

沉积盆地深部流体的地球化学特征及 油气成藏效应初探

金之钧^{1,2}, 张刘平^{1,2}, 杨 雷^{1,2}, 胡文瑄³

(1. 石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 2. 教育部石油天然气成藏机理重点实验室, 北京 102249;
3. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093)

摘要: 以济阳拗陷东营凹陷和塔里木盆地塔中地区为例, 在前人深部流体研究的基础上, 应用同位素地球化学、有机地球化学及热力学定量模型, 对沉积盆地深部流体的活动特征及其油气成藏效应进行了初步的探讨。研究表明, 在东营凹陷不仅存在着幔源富二氧化碳流体 (H_2O+CO_2) 的活动, 而且还存在着幔源富氢流体 ($H_2O+CH_4+H_2$) 的活动。塔里木盆地塔中地区也发现了幔源富二氧化碳的活动。深部流体上升过程中热能传递的定量研究表明, 幔源流体是良好的热能载体。东营凹陷和塔中地区的有机质异常热变现象证实了深部流体的热效应。有机质热演化生烃不仅需要热, 而且是个缺氢的过程, 富氢流体注入沉积盆地势必对油气的生成产生影响。加氢热模拟实验结果表明, 加氢可大幅度提高烃源岩的产烃率; 对腐植型干酪根而言, 加氢生烃效应最显著的阶段是在生烃高峰之后, 产率可增加 147% 以上; 腐植型干酪根的加氢生烃效应在各个阶段都较显著。在东营凹陷和塔中地区分别发现了深部流体促进烃源岩生烃的现象。因此, 深部流体在能量上和物质上对油气的生成均可构成重要的影响。

关键词: 地幔流体; 油气成藏; 同位素地球化学; 热力学; 模拟实验。

中图分类号: P618.130.2; P59 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)06-0659-07

作者简介: 金之钧(1957-), 男, 博士生导师, 1992 年获莫斯科石油与天然气大学副博士学位, 主要研究方向为油气资源评价、含油气盆地分析、油气形成与分布、勘探经济评价与决策。

油气成因理论是当今前沿学科的重大课题之一, 也是一百多年来激烈争论的问题。20 世纪 80 年代以来, 在世界范围内众多的含油气盆地之中, 发现了深部流体的活动, 为进一步探讨油气成因奠定了雄厚的基础。文中的深部流体指进入沉积盆地的地幔流体, 也称幔源流体。地幔流体是富含地球内部原始成分, 同时包含地壳再循环物质的超临界挥发分系统。地幔流体的化学成分以 C, H, O, N, S 等为主, 并溶有多种碱性元素、稀有气体及 F, P, Cl 等微量组分^[1,2]。自然界中有机成因油气与深部流体的协调共存, 促使着我们从共存与相互作用的视角, 探讨油气的生成、运移、聚集与保存。关于深部流体的成藏效应, 已有学者进行过一定的探讨^[3,4]。本文在前人地幔流体研究成果的基础上, 以济阳拗陷东营

凹陷和塔里木盆地塔中地区为例, 着重研究含油气沉积盆地内部深部流体在物质和能量 2 个方面对油气生成的影响。

1 地幔流体的类型与特征

研究表明地幔流体主要有 2 种类型^[5]: 富氢流体和富二氧化碳流体。

1.1 富氢流体

氢是深部流体的重要组成部分, 越向深部 H_2 的含量越高, 到中下地幔和地核则主要是 H , H_2 和氢化物^[5~7]。地幔富氢流体实际上就是一种超深流体, 来自较深的地幔, 或许相当于 Haggerty^[8] 所提出的来自核幔边界及杜乐天^[9] 提出的来自外地核氢气圈。根据在金伯利岩中发现的缺氧矿物(碳化钨, 结晶温度 2 765 °C)和自然元素, 在金刚石中发现的自然元素和合金包体、流体包裹体以及 $CuCl_2$, KCl ,

NaCl 包体等推测,这种超深流体的组成至少包括 C, H, O, N, S, F, Cl, P, 碱金属, Fe, Si, Cu, Pb, Zn, Sn, Ag, Au 等,氧逸度很低,流体主要为 $\text{CH}_4 + \text{H}_2$, 估计占气体总量的 97.8%, H/O 达 1 330.

