

文章编号: 1001-6112(2007)03-0259-06

深部流体对天然气成藏影响

申宝剑^{1,2}, 黄智龙¹, 刘洪文¹, 许成¹, 严再飞^{1,2}, 陈觅^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 深部流体是地球内部物质和能量交换最活跃的组分, 超临界状态存在的深部流体中含有大量的气体, 通过地震、火山或其他各种构造通道向地球的浅部运移。上升过程中由于物理化学条件变化(主要是温度和压力降低), 其中的挥发分首先从岩浆中析出, 在合适的构造部位直接聚集成藏; 同时流体上升过程中带出的大量地球深部的物质或能量为天然气形成提供有利条件。中国东部郯庐大断裂带气藏天然气碳同位素及稀有气体地球化学特征表明, 深部流体直接或间接对天然气形成以及运移有重要的影响。国外一些天然气形成的模拟实验结果也显示以二氧化碳和水为主的流体在深部油气的无机合成、运移和富集中起着重要的作用。深入研究深部流体与天然气形成之间的关系可以为天然气勘探提供重要的方向和目标, 将对天然气成因及来源产生重要的理论和实践意义。

关键词: 深部流体; 超临界状态; 天然气成因; 天然气成藏**中图分类号:** TE122.3**文献标识码:** A

EFFECTS OF DEEP-SOURCED FLUIDS ON THE FORMATION OF NATURAL GAS RESERVOIRS

Shen Baojian^{1,2}, Huang Zhilong¹, Liu Hongwen¹, Xu Cheng¹, Yan Zaifei^{1,2}, Chen Mi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposits Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang, Guizhou, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: The deep-sourced fluids are important in material and energy transfer on earth interior. Deep-sourced fluid is a kind of supercritical fluid composed of vast of gases. These gases will move to the shallow through earthquake or deep fault belt. The temperature and pressure will reduce during the fluid uplifting. A mass of gases will extract from fluid or magma. On the other hand, it can transmit energy and material, which obviously contributes hydrogen to hydrocarbon generation. Applying models of stable carbon isotope and rare gas geochemistry, the natural gases along Tanlu Fault Belt were studied. The result shows that the deep-sourced fluid effects on natural gas formation and migration. The same result was obtained with an experimental simulation of natural gas formation. The recent researches on the relationship between deep-sourced fluids and the formation of natural gas reservoir have important theoretic and practice significance to natural gas origin.

Key words: deep-sourced fluids; supercritical state; natural gas origin; natural gas reservoir forming

深部流体的涵义很广泛, 除包括水、二氧化碳、碳氢化合物、硫化氢、氮和氢等流体外, 还包括深部熔融的岩浆^[1]。近年来由于在一些盆地及油气田中深部流体活动的现象不断被揭示, 深部流体与天然气藏之间的关系成为当前研究的一个热点。处于超临界状态的深部流体本身就溶有大量的气体, 气体随流体在上升过程中析出并在特定的地质条件下聚

集成藏。对沿郯庐大断裂分布的一些 CO₂ 气藏分析表明, 几乎所有的 CO₂ 气藏都有地幔来源成分。同时深部流体将大量的地球深部物质及热量带出, 为天然气的形成提供物质和能量支撑; 深部流体中的微量过渡金属元素对有机质成烃有重要催化作用, 在一定条件下深部流体中的水与一些岩石发生水/岩交换反应, 为天然气的形成提供氢源。

收稿日期: 2006-03-13; **修订日期:** 2007-04-03。**作者简介:** 申宝剑(1978—), 男(汉族), 江苏泰州人, 博士生, 主要从事天然气地球化学及深部流体与天然气成藏关系研究。**基金项目:** 中国石化科技攻关项目(04-12-01, 06-12-01)。

1 地球深部流体的特性

现代玄武岩火山活动观测表明,火山喷发过程中从深部带到地表的水蒸气、二氧化碳及一些烃类气体的数量相当可观,此外幔源岩石中存在含水矿物以及无水硅酸盐矿物中含有大量的流体包裹体,这些事实都说明在地球深部有大量的水、二氧化碳等流体存在^[2]。不同的学者对深部流体有不同的定义^[3~6],但都强调深部流体中包括了大量非生物成因天然气,主要是以 C-H-O 或 CO₂-H₂O 为主的流体系统。当深部流体所处的环境氧逸度较高时,地幔流体种类主要为 CO₂-H₂O;反之,氧逸度较低时深部流体主要为 CH₄ 和 H₂^[7]。

根据目前对地球内部压力和温度的估算结果,在下地壳及深部,流体均处于超临界状况。Robert 等^[8]认为在这种状况下,当温度和压力达到某一特定值时,气相液相之间的区别消失,成为一种均匀的流体相,具有许多气相、液相所没有的独特性质,在常温下难溶的化合物变得易溶;而且这种超临界流体是一种理想的运输媒介,能够加快其内的化学反应的速率。地球深部的超临界流体可为天然气形成提供物质和能量。超临界水的介电常数大致相当于标准状况下一般有机溶剂的值,此时的水难以屏蔽掉离子间的静电势能,溶解的离子便以离子对形式出现。超临界水更近似于非极性有机化合物,它可对分散的有机质进行萃取富集,为油气成藏提供物源。随着近年来油气勘探研究的深入,油气无机生成(费托法、地球深层气无机成因)的证据越来越多。幔源 C-H-O 流体是一种高密度的超临界流体,本身可发生成矿作用。超临界水的高电离程度提供了大量的氢离子,使有机质热解生成的碎片能立即加氢而稳定,尤其是对贫氢的腐质型有机质导致了液态烃产率的提高。溶解和扩散能力很强的深部热流体所携带的高热能可使沉积盆地的地温升高,加快烃源岩的热演化,促进油气的生成^[9,10]。

