

深源 CO₂ 对沉积盆地油气成藏的影响^{*}

刘国勇^{1,2} 金之钧^{2,3} 张刘平⁴

(1. 中国石油大学盆地与油藏研究中心 2. 教育部“石油天然气成藏机理”重点实验室·中国石油大学
3. 中国石化集团石油勘探开发研究院 4. 中国科学院地质与地球物理研究所)

刘国勇等. 深源 CO₂ 对沉积盆地油气成藏的影响. 天然气工业, 2006, 26(11): 31-34.

摘 要 深部地壳和沉积盆地中已经有大量深部来源的 CO₂ 被发现, 这些 CO₂ 的存在已经对油气的成藏产生了重大影响。研究表明, 在地质条件下, CO₂ 不仅能与 H₂ 发生费托反应生成烃类物质, 还可以被 Fe₂SiO₄ 还原为 CH₄; 地球深部的这些 CO₂ 是以超临界状态存在的, 这种状态的 CO₂ 可以大量吸附和溶解壳幔中分散的有机质, 并促使其运移; CO₂ 还能与盆地流体构成酸性介质, 溶解盆地中的碳酸盐矿物和铝硅酸盐矿物, 显著改善储层物性。加强这方面研究, 不仅对于油气的勘探开发有重大指导作用, 而且对于油气资源评价也有深远影响。

主题词 深源二氧化碳 费托反应 超临界状态 次生孔隙 储集层 物性

近年来, 自然界中出现了大量高浓度源自地球深部的 CO₂ 气藏^[1-7], 通过对这些气藏进行地质背景分析和地球化学测试, 学者们认识到在地球深部存在大量的富 CO₂ 流体^[8,9]。这些发现引起了学者们的广泛关注, 他们投入了大量精力对其进行研究, 但研究主要集中在 CO₂ 本身, 如形成原因、分布规律、成藏模式、资源潜力和评价方法等方面。随着油气勘探的进程中大量 CO₂ 的出现, 不断有学者开始关注这些 CO₂ 与油气的关系, 时至今日, 地球深部来源的 CO₂ 对油气成藏的影响已经成为油气勘探工作中不容回避的问题。加强这方面的研究, 不仅对于指导油气勘探开发、扩展油气勘探领域有重大现实意义, 对石油地质学的完善和发展也具有重大理论意义。

一、壳幔中广泛分布的深源 CO₂

世界范围内, 已经发现了大量高浓度 CO₂ 气藏, 仅在我国东部盆地和大陆架上就发现了 29 个 CO₂ 气藏, 这些气藏中很多 CO₂ 含量超过 90%, 有的甚至达到 99% 以上; 在中部和西部的四川盆地和塔里木盆地, 也出现了大量富含 CO₂ 的天然气藏(见表 1)。这些 CO₂ 气藏大多是来源于地球深部, 因为地球深部广泛存在着大量的富 CO₂ 流体^[8,9], 这些富 CO₂ 流体从地球深部不断向外排放 CO₂, 并通过

表 1 中国部分沉积盆地天然气中 CO₂ 含量表

地区	地 点	层位	含量 (%)	资料来源
松辽盆地	万金塔 Wan4 井	K ₁ q ³	99.76	李先奇, 等, 1997
渤海湾盆地	黄骅翟庄子 Jiang152	Es ₁	98.61	李先奇, 等, 1997
苏北盆地	黄桥气田	C ₃	90.00	郭念发, 等, 2000
三水盆地	沙头圩 Shuishen9	E ₁₋₂ b	99.55	李先奇, 等, 1997
东海盆地	石门潭 Shimentan1		99.42	李先奇, 等, 1997
珠江口盆地	惠州 Huizhou22-1-1 井	Z _j	99.53	向凤典, 1994
莺歌海盆地	东南区 B22-1		93.00	何家雄, 等, 1998
塔里木盆地	塔北东河塘 DH11	C	24.50	王国安, 等, 2001
楚雄盆地	乌龙 1 井		98.22	李秀梅, 等, 2002
四川盆地			8.00	戴金星, 等, 2001

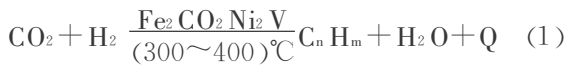
深大断裂或岩浆通道运移至浅部地壳或地表, 据全球陆上和海底火山观测, 排放量约为 11×10^{12} mol/a^[10]。这些源自地球深部的海量的 CO₂ 在进入沉积盆地的过程中, 必然会与沉积盆地的各种介质接触并发生各种物理和化学反应, 从而对油气的成藏造成重大影响。

二、CO₂ 对于生烃的影响

地球深部存在大量富 CO₂ 流体, 在适宜的条件下, 这些流体所排出的 CO₂ 在上升的过程中可以与 H₂ 发生著名的费托反应生而生成烃类^[11]:

^{*} 本文受到国家重点基础研究发展规划“973”项目(2005CB422108)和(2004CB720503)联合资助。

作者简介: 刘国勇, 1978 年生, 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心博士研究生; 研究方向为石油地质学。地址: (102249)北京市中国石油大学“盆地与油藏”研究中心。电话: (010)89733423。E-mail: liuguoyong180@sina.com



有学者在实验室中进行了费托反应实验,实验表明,当以上条件满足的时候,CO₂ 和 H₂ 可以发生费托反应,并生成一些烃类物质,而且所合成烃类的成分与性质几乎与原油完全一致^[12]。

这也说明,在地球内部,完全可能因为费托反应的发生而形成大量烃类;首先,在地球深部存在大量的富 CO₂ 流体,这些富 CO₂ 流体从地球深部不断向外排放海量的 CO₂,这些 CO₂ 可以通过深大断裂或岩浆通道进入沉积盆地,这为费托反应的发生提供了先决条件;其次,在地球深部还存在大量的富 H 流体^[8,9]。地球在排放 CO₂ 的同时也在不停排 H,在很多地方已经发现这种无机成因的氢气藏^[13],而且越向地球深部,H₂ 的含量越高,到中下地幔和地核则主要是 H、H₂ 和氢化物^[14],这为费托反应的发生提供了物质保障;再次,在很多沉积盆地中广泛发育蛇纹石化超基性岩或玄武岩,这些富含金属矿物岩石为费托反应提供了大量的催化剂;最后,在断裂发育或深部流体活动频繁的地方,肯定会有大量温度适宜的区域,费托反应极有可能在这些部位发生。

世界范围内油气田的分布规律也可以为费托反应的发生提供佐证:世界一半以上油气资源分布在与板块俯冲及其相联系的各种断裂带附近,而且在这些断裂带附近发现大油气田的机会更多^[15],例如加拿大近海、北美东部、中部、西部、北海及沙特阿拉伯等含油气盆地的基底均存在与板块俯冲作用有关的深大断裂;拥有世界近三分之二油气储量的波斯湾地区,就分布在被推覆到陆架之上的扎格罗斯碰撞带的蛇绿岩附近^[10];加利福尼亚丰富的石油储量,也与海岸山脉的蛇绿岩推覆有关^[16]。世界范围内大

多数油气藏都紧邻断裂带和蛇绿岩带分布,而这些区域正好是费托反应最可能发生的地方,这一分布规律也提醒我们要充分关注这种生烃机制,这种反应的发生将会极大地拓展油气的勘探领域。

除参与费托反应外,在 250 °C 条件下,CO₂ 还可以被 Fe₂SiO₄ 直接还原为 CH₄,东营凹陷部分烃类的生成就是这种反应的结果^[17]。此外,深部富 CO₂ 流体是热能的良好载体,这种流体进入沉积盆地后会为盆地介质提供大量热能,从而促进烃源岩生烃,这也得到了实例的验证^[18]。

三、CO₂ 对于烃类的溶解运移

在特定的温度和压力条件下,流体均呈超临界状态存在^[19,20]。这种状态是指常温下呈气态或液态的物质在温度和压力高于其临界温度和压力时的一种状态。这种状态在相图上为气体—液体共存曲线的终点,气相和液相之间的差别在该点消失,物质呈一种均匀的流体相存在。地层条件下,通常当埋藏深度达到 750 m 时,CO₂ 就会以超临界状态存在(假设水的密度为 1.0 g/cm³、压力系数为 1.0、地温梯度为 3 °C/100 m、地表平均温度为 10 °C,此时 750 m 埋深的温度为 32.5 °C、流体压力为 7.45 MPa,已经超过高于 CO₂ 的临界温度和压力)。

超临界状态的流体具有很多特殊的性质;其一,微小的压力变化就可以造成超临界流体密度很大的变化,因此,只要有微小的压力变化可以造成几个数量级的溶解度差;其二,超临界流体的密度介于气体和液体之间,许多物理性质也与这二者有所不同。从表 2 可以看出,超临界状态的流体的扩散系数和粘度等物性参数均介于气、液之间,因而它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(据孙楠,2000)

物性参数	密度 (×10 ³ kg/m ³)	扩散系数 (×10 ⁻⁴ m ² /s)	黏度 (×10 ⁻³ Pa·s)
气体	0.62, 0×10 ⁻³	0.1~0.4	(1~3)×10 ⁻²
超临界流体	0.2~0.9	(0.2~0.7)×10 ⁻³	(1~9)×10 ⁻²
液体	0.6~1.6	(0.2~2.0)×10 ⁻⁵	0.2~3.0

