

深层油气藏成因类型及其特征

张东东^{1,2}, 刘文汇^{1,2,3}, 王晓锋^{1,2}, 罗厚勇^{1,2}, 王庆涛^{1,2}, 李忆宁^{1,2}, 李凤娇^{1,2}

(1. 大陆动力学国家重点实验室 西北大学, 陕西 西安 710069;

2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 深层油气勘探不断取得的重要发现, 使其成为中国乃至全球油气资源的重要战略领域。但盆地深层高温、高压的环境, 漫长的演化历史以及复杂的有机-无机相互作用导致人们对深层油气成藏机制尚不完全明了。按照油气藏的形成主因、演化历程以及成藏特征将深层油气藏划分为浅成深埋型、浅成深成型和深层成藏型油气藏等3种类型, 并对它们的成因机制和主要成藏特征进行了梳理和表征; 同时重点讨论了深层油气成源和成烃的难点问题, 其中深层外源氢的参与、富钙烃源物质以及无机成因气等对高-过成熟有机质的成烃意义重大。对深层油气成藏机制的探讨将有助于推动中国深层油气勘探并夯实产业发展理论基础。

关键词: 多元生烃机制; 有机-无机相互作用; 外源氢; 高演化碳酸盐岩层系; 深层油气藏; 塔里木盆地; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Genetic types and characteristics of deep oil and gas plays

Zhang Dongdong^{1,2}, Liu Wenhui^{1,2,3}, Wang Xiaofeng^{1,2}, Luo Houyong^{1,2}, Wang Qingtao^{1,2}, Li Yining^{1,2}, Li Fengjiao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Significant oil and gas discoveries have been obtained in deep plays in succession, making the deep plays become an important strategic domain for oil and gas exploration both in China and around the world. However, we are not quite clear about its accumulation mechanism under the high-temperature and high-pressure environment, following long evolutionary history and complex organic-inorganic interactions. The deep plays could be divided into 3 types considering the major genesis, evolutionary history and accumulation characteristics, namely, plays of pre-deep-burial enrichment, plays of syn-deep-burial enrichment, and plays of post-deep-burial enrichment. Their genetic mechanism and main accumulation characteristics are sorted out and characterized. Meanwhile, the study focuses on the mysteries concerning source rocks and hydrocarbon generation of the deep plays; among others, the involvement of deep-sourced exogenous hydrogen, calcium-rich source materials and inorganic gas, is of great significance to hydrocarbon generation from high-to-over-mature organic matter. In all, discussion on the mechanism of deep hydrocarbon accumulation is sure to help lay a solid theoretical foundation to promote deep petroleum exploration and industrial development in China.

Key words: hydrocarbon generation mechanism, organic-inorganic interaction, exogenous hydrogen, carbonate sequence of high maturity, deep play, Tarim Basin, Ordos Basin

1 深层油气勘探研究概况

当前, 随着中国国民经济和工业的发展需求以及科学技术的进步, 深层油气成为重要的能源勘探接替

领域和研究热点^[1-10]。由于中国处于3大板块拼合部位, 强烈的构造活动和多期改造作用形成了中国受控于大陆多旋回演化控制的叠合含油气盆地^[6, 11-12], 如塔里木、鄂尔多斯和四川盆地等。具中国特色的叠合沉积盆地通常发育浅层中-新生界沉积构造层以及

收稿日期: 2021-03-02; 修订日期: 2021-09-06。

第一作者简介: 张东东(1985—), 男, 博士, 副教授, 石油地质与油气地球化学。E-mail: zhangdd@nwu.edu.cn。

通讯作者简介: 刘文汇(1957—), 男, 博士, 教授, 天然气地质学及油气地球化学。E-mail: whliu@nwu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930426, 41330315, 41972134)。

深层古生界—元古宇沉积构造层,半个多世纪的油气地质研究与勘探实践多集中于中、浅层沉积构造层,且形成了具有中国特色的油气地质理论,如“陆相生油”“源控论”“复式油气聚集理论”等^[13]。而随着油气勘探深度和范围的不断拓展,前期所总结形成的油气勘探理论和认识受到了很大程度的限制,温度和压力的增长致使深层油气的来源、聚集以及保存机理等问题均与中、浅层油气有着很大的差异和变化,需要针对含油气盆地深层开展相关方面的地质研究,深层油气资源将是全球探明储量的增长主体,推动深层油气勘探的发展,不仅具有重要的学科理论意义,更具有重大国家战略和社会经济价值。

深层油气藏的定义在国际上现仍未有严格的标准,不同国家以及不同企业对深层的定义、界限以及地质内涵亦不统一。国际上一般将埋深超过 15 000 ft (4 500 m) 的油气藏定义为深层油气藏;中国所颁布的《石油天然气储量计算规范》(2019)将埋深在 3 500~4 500 m 的油气藏划分为深层油气藏,埋深在 4 500 m 以深的则定义为超深层油气藏;《页岩气资源储量计算与评价技术规范》(2014)中将页岩气藏中的深层埋深定义为 3 500~4 500 m,超深层则定义为 4 500~6 000 m;《石油天然气钻进工程术语》(2012)中将埋深在 4 500~6 000 m 的地层作为深层,埋深大于 6 000 m 的地层作为超深层;一些学者根据中国深层的地质条件以及勘探资料,将深层油气藏的埋深定为 4 500~6 000 m,认为深层油气藏指储于 4 500 m 以深的油气和源岩在 5 000 m 深度之下生成的油气,6 000 m 以深则认为是超深层油气藏^[4-8,14-15];2017 年国家“深地资源勘查开采”重点研发项目中将超深层的深度界限定为 $\geq 6 500$ m,进一步推进了深层油气的概念。现今,在深层甚至超深层找寻油气资源已是全球油气勘探开发的重要趋势,向深层进军也是中国 2035 科技关键攻关重点方向之一。

随着深井—超深井钻采设备等研发的迅速进展,深层油气的勘探开发迎来了快速发展的机遇期,前苏联和美国分别在 1984 和 1972 年创造了 12 869 和 9 583 m 的钻深记录,中国在 2019 年由中国石油在新疆塔里木盆地创造了 8 882 m 的亚洲直井井深记录。目前世界上已在 71 个盆地中发现了 562 个埋深大于 4 500 m 的工业油气藏^[4,7,10,14]。前苏联沉积地层厚度超过 6 000 m 的盆地有 18 个,目前已在其中的 4 个含油气盆地中发现了 5 个埋深大于 6 000 m 的工业油气藏;在美国墨西哥湾卡斯基达 (Kaskida) 油田和戴维琼斯 (Davy Jones) 气田发现的产层深度分别为 7 356 和

7 620 m;在美国西内盆地阿纳达科凹陷米尔斯兰奇 (Mills Ranch) 油气田中发现了产层深度为 7 663~8 103 m 的气田;俄罗斯的滨里海盆地在 7 550 m 的深度 (295 ℃) 依然发现有液态烃聚集;波斯湾马伦 (Mullen) 油田产层温度超过了 230 ℃。此外在委内瑞拉、意大利、法国和阿联酋等国均发现了埋深大于 5 000 m 的工业性油气田。2008—2018 年全球 4 000 m 以深新增油气探明储量为 234×10^8 t, 占全球新增储量的 60% 以上。全球 87 个含油气盆地深层油气层系的分布统计显示,深层油气主要分布在新近系、古近系、白垩系、侏罗系和上古生界等 5 套储集层系内^[14]。

