

# 超深层油气藏石油地质特征及其成藏主控因素分析

黄娟, 叶德燎, 韩彧

(中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所 江苏 无锡 214126)

**摘要:** 由于区域地质背景的不同, 根据前人的研究成果, 确定了超深层油气藏为大于 6 km 的埋深。对超深层油气藏的烃源岩、储集层、盖层和圈闭等的研究发现: 与一般烃源岩相比, 超深层油气藏的烃源岩成熟期晚、成熟度较高, 生烃作用除了受温度和时间控制外, 还受压力作用的影响。超压对有机质热演化和生烃过程有着强烈的抑制作用; 储集层主要以次生孔隙为主, 年代偏老, 储集层岩性中, 碳酸盐岩所占比例达 33%; 盖层主要为盐岩、泥质岩; 圈闭类型主要为构造圈闭、岩性圈闭、礁和复合圈闭。超深层油气藏主要受地层异常压力分布和温度等因素的控制。对我国超深层油气藏的勘探, 可集中于地温梯度较小的地区、超高压体系内的次生孔隙和裂缝发育带、深层海相碳酸盐岩区、盐下地层和东部海域的深水區等。

**关键词:** 高温高压; 超深层; 油气成藏; 石油地质

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

## Petroleum geology features and accumulation controls for ultra-deep oil and gas reservoirs

Huang Juan, Ye Deliao, Han Yu

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** According to previous studies and specific geological settings of different regions, ultra-deep reservoirs have been defined as being 6 km. Petroleum geology studies of ultra-deep reservoirs have been made, including considerations of source rock, reservoir, cap rock and trap. Compared to conventional source rocks, the source rocks in ultra-deep reservoirs entered the mature stage later and have a higher maturity. Hydrocarbon generation was controlled by temperature, time and pressure. Overpressure strongly restricted the thermal evolution of organic matter and hydrocarbon generation. Secondary pores with an older age worked as the main reservoir space. Carbonate rocks account for 33% of reservoir. Cap rocks are dominated by evaporites and mudrocks. The major traps are structural, lithological, reef and combination traps. The formation of ultra-deep reservoirs was controlled by abnormal pressure and temperature. It is suggested that ultra-deep oil and gas exploration in China should focus on the areas with lower geothermal gradients, stratigraphic intervals with secondary porosity and well-developed overpressures, deeply-buried carbonate rocks, sub-salt sequences and East China's deep offshore areas.

**Key words:** high temperature and high pressure; ultra-deep; hydrocarbon accumulation; petroleum geology

近年来, 油气发现的难度在不断增大, 各国和各大石油公司开始转向非常规油气的勘探<sup>[1]</sup>。同时, 随着勘探理论和工程技术的不断进步, 深层油气勘探开发越来越被广泛关注。向含油气盆地超深层拓展, 也是实现我国油气资源新突破, 提高资源保障程度的重要途径之一。勘探结果表明, 6 km 深度以下发现的油气藏个数和储量在不断地增长, 我国东部渤海湾盆地胜利 1 井的钻探深度超过了 6 km; 位于西部塔里木盆地的塔深 1 井钻深达 8 408 m<sup>[2]</sup>; 四川元坝气田的平均埋深约 6 800 m, 是迄今世界上地质埋藏最深, 开发风险最大, 建设难

度很高的高含硫化氢气田<sup>[3]</sup>。近年来, 全球发现了大量的超深层油气, 在美国超过 6 km 的生产井近 1 000 口, 其中 52 口为钻探深度超过 7 500 m 的超深井, 且超深井的钻探成功率达到了 50%。2011 年壳牌公司在墨西哥湾水深 2 934 m 的 Tobago 油田所钻的一口勘探井日前已开始石油生产<sup>[4]</sup>。超深层油气藏已经成为新一轮油气勘探的热点。

深层—超深层油气领域多处于高温、高压环境中, 如我国东部陆相盆地超深层地层温度普遍在 150 °C 以上, 大庆油田古龙 1 井(井深 6 300 m)温度高达 200 °C, 东营凹陷的胜利 1 井井深 7 026 m