在地核或地幔中氢化物存在的可能性较大,推测 FeH 的摩尔分数可高达 40%~95%^[10]. 局部升温、减压或其他物理化学条件的变化,甚至宇宙变化的触发,金属氢化物分解,使氢逸出. 氢极小的密度和粘度使之可从 2 900 km 的核幔边界上升,穿透各种地幔岩石. 地球深部氢的释出可引发一系列高温高压反应,形成羟基,造成水解弱化,使氧化物和硅酸盐强度降低,易发生塑性变形,羟基进一步与氢化合生成水,构成地幔流体,水的产生推动了碱金属和碱土金属的溶出,形成地幔流体的碱性组分;氢与非金属元素反应形成酸酐和酸,使矿物晶格中的 Cl, F, S, P 等元素进入流体,甚至发生费托反应形成烃类化合物;氢的强还原作用,破坏某些氧化物和硅酸盐,形成金属,有利于打开通道. 地幔流体中的酸、碱组分与金属进一步作用形成成分复杂的地幔热流体. 超深流体可诱发地幔岩石的部分熔融,导致地幔柱的形成^[9,11].

由于深大断裂、地震、火山—岩浆活动,深部流体向地球浅部运移,在此过程中,由于氧逸度的增加,富氢流体会被氧化而形成水和 CO_2 , 即转化为富 CO_2 流体,所以在地层浅部发现的无机成因气藏以 CO_2 为主^[3]. 在一些沉积盆地及大陆裂谷之中,仍发现有幔源富氢流体的活动($\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{H}_2$)^[12,13]. 冰岛西南裂谷带幔源富氢温泉^[14]表明,在有利的条件下,地幔富氢流体还可达到地表.

1.2 富二氧化碳流体

上地幔软流层熔融后,一部分可凝聚上升侵位或喷出地表,但也有部分因数量少或不具备通道条件仍存留于地幔内部,被称为“夭折的岩浆”. 上地幔夭折的岩浆在结晶的晚期可分异出以 $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 为主的流体,它们在深部也可发生交代作用. 金云母、钾碱镁闪石、富钛矿物、磷灰石、碳酸盐都可以产出^[5].

在众多的含油气盆地之中,已经发现了幔源富 CO_2 流体($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$),甚至幔源 CO_2 气藏,如我国的松辽、黄骅、济阳、苏北、三水、塔里木等^[3,15].

2 沉积盆地深部流体的活动特征

为了探讨深部流体在沉积盆地之中的活动特

征,选择渤海湾盆地东营凹陷和塔里木盆地的塔中地区为研究区.

2.1 东营凹陷

东营凹陷是一个中生代裂谷盆地叠加在中生代—古生代盆地之上的油气富集区,总体呈北断南超的构造格局,其烃源岩主要为下第三系沙河街组的沙四上亚段和沙三段的暗色泥岩、油页岩. 断层、骨架砂体和层序界面为油气运移的主要通道,发育多套储盖组合,油气资源十分丰富. 中生代火山活动和岩浆作用强烈,在中生代地层的不整合面上,尤其是上第三系馆陶组和下第三系沙河街组沙三段底的不整合面,大量发育基性火山喷出岩. 岩浆活动总体上分为 3 期:(1)晚侏罗世—早白垩世中基性火山岩活动;(2)老第三纪基性火山岩活动,主要为安山质玄武岩、玄武岩、辉绿岩、水底喷发基性火山岩、玄武质凝灰岩及火山角砾岩;(3)新第三纪超基性火山岩活动,多呈熔岩被分布,主要为碱性橄辉玄武岩、苦橄岩、碧玄岩、霞石岩. 第三系火成岩主要沿凹陷西部的高青—平南断裂和南部的石村断裂分布^①,这 2 个构造带被认为是深部物质进入沉积盆地的优势通道. 4 个具有幔源特征的 CO_2 气藏均沿高青—平南断裂带展布.