2 深部流体与天然气藏的关系

在固体矿床学和地球化学领域,深部流体壳幔相互作用已经被众多学者认同,深部流体活动规律及对内生矿床的成矿效应是地学研究的前缘领域之一^[11~18]。但深部流体与盆地内流体在物质与能量等方面的互相作用及对天然气成藏效应甚少有人研究。张景廉^[19]研究了国内外一些盆地的油气藏,认为热液烃对油气的形成起了积极的作用,热

液烃来源于地球深部,在地球深部存在一个富含 CH₄,CO₂(为主)的热液流体“库”,当它上升过程中进入不同的圈闭时会发生分异,一部分形成了以 CH₄ 为主的天然气藏,另一部分则形成了以 CO₂ 为主的气藏。

深部流体主要通过深大断裂以及岩浆喷发进入沉积盆地,从而与沉积盆地的物质和能量进行交换,对沉积盆地的油气生成、聚集、运移、成藏产生重要的影响。

2.1 深部流体与二氧化碳气藏

赫英等^[7]研究认为地幔由浅至深有 CO₂-CH₄-H₂ 富集的趋势,其中壳幔界面附近可能是 CO₂ 的聚集带。从国内 CO₂ 气田的分布和地质特征可以看出以下特征:CO₂ 气田的形成与火山岩活动带有关,目前已发现的 CO₂ 气藏大多分布在地史上或现代的火山活动带;CO₂ 气的运移聚集与深大断裂带关系密切,它的分布明显地受控于区域性大断裂;CO₂ 气藏往往与地热流值较大和地温梯度较高的含油气盆地及碳酸盐岩分布区有关。

我国东部裂陷伸展,地壳减薄,地幔上拱,岩浆活动频繁,该地区发育郯庐断裂带。郯庐大断裂是自中生代以来长期活动的巨型断裂,是一条超壳的深大断裂,也是深源岩浆活动带。新近纪以来主要以拉张为主,进入第四纪以挤压为主。在这过程中派生出一些小断层沟通了深部断层,这些断层为深部流体的上涌提供了通道。这与我国 CO₂ 气藏主要分布在郯庐断裂带两侧的松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地和三水盆地是相一致的。表 1 统计了沿郯庐断裂带分布的 CO₂ 气藏的组分及同位素特征,其中以东海盆地丽水凹陷的 ZWS13-1-1 井 CO₂ 含量最高^[20],达 99.87%。

近年来的研究发现,有机成因 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般小于 -10‰,全球已发现的高含 CO₂ 气藏主要是幔源成因^[21]。戴金星等^[22]综合国内外众多学者有关 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 数据,归总出我国幔源无机成因 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要在 -8‰~-4‰之间。笔者统计了沿郯庐断裂带分布的 CO₂ 气藏的 $\delta^{13}\text{C}$ (图 1),从中可以看出,大部分 CO₂ 气藏的 $\delta^{13}\text{C}$ 都集中在 -8‰~-4‰之间,这就表明郯庐断裂带分布的 CO₂ 带有明显的地幔成分。气藏中的一部分气体是由地球深部的气体在壳幔活动过程中沿深大断裂向上逸散而形成。同样 CO₂ 气藏中的惰性气体携带了地球深部的信息。稀有气体同位素组成及其相对比值是地球脱气理论和地幔地球化学演化很重要的地球化学指标^[23,24]。利用 He 同位素比

表 1 郯庐断裂带气体组分与同位素特征^[20,52-57]

Table 1 Gas composition and isotopic characteristics of natural gas along Tanlu Fault Belt