在中国油气资源总量中,埋深大于 4 500 m 的深层油气资源约占 40%,其中 2/3 以上分布在塔里木、四川和鄂尔多斯等 3 大盆地中,大型碳酸盐岩油气藏占主要组成部分,如普光大气田、元坝大气田、安岳大气田、塔河油田和顺北油气田等。塔里木盆地油气探明储量中 80% 以上的油气藏埋深大于 5 000 m,深层油气以塔河、顺北、哈拉哈塘、塔中、轮古、克拉苏、塔中 I 号以及克拉 2 等油气田为代表,形成多个亿吨级大油田和万亿立方米大气区。四川盆地埋深大于 5 000 m 的大气田占总探明储量的 37.9%,同时四川盆地的深层页岩气亦取得了可喜成绩^[16-17],如威荣页岩气田 (部分水平井深度可达 5 200 m 以深) 在 2018 年提交的探明地质储量为 1247×10^8 m³,四川盆地建成了涪陵、长宁—威远、昭通等多个国家级页岩气示范区,据评价超过 60% 的页岩气资源埋藏在深层。鄂尔多斯盆地奥陶系发现万亿方大气区,在盆地东部的盐下深层 (马家沟组四段以下层段) 已落实了多个天然气藏,同时盆地中—新元古界裂谷带和寒武系也具有深层油气的勘探潜力。

随着深层勘探开发技术水平的不断提高,在 2019 年中国深层油气取得了多点突破。塔里木盆地中,完钻深度达 7 880 m 的博孜 9 井测试获气 41.8×10^4 m³/d、凝析油 115.2×10^4 m³/d;顺北地区的顺北 53X 井在鹰山组 7 750~8 341 m 井段获油 125 t/d、气 7.5×10^4 m³/d。四川盆地钻井垂深为 5 047 m 的磨溪 129H 井灯影组四段测试获气 141×10^4 m³/d;川东南綦江东溪构造的东页深 1HF 井完钻井深 6 062 m (垂深 4 259 m),测试获气 31.2×10^4 m³/d。柴达木盆地切克里克凹陷的切探 2 井在 4 700 m 深层自喷获油 54.9 m³/d、气 6 899 m³/d。中国深层油气多分布于叠合盆地的下沉积构造层,地层时代较老,以震旦系、寒武系、奥陶系、志留系和上古生界为主^[9,14]。

2 深层油气藏成因类型划分

深层油气藏不仅在勘探实践领域获得了一系列重大突破,而且在成因理论上也对经典的干酪根晚期生油理论的温度和压力界限提出了挑战。传统的油气成因理论认为液态烃的形成分布温度在 $60 \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (即镜质体反射率 $R_o = 0.60\% \sim 1.35\%$),当地层温度超过 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (镜质体反射率 $R_o > 1.35\%$),有机质和液态烃将开始发生分解形成以甲烷为主的气态烃类,而 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的高温地层则不应该存在液态原油^[18-19]。但近期的勘探发现却证实在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上(甚至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)的地层中依然有液态烃存在,如渤海湾盆地霸县凹陷牛东1井在深度 $5\,641 \sim 6\,027\text{ m}$ 储层中依然存在液态烃^[20];塔里木盆地顺北地区在深度 $7\,000\text{ m}$ 的储层中发现轻质油藏^[21-25];前苏联南里海(South Caspian)油田的油藏埋深可达 $8\,000 \sim 9\,000\text{ m}$ 等等。前人研究表明,液态烃在烃源岩热成熟度 R_o 达到 $7.0\% \sim 8.0\%$ 时仍然存在^[26-27],烃源岩中的滞留液态烃裂解成气期($R_o = 1.6\% \sim 3.2\%$)晚于干酪根,模拟实验也表明压力的增大会抑制有机质热演化和生烃作用,进一步拓宽了油气死亡线^[28-40]。在有石墨存在的

地层中甲烷可以保存到至少 $12\,000\text{ m}$ 深度^[41]。在深层环境中天然气(烃类气体)有很高的热力学稳定性,大部分的烃类气体[地温 $> 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时重烃气体(C_{2+})才发生裂解,甲烷的裂解对应地温则高于 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$]在深层高温条件下是可以稳定存在的^[35-39]。

深层油气可以通过两种途径形成:①由深层烃源岩中的干酪根等成烃母质在一定的温度、压力和化学条件下直接形成油气;②早期形成的液态烃在深层高温条件下进一步裂解形成烃类气体。因此,深层油气的形成受温度、压力和介质条件等多种因素的控制。深层油气藏则不仅仅涉及深层油气的来源,同时需从动力学角度关注深层地质条件下油气供给、运移和聚集等动态过程。中国叠合盆地构造改造和热演化历史复杂多变,不同盆地和地区的构造演化和地层温度差异较大^[2, 42-43],故而有不同类型的深层油气藏成因,按照油气藏的形成主因、演化历程以及成藏特征将深层油气藏成因类型划分为3类(图1)。

1) 浅成深埋型

油气藏早期在浅层已经形成,伴随盆地沉降迅速埋深至深层保持成藏,油气藏的储层、盖层等保存条件不发生较大变化,仅所储藏的烃类物质发生一定的相

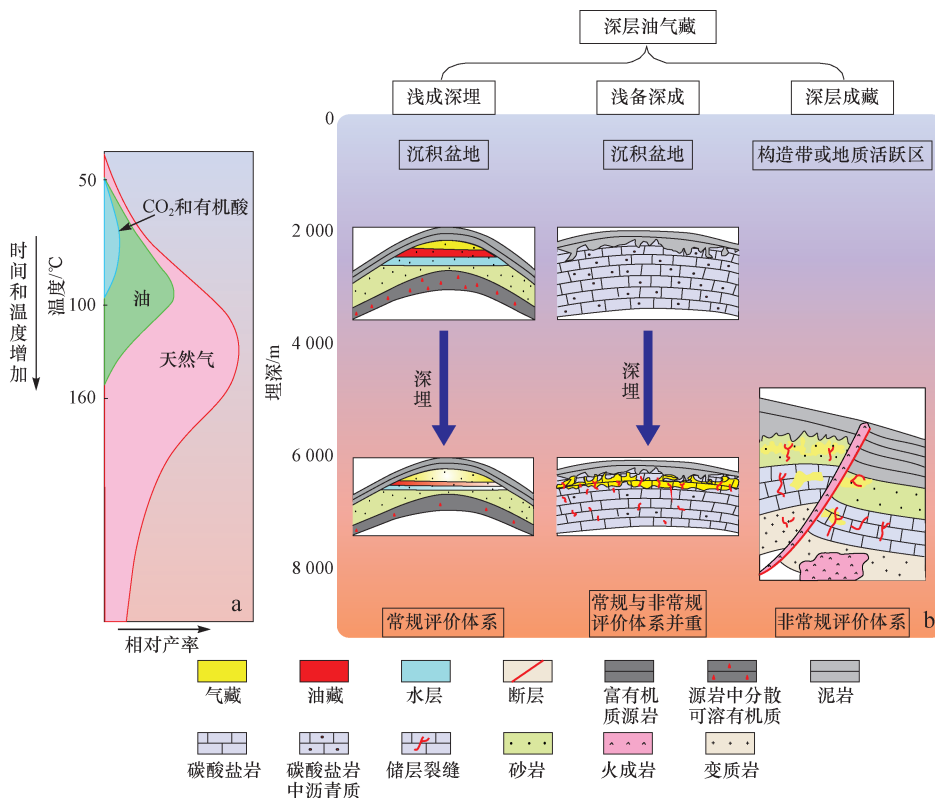


图1 深层油气藏成因类型划分

Fig. 1 Genetic types of deep plays

a 烃源岩 Tissot 生烃模式; b 不同类型深层油气藏演化模式

态和组分的变化。

2) 浅层深成型

在地层浅部成烃和储备条件不足以成藏,但随着地层埋深过程中深层温度和压力的提升,以及成岩作用的改造,不同类型的烃源可以形成足够的烃类物质聚集在改造后的储层中得以最终深层成藏。

3) 深层成藏型

伴随盆地深部构造作用、热液作用以及热力作用等大量无机物质和能量的强烈交换与改造下,并在有机-无机相互作用的参与中,在盆地内或者边缘以及构造活动区的深部地层中形成油气藏,该类油气藏不同于传统油气成因(传统石油地质学所认知的有机成因形成的油气藏),属于非传统深层油气成藏。