东营凹陷天然气化学成分测试结果中 CO_2 和 H_2 表现出异常高的含量. 图 1 中,明显地存在 3 个端元组分: CO_2 极高质量分数端元、 H_2 较高质量分数端元、 CO_2 和 H_2 质量分数均低同时烃组分质量

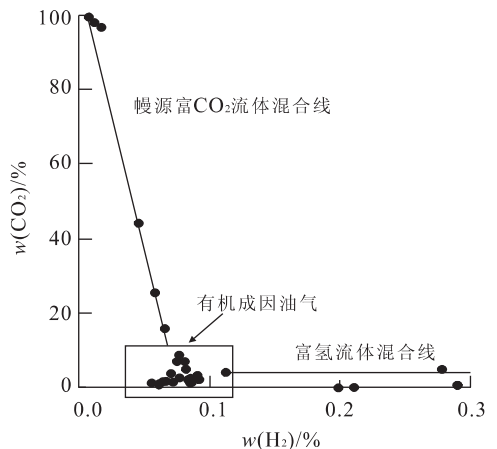


图 1 东营凹陷天然气 $w(\text{H}_2) - w(\text{CO}_2)$ 关系

Fig. 1 Plot of $w(\text{H}_2) - w(\text{CO}_2)$ of natural gas in Dongying sag, Bohai Bay basin

①刘兴材,徐寿根,李丕龙,等.胜利油气区非烃类气(二氧化碳和氦)成因、成藏规律、勘探、开发技术及综合利用,1995,1—106.

表 1 东营凹陷基性火成岩幔源气相包体组分^①

Table 1 Chemical components of inclusions in basic igneous rocks in Dongying sag^①

构造单元	井号	层位	寄主矿物	w _B /%								
				CO ₂	N ₂	H ₂ S	CH ₄	CO	SO ₂	H ₂ O	H ₂	
东营凹陷西部	高气 2	K ₁	辉石		34.4	14.6	28.2					22.8
	高 41-1	K ₁	辉石	39.4	44.1	11.1	5.4				32	2.8
				54.3			10.9					
	高 56	K ₁	橄榄石	58.2		19.3	13.8		8.7			
高 41		57.5		14.7	13.6	14.2						
东营凹陷南部	羊古 1	K ₁	辉石	51.7					16.9	23.9	7.5	
	纯 103	Ng	辉石	67.5		12.4		20.1				

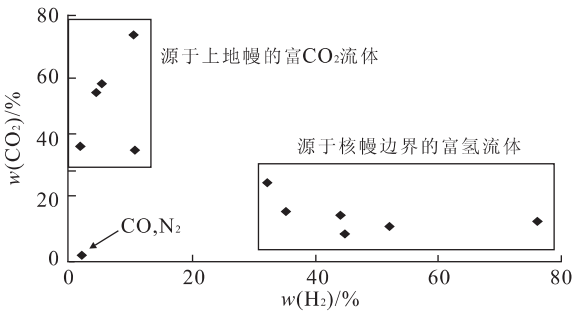


图 2 金刚石幔源包裹体 w(H₂)—w(CO₂) 关系(数据据杜乐天^[9])

Fig. 2 Plot of w(H₂)—w(CO₂) in diamond inclusions

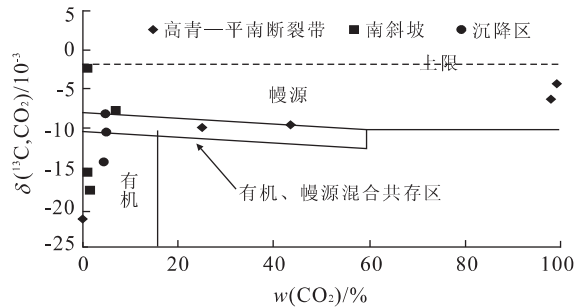


图 3 东营凹陷天然气 δ(¹³C, CO₂)—w(CO₂) 关系

Fig. 3 Plot of δ(¹³C, CO₂)—w(CO₂) of natural gas in Dongying sag

图据戴金星等^[3], 幔源上限据 Lesniak 等^[15]