收稿日期: 2015-08-31; 修订日期: 2016-08-05。

作者简介: 黄娟(1983—)女, 硕士, 工程师, 从事石油地质研究工作。E-mail: huangjuan\_syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化前瞻性研究项目(G5800-13-25-KJB024-4)。

处的温度和压力分别高达 235 °C 和 123 MPa; 中西部盆地深层(7 km 以下) 同样处于高温高压状态 ( $T > 150$  °C,  $P > 50$  MPa)。在这些深层—超深层油气勘探研究过程中,发现在高温、高压条件下仍存在液态烃并形成有效油气藏<sup>[1]</sup>。这些发现对长期以来指导油气勘探的一些经典理论,包括干酪根晚期生油理论、储层形成与演化理论和油气成藏理论都提出了新的挑战。

## 1 超深层油气资源的划分

关于超深层油气藏的划分,如果仅考虑深度因素,很难给出一个合理的划分标准。合理的划分标准应该根据深度、压力和温度的关系,再结合研究区的实际情况,以及其勘探开采难度的大小进行划分。根据 Hallbouty 等所统计的世界大油气田数据<sup>[5-7]</sup>以及 USGS 全球资源评价的数据<sup>[8-9]</sup>所做的世界 840 个大油气田的深度埋深分布图(图 1)可以看出,已知储层深度大于 6 km 的大油气田只有 4 个,可见在 6 km 深度以下的油气藏勘探有待进一步深入,但勘探难度较大。

然而,最近几年美国墨西哥湾盆地在深度 9 km 左右发现了大型的油气藏,俄罗斯滨里海盆地布拉海油藏在 7 550 m 深度、温度 295 °C 条件下仍有液态烃聚集,说明在大于 6 km 深度油气可以成藏富集,但是存在油气的地区必须具备特定的地质条件,才能保证存在商业性油气聚集。因此可将埋深超过 6 km 的油气资源作为超深层油气。

近年来的勘探实践表明,在深层高温条件下有

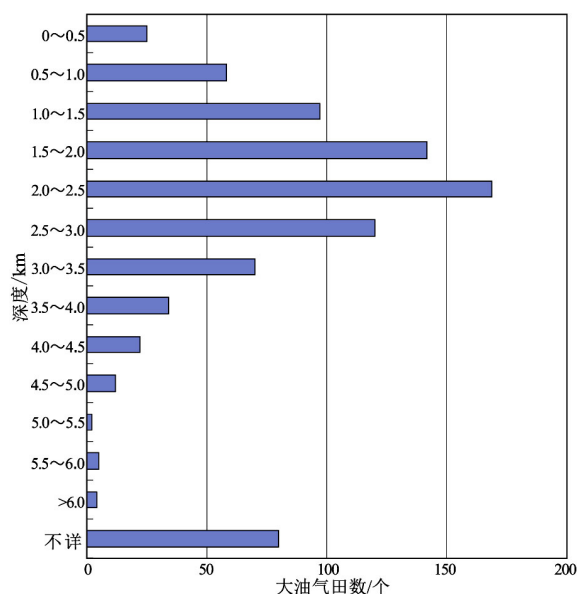


图 1 世界大油气田储层深度分布<sup>[8-9]</sup>

Fig. 1 Reservoir depth of giant oil and gas fields in the world

机质仍能稳定存在<sup>[10-11]</sup>。科威特在 6 736 m 的深层发现了无硫天然气/凝析油藏,可见深层油气的赋存深度范围很广。通过分析这些超深层地区存在油气资源的原因,可以为未知地区超深层的油气勘探提供很好的借鉴。

## 2 超深层油气藏成藏条件

### 2.1 构造背景

世界超深层油气藏主要分布于 2 大类盆地中,即与板块边界无关的被动大陆边缘盆地和与主动大陆边缘相关的盆地。主要有主裂谷盆地、被动大陆边缘盆地和前陆盆地等。前陆盆地中,超深层油气层主要分布于前渊构造带。

这 2 大类盆地之所以为超深层油气发育最有利区是由于:(1) 沉积厚度较厚,具有形成和保存超深层油气的物质条件;(2) 常常伴有异常高压,从而抑制了油气的生成和排出,降低了生油窗的深度;(3) 在盆地深部容易产生大量的裂缝和破裂,提高储层的储集性能,有利于排烃和油气的聚集;(4) 裂谷盆地和前陆盆地所形成的构造圈闭,具有良好的储集条件。