浅成深埋型深层油气藏在现实油气勘探中不断取得发现,传统技术方法可对其进行评价,在已有勘探发现的深层油气藏中较为常见,如顺北油气田、安岳气田等;浅层深成型深层油气藏正在取得勘探突破,是比较现实的油气勘探接替领域,潜力巨大,评价技术方法正在形成,如鄂尔多斯盆地中东部盐下气藏、四川盆地深层页岩气藏^[16-17]等;深层成藏型深层油气藏属于理论远景领域,需要强大理论技术支撑,评价技术方法未起步,该类油气藏通常分布于构造板块边缘与活动断裂附近,如渤海湾盆地郯庐断裂带两侧部分气藏。

3 深层油气藏成藏基本特征

3.1 浅成深埋型深层油气藏特征

1) 主要发育于大、中型较稳定的沉积盆地或坳陷中。

浅成深埋型深层油气藏成藏机制和过程符合传统油气成藏理论,油气在埋深过程中会发生一定的相态和组分变化。庞雄奇等通过对全球深层油气藏进行统计,其中42%为气藏,51%为油气藏,仅7%为油藏^[10],然而中国塔里木盆地和渤海湾盆地等深层地层中依然发现轻质油,因此深层油气相态类型较为复杂。

2) 构造演化导致盆地持续沉降是深层成藏的关键,优质的保存条件是抵御油气藏破坏的关键。

在浅层地层中形成稳定油气藏后,盆地或者坳陷发生整体快速沉降,并且在沉降过程之前浅层地层中所形成的油气藏没有发生会导致原油气藏发生破坏的较大断裂或者裂缝以及热液流体活动,同时油气藏原有的保存条件在埋深过程中由于压力递增致使其封堵和保存油气藏的能力能够有效提高,使得浅层所形成的油气藏在深层依然能够得以完整保存。

3) 深层勘探在于确定含油气空间的存在及含油气性。

此类深层油气藏因在浅层已经形成,且在埋深过程中未发生破坏,故而一般为较为简单且稳定的油气藏类型,如背斜油气藏、古潜山油气藏和断块油气藏等构造油气藏,因此其对应的勘探技术和理论较为成熟,含油气空间易于确定,含油气性在地震和测井等地球物理勘探技术实施下也较易于发现。

4) 资源前景以目前理论可以进行基本评价。

浅成深埋型深层油气藏的成源、成烃和成藏主要元素以及地质作用皆符合传统的含油气系统理论,可用目前的石油地质理论进行基本评价。

5) 最现实的资源,但规模有限。

对于中国深层油气资源评价工作来讲,此类油气资源潜力是最为直接、最能判识和最为现实的资源,但因中国含油气盆地多数经历了后期抬升和叠置改造,深层油气藏的保存条件较难保持稳定,能够满足浅成深埋型深层油气藏地质演化条件的盆地数量较少,且盆地愈老愈难以满足,所以整体上浅成深埋型油气藏的规模有限。

6) 油气相态和油气地球化学是识别该类油气的主要方法。

塔里木盆地作为深部克拉通盆地(主要储层的埋深超过6 000 m)经历了多期次旋回叠加和构造运动,导致油气聚集的复杂分布^[21-24]。在塔里木盆地北部的塔北地区,海西晚期(二叠纪)是盆地主力烃源岩下寒武统玉儿吐斯组的主要生烃和排烃时期,盆地中发现的油气藏多数形成于这一时期,如英买力和哈拉哈塘油田。结合热史和埋藏史分析,塔北地区轮探1井所发现的圈闭中油气聚集与成藏就是形成于海西晚期(二叠纪),油气藏类型为较简单的背斜油气藏(图2);在油气成藏之后,该油气藏自三叠纪以来一直处于连续沉降埋藏状态,圈闭基本上保持了海西晚期油气成藏状态,直至喜马拉雅晚期(5 Ma),油藏的埋深在短时间内增加了2 500 m以上,形成了现今的深层油气藏(图3),轮探1井中的寒武系油藏温度可达171℃(在深度8 260 m处),并且油藏中的液态烃并没有发生热裂解^[22-23]。油藏的主力烃源岩为寒武系碳酸盐岩层系,厚度为81 m,有机碳含量(TOC)介于2.43%~18.48%,成熟度(R_o)可达1.5%~1.8%,发育白云岩与膏岩的储-盖组合,储层以孔洞型为主,有角砾状构造,可见高角度裂缝和溶蚀孔洞,形成优质的生-储-盖组合,现油藏日产油134 m³,日产气45 917 m³^[24-25],可用常规的油藏描述方法进行评价。

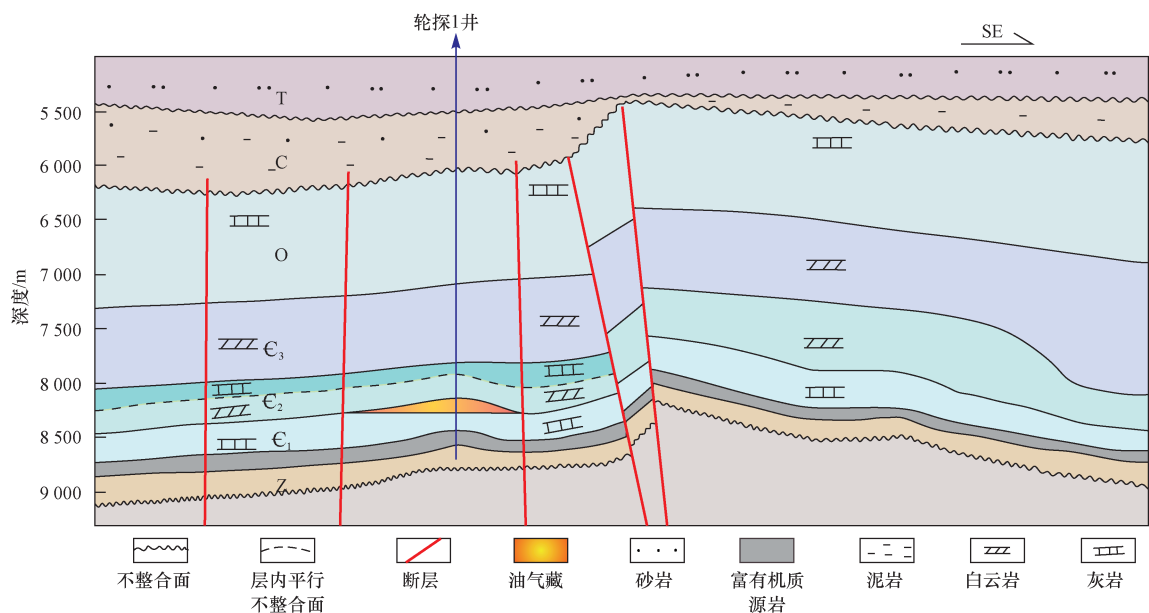


图 2 塔里木盆地过轮探 1 井 SE - NW 向剖面解释示意图^[22-23]

Fig. 2 Schematic diagram showing the SE-NW-trending cross section across Well Luntan 1 in the Tarim Basin^[22-23]

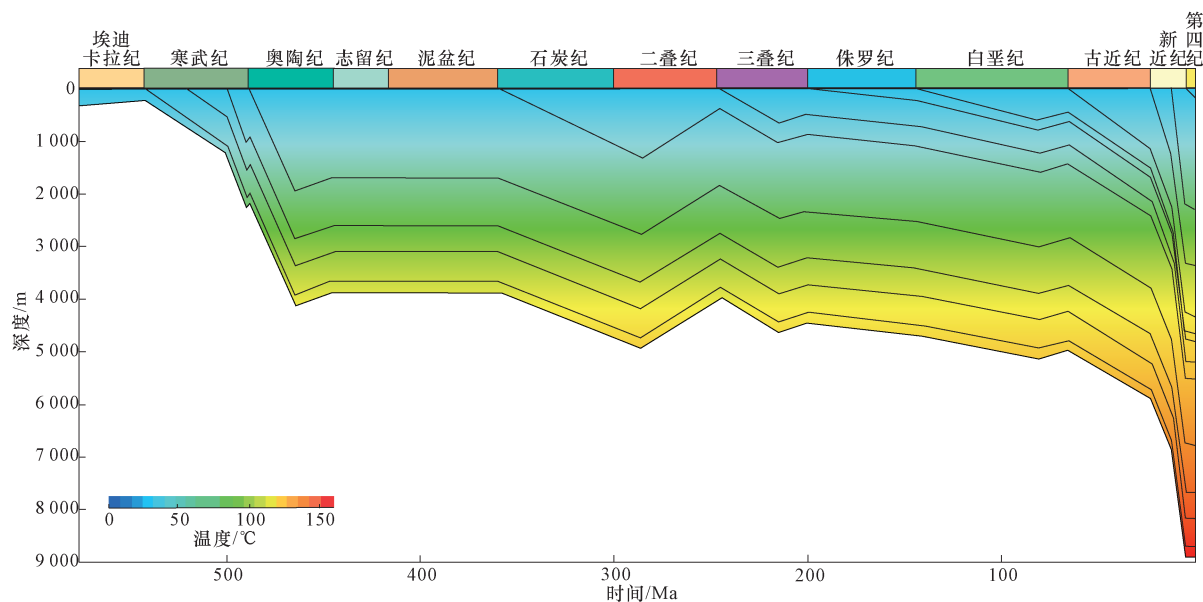


图 3 塔里木盆地轮探 1 井地层埋藏史演化模型^[22-23]