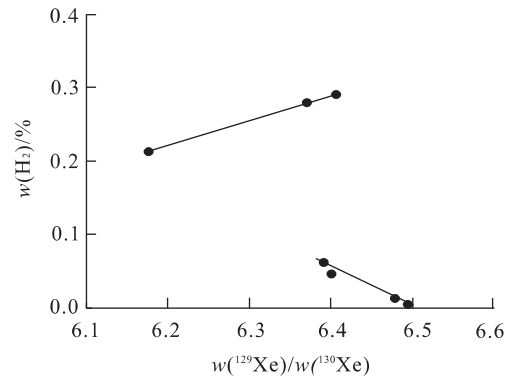


图 4 东营凹陷天然气 w(H₂)—w(¹²⁹Xe)/w(¹³⁰Xe) 关系

Fig. 4 Plot of w(H₂)—w(¹²⁹Xe)/w(¹³⁰Xe) of natural gas in Dongying sag

分数较高的端元。后者与盆地中的有机成因油气有关。端元间存在着过渡, 我们认为是混合作用所致。

金刚石中的流体包裹体对于揭示地幔流体的特征可提供有益的信息。对比图 1 与图 2, 两者存在一定的类似之处。图 2 同样存在 CO₂ 极高质量分数端元和 H₂ 较高质量分数端元, 只是缺乏 CO₂ 和 H₂ 质量分数均低同时烃组分质量分数较高的端元。因而推测, 东营凹陷可能经受了幔源富 CO₂ 流体和富氢流体的作用。该区基性火成岩中, 确实存在 CO₂ 质量分数较高、还原性组分较低的幔源包裹体; 也存在着 H₂ 质量分数较高, 但氧化性组分较低的包裹体(表 1), 证明东营凹陷经受过 2 种幔源流体的作用。

为进一步证明 2 类流体与东营凹陷有机成因油气发生了相互作用, 对天然气进行了同位素测试。图 3 中, 高青—平南断裂带 CO₂ 质量分数近乎 100% 的样品为幔源 CO₂, 与前人的成果相吻合^[3]。在高青—平南断裂带, R/Ra 为 2.54~3.19^[3], 具有明显的幔源氢特征。随着 CO₂ 含量的降低, 样品进入有机成因和幔源 CO₂ 混合共存区, 与图 1 中的富 CO₂ 流体混合线相对应。图 4 中存在 2 条直线, 对于 H₂ 质量分数较高的直线, w(H₂) 与 w(¹²⁹Xe)/w(¹³⁰Xe) 呈正比, 可能反映了幔源富氢流体的作用。

2.2 塔中地区

塔中地区存在深部流体的活动, 主要表现在富含非烃气体、热液矿物、火山活动和深大断裂发育等方面。塔中一号断裂切穿基底, 是盆内深浅部和基底以下物质能量交换的重要通道。在塔中西部及其以西广大地区在早二叠世末发生过一次区域性的火山喷发事件, 形成了厚度不等(一般数 m 至数十 m, 局部可达数百 m)、分布广泛的层状玄武岩。二叠纪, 塔

中地区主要烃源岩均已进入生烃门限。根据火山岩发育和塔中一号断裂带的展布,将西部火山岩发育区和塔中一号断裂带附近初步划分为深部流体活动区,为对比起见,将塔中地区中部作为对比的稳定区。

CO₂ 是塔中天然气中常见的非烃组分。王国安等^[16]对塔中天然气中的 CO₂ 进行了 δ(¹³C)测试,其中有 5 个样品(分别为 -5.9×10^{-3} , -7.4×10^{-3} , -7.5×10^{-3} , -2.5×10^{-3} , -0.4×10^{-3})属 CO₂ 无机成因。王国安等^[16]认为,塔中天然气中的 CO₂ 可能主要来自二叠纪基性岩浆的脱气作用(δ(¹³C) 值域为 $-5 \times 10^{-3} \sim -7 \times 10^{-3}$),也有一部分是海相碳酸盐岩分解产生的二氧化碳(δ(¹³C) 一般为 $-3.5 \times 10^{-3} \sim +3.5 \times 10^{-3}$),以及沉积碎屑岩中碳酸盐胶结物及泥质岩中碳酸盐矿物分解产生的二氧化碳(δ(¹³C) 一般为 $-15 \times 10^{-3} \sim -9 \times 10^{-3}$)。

塔中地区热液矿物萤石十分发育,如塔中 45 井萤石发育段厚达百 m 以上,充填了大量的裂缝和孔洞,塔中 47 井等其他一些井也发现有大量萤石。萤石晶粒粗大(一般在 5~10 mm 以上),以自形晶为主,其分布受断层、裂隙的控制。研究表明^[17],塔中地区萤石脉的形成主要与岩浆期后热液作用有关。

3 深部流体的成藏效应

3.1 深部流体上升过程中热能传递的定量研究

为了探讨深部流体上升到地球浅部带来的热量以及不同性质的深部流体所携带的热量的差异等,开展了深部流体上升过程中热能传递的定量研究。考虑到处于超临界状态下的深部流体含盐分很少,主要由 H₂O 和气体组分构成,甚至常以 CO₂, N₂ 和 CH₄ 等气体为主,我们的研究对象是一个相对组分有所变化的 H₂O-CO₂-N₂-CH₄ 多元超临界体系。