### 2.2 石油地质特征

#### 2.2.1 烃源岩

与一般的烃源岩相比,超深层烃源岩生烃作用的控制因素除了温度和时间外,还有压力因素;超深层烃源岩的成熟期一般较晚,且由于埋深较大,成熟度一般相对较高。

超深层油气藏的温度已高于干酪根生油理论所定义的“液态窗”<sup>[12]</sup>。近年的很多勘探实践过程中,发现油气的生成已经超过了这一界限,如北海地区的某些油层在 165 ~ 175 °C<sup>[13]</sup>。

超深层烃源岩的有机碳含量仍然很高,且含油气盆地超深层烃源岩分布范围也很大,岩性主要为陆源碎屑岩和碳酸盐岩,有机碳含量介于 0.25% ~ 6%。超深层烃源岩有机碳含量主要受控于源岩的沉积相以及其中的有机质,与源岩的埋藏深度没有关系。超深层烃源岩的成熟度除受温度和压力的影响外,还与盆地沉积速率有关。晚期快速沉积与沉积速率基本不变的沉积相比,其烃源岩的成熟期较晚,生烃速率也较大<sup>[14-16]</sup>。烃源岩的标志,诸如物质组成特性和高的有机质丰度等,在鉴别深部烃源岩时依然有效<sup>[17-20]</sup>。