Fig. 3 Diagram showing the evolutionary model of the stratigraphic burial history in Well Luntan 1, Tarim Basin^[22-23]

3.2 浅备深成型深层油气藏特征

- 1) 浅备深成型深层油气藏主要发育于大、中型沉积盆地,特别是叠合盆地当中。
- 该类型深层油气藏形成的重点在于其所蕴藏的烃类物质、圈闭的存储空间等主要含油气系统要素主体在深层形成,而非浅层,但浅层已具备成源条件、成储潜力和成藏组合的雏形,成藏过程有别于传统油气成藏理论。
- 2) 多元生烃、储层保持和保存条件优化是浅备深

成型深层油气成藏的关键。

盆地经历多期构造运动,盆地演化早期(浅部)具有一定烃源基础和潜在保存条件,特别是良好的成层型储集空间,但在早期烃源岩未能形成足够的烃类物质供给圈闭成藏。随着盆地演化,地层在深埋过程中温度和压力增大,同时伴随着热液流体及外源氢等深部物质的参与反应,烃源岩中原本在浅层难以生烃的有机质在高温、高压下发生了生烃以及排烃作用^[44-46]。此类有机质不仅仅是传统的干酪根物质,还包含了烃源岩地层甚至储层当中的其他分散有机质、有机酸盐

和固体沥青等物质(图4)。在深埋过程中,碳酸盐岩层系中富含脆性矿物的储层因流体活动和压实作用等发生溶蚀和断裂,改善和提升了储层的孔隙空间和储藏能力;同时在深埋过程中,上部盖层以及侧向断层的保存条件因压力的增强而进一步提升。

3) 深层勘探不仅要确定含油气空间的存在及其含油气性,还要反演成藏要素。

在此类深层油藏勘探过程中,不仅仅是发现储藏空间以及其含油气性,更需对其主要的成藏要素进行分析和描述,尤其是烃源条件。深部多元生烃的客观事实对传统的生烃理论提出挑战,而储层随深度而发生的改变(溶蚀-缝洞)如何进行有效表征(微米-纳米级别孔隙结构)与反演(原始结构恢复及演化)亦是勘探家需面对的难题^[47-48]。

4) 资源前景评价需要创新,成藏理论是关键。

对深层多元生烃进行资源评价现今仍未有较为行之有效的标准方法,传统的成因法因这类油气藏具有多期生烃、多元生烃以及各个烃源贡献不明等特征而

不适用,类比法又因各个古老盆地的源-储参数不具相似性、可类比的成熟目标太少而导致无从下手,所以此类深层油气藏的评价需深入了解其各自独特的成藏要素以及成藏模式,并且抓住主要成藏因素进行定性判识、定量计算以及资源量模拟核实,切不可一概而论。

5) 资源潜力大。

此类盆地广泛分布,盆地层系愈老、比例愈高。中国西部叠合盆地深层中、下组合发育多套烃源,蕴藏着丰富的油气资源。不同于浅成深埋型深层油气藏成藏关键在于保存条件不受破坏,油气藏整体处于类封闭环境中,浅成深埋型深层油气藏在埋深过程中则处于半开放条件下,油气和孔隙的形成均是在深埋过程中或者在深部逐步完成,而在此期间亦发生了各种流-岩相互作用以及与之相关的有机-无机相互作用,因此深层所发生的有机-无机相互作用是此类深层油气藏成烃、成储、成藏的主线。

6) 油气地质-地球化学是识别该类油气的主要方法。

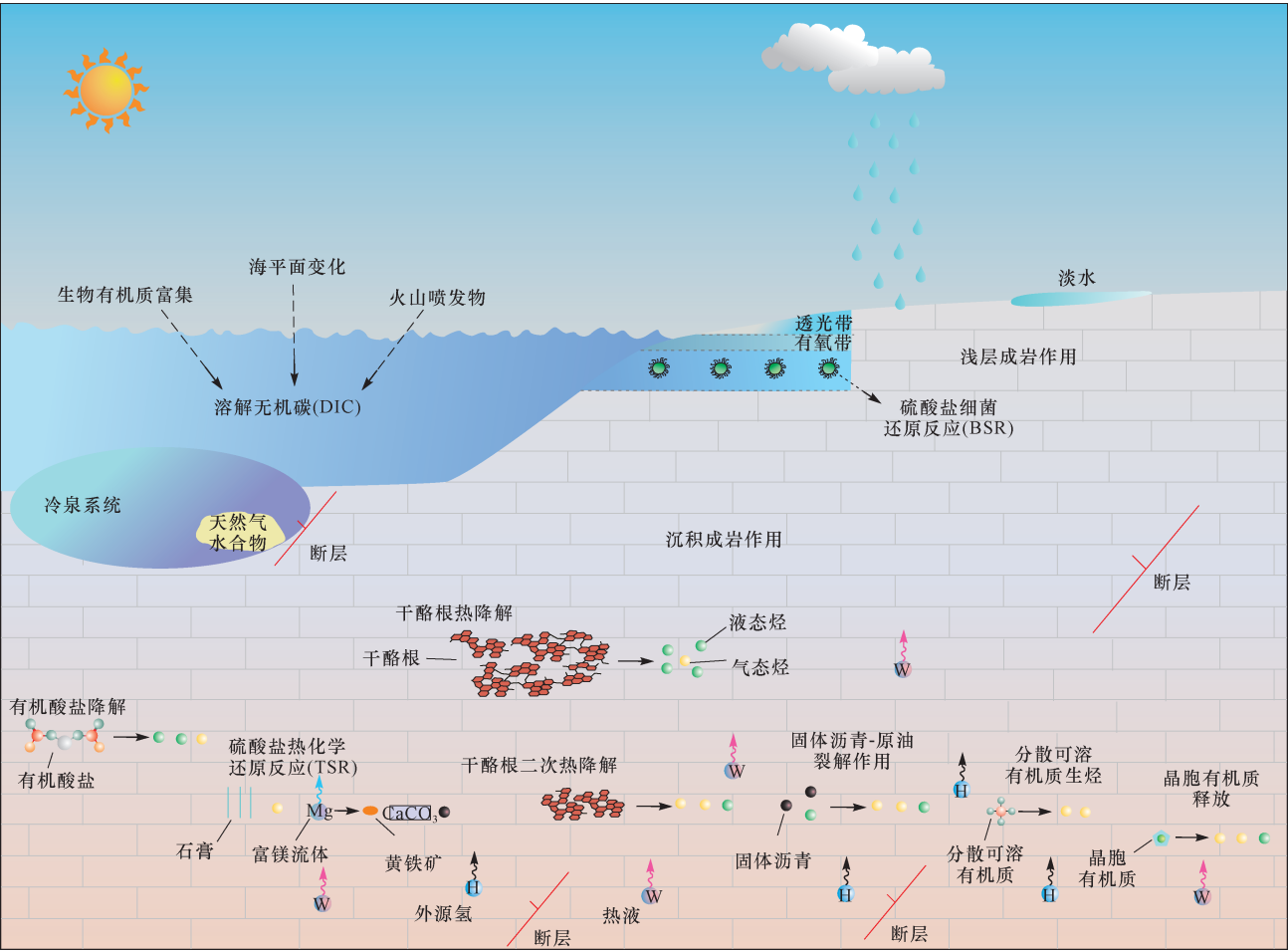


图4 浅成深成型深层油气藏深部相互作用机理示意图
Fig. 4 Schematic diagram showing interaction mechanisms of deep reservoirs of syn-deep-burial enrichment type