| 地区 | 井号 | 层位 | 井深/m | 气体组分, % | | | | | $\delta^{13}C_{PDB}, \text{‰}$ | | $^3\text{He}/^4\text{He}, 10^{-6}$ | R/Ra |
|------|-----------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------------------------|------|
| | | | | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | CO ₂ | CH ₄ | | |
| 济阳坳陷 | 滨 4-6-6 | E ₅₄ | 1 469.7~1 481.0 | 72.50 | 23.52 | 1.28 | 1.33 | 0.62 | -4.57 | -51.67 | 3.87±0.11 | 2.76 |
| | 滨 4-13-1 | E ₅₄ | 1 453.0~1 455.0 | 72.68 | 22.71 | 1.28 | 1.26 | 0.85 | -5.08 | -52.73 | | |
| | 平气 4 | E ₅₄ | 1 459.4~1 474.5 | 75.33 | 20.89 | 1.25 | 1.12 | 0.62 | -5.36 | -51.67 | 3.85±0.11 | 2.75 |
| | 平 9-3 | E ₅₄ | 1 462.6~1 489.2 | 73.87 | 22.46 | 1.29 | 1.12 | 0.64 | -4.47 | -51.58 | 3.87±0.11 | 2.76 |
| | 平气 12 | E ₅₄ | 1 470.5~1 498.0 | 74.2 | 21.63 | 1.33 | 1.12 | 0.64 | -4.36 | -51.87 | 3.85±0.11 | 2.75 |
| | 平 12-61 | E ₅₄ | 1 452.4~1 487.6 | 79.17 | 17.13 | 1.24 | 1.10 | 0.59 | -4.5 | -51.80 | 3.61±0.10 | 2.58 |
| | 平 13-2 | E ₅₄ | 1 453.6~1 483.2 | 68.85 | 26.43 | 1.38 | 1.16 | 0.68 | -4.74 | -52.69 | 3.59±0.11 | 2.56 |
| | 平 13-4 | E ₅₄ | 1 450.8~1 486.4 | 74.92 | 19.04 | 1.20 | 2.18 | 0.70 | -4.43 | -51.74 | 3.55±0.19 | 2.54 |
| | 平 14-3 | E ₅₄ | 1 467.0~1 484.6 | 77.93 | 18.17 | 1.15 | 1.08 | 0.62 | -4.32 | -51.82 | 4.47±0.14 | 3.19 |
| | 滨古 11 | E ₅₄ | | 97.32 | 1.31 | 0.34 | 0.37 | 0.35 | -6.30 | -47.55 | | |
| | 滨古 14 | E ₅₄ | 2 229.0~2 248.2 | 96.99 | 1.16 | 0.27 | 0.55 | 0.43 | -4.76 | | 2.80±0.08 | 2.00 |
| | 滨古 24 | E ₅₄ | | 74.66 | 17.11 | 3.25 | 2.36 | 1.28 | -4.64 | | 5.22±0.13 | 3.73 |
| | 花 17(1) | E ₅₃ | 1 965.1~1 980.0 | 93.78 | 3.89 | | 0.27 | 0.30 | -3.41 | -54.39 | 4.45±0.12 | 3.18 |
| | 花 17(2) | E ₅₃ | 2 000.0~2 009.6 | 93.54 | 3.86 | 1.00 | 0.34 | 0.08 | -3.35 | -53.98 | 4.49±0.12 | 3.18 |
| | 高气 3 | Ng | 833.4~834.8 | 94.36 | 0.14 | 0.01 | 0.07 | | -4.41 | -35.00 | | |
| 阳 25 | E ₅₄ | 2 794.0~2 805.0 | 96.50 | 0.44 | | | | -4.38 | -42.51 | 4.12±0.12 | 2.94 | |
| 丽水坳陷 | ZWS13-1-1 | | 3 335~3 345 | 94.47 | 4.76 | 0.51 | 0.17 | 0.03 | -4.00 | -44.20 | 10.10 | 7.20 |
| | ZWS13-1-1 | | 3 405~3 412 | 98.59 | 1.19 | 0.14 | 0.04 | 0.02 | -4.20 | -46.60 | 12.30 | 8.80 |
| | ZWS13-1-1 | | 3 641~3 666 | 99.87 | 0.13 | | | | -4.20 | | 7.50 | 5.40 |
| | SLS36-1-1 | | 2 251~2 283 | 34.55 | 55.45 | 3.63 | 1.88 | 0.42 | -5.03 | -46.30 | | |
| | FLS-1 | | 2 511~2 530 | 痕迹 | 59.48 | 11.59 | 10.02 | 4.04 | -22.20 | -44.80 | | |
| 松辽盆地 | 芳深 9 | | 3 602~3 620 | 89.72 | 9.61 | 0.14 | | | -4.06 | -27.45 | 3.90 | 2.80 |
| | 芳深 7 | | 3 482.0~3 380.2 | 39.95 | 57.68 | 0.80 | 0.43 | 0.01 | | -28.72 | | |
| | 芳深 6 | | 3 409.1~2 755.4 | 15.32 | 81.79 | 1.19 | 0.28 | 0.02 | -6.61 | -23.60 | | |
| | 万 4 | K ₁ q ³ | 788.5~774.5 | 89.92 | 9.69 | 0.38 | | | -8.83 | -45.37 | | |
| | 万 5 | K ₁ q ³ | 740 | 93.43 | 3.74 | | | | -4.95 | -38.66 | 4.67±0.08 | 3.36 |
| | 万 5 | K ₁ q ¹⁺² | 1 011~1 072 | 99.48 | 0.52 | | | | -4.60 | -42.07 | | |
| | 万 6 | K ₁ q ³ | 603 | 99.77 | 1.39 | | | | -4.31 | -40.14 | 6.94±0.20 | 4.99 |
| 三水盆地 | 水深 9 | E _{1-2b} | 1 429.17 | 99.55 | 0.19 | 0.13 | | | -4.60 | | 6.00 | |
| | 水深 24 | E _{1-2b} | 1 632 | 99.54 | 0.19 | 0.09 | | | -5.80 | | 6.30 | 4.29 |
| | 南 7 | E _{1-2b} | 1 162 | 83.99 | 12.29 | 1.93 | | | | | | 4.50 |
| 苏北盆地 | 黄验 1 | K ₂ p | | 98.20 | 0.19 | | | | | -40.10 | | |
| | 黄验 1 | P ₁ q | | 94.25 | 0.07 | | | | -3.87 | -41.70 | | |
| | 黄验 1 | D ₃ w | | 95.10 | 0.85 | 0.05 | | | -3.08 | 29.61 | | |
| | 丁庄垛 | E ₂ d | | 92.06 | 2.05 | 0.11 | | | -3.82 | | 3.84 | |
| | 纪 1 | E ₁ t | | 92.32 | 0.81 | 0.81 | | | -4.10 | | 6.42 | 2.74 |
| | 富 44 | E _s | | 94.30 | 3.35 | 0.24 | | | -4.54 | | | 4.58 |