#### 2.2.2 储集层

与一般深度的储集层相比,超深层油气藏储集层的孔隙度并不低,但以次生孔隙为主;与一般的油

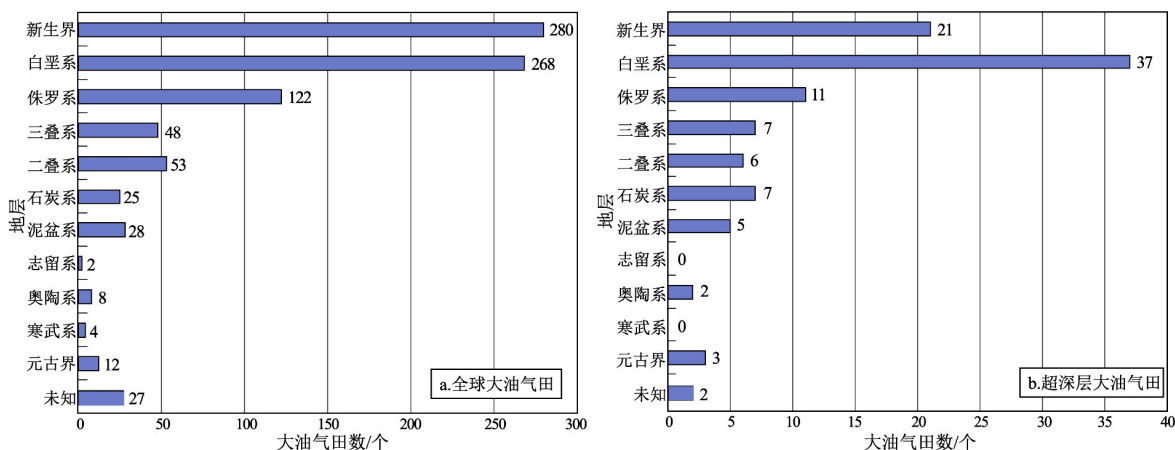


图 2 全球大油气田储层时代分布特征<sup>[8-9]</sup>

Fig. 2 Reservoir age of giant oil and gas fields in the world

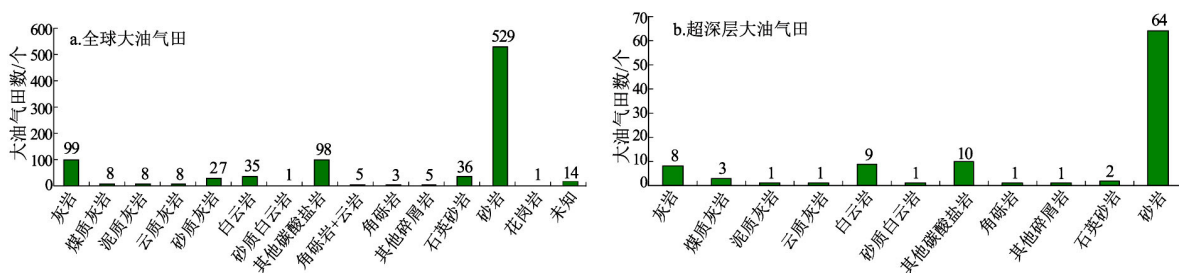


图 3 全球大油气田储层岩性分布特征<sup>[8-9]</sup>

Fig. 3 Reservoir lithological features of giant oil and gas fields in the world

气藏相比, 储集层物性除了受压力和温度的控制外, 还受到应力的影响。超压环境下, 压实、胶结和溶解作用降低, 从而使得超深层的储集层具有相对高孔高渗的储集性能。在超深层油气藏中, 气藏、凝析气藏所占的比例明显上升。全球大油气田储层时代与超深层大油气田储层时代的对比发现, 超深层油气主要集中在中生界, 新生界相对较少<sup>[20]</sup>(图 2)。

超深层油气藏的储层主要为砂岩和碳酸盐岩(图 3)。101 个超深层大油气田中, 砂岩储层有 66 个, 而碳酸盐岩储层有 33 个, 碳酸盐岩储层占总数的 33.67%; 全球大油气田中, 砂岩储层有 565 个, 而碳酸盐岩储层有 284 个, 碳酸盐岩储层占总数的 33.45%。超深层油气藏储层的沉积环境多样, 主要为海相。

超深储层由于脆性较强, 其裂缝与次生孔隙比较发育<sup>[21-24]</sup>。特别是碳酸盐岩, 由于其不易压缩且裂缝发育, 决定了碳酸盐岩的高孔隙和高渗透性。如美国二叠盆地的碳酸盐岩, 在埋藏深度 7 200 m 处的渗透率仍高达  $(120 \sim 1\ 000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。深度和孔隙度也没有正相关性, 在超深层也有孔隙度大于 25% 的储集岩<sup>[24]</sup>。超深层的裂缝改善了储集性能, 并为油气提供了渗流通道。

### 2.2.3 盖层

超深层油气藏的优质盖层主要为盐岩和泥岩。盐岩致密并且易变形, 有很强的韧性, 是超深层油气藏特别是大型油气藏的最优质盖层, 如滨里海盆地的田吉兹油田<sup>[25]</sup>。如果盆地存在优质的盖层, 有可能随埋深的增大, 油气藏规模越大。

### 2.2.4 圈闭

超深层油气藏主要有构造圈闭、岩性圈闭、礁及复合圈闭等(图 4)。圈闭类型的影响因素较多, 主要为盆地的沉积环境、盖层的封闭条件等。在超深层油气勘探中, 特别需要重视 3 种具体圈闭类型:

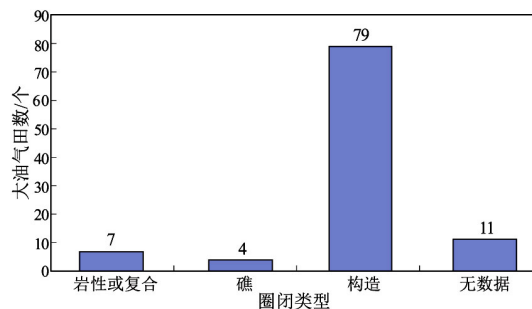


图 4 全球超深层大油气田圈闭类型<sup>[8-9]</sup>

Fig. 4 Reservoir types of ultra-deep giant oil and gas fields in the world

地层不整合圈闭、地层—构造复合圈闭和超高压环境下的岩性圈闭。

### 3 超深层油气藏分布主控因素

超深层之所以能够形成油气藏,是因为具有特殊的成藏特征,超深层油气成藏的主控因素包括地层异常压力和温度等。

#### 3.1 异常压力的控制作用

##### 3.1.1 异常压力对生烃作用的控制作用

压力增加可能抑制或延迟了油气生成和有机质成熟,高压延迟了油气的生成,使生成油气的深度加大<sup>[26]</sup>。异常压力是盆地超深层地层的常见现象,且一般随埋深的增加,异常压力也增大。超高压可以抑制或延迟烃源岩的生烃作用。墨西哥湾盆地华盛顿湖油田的第三系,地层深度 6 540 m 处,地温大于 200 °C,但由于具 130 MPa 的异常高压,仍保持液态烃状态<sup>[27-34]</sup>。