流体体系放热量或吸热量,需用其热焓变化来计算,而体系的焓变(ΔH)又需特定体系的状态方程来推导。对于超临界热流体,虽然已经建立了许多状态方程,但能够预测流体在较大温压范围内的多种热力学性质(特别是热焓)的状态方程很少。Duan 等^[18,19]建立了处理超临界流体(H₂O-CO₂-N₂-CH₄ 体系)的新的状态方程,可以预测超临界流体在广阔的温压范围内的 pVt 性质,笔者与段振豪对方程作了改进,发现它能预测超临界流体在 $t = 1.3 t_c$ (t_c 为 H₂O 的临界温度), $p = 0$ 至 $t = 1700$ °C, $p = 10$ GPa 这一温压范围内所有实验测量

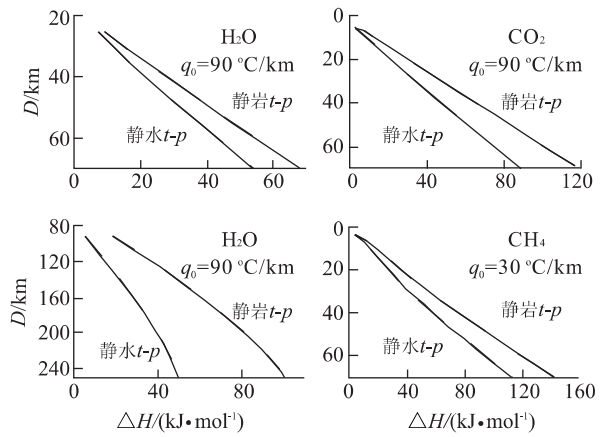


图 5 H₂O, CO₂ 和 CH₄ 热焓随深度的变化

Fig. 5 Variation of enthalpy of H₂O, CO₂ and CH₄ with depth

得到的热力学数据(包括 pVt 性质、逸度、热焓和超临界相分离数据等)^[20],为系统研究深部地质流体的热力学性质在地壳乃至上地幔中的变化规律提供了可能。据此,推导出热焓求解公式,应用这一公式,分别计算了深部流体上升过程中 H₂O, CO₂, CH₄, N₂ 在高地热梯度($q_0 = 120$ °C/km),中偏高地热梯度($q_0 = 90$ °C/km),中偏低地热梯度($q_0 = 60$ °C/km)和低地热梯度($q_0 = 30$ °C/km)条件下的摩尔热焓与深度的关系(图 5)。结果表明,深部超临界流体的热焓都随着深度的增加而增加。在浅部,为零到几十 kJ/mol;深部为几十到大于 100 kJ/mol。因此,来自深部的流体携带着巨大热量。静岩压力下的热焓大于静水压力下的热焓,且深度越大两者之间的差值越大。气体组分体系的热焓比 H₂O 体系高得多,一般高出 0.5~1 倍。

在东营凹陷存在许多异常热变现象,如郝科 1 井在 3 800~4 800 m 深度之间,出现的包裹体均一温度异常高;沙四段泥岩与孔店组泥岩中的镜质体反射率在埋深 3 900 m 左右,由约 0.7%增至 1.6%,然后至 5 200 m 又落在区域变化线上。该井周围火成岩不发育,推测是深部流体作用的结果^②。

通过对塔中地区 7 口研究井近千个烃源岩 t_{max} 数据的分析,发现不同类型地区的 t_{max} 差别十分明显(表 2)。活动区的 t_{max} 平均值多在 445 °C 以上,稳定区的则低于 440 °C;活动区 t_{max} 比较离散,标准方差多在 30 以上,而作为对比的稳定区其标准方差仅为 3~4,反映了活动区比较复杂的热演化条件。

② 金之钧,刘树根,曾溅辉. 中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测. 09 课题中期工作进展报告(G1999043309), 2001. 32~33.