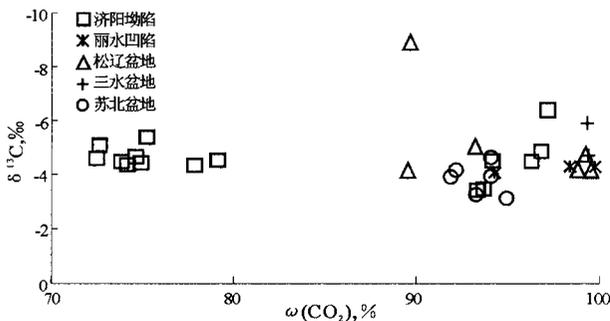


图 1 郯庐断裂带 CO₂ 气藏中 CO₂ 含量与 δ¹³C 关系
Fig. 1 Relationship between δ¹³C and ω(CO₂) in natural gas along Tanlu Fault Belt

较可以判断是否有幔源来源深部流体的侵入,对我国东部一些 CO₂ 气藏的统计结果(图 2)表明,R/Ra 的值介于 2~8.8 之间,有明显的幔源成因特征。

从以上分析可以得出,深部流体与 CO₂ 气藏的形成有密切关系,CO₂ 是岩浆脱气作用的主要产物之一,在较高温度、较高逸氧度、较低压力的热排气过程中,CO₂ 是从深部向地壳逸出的主要气体之一。深部含 CO₂ 流体通过幔源岩浆作为载体沿深大断裂运移到地表后在一定的地质条件下直接聚集成藏;另外在深部流体上升的过程中带来了大量的热量,碳酸盐岩在岩浆高温烘烤作用下分解

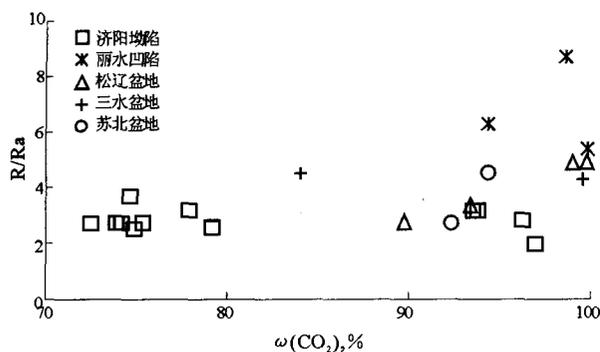
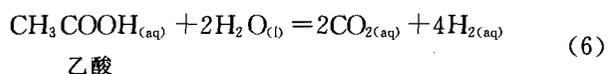
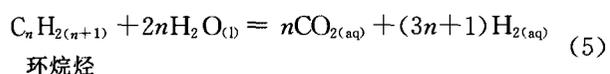
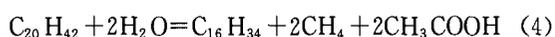
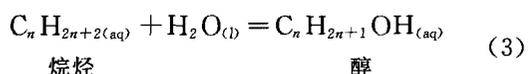
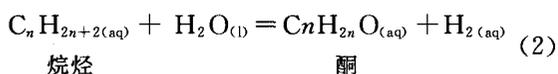
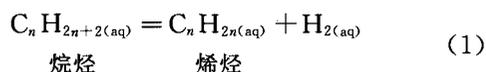


图 2 郯庐断裂带 CO₂ 气藏中 CO₂ 含量与 R/Ra 关系

Fig. 2 Relationship between R/Ra and ω(CO₂) in natural gas along Tanlu Fault Belt

产生的 CO₂，在适宜的构造部位和圈闭环境中聚集成藏，含量较高的 CO₂ 气藏主要是这 2 种成因。表 1 中有一些气藏含有较高的 CH₄ 气体，从 CO₂ 的 δ¹³C 分布值分析这些 CO₂ 气有幔源成因，但是甲烷的 δ¹³C 又显示为有机成因，原因有 3 种：一是 CO₂ 气藏或 CH₄ 气藏形成后，另一种组分为以后充注进去；二是深部流体在上升过程中带出了大量的热量，这些热量加快了有机质向天然气的转化；三是一部分 CO₂ 气和 CH₄ 气是共生的。本文对第 3 种情况做重点讨论。深部流体从岩浆中或从深源上涌时，其温度一般较高，在 900~1 150 °C^[25]，流体在深部处于超临界状态，溶解了一些金属成矿元素，而这些成矿元素可以作为一种催化剂，通过有机和无机相结合反应，形成无机与有机混合的气藏。Jeffrey^[26]认为深部流体中的临界水在一些成矿元素作为催化剂的条件下，在一定的温度、压力条件下与沉积盆地中有机质反应，在反应的过程中临界水为天然气的形成提供了 O 和 H 原子，有机与无机结合生成了 CO₂，CH₄ 和 H₂，方程式如下：