##### 3.1.2 异常压力对储集性能的改善

异常高压可以抑制压实、胶结、溶解作用,从而保护了原有的原生孔隙。此外早期进入的原油、次生孔隙的发育、封存箱的排放产生的淋滤作用都提高了储集性能<sup>[21]</sup>。在超深层储集层中,储层岩石的破裂非常重要。破裂使孔隙空间体积的增大并不显著,却能够有效地增大渗透率。超深层地层裂缝和微破裂带是不封闭的,流体可沿裂缝或破裂带运移并聚集成藏。

##### 3.1.3 异常压力的封闭作用

现今超深层的超压圈闭可能只是在历史的某个很短的时间段内产生了破裂,而这些破裂对现今的油气聚集影响甚微。膏盐具有很强的可塑性,对圈闭的保存有着重要的作用。尽管超压盆地油气倾向于赋存在浅层的静水压力系统中,但超深层的超压环境也可形成商业性油藏。

##### 3.1.4 异常压力促进油气运移

异常压力不仅可以为油气运移克服毛细管压力,而且超深层异常压力所产生的裂隙和断裂,为油气运移提供了通道,从而形成油气藏。

#### 3.2 温度

干酪根晚期成油理论将生成液态烃的温度限定在 60 ~ 120 °C,超过这一温度将主要以气态烃的形式产出。大多数学者认为油气存在的下限为 160 ~ 200 °C,相应的深度为 5 ~ 9 km。这其中深度的差别主要是由于煤化阶段和相应后生作用阶段之间过渡界限温度不同所致。在相同的深度内,若对应的温度比较低,就对其油气的形成与保存有

利。因此在地温梯度较小的地区就有利于形成油气藏。如在美国的墨西哥湾盆地,从陆到海地温梯度逐渐减小。近年来在墨西哥湾海域的深水区,油气勘探技术不断创新与应用,推动了墨西哥湾成熟探区超深层巨型气藏的新发现,油气勘探深度已经超过了 8 km。

碳酸盐岩的热导性低于蒸发岩,因此厚含盐地层促使地温梯度极大减小。如在北非锡尔特裂谷盆地,按各种指标来看这个盆地应具有高地温,但是始新统含盐地层使拗陷深部的热量释放,从而降低了地温,有利于油气藏的形成与保存。这对于论证超深层油气藏存在的可能性来说非常重要,因为大多数研究者均将 180 ~ 200 °C 的现在温度作为深部无远景的依据,认为这样的温度对于石油以及甲烷来说是临界温度。因此,在研究深部油气藏温度时,不仅要考察现今油气藏的温度,同时要注意原油充注储层后储集层的温度。

### 4 超深层油藏勘探有利区分析

#### 4.1 勘探可以集中于地温梯度较小的地区

传统的干酪根晚期成油理论认为液态烃形成的温度范围为 60 ~ 120 °C,当地层温度超过 120 °C 时,有机质和液态烃将发生裂解形成以甲烷为主的气态烃。在滨里海盆地东阿科布盐丘穹窿范围和穹窿间的阿蜡所尔带,根据与其地质构造相似区的对比,其地温梯度应为 1.2 ~ 2.2 °C/hm,即在 16 ~ 18 km 深处地温可能仍不超过 200 °C,这是滨里海盆地深层油气藏存在的关键因素<sup>[26, 35-38]</sup>。因此可以将地温梯度较小的含油气盆地作为我国深层油气勘探的主要目标区。

#### 4.2 超高压体系的次生孔隙和裂缝发育带

超高压对深层储集层具有改善作用,具体体现在降低的储集层有效应力抑制了成岩作用、压力泄漏促进了次生孔隙的形成、超高压缝的发育和超高压控制下的热循环对储集层的改善等。