在油源识别所涉及的各类油气地球化学方法中,有机酸盐的识别与定量分析、分散有机质生烃机制、油气-源稳定同位素以及生物标志化合物等方法渐渐成为不容忽视的主要方法。

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通的西部,近年在盆地中东部地区奥陶系中组合盐下天然气勘探持续取得重大发现^[49-53]。盆地奥陶系碳酸盐岩有机碳含量(TOC)低(均值为0.2%,一般<0.5%),且下古生界烃源岩成熟度(R_o)值多数大于2.0%,学者们一度认为其不具备生气潜力,但近期随着勘探的不断深入,在奥陶系马家沟组中不仅常见分散可溶有机质,同时在中-低成熟度样品中存在较为可观的酸溶有机质。常规烃源中的成烃生物组合以生烃能力较强的浮游生物为主,干酪根、分散可溶有机质和有机酸盐共同构成奥陶系马家沟组碳酸盐岩烃源,这些不同类型的烃源在盆地深部可以为盆地中东部盐下气藏提供充足的烃类物质,下古生界天然气的甲烷氢同位素(主要分布在-180‰~-160‰)也证实鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气属于自生自储油型气(图5)^[49],与下古生界马家沟组碳酸盐层系中烃源岩的酸解烃地球化学特征相

近,表明盆地中东部奥陶系厚层膏盐层下的海相碳酸盐岩可能是盆地天然气藏的气源岩。

3.3 深层成藏型深层油气藏特征

1) 深层成藏型深层油气藏主要发育于沉积盆地及其周缘,甚至构造活动区。

不同于传统的油气成藏理论,该类型油气藏的形成属于全新的油气成藏理论,且大多以深层气为主。

2) 构造活动及其演化形成了岩体储集和油气保存要素。

在盆地边缘以及构造活动区,地层在深部受到较强的构造改造、隆升沉降以及热力交换,在此过程中,原始沉积地层或火成岩、变质岩遭受应力变化而发生一定的结构改造,形成新的储集空间;同时伴随应力加强以及物质迁移,在部分区域形成的封闭空间具有一定的油气藏保存能力。在此期间,对于深部地球物质的形成和演化的研究是认识深层成藏型油气藏的关键。

3) 此类深层油气藏勘探在于确定构造活动导致的含流体空间及其含油气性,对于深部地质的刻画也是必须的。

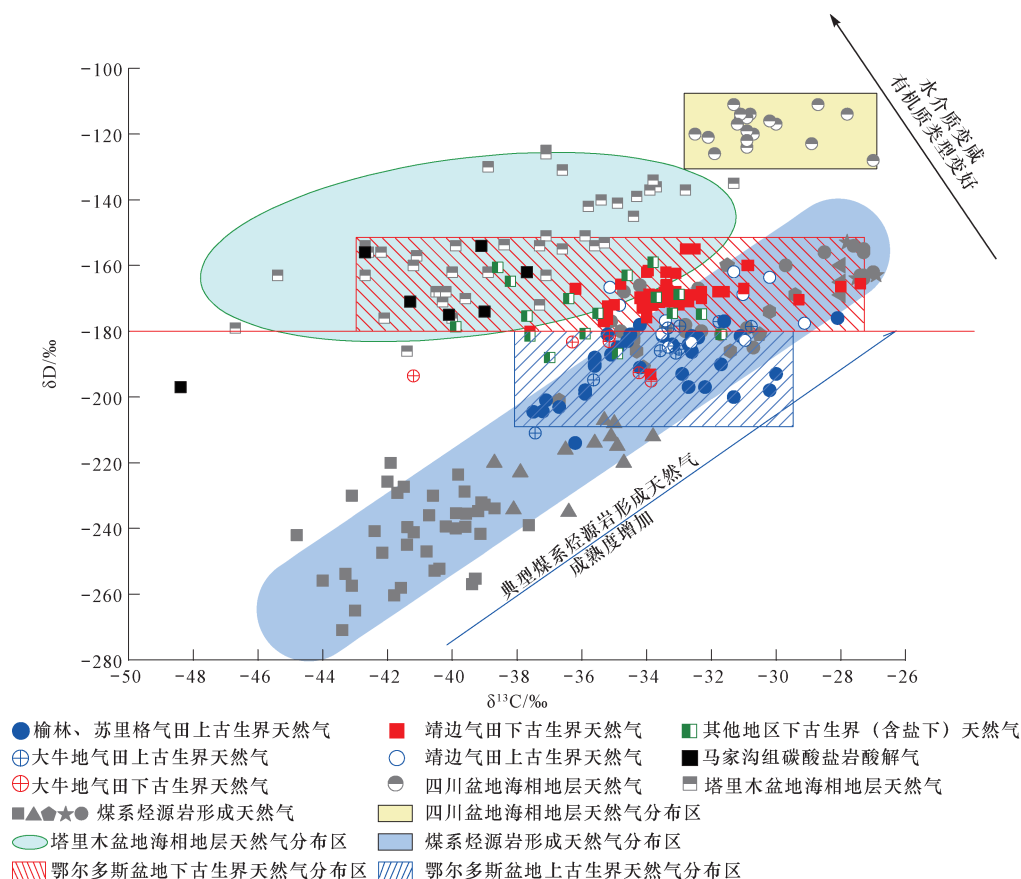


图5 不同含油气盆地古生界天然气中甲烷氢、碳同位素组成特征^[49]

Fig. 5 Hydrogen and carbon isotopic compositions of methane in the Paleozoic natural gas in different petroliferous basins^[49]

深部地质的刻画不仅仅是地球物理方面的空间刻画,同时也包含深部地质体中的物质组成、化学成分等方面的岩石学、沉积学以及地球化学方面的分析和判识。

4) 加氢成烃甚至无机成烃、断裂成储、动态成藏是关键要素,亦是理论探索的核心科学问题。

在构造活动区内不断发生着不同圈层、深层与浅层的物质和能量交换,传统的 Tissot 生烃理论在深部会被进一步丰富和深化,在地球深部存在大量外源氢(火山热液携带、俯冲带中橄榄岩的蛇纹石化生氢、辐射生氢、地幔脱气等),而氢气的加入不但会改变传统的生烃模式,增大深部生烃量,同时也可与一氧化碳或二氧化碳发生费托合成反应进而直接以无机作用的方式生成烃类物质;断裂在深部的不断活动亦会改造周围岩石的物理结构进而形成烃类物质可聚集的储集空间;而构造活动区的演化复杂性无疑会增加人们对此类深层油气藏识别和认知的难度。

5) 资源前景不明朗,但具有规模潜力(地质条件特殊,完全新领域),评价体系需重建。

传统的油气资源评价体系完全不适用于此类深层油气藏,但重要的是应对各种油气资源持开放态度,解放思想,发展地球物理、地球化学以及构造地质学等学科的交叉,从不同角度和方向探寻此类油气藏的成因机制以及定量评价体系。