在一些盆地及大陆裂谷中发现富氢流体的气藏^[27,28]，一些学者认为这些氢来源于地幔富氢流体，但是地幔富氢流体在向地球浅部转移的过程中由于氧逸度的增加，富氢流体会被氧化而形成水，因此有机及无机的反应生成氢，为一些盆地中的氢来源提供了合理的解释。

2.2 深部流体与烃类气藏

深部流体导致烃类气藏的形成主要有 2 种形式，一种是深部流体将地球深部的烃类气体（主要为 CH₄）带出，在深部流体上升的过程中，烃类气体直接在合适的部位聚集成藏；另一种就是深部流体中溶解的一些过渡金属元素在一定的温度压力条件下，发生水/岩交换反应，生成大量的氢，使干酪根加氢，从而生成更多的烃类气体。深部流体带出大量的热促进了有机质的分解生成烃类气体。

2.2.1 深部流体将地幔中烃类气体带出聚集成藏

运用气相色谱及电子探针等技术对地幔岩捕虏体中的流体包裹体分析发现，地幔岩捕虏体中普遍含有烷烃、炔烃和烯烃类^[29~33]。烃类气体的形成目前主要有有机成因和无机成因说，但是深部流体中含有烃类气体已经是一个不争的事实。Gold^[34]认为在地球深部，存在大量的原始甲烷，是天然气的供给源。因为太阳系的原始陨石和行星大气中存在甲烷及其构成元素氢和碳，行星形成时地球从原始太阳星云获得了大量的原始烃类气体。从地球大气的元素丰度来看，该两种元素大部分应该处于地球内部。地球深部的高压条件有利于烃类气体的保存。烃类气体在随深部流体上升过程中，随着压力的降低多数烃类将逐渐分解为 CH₄。地壳中天然气藏是在地球深层的甲烷向地表释放过程中形成的^[35,36]，甲烷气体随着岩浆喷发而被携带到地表直接成藏。

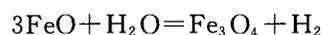
2.2.2 深部流体对烃类气体形成的影响

水和二氧化碳在超临界状态下有特殊的性质，比如热容非常之大。因此，高压、超高压条件下超临界流体性质及其与岩石反应的研究非常重要。深部流体随岩浆沿深大断裂进入地球表层的沉积盆地时，带来了大量的热。深部流体上升过程中热能传递的定量研究表明，水从 100 km 上升进入沉积盆地，每摩尔的水可释放出的热能多达 80 kJ；二氧化碳所携带的热能约为水的 2 倍，所以幔源富二氧化碳流体是良好的能量载体^[37]，其温度大约在 1 000~1 250 °C。溢出流体的温度远远高于周围

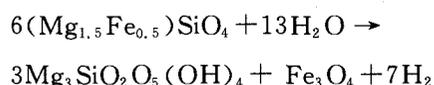
围岩的温度,其热量不断传递给围岩,在这种条件下促进了烃类气体的生成。表 2 为渤海湾盆地临邑凹陷同层位、同深度的夏 38 井以及与该井相隔 8 km 的临 68 井生油指标对比,其中夏 38 井有岩浆及深部流体的侵入,而临 68 井无岩浆及深部流体的侵入。从表中我们可以得出这样一个结论,即深部流体引起的局部高温有利于有机质成熟度的提高。但从两井的对比(图 3)中可以看出,深部流体对烷烃的生成影响最明显,这进一步说明了深部流体对烃类生成有不可忽视的作用。

一般认为,天然气主要有生物成因气和热成因气^[38]。近年来,深层天然气以及非生物成因天然气的形成成为天然气研究领域的一个热点^[39~43]。传统理论认为天然气是由于干酪根热分解形成,但是根据该理论只有 25% 的碳形成 CH₄,而 H 的加入有利于烷烃气体的形成^[27],因此有些学者认为深部流体为烃类的形成提供了氢^[44~46],越向地球深部 H₂ 的含量越高^[47],通过地震或者深大断裂地球深部的 H₂ 上移从而成为深部流体的重要组成部分。Suzuki 等^[48]在 5 GPa 和 1 000~1 300 °C 下对

含过渡元素(Fe,Co,Ni,Ti,V,Cr 和 Mn)硅酸盐水体系的实验表明,产物橄榄石、辉石和石榴子石与氢化物或金属共生。Fe,Co 和 Ni 的氢化物在减压时分解,氢逸出。水是有机质成烃演化的重要氢源,深部流体处于超临界状态,在一定的温度、压力条件下深部流体中的水将发生水岩相互作用。在 5~11 GPa 压力、500~1 500 °C 温度下,Henry^[49]用 FeO、碳酸盐和水反应生成氢:



金强^[50]认为在沸石作为催化剂的条件下,橄榄石与水发生反应可生成大量的氢,氢的生成有利于烃源岩向烃类气体转化。反应方程式如下:



3 结论

深部流体经过深大断裂运移至浅部,对无机成因气、有机质的演化、生烃及油气的成藏产生多方面的影响。来源于深部幔源的 CO₂ 气,由深部热流体储气,深大断层向上输导,于适当圈闭中聚集形成藏;深断裂及火山活动控制了无机成因气藏的形成及分布。深部流体由于能量很大(压力、温度、化学活泼性都极高),穿透能力很强,流体的热焓随着深度的增加而增加,上涌过程中将为天然气的形成提供热量。深部流体富氢气体以及临界水发生的水/岩反应将补偿天然气形成所需的氢,促进生烃作用。深部热流体是一种含有多种幔源物质组分的超临界流体,溶解和扩散能力很强,在向上运移的过程中极易与通道围岩发生相互作用,改变围岩的物性,形成各种构造裂隙或次生溶孔,为流体(油气)传输提供良好通道,提供成藏空间。深部流体中所溶解的一些过渡金属,不但对烃类的形成有影响,而且对非烃类的形成也有很明显的影响^[51]。

进一步研究深部流体的赋存状态、流体从深部向浅部转移的形式及其化学动力学性质、聚集特征及对天然气形成影响的程度和范围,可以为天然气勘探提供新的目标。深部热流体在天然气的生成演化过程中有明显的加氢作用,但其具体机理还有待进一步研究,深入研究可以对油气有机、无机成因的长期争论给出合理的解释。

参考文献:

- 李明诚. 地壳中的热流体活动与油气运移[J]. 地学前缘, 1995, 2 (3-4): 155~162
- 谢鸿森. 地球深部物质科学导论[M]. 北京: 科学出版社,

表 2 渤海湾盆地临邑凹陷夏 38 井与临 86 井有机物对比

Table 2 Contrast of the organic characteristics in Well Xia38 and Well Lin86 in Linyi Sag, the Bohai Bay Basin

| 项目 | 夏 38 井 | 临 86 井 |
|----------------------|----------|-----------|
| 深度/m | 3 889.4 | 3 911.4 |
| 古地温/°C | 123 | 92 |
| R _o , % | 1.00 | 0.68 |
| 烷烃, 10 ⁻⁶ | 15 989.3 | 287 539.7 |
| 芳烃, 10 ⁻⁶ | 17 301.4 | 81 836.4 |
| 非烃, 10 ⁻⁶ | 17 129.4 | 84 941.2 |

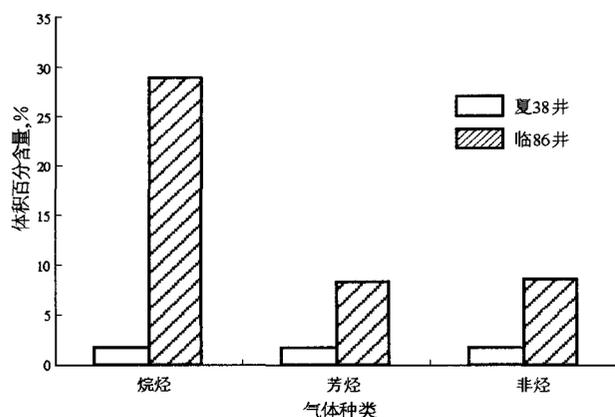


图 3 渤海湾盆地临邑凹陷夏 38 井与临 86 井气体对比

Fig. 3 Contrast of gas yields in Well Xia38 and Well Lin86 in Linyi Sag, the Bohai Bay Basin