#### 4.3 盐下地层的油气勘探

墨西哥湾盆地、滨里海盆地和塔里木盆地等发现了一系列盐下油气藏,超深层油气藏勘探潜力很大。塔里木盆地发育盐下构造,渤海莱州湾地区存在一定盐岩相关构造,这些构造的勘探有可能为塔里木盆地和渤海湾盆地带来一定的储量增长<sup>[39-41]</sup>。美国墨西哥湾盆地盐下油气勘探已有成熟的技术和成功的经验,值得学习和借鉴。

#### 4.4 深层海相碳酸盐岩区

我国的碳酸盐岩油气藏具有自身的特殊性,碳

酸盐岩层系形成于多旋回的叠合盆地;碳酸盐岩层系时代老、埋藏深;烃源岩多元、多期生烃;储集层类型多、非均质性强;圈闭类型多样,以地层圈闭和复合圈闭为主;油气藏改造、破坏严重,保存条件复杂;油气藏分布复杂,预测难。

但碳酸盐岩又具有形成超深层油气藏的有利条件,如碳酸盐岩的次生孔隙发育,且容易形成超压,对于深层油气藏来说,有着很好的储集条件;若存在一定规模的生物礁体,将会具有很好的油气勘探潜力。中国深层碳酸盐岩油气勘探在借鉴国外勘探经验的同时,更应注重我国碳酸盐岩基础地质特征和油气成藏独特性方面的研究,以便探索适合我国的理论模式和勘探技术。

#### 4.5 深水区的超深层油气勘探

随着深水区大油气田的不断发现,油气储量、产量比例快速增大,虽然深水油气勘探具有高成本、高技术、高风险的特点,却能够获得丰富的油气储量,即高回报。中国深水领域广阔,包括南海的琼东南盆地南部深水区及珠江口盆地珠二坳陷和潮汕坳陷周缘的深水区。近几年的研究成果表明,南海北部陆架深水区具有很好的油气成藏条件,与国外获得巨大成功的深水油气勘探区较为相似,建议选择重点的勘探区带和合理的勘探步骤,“由浅及深,循序渐进”地推动我国深水油气勘探。

## 5 结论

(1) 超深层油气藏的烃源岩具有晚期成熟特征;生烃作用除受温度和控制外,还受压力作用的影响,超压对有机质热演化和生烃过程有着强烈的抑制作用。超深储集层主要以次生孔隙为主;储集性能除受温度和压力的控制外,还受应力作用的影响;储集层岩性中,碳酸盐岩所占比例达33%。盖层主要为盐岩、泥质岩;圈闭类型主要为构造圈闭、岩性圈闭、礁和复合圈闭。

(2) 我国超深层油气勘探可以集中在地温梯度较小的地区、超高压体系的次生孔隙和裂缝发育带、深层海相碳酸盐岩区、盐下地层和海域的深水区等。西部的大型沉积盆地有丰富的深层资源和形成深层大中型油气田(藏)的地质条件,具有良好的勘探前景。