表 2 塔中地区部分钻井中上奥陶统烃源岩热解数据分析
Table 2 Pyrogenation data of source rocks in Upper Ordovician of wells in Central Tarim basin

指标	活动区				稳定区			
	TZ10	TZ45	TZ44	TZ30	TZ33	TZ101	TZ52	
$t_{max}/^{\circ}C$	平均	443	451	477	446	449	437	439
	S_d	17.5	31.6	36.9	29.3	39.4	3.29	4.3
TPI	平均	0.25	0.45	0.54	0.40	0.49	0.21	0.13

注: S_d 标准方差; TPI 总油气产率指数。

表 3 热模拟实验样品热解参数

Table 3 Pyrogenation data of samples for experimental simulation

样品号	$\omega(TOC)/\%$	$t_{max}/^{\circ}C$	$S_1/(mg \cdot g^{-1})$	$S_2/(mg \cdot g^{-1})$	PI
面 16	1.76	433	0.56	8.63	0.06
樊 15	2.74	438	1.86	10.64	0.15
和 4	0.49	421	0.05	0.13	0.28

注: S_1 . 游离烃质量分数; S_2 . 热解烃质量分数; PI . 产率指数。

3.2 加氢生烃效应

有机质热演化生烃不仅需要热,而且是个缺氢的过程。富氢流体注入沉积盆地势必会对油气的生成产生重要影响。Jin 等^[21]曾经利用橄榄石、氟石和烃源岩进行了模拟实验,发现生油岩与沸石和橄榄石相互作用后,甲烷的产率增加了 2~3 倍。虽然加入橄榄石,认为有氢产出而使得甲烷含量迅速增加,但是这些矿物及其所携带的金属元素也可能起到催化作用。因而,很有必要开展纯粹的加氢生烃热模拟实验。在东营凹陷和塔中地区,尽量采集成熟度较低的烃源岩(表 3)。随后开展了加氢与未加氢热模拟对比实验,氢的加入量为 100 mL,其他实验条件为: 200~450 °C 共 6 个温度点加温,反应时间 48 h,样品量 100 g,其中一烃源岩样品(樊 15)加 20 g 水。

图 6 中,对于 II 2 型干酪根而言,加氢生烃效应最显著的阶段是生烃高峰以后,可达 147%,由此推论过成熟烃源岩在富氢流体的作用下可继续生成大量烃类。此外,水产生的压力效应抵制了解气生成。图 6 还表明,腐植型干酪根的加氢生烃效应在各个阶段均较显著。因此越是贫氢的干酪根,其加氢生烃效应越显著。

为了验证加氢生烃效应是否在自然界中发生过,对东营凹陷深大断裂附近大芦湖油田和远离深大断裂的牛庄油田处的烃源岩进行了对比分析(表 4)。深部流体活跃区烃源岩 TOC 低于稳定区,但是抽提物却高于稳定区,呈相反趋势,表明活跃区

表 4 东营凹陷烃源岩样品及抽提物分析^[22]

Table 4 Data of source rocks and their extractable matter in Dongying sag^[22]

取样区域	样数	抽提物	TOC	烷烃	芳香烃	异构组分	沥青
							$\omega_B/\%$
I	6	1.80	13.1	41.98	8.26	39.41	9.7
II	4	1.88	11.5	45.30	12.21	34.69	7.8

I. 大芦湖油田; II. 牛庄油田

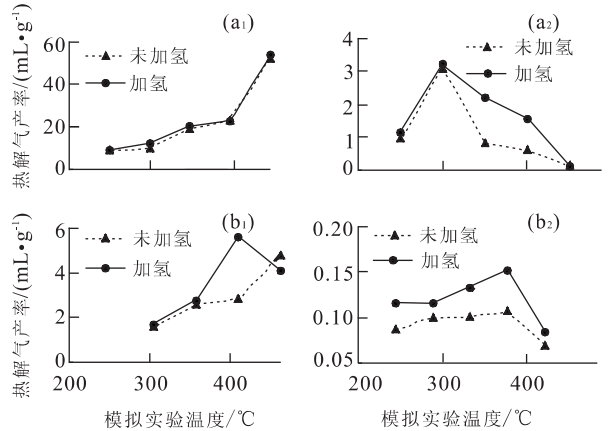


图 6 不同类型的烃源岩加氢与未加氢热模拟实验结果
Fig. 6 Experimental simulation results of different types of source rocks with and without hydrogen addition
a. 东营凹陷樊 15 井沙三段烃源岩(干酪根类型 II 2, 加水); b. 塔中地区 6 井石炭系烃源岩(干酪根类型 III, 未加水)

的产率率可能高于稳定区。活跃区饱和烃和异构组分含量较高,芳香烃含量低,可能表明氢的加入。

油气产率指数 TPI 是可溶烃与总烃量(包括热解烃和可溶烃)的比值,代表烃源岩有机质转化为烃类的多少, TPI 较高表明有较多的烃类生成。塔中地区活跃区 TPI 远高于稳定区,深部流体的活跃也可能对于烃源岩生烃具有重要的促进作用。成熟度较高可能是活动区样品 TPI 较高的原因之一(表 2)。