- 1997, 215~220
- 3 毛景文, 李晓峰. 深部流体及其与成矿成藏关系研究现状[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 520~532
 - 4 毕思文. 地球内部流体系统科学统一理论[J]. 地质前缘, 1996, 3(3): 1~8
 - 5 胡文宣, 孙睿, 张文兰等. 金矿成矿流体特点及深—浅部流体相互作用成矿机制[J]. 地质前缘, 2001, 8(4): 281~288
 - 6 杨雷, 金之钧. 深部流体中氢的油气成藏效应初探[J]. 地质前缘, 2001, 8(4): 337~342
 - 7 赫英, 王定一, 朱兴国. 幔源二氧化碳和甲烷成藏的现成性与可能性[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1997, 27(5): 422~426
 - 8 Shaw R W. Supercritical water: A medium for chemistry[J]. Chemical and Engineering News, 1991, 26~39
 - 9 王传远, 杜建国, 刘巍等. 超临界流体的地质意义[J]. 西北地质, 2005, 38(2): 49~55
 - 10 邓平, 王国建. 超临界流体萃取在油气地球化学勘探中的应用[J]. 石油实验地质, 2005, 27(6): 627~631
 - 11 喻学惠. 地幔交代作用、研究进展、问题及对策[J]. 地球科学进展, 1995, 10(4): 330~335
 - 12 曹荣龙, 朱寿华. 地幔流体与成矿作用[J]. 地球科学进展, 1995, 10(4): 323~329
 - 13 刘丛强, 黄智龙, 许成等. 地幔流体及其成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004. 65~81
 - 14 丁振举, 姚书振, 方金云. 地幔流体与成矿作用[J]. 地质科技情报, 1997, 16(1): 72~76
 - 15 孙爱群, 牛树银. 地幔热柱成矿作用研究进展[J]. 地质科技情报, 1997, 16(1): 65~71
 - 16 陶明信, 徐永昌, 韩文功等. 中国东部幔源流体的活动特征与成藏效应[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(3): 265~270
 - 17 杨金中, 沈远超, 赵玉灵. 初论深部流体与成矿作用[J]. 黄金科学技术, 1998, 6(4): 1~7
 - 18 滕吉文. 地球深部物质和能量交换的动力过程与矿产资源的形成[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(1): 3~21
 - 19 张景康, 王先彬, 曹正林. 热液烃的生成与深部油气藏[J]. 地球科学进展, 2000, 15(5): 545~552
 - 20 黄志龙, 姜亮, 郝石生. 东海盆地丽水凹陷天然气成因类型[J]. 天然气工业, 2003, 23(3): 29~31
 - 21 程有义. 含油气盆地二氧化碳成因研究[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 684~687
 - 22 戴金星, 宋岩, 戚厚发等. 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. 1~12
 - 23 杜建国, 王先彬, 谢鸿森. 深部物质运动的气体地球化学特征[J]. 地球科学进展, 1994, 9(3): 48~53
 - 24 谈迎, 刘德良, 李振生. 松辽盆地北部二氧化碳气藏成因地球化学研究[J]. 石油实验地质, 2006, 28(5): 480~483
 - 25 万丛礼, 李元昊, 李继红等. 东营凹陷深源热流体在油气形成中的作用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2004, 2(1): 1~6
 - 26 Seewald J S. Organic-inorganic interactions in petroleum-producing sedimentary basins [J]. Nature, 2003, 426(20): 327~333
 - 27 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——中国地质大学学报, 2002, 27(6): 659~665
 - 28 刘国勇, 张刘平, 金之钧. 深部流体活动对油气运移影响初探[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 269~275
 - 29 O'Reilly S Y. The nature and role of fluid in the upper mantle, Evidences in xenoliths from Victoris, Austrilia [A]. Mantle Xenoliths[M]. John Wiley and Sons, 1987: 315~323
 - 30 杜乐天, 戎嘉树, 陈安福等. 地幔岩中微粒合金和还原气体[J]. 科学通报, 1995, 40(9): 1788~1790
 - 31 Sugisaki R, Mimura K. Mantle hydrocarbons: Abiotic or biotic? [J] Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 2527~2542
 - 32 Kenney J F. Comment on "Mantle hydrocarbons: Abiotic or biotic?" [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59: 3857~3858
 - 33 Sugisaki R, Mimura K. Reply to the comment by J F Kenney on "Mantle hydrocarbons: Abiotic or biotic?" [J] Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59: 3859~3861
 - 34 Gold T, Soters. The deep-earth gas hypothesis[J]. Scientific American, 1980, 242(6): 154~161
 - 35 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
 - 36 李华东. 油气历史成因假说[J]. 石油实验地质, 2004, 26(4): 404~408
 - 37 曾贇辉, 金之钧, 张刘平. 东营凹陷高青—平南断裂带幔源流体活动特征及其成藏效应[J]. 地质论评, 2004, 50(5): 501~506
 - 38 曾国寿, 徐梦虹. 石油地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. 185~195
 - 39 王先彬, 妥进才, 闫宏等. 深层石油天然气形成机制[A]. 见: 2001年全国沉积学大会摘要论文集[C], 武汉: 中国地质大学, 2001. 163~164
 - 40 王先彬, 妥进才, 李振西等. 天然气成因理论探索: 拓宽领域、寻找新资源[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(1): 1~5
 - 41 王先彬. 研究与寻找新的油气资源、开拓勘探新领域[J]. 矿物岩石地球化学通报 2002, 21(1): 22~25
 - 42 妥进才, 王先彬, 陈晓东. 深层油气研究进展与前景展望[A]. 天然气地质研究与应用[C], 北京: 石油工业出版社, 2000. 78~87
 - 43 周世新, 王先彬, 妥进才等. 深层油气地球化学研究新进展[J]. 天然气地球科学, 1999, 10(6): 9~15
 - 44 Lewan M D. Experiments on the role of water in petroleum formation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61: 3691~3723
 - 45 Jin Qiang, Xiong Shousheng, Lu Peide. Catalysis and hydrogenation: volcanic activity and hydrocarbon generation in rift basin, eastern China [J]. Applied Geochemistry, 1999, 14: 547~558
 - 46 Jin Zhijun, Zhang Liuping, Yang Lei, et al. A Preliminary study of mantle-derived fluids and their effects on oil/gas generation in sedimentary basins [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 41: 45~55
 - 47 Bell D R, Rossman G R. Water in earth's mantle: the role of nominally anhydrous minerals [J]. Science, 1992, 255(5050): 1391~1397
 - 48 Suzuki T, Akimoto S, Yagi T. Metal-silicate-water reaction under high pressure I. Formation of metal hydride and implications for composition of the core [J]. Phys Earth Planet Inter, 1989, 56(3-4): 377~388

