地球科学进展*, 1998, 13(1): 44~ 50.
- [37] Sztamari P. Plate tectonic control of synthetic oil formation

- [ ] Oil & Gas Journal, 1986, 84: 67-69.
- [38] Szatmari P. Petroleum Formation by Fischer-Tropsch synthesis in plate tectonic [J]. AAPG Bull, 1989, 73(8): 989-998.
- [39] 潘钟详. 石油地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 1986. 109-111, 162-164.
- [40] England W A. The movement of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144: 327-347.
- [41] 康永尚, 郭黔杰. 论油气藏流体动力系统 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1998, 23(3): 281-283.
- [42] 康永尚, 庞雄奇. 油气成藏流体动力系统分析原理及应用 [J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 80-84.
- [43] Speer F J. Carbon dioxide in igneous petrogenesis fluid dynamics of mantle metasomatism [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1981, 71: 56-65.
- [44] 孙丰月, 石准立. 初论幔源 C-H-O 流体与大陆板内的某些作用 [J]. 地学前缘, 1995, 2(1-2): 165-174.

## FLUIDS IN DEEP EARTH AND ORIGIN AND MIGRATION OF OIL AND GAS

SUN Qiang, XIE Hongsen, GUO Jie, SU Genli, DING Dongye

(The Geochemistry Institute of China, CAS, Guiyang 550002, China)

**Abstract** In recent years, more and more researches have proved that fluids are not only in upper crust but also in lower crust and mantle, and they are mostly composed of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>. Because of the particular pressure and temperature conditions in deep Earth, they are under supercritical state and show particular physical and chemical characters that are different from general fluids. They are important transportation media of matter and energy and play important roles in the evolution of Earth. And they also play important roles in the origin and migration of oil and gas. On the other hand, they are related to inorganic origin of oil and gas, and they also produce an important effect in enrichment and migration of petroleum.

**Key words** Deep Earth; Supercritical fluids; Inorganic origin; Enrichment and migration of oil and gas.

### 【知识点】

## 中国科学引文数据库

中国科学引文数据库 (Chinese Science Citation Database) 简称 CSCD, 是国家自然科学基金委员会和中国科学院共同资助, 由中国科学院文献情报中心研建的一个多功能的大型数据库。CSCD 收录了国内出版的中英文科技核心期刊 582 种, 涉及数学、物理学、力学、化学、天文学、地球科学、生物学、农林科学、医药卫生、工程技术、环境科学等领域。CSCD 始建于 1989 年, 目前已经积累了 40 万条来源数据和 120 万条引文数据。该数据库可提供论著 (期刊论文、专著、会议文献、学位论文、专利文献等) 被引情况、期刊被引情况、机构或个人在核心期刊上发表论文情况的检索, 是目前国内唯一能与 SCI 接轨的数据库。