6) 识别该类油气的地质-地球化学方法仍处于争议当中。

此类典型且被公认的油气藏尚未有公开报道,但从一些勘探事实以及地质发现中不难观察到此类油气藏存在的可能性。伏尔加-乌拉尔(Volga Ural)油区前寒武系花岗岩和变质岩中发现了油质沥青和烃类气体;科拉半岛深度 11 600 m 超深井结晶基底中见沥青包裹体;加勒比海的深断裂附近发现了喷发强烈的 CH_4 ;在板块俯冲带以及洋中脊等构造活跃区也出现过无机成因烃类气体的报道,东太平洋海隆与圣安德烈大断裂相接处瓜伊马斯(Guaymas)盆地中发现的油气形成与深部热液侵入有关;菲律宾三描礼士省(Zambales)蛇绿岩的超基性-基性岩、西南印度洋中脊、加拿大魁北克(Quebec)碱性花岗岩、格陵兰伊利毛沙克(Ilimausaq)碱性杂岩、东非乌干达苏库鲁(Sukulu)碳酸岩等均有无机成因烃类气体的报道。中国松辽盆地地幔上隆、地壳减薄且发育火山活动以及深大断裂,地质背景非常活跃,沿主要深大断裂所发现的一些气藏被认为存在无机成因的可能^[54-57],如徐家围子气藏、万金塔 CO_2 气藏、肇州西和昌德的烷烃气藏等。总体上,此类油气藏主要分布于构造活跃地区,如活动大陆边缘、深大断裂、岩浆热液活动频繁地区、洋中脊与海沟处等(图 6),存在大量有机-无机相互作用和深-浅物质交换等作用,对其进行评价和准确预测尚有难度。

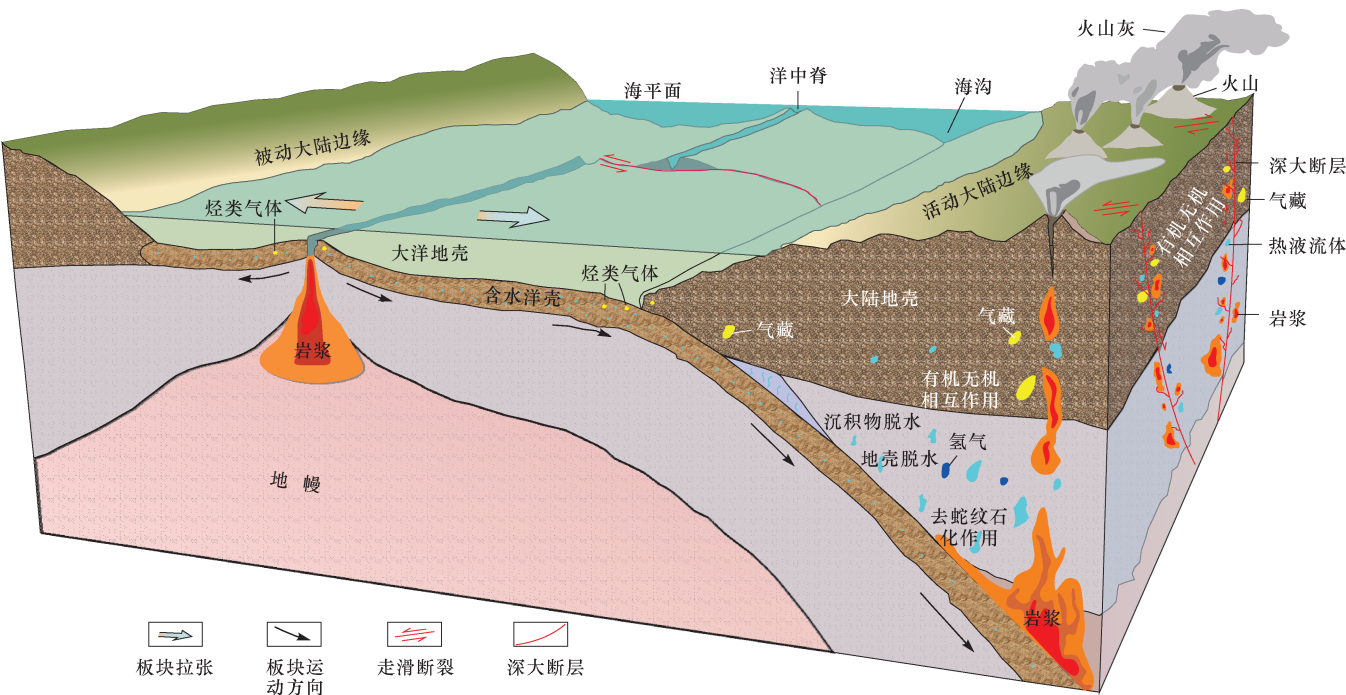


图 6 深层成藏型油气藏的形成环境及机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram showing the environment and mechanism for the formation of reservoirs of post-deep-burial enrichment type

4 问题讨论

在深层油气的识别和勘探过程中仍存在很多科学问题亟需讨论,其中,油气成源和成烃的机理和过程是最为重要的难点问题,也是油气勘探与资源评价的理论基础,传统的理论已难以对深层油气进行有效预测和评价。从地球化学观点看,深层面临的问题主要是中-高成熟度油气生成、演化、储集和保存问题:丰富的烃源岩、充足的能量供给、良好的运保条件和有利的成烃演化环境。而在深层所处的温压条件、流体性质和相态等都发生了重大变化,使得水-岩-烃相互作用可能性大大增加,有机与无机相互作用更为频繁,因此,深层油气形成的关键在于深部无所不在的有机与无机相互作用,这其中主要存在以下问题亟待商榷。

1) 按有机与无机相互作用成烃的观点^[58-60],外来氢的加入是高演化碳酸盐源岩成烃的关键因素。

关于外源氢的来源可分为以下几种^[61-67]:①相对活动区孔、裂隙发育带地下潜水的加入;②岩石相互作用形成的挥发性气体,特别是深部挥发份沿大断裂的运移;③热水流体与围岩发生水-岩反应时,某些矿物或岩石产生蚀变现象,这样也会释放出氢气;④深部断裂活动所伴随的侵入岩或热液中的放射性物质对流体的辐射分解。因此,上述区域应是高演化碳酸盐源岩发育区寻找烃类形成与聚集的有利场所。

2) 富钙烃源岩物质组成对深层油气来源的影响。

特殊烃源,主要是有机酸钙(有机-无机作用产物)。碳酸盐矿物和有机酸反应条件在地质过程中存在:高盐度海水中含有丰富的、能够形成有机酸的有机质,碳酸盐岩的形成环境为碱性环境,而膏盐岩层系具有很高的盐水饱和度,有利于形成大量有机酸盐^[68-69]。在有机质演化的早期阶段有大量的有机酸,有机酸盐热稳定性很高,其成烃演化呈现出与I型干酪根近似的成烃过程,但在成烃转化率、烃类气体占比、CO₂碳同位素组成等方面具有特殊性,主要表现为成烃转化率高和成烃时间滞后的特征^[70]。在液态烃大量生成时期很少分解,但在过成熟阶段可以裂解生成凝析油(轻质油)和气态烃,因而对气藏贡献更直接有效。

3) 深层油气来源绕不开的问题——无机成因气。

无机成因气主要有两种学说^[71-73]:①地幔脱气说。认为地球深部存在着大量的甲烷及其他非烃资源,这些甲烷向上运移,并大量聚集在地壳深部15 km左右的地带,形成无机成因的油气藏。②费托地质成说。地幔脱气生成的CO₂,CO和H₂沿玄武岩的破

裂带上升到超基性的蛇纹岩带,发生了著名的费托合成反应,即氢气与二氧化碳或一氧化碳经高温超压以及Fe,Co,Ni和V等物质的催化下生成烃类物质。故而在火山热液活动区域、深大断裂区域以及构造活动区域需综合油气有机成因、无机成因以及有机-无机混合成因多种模式对深层油气成藏机理进行分析和判识。

5 结论

1) 将深层油气藏类型分为浅成深埋型、浅成深成型和深层成藏型3种,并总结了不同深层油气藏类型的特征、形成过程、油气勘探和评价理论以及存在的重要科学问题,目的在于认识深层油气藏的分布规律、评价勘探前景以及预测勘探目标。

2) 海相碳酸盐岩层系深层有效烃源的类型存在一定的多样性,分散可溶有机质和有机酸盐是构成海相碳酸盐岩烃源的重要组成部分。深层有机-无机相互作用,特别是深层外源氢的参与对高-过成熟有机质的成烃意义重大。高演化碳酸盐岩中存在有机碳向无机碳的转化过程,不能以深层残余TOC低而低估碳酸盐岩层系的生烃潜力。