4 讨论与结论

幔源流体热能传递定量模型研究表明,深部超临界流体的热焓都随着深度的增加而增加。定量计算进一步表明,来自于 100 km 深处的 1 g H₂O,就可以使浅部 1 000 g H₂O 升高 1 °C,因此少量深部流体的注入,就会产生显著的热效应。幔源流体有着较强的穿透能力,影响范围也是广泛的。相同温压下,CO₂, CH₄ 和 N₂ 的摩尔热焓都比 H₂O 大,说明气体组分是地球内部热能向外散发的良好载体。同一深度上,静岩压力下的热焓比静水压力下的热焓大,所

以,断裂的开裂也会导致热量释放。

幔源富氢流体注入盆地,可补偿有机质热降解所需要的氢,从而大幅度提高烃的产率。对于腐泥型干酪根而言,在生烃高峰期之后,加氢生烃效应最显著。因此,过成熟烃源岩在幔源富氢流体的作用下,仍可生成大量的烃类,产率可提高 147%。对于腐植型干酪根而言,加氢生烃效应在各个阶段都较显著。幔源流体有着较强的穿透能力,影响范围也是广泛的。总之,越是缺氢的烃源岩,这种加氢生烃效应越显著。由于干酪根类型和过成熟的原因,曾经认为勘探远景较差的地区,只要存在幔源流体的活动,可能仍有较大的勘探潜力。目前已经发现的有幔源富氢流体活动的盆地为数不多。实际上在东营凹陷也是先发现幔源 CO₂。在东营凹陷,富氢流体的发现,可能意味着更多的盆地曾经经历过这种流体的作用。

工作中,胜利油田李丕龙、张善文、廖永胜等给予了大力支持,刘惠民、冯有良等提供了大量的地质资料,笔者一并致谢。

参考文献:

- [1] Navon O, Hutcheon I D, Rossman G R, et al. Mantle-derived fluids in diamond micro-inclusions [J]. *Nature*, 1988, 335(6193): 784—789.
- [2] 张铭杰,王先彬,李立武. 地幔流体组成[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 401—412.
ZHANG M J, WANG X B, LI L W. Composition of mantle fluid [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2): 401—412.
- [3] 戴金星,宋岩,戴春森,等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京:科学出版社,1995.
DAI J X, SONG Y, DAI C S, et al. Inorganic origin gas and its accumulation conditions in eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [4] 高波,陶明信,王万春. 深部热流体对油气成藏的影响[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(1): 30—34.
GAO B, TAO M X, WANG W C. Influence of deeply sourced thermal fluid on the formation of hydrocarbon reservoirs [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(1): 30—34.
- [5] 路凤香. 深部地幔及地幔流体[J]. *地学前缘*, 1996, 3(3—4): 181—185.
LU F X. Deep mantle and its fluids [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(3—4): 181—185.
- [6] Bell D R, Rossman G R. Water in Earth's mantle: the role of nominally anhydrous minerals [J]. *Science*, 1992, 255: 1391—1397.
- [7] 杜乐天,王驹. 气体地球动力学——一个重要的研究方向[J]. *地球科学进展*, 1993, 8(6): 66—73.
DU L T, WANG J. Gas geo-dynamics—an important research field [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1993, 8(6): 66—73.
- [8] Haggerty S E. Superkimberlites: a geodynamic diamond window to the Earth's core [J]. *EPSC*, 1994, 122: 57—69.
- [9] 杜乐天. 烃碱流体地球化学原理[M]. 北京:科学出版社,1995. 478, 490.
DU L T. Geochemical principles of hydrocarbon alkali-fluids [M]. Beijing: Science Press, 1995. 478, 490.
- [10] Badding J V, Hemley R J, Mao H K. High-pressure chemistry of hydrogen in metals: in situ study of iron hydride [J]. *Nature*, 1991, 253(5018): 421—424.
- [11] 陈丰. 氢——地球深部流体的重要源泉[J]. *地学前缘*, 1996, 3(3—4): 72—79.
CHEN F. Hydrogen—the important source of fluid in Earth interior [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(3—4): 72—79.
- [12] Angino E E, Coveney R M. Hydrogen and nitrogen—origin, distribution, and abundance [J]. *Oil & Gas Journal*, 1984, 82(3): 142—146.
- [13] Coveney R M, Goebel E D, Zeller E, et al. Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas [J]. *AAPG Bull*, 1987, 71(1): 39—48.
- [14] Marty B, Gunnlaugsson E, Jambon A, et al. Gas geochemistry of geothermal fluids, the Hengill area, southwest rift zone of Iceland [J]. *Chemical Geology*, 1991, 91: 207—225.
- [15] Lesniak P M, Sakai H, Ishibashi J. Mantle helium signal in the West Carpathians, Poland [J]. *Geochemical Journal*, 1997, 31(6): 383—394.
- [16] 王国安,申建中,季美英. 塔北、塔中天然气中 CO₂ 的碳同位素组成及成因探讨[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(1): 36—39.
WANG G A, SHEN J Z, JI M Y. Carbon isotopic composition and origin of carbon dioxide in natural gases in northern and central Tarim basin [J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29(1): 36—39.
- [17] 钟广发,马在田,刘瑞林. 塔里木盆地奥陶系萤石脉—油气叠合成藏作用——高分辨率成像测井资料提供的证据[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(4): 576—582.
ZHONG G F, MA Z T, LIU R L. Polygenesis of fluorite veins and hydrocarbons in Ordovician in Tarim basin [J]. *Geological Journal of China Universities*,