(3) 深层油气勘探成本高、风险大,很难获得好的资料,还有一系列诸如油气藏形成机理等的科学问题需进一步系统深入研究,同时需要研发相关的深层勘探和开发技术。

#### 参考文献:

- [1] 妥进才. 深层油气研究现状及进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 565-571.  
Tuo Jincan. Research status and advances in deep oil and gas exploration[J]. *Advance in Earth Sciences* 2002, 17(4): 565-571.
- [2] 江书程. 开拓油气勘探新领域: 胡见义院士谈高海拔与超深地层油气勘探开发[EB/OL]. (2009-01-16) [2009-06-10]. <http://www.cippe.net/news/11804.htm>.
- [3] 四川日报网. 元坝气田年底全面投产[EB/OL]. (2015-08-25) [2016-09-18]. <http://epaper.scdaily.cn/shtml/scr/20150825/108576.shtml>.
- [4] Sebastian S. 9 627 feet: Gulf well sets deep-water record[EB/OL]. (2011-11-17) [2015-02-27]. <http://www.chron.com/business/article/9-627-feet-Gulf-well-sets-deep-water-record-2275146.php>.
- [5] Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the 1990s: An introduction[M]//Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999: AAPG Memoir 78. Tulsa: AAPG, 2003: 1-13.
- [6] Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999: AAPG Memoir 78 [M]. Tulsa: AAPG, 2003: 1-340.
- [7] Ahlbrandt T S, Charpentier R R, Klett T R et al. Global resource estimates from total petroleum systems[M]. Tulsa: AAPG, 2005: 1-324.
- [8] U. S. Geological Survey National Oil and Gas Resource Assessment Team. 1995 national assessment of United States oil and gas resources [R]. Washington: United States Government Printing Office, 1995.
- [9] USGS World Energy Assessment Team. U. S. Geological Survey world petroleum assessment 2000: Description and result [R]. Denver: U. S. Geological Survey, 2000.
- [10] Lichman E, Goloshubin G. Unified approach to gas and fluid detection on instantaneous seismic wavelets [C]//SEG 73th Technical Program Expanded Abstracts. [S. l.]: SEG, 2003: 1699-1702.
- [11] 段毅, 王先彬. 深层油气形成的若干问题探讨[J]. 天然气地球科学, 1999, 10(6): 22-26.  
Duan Yi, Wang Xianbin. Several questions about deep reservoir formation [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1999, 10(6): 22-26.
- [12] 李美俊, 孟元林, 顾雪琴. 深层烃源岩成烃理论研究进展[J]. 特种油气藏, 2002, 9(4): 1-5.  
Li Meijun, Meng Yuanlin, Gu Xueqin. Research progress in hydrocarbon formation theory of deep source rock [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2002, 9(4): 1-5.
- [13] 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.
- [14] McTavish R A. The role of overpressure in the retardation of organic matter maturation [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1998, 21(2): 153-186.
- [15] 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.
- [16] Price L C. Thermal stability of hydrocarbons in nature: Limits, evidence, characteristics and possible controls [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(14): 3261-3280.
- [17] Meihejef. The oil bearing temperature conditions on deep strata