参 考 文 献

- [1] 李建忠,陶小晚,白斌,等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):1-16.
Li Jianzhong, Tao Xiaowan, Bai Bin, et al. Geological conditions, reservoir forming evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1-16.
- [2] 任战利,祁凯,杨桂林,等. 沉积盆地深层热演化历史与油气关系研究现状及存在问题[J]. 非常规油气,2020,7(3):1-7,15.
Ren Zhanli, Qi Kai, Yang Guilin, et al. Research status and existing problems of relationship between deep thermal evolution history and oil and gas in sedimentary basins[J]. Unconventional Oil & Gas, 2020, 7(3): 1-7, 15.
- [3] 何治亮,李双建,刘全有,等. 盆地深部地质作用与深层资源—科学问题与攻关方向[J]. 石油实验地质,2020,42(5):123-135.
He Zhiliang, Li Shuangjian, Liu Quanyou, et al. Deep geological processes and deep resources in basins: scientific issues and research directions[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 123-135.
- [4] 庞雄奇,林会喜,郑定业,等. 中国深层和超深层碳酸盐岩油气藏形成分布的基本特征与动力机制及发展方向[J]. 地质力学学报,2020,26(5):673-695.
Pang Xiongqi, Lin Huixi, Zheng Dingye, et al. Basic characteristics, dynamic mechanism and development direction of the formation and distribution of deep and ultra-deep carbonate reservoirs in China

- [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 673–695.
- [5] 袁玉松, 胡文瑄, 陈书平, 等. 超深层油气保存主控因素及评价思路[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(4): 47–56.
- Yuan Yusong, Hu Wenxuan, Chen Shuping, et al. The main controlling factors and evaluation ideas of ultra-deep oil and gas preservation [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(4): 47–56.
- [6] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 1–12.
- He Dengfa, Ma Yongsheng, Liu Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 1–12.
- [7] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术发展[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1156–1166.
- Zhang Guangya, Ma Feng, Liang Yingbo, et al. Domain and theory technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1156–1166.
- [8] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1457–1469.
- Jia Chengzao, Pang Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1457–1469.
- [9] 赵文智, 胡素云, 刘伟, 等. 再论中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特征与勘探前景[J]. *天然气工业*, 2014, 34(4): 1–9.
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Liu Wei, et al. Petroleum geological features and exploration prospect in deep marine carbonate strata onshore China: A further discussion [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(4): 1–9.
- [10] 庞雄奇, 汪文洋, 汪英勋, 等. 含油气盆地深层与中浅层油气成藏条件和特征差异性比较[J]. *石油学报*, 2015, 36(10): 1167–1187.
- Pang Xiongqi, Wang Wenyang, Wang Yingxun, et al. Comparison of otherness on hydrocarbon accumulation conditions and characteristics between deep and middle-shallow in petroliferous basins [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(10): 1167–1187.
- [11] 刘池洋. 叠合盆地特征及油气赋存条件[J]. *石油学报*, 2007, 28(1): 1–7.
- Liu Chiyang. Geologic characteristics and petroleum accumulation conditions of superimposed basins [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(1): 1–7.
- [12] 刘池洋. 后期改造强烈: 中国沉积盆地的重要特点之一[J]. *石油与天然气地质*, 1996, 17(4): 255–261.
- Liu Chiyang. Strong late-reformation: one of the important characteristics of sedimentary basins in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 1996, 17(4): 255–261.
- [13] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状, 关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. *石油与天然气地质*, 2020(4): 655–672.
- Ma Yongsheng, Li Maowen, Cai Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020(4): 655–672.
- [14] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(1): 45–57.
- Li Yang, Xue Zhaojie, Cheng Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(1): 45–57.
- [15] 刘文汇, 郑建京, 妥进才, 等. 塔里木盆地深层气[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1–60.
- Liu Wenhui, Zheng Jianjing, Tuo Jincai, et al. Deep-gas in Tarim Basin [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1–60.
- [16] 张金川, 陶佳, 李振, 等. 中国深层页岩气资源前景和勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2021, 41(1): 15–28.
- Zhang Jinchuan, Tao Jia, Li Zhen, et al. Prospect of deep shale gas resources in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 15–28.
- [17] 何治亮, 聂海宽, 胡东风, 等. 深层页岩气有效开发中的地质问题——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 379–391.
- He Zhiliang, Nie Haikuan, Hu Dongfeng, et al. Geological problems in the effective development of deep shale gas: A case study of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations in Sichuan Basin and its periphery [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 379–391.
- [18] Pusey W. How to evaluate potential gas and oil source rocks [J]. *World Oil*, 1973, 176(5): 71–75.
- [19] Tissot B, Welte H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1984: 1–235.
- [20] Feng W, Wang F, Jiang T, et al. Origin and accumulation of petroleum in deep precambrian reservoir in Baxian Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104541.
- [21] Li J, Zhang Z, Zhu G, et al. The origin and accumulation of ultra-deep oil in Halahatang area, northern Tarim Basin [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195: 107898.
- [22] 朱光有, 曹颖辉, 闫磊, 等. 塔里木盆地 8000m 以深超深层海相油气勘探潜力与方向[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(6): 755–772.
- Zhu Guangyou, Cao Yinghui, Yan Lei, et al. Petroleum exploration potential and favorable areas of ultra-deep marine strata deeper than 8000 meters in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(6): 755–772.
- [23] Zhu G, Milkov A V, Li J, et al. Deepest oil in Asia: Characteristics of petroleum system in the Tarim basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 199: 108246.
- [24] Wang Q, Hao F, Cao Z, et al. Geochemistry and origin of the ultra-deep Ordovician oils in the Shunbei field, Tarim Basin, China: Implications on alteration and mixing [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104725.
- [25] 张天付, 黄理力, 倪新锋, 等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统吾松格尔组岩性组合及其成因和勘探意义——亚洲第一深井轮探 1 井突破的启示[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 928–940.
- Zhang Tianfu, Huang Lili, Ni Xinfeng, et al. Lithological combination, genesis and exploration significance of the Lower Cambrian Wusonggeer Formation of Kalpin area in Tarim Basin: Insight through the deepest Asian onshore well—Well Luntan 1 [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 928–940.
- [26] Price L C. Thermal stability of hydrocarbons in nature: Limits, evidence, characteristics, and possible controls [J]. *Geochimica et Cos-*