地球内部含有大量的 CO₂,由于它的临界参数相对较低(7.38 MPa、31.1 °C)^[20],大部分 CO₂ 以超临界状态存在。这种超临界 CO₂ 流体已经作为一种优质的萃取剂,在生物、食品和医药等行业得以广泛应用。超临界状态的 CO₂ 不仅能很快抽提出沉积物中的甾烷、藿烷和芳香烃,而且对油页岩和煤中的有

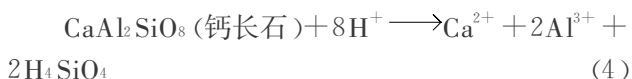
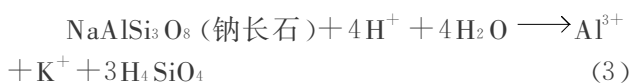
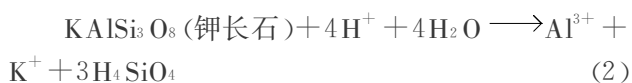
机质也能进行萃取,这种萃取方法已经在实验室中得以应用。地球深部还含有大量分散的烃类,这已经被超深钻的结果所证实,而超临界 CO₂ 流体对于分散的有机质具有非凡的富集能力,这种作用使得超临界状态深部流体对分散的油气组分具有明显的富集作用。这种作用可能会导致无机成因油气藏的

出现。

在澳大利亚奥特韦 (Otway) 盆地,发现油气显示的同时也发现的大量高浓度的 CO_2 气田,有学者认为,火山岩浆源的高浓度超临界态 CO_2 对奥特韦和库珀盆地油气的形成可能起着重要作用^[21]。在基岩中,已经发现了一些无机成因的油气藏。在这些油气藏附近并没有生油岩存在,但它们往往与一些深部断层并存^[22]。这些现象的出现可以用超临界流体的溶解运移来解释:地球内部存在大量的烃类,超临界流体可以对这些烃类进行富集并沿深大断裂向上运移,在这个过程中由于与围岩的相互作用,超临界流体的温度和压力会不断降低,由于它具有溶解和密度方面的特殊性质,油气溶解度也会减小,油气不可避免的会从流体中分离出来。如果这些逸出的烃类在断层、孔隙或裂缝发育的区域被释放出来,它们会渐渐逸散在地壳中;如果这些烃类被释放到有效圈闭中时,就可能被捕获,形成具有无机成因的油气藏。

四、 CO_2 对于储层的影响

地球深部不断地排放的 CO_2 进入沉积盆地后,会和盆地流体发生作用。这些 CO_2 主要以碳酸根或碳酸氢根的形式溶于盆地流体中,影响溶液的 pH 值,离解出氢离子,并对盆地介质产生重要影响。长石也是一种重要的造岩矿物,在砂岩中,它的平均含量为 10%~15%。从物理学性质来看,它的解理和双晶都很发育,易于破碎,从化学性质上来说,长石非常容易水解,尤其是在酸性介质条件下,其反应式如下^[23]:



酸性介质条件下,钾长石、钠长石和钙长石都会发生蚀变而形成大量的次生孔隙,这种储层已经引起了学者们的关注。

石英也是砂岩的主要成分,它在砂岩中的含量可达 66.8%,虽然它的抗风化能力较强,但在一定的条件下可以被溶解。在长石溶解中,由于氢离子的消耗使溶液 pH 值升高,慢慢会形成有利于石英溶解的环境,石英会因此而溶解形成大量的次生孔隙,在泌阳凹陷发现了这类次生孔隙的存在^[24]。

随着大量的 CO_2 在盆地流体中溶解,当溶液具有较强的酸性时,对碳酸盐岩的溶解能力大大增强,这种流体在碳酸盐岩地层中流动时,便逐渐将岩石溶解,并将形成重碳酸盐带走,这种流体溶蚀碳酸盐岩的反应可以表示为:



大量的 CO_2 进入沉积盆地,会导致地层流体 pH 值的降低,从而导致地下碳酸盐矿物和铝硅酸盐矿物的溶解。这类作用也可以使由碳酸岩矿物和铝硅酸盐矿物胶结的砂岩溶解,从而产生大量次生孔隙^[25]。这类孔隙的存在可以显著改善储层物性。

此外, CO_2 对于油气藏形成也有一些不利的影响。如莺歌海盆地出现的大量高浓度的 CO_2 气藏已经成为该区勘探中亟需回避的风险^[26];珠江口盆地也出现了火山—岩浆成因的 CO_2 取代早期形成的油气藏中的油气现象,从而导致勘探失利^[3]。这些问题的出现也提醒我们要对 CO_2 的油气成藏效应给予更多的关注。