2000, 6(4): 576—582.

- [18] Duan Z, Moller N, Weare J H. Molecular dynamics simulation of pVt properties of geological fluids and a general equation of state of nonpolar and weakly polar gases up to 2 000 k and 20 000 bar [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 3839—3845.
- [19] Duan Z, Moller N, Weare J H. A general equation of state for super critical fluid mixtures and molecular dynamics simulation of mixture $PVTX$ properties [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 1209—1216.
- [20] 孙睿, 胡文瑄, 段振豪. 超临界流体热力学函数的理论计算[J]. *地质论评*, 2000, 46(2): 167—177.
- SUN R, HU W X, DUAN Z H. Theoretical calculation of thermodynamic functions of super critical fluids [J]. *Geological Review*, 2000, 46(2): 167—177.
- [21] Jin Q, Xiong S, Lu P. Catalysis and hydrogenation: volcanic activity and hydrocarbon generation in rift basins, eastern China [J]. *Applied Geochemistry*, 1999, 14(5): 547—558.
- [22] Jin Z, Sun Y, Yang L. Influences of deep fluids on organic matter of source rocks from Dongying depression, East China [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2001, 19(5): 479—486.

Primary Study of Geochemical Features of Deep Fluids and Their Effectiveness on Oil/Gas Reservoir Formation in Sedimental Basins

JIN Zhi-jun^{1,2}, ZHANG Liu-ping^{1,2}, YANG Lei^{1,2}, HU Wen-xuan³

(1. Basin & Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Beijing 102249, China; 3. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: This paper focuses on geochemical features of deep fluids (mainly mantle-derived fluid) and their effect on oil/gas reservoirs formation in Dongying sag, Jiyang depression and Central Tarim basin, by using isotopic geochemistry, organic geochemistry and thermodynamics. It is found that both CO_2 - ($\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$) and H- ($\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_4+\text{H}_2$) rich fluids from the mantle are injected into Dongying sag and CO_2 -rich fluid in Central Tarim basin. The quantitative study of heat transformation of deep fluid ascendance shows that the mantle is an effective heat carrier. The evidence of thermal anomalies in Dongying sag and Central Tarim basin proves the existence of heat effect of deep fluids. Hydrocarbon generation from kerogen degradation not only needs heat but also actually requires hydrogen. It is known that mantle-derived, hydrogen-rich fluid may increase hydrocarbon production when the fluid meets source rocks in basins. Experimental hydrogenation simulation shows that hydrogen addition increases the production greatly. For sapropelic kerogen, the effect of hydrogenation becomes evident after fastigium of hydrocarbon generation and the production can increase up to 147%. While for humic kerogen, hydrocarbon production by hydrogenation can be increased at every stage of thermal evolution. It is found that deep fluids increase production rate of the source rocks in Dongying sag and Central Tarim basin. Hence it can be concluded that the mantle-derived fluids have great influence on hydrocarbon generation from source rocks in both energy and substance supply.

Key words: mantle-derived fluid; oil/gas reservoirs formation; isotopic geochemistry; thermomechanics; experimental hydrogenation simulation.