- mochimica Acta, 1993, 57(14): 3261–3280.
- [27] Price L C, Wenger L M. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis[J]. Organic Geochemistry, 1992, 19(1/3): 141–159.
- [28] 卢双舫, 薛海涛, 钟宁宁. 石油保存下限的化学动力学研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 1–3.
Lu Shuangfang, Xue Haitao, Zhong Ningning. The chemical kinetic study of the oil preservation threshold[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(6): 1–3.
- [29] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1–12.
- [30] McTavish R A. The role of overpressure in the retardation of organic matter maturation[J]. Journal of Petroleum Geology, 1998, 21(2): 153–186.
- [31] Simoneit B R T. Aqueous high-temperature and high-pressure organic geochemistry of hydrothermal vent systems[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(14): 3231–3243.
- [32] Mango F D, Hightower J. The catalytic decomposition of petroleum into natural gas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(24): 5347–5350.
- [33] Mango F D. The stability of hydrocarbons under the time-temperature condition of petroleum genesis[J]. Nature, 1991, 352: 146–148.
- [34] Dieckmann V, Schenk H J, Horsfield B, et al. Kinetics of petroleum generation and cracking by programmed-temperature closed-system pyrolysis of Toarcian Shales[J]. Fuel, 1998, 77: 23–31.
- [35] Gai H, Tian H, Xiao X. Late gas generation potential for different types of shale source rocks: implications from pyrolysis experiments[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 193: 16–29.
- [36] Gai H, Xiao X, Cheng P, et al. Gas generation of shale organic matter with different contents of residual oil based on a pyrolysis experiment[J]. Organic Geochemistry, 2015, 78: 69–78.
- [37] Lorant F, Behar F. Late generation of methane from mature kerogens[J]. Energy & Fuels, 2002, 16: 412–427.
- [38] 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等. 超压环境有机质热演化和生烃作用机理[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 9–18.
Hao Fang, Zou Huayao, Fang Yong, et al. Kinetics of organic matter maturation and hydrocarbon generation in overpressure environment[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 9–18.
- [39] 郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2002, 27(5): 610–615.
Hao Fang, Zou Huayao, Ni Jianhua, et al. Evolution of overpressured systems in sedimentary basins and conditions for deep oil/gas accumulation[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 610–615.
- [40] 姜峰, 杜建国, 王万春, 等. 高温超高压模拟实验研究——II. 高温高压下烷烃产物的演化特征[J]. 沉积学报, 1998, 16(4): 145–148.
Jiang Feng, Du Jianguo, Wang Wanchun, et al. The study on high-pressure-high-temperature aqueous pyrolysis II. Evolutionary characteristics of alkane generated from organic matter under high temperature and high pressure[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(4): 145–148.
- [41] Barker C. Calculated volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(7): 1254–1261.
- [42] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 深层、超深层温度及热演化历史对油气相态与生烃历史的控制作用[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 22–30.
Ren Zhanli, Cui Junping, Qi Kai, et al. Control effects of temperature and thermal evolution history of deep and ultra-deep layers on hydrocarbon phase state and hydrocarbon generation history[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 22–30.
- [43] 邱楠生, 刘雯, 徐秋晨, 等. 深层—古老海相层系温压场与油气成藏[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3511–3525.
Qiu Nansheng, Liu Wen, Xu Qiucheng, et al. Temperature-pressure field and hydrocarbon accumulation in deep-ancient marine strata[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3511–3525.
- [44] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 1–11.
Jia Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1–11.
- [45] 刘文汇, 王杰, 腾格尔, 等. 中国海相层系多元生烃及其示踪技术[J]. 石油学报, 2012(S1): 115–125.
Liu Wenhui, Wang Jie, Tengge, et al. Multiple hydrocarbon generation of marine strata and its tracer technique in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012(S1): 115–125.
- [46] 刘文汇, 张建勇, 范明, 等. 叠合盆地天然气的重要来源—分散可溶有机质[J]. 石油实验地质, 2007, 29(1): 1–6.
Liu Wenhui, Zhang Jianyong, Fan Ming, et al. Gas generation character of dissipated soluble organic matter[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(1): 1–6.
- [47] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 533–546.
He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhu Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533–546.
- [48] 刘永立, 尤东华, 李海英, 等. 超深层碳酸盐岩层系硅质岩储层表征与评价——以塔里木盆地塔深6井为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 547–556.
Liu Yongli, You Donghua, Li Haiying, et al. Characterization and evaluation of chert reservoirs in ultra-deep carbonate rock formations—A case study on Well TS 6 in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 547–556.
- [49] Wang Xiaofeng, Liu Wenhui, Shi Baoguang, et al. Hydrogen isotope characteristics of thermogenic methane in Chinese sedimentary basins[J]. Organic Geochemistry, 2015, 83–84: 178–189.
- [50] Liu D, Zhang W, Kong Q, et al. Lower Paleozoic source rocks and natural gas origins in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration & Development, 2016, 43(4): 591–601.
- [51] Liu Q, Jin Z, Meng Q, Wu X, et al. Genetic types of natural gas and filling patterns in Daniudi gas field, Ordos Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 107: 1–11.

- [52] Tang S, Tang D, Li S, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas and gas-filling mode of the Paleozoic in the Yanchuannan gas field, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 49: 286–297.
- [53] Wu X, Liu Q, Zhu J, et al. Geochemical characteristics of tight gas and gas-source correlation in the Daniudi gas field, the Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 412–425.
- [54] 戴金星, 石昕, 卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J]. *石油学报*, 2001, 22(6): 5–10.
Dai Jinxing, Shi Xin, Wei Yanzhao. Summary of the abiogenic origin theory and the abiogenic gas pools (fields) [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(6): 5–10.
- [55] 戴金星. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J]. *天然气工业*, 1995, 15(3): 22–27.
Dai Jinxing. Abiogenic gas in oil-gas bearing basins in China and its reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 1995, 15(3): 22–27.
- [56] 崔永强, 李莉, 陈卫军. 松辽盆地无机成因烃类气藏的幔源贡献[J]. *大庆石油地质与开发*, 2001, 20(4): 6–8.
Cui Yongqiang, Li Li, Chen Weijun. Mantle source contribution of inorganic genetic hydrocarbon gas reservoir in Songliao basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2001, 20(4): 6–8.
- [57] 郭占谦, 刘文龙, 王先彬. 松辽盆地非生物成因气的成藏特征[J]. *中国科学 D 辑(地球科学)*, 1997, 27(2): 143–148.
Guo Zhanqian, Liu Wenlong, Wang Xianbin. Accumulation characteristics of abiogenic gas in Songliao Basin[J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27(2): 143–148.
- [58] Seewald J S. Organic-inorganic interaction in petroleum-producing sedimentary basins[J]. *Nature*, 2003, 426: 327–333.
- [59] 张旗, 金维浚, 王金荣, 等. 岩浆热场对油气成藏的影响[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(4): 1525–1541.
Zhang Qi, Jin Weijun, Wang Jinrong, et al. Relationship between magma-thermal field and hydrocarbon accumulation[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4): 1525–1541.
- [60] 梁新平, 金之钧, 刘全有, 等. 火山灰对富有机质页岩形成的影响——以西西伯利亚盆地中生界巴热诺夫组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 201–211.
Liang Xinping, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Impact of volcanic ash on the formation of organic-rich shale: A case study on the Mesozoic Bazhenov Formation, West Siberian Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 201–211.
- [61] Spirakis C S. The roles of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 11(1–3): 53–69.
- [62] Lollar B S, Onstott T C, Lacrampe-Couloume G, et al. The contribution of the precambrian continental lithosphere to global H₂ production[J]. *Nature*, 2014, 516: 379–382.
- [63] Lin L H, Hall J, Lippmann-Pipke J, et al. Radiolytic H₂ in continental crust: Nuclear power for deep subsurface microbial communities. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005a, 6: 1–13.
- [64] Kita I, Matsuo S, Wakita H. H₂ generation by reaction between H₂O and crushed rock: An experimental study on H₂ degassing from the active fault zone[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1982, 87: 10789–10795.
- [65] Hu Q Y, Kim D Y, Liu J, et al. Dehydrogenation of goethite in Earth's deep lower mantle [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114: 1498–1501.
- [66] Helgeson H C, Knox A M, Owens C E, et al. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: Are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(14): 3295–3339.
- [67] Charlou J L, Donval J P, Fouquet Y, et al. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR) [J]. *Chemical Geology*, 2002, 191: 345–359.
- [68] 刘全有, 金之钧, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地海相层系中有机关盐存在以及对低丰度高演化烃源岩生烃潜力评价的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(12): 1975–1983.
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Liu Wenhui, et al. Presence of carboxylate salts in marine carbonate strata of the Ordos Basin and their impact on hydrocarbon generation evaluation of low TOC, high maturity source rocks[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(12): 1975–1983.
- [69] 刘鹏, 王晓峰, 房嫄, 等. 碳酸盐岩有机质丰度测试新方法[J]. *沉积学报*, 2016, 34(1): 200–206.
Liu Peng, Wang Xiaofeng, Fang Xuan, et al. A new method to measure the value of organic abundance in carbonate rocks [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(1): 200–206.
- [70] Wang Q, Liu W, Pei L, et al. Hydrocarbon generation from calcium stearate: insights from closed-system pyrolysis[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 126: 104923.
- [71] Gold T. The origin of methane in the crust of the earth[J]. *The Future of Energy Gases: U S Geological Survey Professional Paper*, 1993, 1570: 57–80.
- [72] Kolesnikov A, Gutcherov V G, Goncharov A F. Methane derived hydrocarbon produced under upper mantle conditions[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 556–570.
- [73] Friedel R A, Sharkey Jr A G. Alkanes in natural and synthetic petroleum: comparison of calculated and actual composition[J]. *Science*, 1963, 124: 1203–1205.

(编辑 张玉银)