五、讨论与结论

地球深部和沉积盆地中大量地出现 CO_2 已经对油气的成藏产生了重大的影响,这些 CO_2 的出现和存在可以促使油气大量聚集成藏,同时它对已经形成的油气藏也可以产生破坏作用。但是这方面的研究工作有待深入,有许多问题亟需解决:首先,应该积极探索地壳中 CO_2 的分布规律,弄清 CO_2 气藏分布的主控因素;其次,应该运用模拟实验的方法,进一步明确 CO_2 对于油气生成和运聚方面的影响;最后,要结合具体的油气藏分析 CO_2 对于油气成藏的影响。假以时日,如果这些问题能够得以圆满解决,我们才能趋利避害,更有效地进行油气的勘探与开发。

参 考 文 献

- [1] 李先奇,戴金星.中国东部二氧化碳气田(藏)的地化特征及成因分析[J].石油实验地质,1997,19(3):215-221.
- [2] 郭念发,尤孝忠,雷一心,等.黄桥 CO_2 气田特征及其勘探远景[J].天然气工业,2000,20(4):14-19.
- [3] 向风典.珠江口盆地(东部)的 CO_2 气藏及其对油气聚集的影响[J].中国海上油气(地质),1994,8(3):155-162.
- [4] 何家雄,陈刚.莺歌海盆地 CO_2 分布及初步预测研究[J].石油勘探与开发,1998,25(2):20-26.
- [5] 李秀梅,刘映辉,温景萍.楚雄盆地乌龙 1 井天然气的地球化学特征和地质意义[J].天然气工业,2002,22(5):16-20.

- [6] 王国安,申建中,季美英.塔北、塔中天然气中 CO_2 的碳同位素组成及成因探讨[J].地质地球化学,2001,29(4):36-39.
- [7] 戴金星,夏新宇,卫延召,等.四川盆地天然气的碳同位素特征[J].石油实验地质,2001,23(2):36-39.
- [8] 金之钧,张刘平,杨雷,等.沉积盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应初探[J].地球科学,2002,27(6):659-665.
- [9] 路凤香.深部地幔及深部流体[J].地学前缘,1996,3(4):181-186.
- [10] 涂光炽.关于 CO_2 若干问题的讨论[J].地学前缘,1996,3(3-4):53-61.
- [11] SZATMARI P. Petroleum formation by Fisher-tropsch synthesis in plate tectonics [J]. AAPG Bull,1989,73(8):989-998.
- [12] 张景廉,张平中,吕锡敏.油气无机成因学说的新进展[J].地球科学进展,1998,13(1):44-50.
- [13] 刘国勇,张刘平,杨振平.天然气中氢气的地化特征及油气成藏效应[J].天然气工业,2004,24(11):31-33.
- [14] 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.
- [15] KLEMME H O. Petroleum basin-classification, and characteristics[J]. Journal of Petroleum Geology,1980,3:87-203.
- [16] 朱岳年.二氧化碳地质研究的意义及全球富含二氧化碳天然气的分布特点[J].地球科学进展,1997,12(1):26-31.
- [17] 金之钧,张刘平,曾溅辉,等.东营凹陷与幔源富 CO_2 流体有关的复合成因烷烃[J].科学通报,2002,47(16):1276-1280.
- [18] 金之钧,杨雷,曾溅辉.东营凹陷深部流体活动及其生烃效应初探[J].石油勘探与开发,2002,29(2):42-44.
- [19] 孙橐,谢鸿森,郭捷,等.地球深部流体与油气生成及运移浅析[J].地球科学进展,2000,15(3):283-288.
- [20] 何涛,胡红旗,陈鸣才,等.超临界二氧化碳—高分子化学中的绿色介质[J].功能高分子学报,2003,16(2):281-286.
- [21] MCKIRDY D M, CHIVAS A R. Nonbiodegraded aromatic condensate associate with volcanic supercritical carbondioxide, Otway Basin: implications for primary migration from terrestrial organic matter [J]. Organic Geochemistry,1992,18(5):611-627.
- [22] Ulrich Mann(著),舒云涛(摘译).油气初次运移通道的沉积岩石学和岩石物理学研究[J].天然气勘探与开发,1993,3:19-26.
- [23] 罗孝俊,杨卫东,李荣西,等.pH 值对长石溶解度及次生孔隙发育的影响[J].矿物岩石地球化学通报,2001,20(2):103-107.
- [24] 邱隆伟,姜在兴,陈文学,等.一种新的储层孔隙成因类型——石英溶解型次生孔隙[J].沉积学报,2002,20(4):621-627.
- [25] 杨晓宁,陈洪德,寿建峰,等.碎屑岩次生孔隙形成机制[J].大庆石油学院学报,2004,28(1):4-7.
- [26] 刘宝明,何家雄,夏斌,等.国内外 CO_2 研究现状及发展趋势[J].天然气地球科学,2004,15(4):412-417.

(收稿日期 2006-07-11 编辑 黄君权)