缝的发育状况存在较大差异,从而出现以不同类型储层占优势的现象。

从平面上来看, LG9—LG41 井峰丛洼地地貌区,地貌较高,也靠近 LG9 井断层,有效储层以裂缝—孔洞型为主; LG42—LG52 井峰林谷地地貌区,储层以裂缝型为主,物性较差,除 LG42 井有 8.6 m 的裂缝—孔洞型储层提供有效产能外,其它井均无产能; LG15—LG47 井峰林平原地貌区,地貌较低,位于泄水区,表层岩溶带发育洞穴型储层,同时在洞穴的上部还发育裂缝—孔洞型储层,产能较高,而 LG15—2 和 LG47 井井位较低,储层物性较差,基本无产能。

从垂向岩溶分带来说,表层岩溶带附近洞穴型储层和裂缝—孔洞型储层发育;上渗流带除 LG9 井各类储层较为发育外,其它井储层都不太发育;上潜流带各类储层都较发育,同时发育少量小型洞穴,但洞穴规模比表层岩溶带发育的洞穴规模小,储渗能力也差很多;下渗流带总体上来说,储层不太发育;下潜流带大型洞穴发育,但基本全充填,充填物以粉砂质泥岩为主,基本不具备储集能力。

从岩心及镜下观察结果来看,裂缝主要发育于距风化壳顶 90~140 m 的范围内,属于岩溶分带的上潜流岩溶带—下渗流岩溶带。

受断层及古地貌的影响,在 LG40, LG42, LG9 井之间的广大区域内,裂缝型储层、孔洞型储层以及裂缝—孔洞型储层都比较发育,而 LG15—LG47 井区则为洞穴型储层的发育区。

5 结论

1) 轮古西地区早海西期奥陶系古岩溶的形成条件与广西现代岩溶十分相近,发育有热带古岩溶地貌。平面上自东向西依次发育峰丛洼地、峰林谷地和峰林平原地貌组合。

2) 研究区发育 2 期岩溶旋回,是 2 期地壳抬升

的产物。上部岩溶旋回可进一步划分为表层岩溶带、上垂直渗流带、上水平潜流带;下部岩溶旋回由下垂直渗流带和下水平潜流带 2 个岩溶相带构成。各岩溶相带厚度的平面差异性主要受岩溶地貌及微地貌的控制。

3) 溶孔、溶洞、裂缝是古岩溶储层的主要储集空间类型,形成孔洞型、裂缝型、裂缝—孔洞型及洞穴型 4 种储层类型。由于受古岩溶地貌的控制,在平面上不同地区和纵向上不同深度段,不同类型储层发育存在差异。

参考文献:

- 1 陈学时, 易万霞, 卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 244~253
- 2 顾 忆. 塔里木盆地北部塔河油田油气藏成藏机制[J]. 石油实验地质, 2002, 22(4): 307~312
- 3 周玉琦, 黎玉战, 侯鸿斌. 塔里木盆地塔河油田的勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 363~367
- 4 夏日元, 唐健生, 关碧珠等. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 133~136
- 5 肖玉茹, 何峰煜, 孙义梅. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究: 以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 75~86
- 6 王敦则, 黎玉战, 俞仁连. 塔里木盆地塔河油田下奥陶统油藏特征及成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 122~128
- 7 闫相宾. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 262~265
- 8 刘金荣, 黄国彬, 黄学灵等. 广西区域热带岩溶地貌不同类型的演化浅议[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 247~258
- 9 杨景春, 李有利. 地貌学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005. 1~246
- 10 任美镔, 刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 1~331
- 11 闫相宾, 李铁军, 张 涛等. 塔中与塔河地区奥陶系岩溶储层形成条件的差异[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 202~207
- 12 顾家裕, 周兴熙. 塔里木盆地轮南潜山岩溶及油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 1~268
- 13 王良俊, 李桂卿. 塔河油田奥陶系岩溶地貌形成机制[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(6): 480~482
- 49 Scott H P, Hemley R J, Mao H K. et al. Generation of methane in the Earth's mantle. In situ high pressure-temperature measurements of carbonate reduction [J]. PNAS, 2004, 101(39): 14023~14026
- 50 金 强. 裂谷盆地生油层中火山岩及其矿物与有机质的相互作用[J]. 地球科学进展, 1998, 13(6): 542~546
- 51 翟庆龙, 金 强, 万从礼. 裂谷盆地 CO₂ 的一种潜在成因[J]. 天然气工业, 2003, 23(3): 129~131
- 52 郑乐平, 冯祖钧, 徐寿根等. 起源于地球深部的济阳坳陷 CO₂ 气藏[J]. 科学通报, 1995, 40(24): 2264~2266
- 53 郑乐平, 冯祖钧, 廖永胜等. 济阳坳陷非烃气藏(CO₂, He) 的成因探讨[J]. 南京大学学报, 1997, 33(1): 79~81
- 54 霍秋立, 杨步增, 付 丽. 松辽盆地北部昌德东气藏天然气成因[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 17~19
- 55 宋 岩. 松辽盆地万金塔气藏天然气成因[J]. 天然气工业, 1991, 11(1): 17~21
- 56 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
- 57 杨方之, 周荔青, 郭念发等. 江苏黄桥二氧化碳气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 106~133

(上接第 264 页)