- [J]. *Petroleum Geology Formation*, 1993, 14(3/4): 1-4.
- [18] 妥进才, 王先彬, 周世新, 等. 深层油气勘探现状与研究进展[J]. *天然气地球科学*, 1999, 10(6): 1-8.  
Tuo Jincan, Wang Xianbin, Zhou Shixin, et al. Deep oil and gas exploration status and research progress [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1999, 10(6): 1-8.
- [19] 石昕, 戴金星, 赵文智. 深层油气藏勘探前景分析[J]. *中国石油勘探*, 2005, 10(1): 1-10.  
Shi Xin, Dai Jinxing, Zhao Wenzhi. Analysis of deep oil and gas reservoirs exploration prospect [J]. *China Petroleum Exploration*, 2005, 10(1): 1-10.
- [20] 吴富强, 鲜学福. 深部储层勘探、研究现状及对策[J]. *沉积与特提斯地质*, 2006, 26(2): 68-71.  
Wu Fuqiang, Xian Xuefu. Current state and countermeasure of deep reservoirs exploration [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2006, 26(2): 68-71.
- [21] Yu Gang, Marion B, Bryans B, et al. Crosswell seismic imaging for deep gas reservoir characterization [J]. *Geophysics*, 2008, 73(6): B117-B126.
- [22] Solares J R, Franco C A, Al-Marri H M, et al. Successful multistage horizontal well fracturing in the deep gas reservoirs of Saudi Arabia: Field testing of a promising innovative new completion technology: SPE-114768 [R]. [S. l.]: SPE, 2008.
- [23] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(1): 1-12.
- [24] 张冬玉. 深层油气藏的流体特征及成藏条件[J]. *油气地质与采收率*, 2006, 13(5): 47-49.  
Zhang Dongyu. Fluid characteristics and reservoir forming condition in deep oil and gas reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(5): 47-49.
- [25] 周生友, 杨秀梅, 马艳, 等. 滨里海盆地北部盐下油气成藏条件与模式研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(2): 304-308.  
Zhou Shengyou, Yang Xiumei, Ma Yan, et al. Forming condition for hydrocarbon accumulation and hydrocarbon accumulation pattern in the northern part of Pre-Caspian Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(2): 304-308.
- [26] 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.  
Zhou Shixin, Wang Xianbin, Tuo Jincan, et al. New progress of deep petroleum geochemistry research [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1999, 10(6): 9-15.
- [27] Ajdukiewicz J M, Nicholson P H, Esch W L. Prediction of deep reservoir quality using early diagenetic process models in the Jurassic Norphlet Formation, Gulf of Mexico [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1189-1227.
- [28] Crawford T G, Burgess G L, Kinler C J. Estimated oil and gas reserves in Gulf of Mexico, December 31, 2003: OCS Report MMS 2006-069 [R]. [S. l.]: Minerals Management Service, 2006.
- [29] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis II: Application to northwest Gulf of Mexico Cenozoic Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(2): 143-154.
- [30] 李双林, 张生银. 墨西哥及墨西哥湾盆地构造单元及其演化[J]. *海洋地质动态*, 2010, 26(3): 14-21.  
Li Shuanglin, Zhang Shengyin. Tectonic units and their evolution in Mexico orogen and Gulf of Mexico Basin [J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(3): 14-21.
- [31] Payne M L. Deepwater activity in the US Gulf of Mexico continues to drive innovation and technology: OCS Report MMS 2006-022 [R]. [S. l.]: Minerals Management Service, 2006.
- [32] Peterson R H, Richardson G E, Bohannon C M, et al. Deepwater Gulf of Mexico 2007: Interim report of 2006 highlights: OCS Report MMS 2007-021 [R]. [S. l.]: Minerals Management Service, 2007.
- [33] Salvador A. Origin and development of the Gulf of Mexico Basin [M]//Salvador A. *The Gulf of Mexico Basin*. Boulder, Colorado: The Geological Society of America, 1991: 389-444.
- [34] Feng Jianhua, Buffer R T, Komins M A. Laramide orogenic influence on late Mesozoic-Cenozoic subsidence history, western deep gulf of Mexico Basin [J]. *Geology*, 1994, 22(4): 359-362.
- [35] 金之均, 王骏, 张生根, 等. 滨里海盆地盐下油气成藏主控因素及勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(2): 111-115.  
Jin Zhijun, Wang Jun, Zhang Shenggen, et al. Main factors controlling hydrocarbon reservoirs and exploration directions in the pre-salt sequence in Pre-Caspian Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(2): 111-115.
- [36] 王连岱, 沈仁福, 吕凤军, 等. 滨里海盆地石油地质特征及勘探方向分析[J]. *大庆石油地质与开发*, 2004, 23(2): 17-18.  
Wang Liandai, Shen Renfu, Lü Fengjun, et al. Petroleum geology characteristics and exploration direction analysis of Pre-Caspian Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(2): 17-18.
- [37] 刘东周, 龔立荣, 郝银全, 等. 滨里海盆地东部盐下成藏主控因素及勘探思路[J]. *海相油气地质*, 2004, 9(1-2): 53-58.  
Liu Dongzhou, Dou Lirong, Hao Yinquan, et al. The origin of hydrocarbon accumulation below the lower Permian salt bed and the prospecting in the east part of Pre-Caspian Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2004, 9(1-2): 53-58.
- [38] 刘洛夫, 朱毅秀, 胡爱梅, 等. 滨里海盆地盐下地层的油气地质特征[J]. *西南石油学院学报*, 2002, 24(3): 11-15.  
Liu Luofu, Zhu Yixiu, Hu Aimei, et al. Petroleum geology of pre-salt sediments in the Pre-Caspian Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2002, 24(3): 11-15.
- [39] 马安来, 金之均, 刘金钟. 塔里木盆地寒武系深层油气赋存相态研究[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(6): 681-688.  
Ma Anlai, Jin Zhijun, Liu Jinzhong, et al. Hydrocarbon phase in the deep Cambrian of the Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(6): 681-688.
- [40] 查全衡. 渤海湾油区石油储量、产量增长的特点与潜力[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 16-20.  
Zha Quanheng. Growth and potential of oil in place and production in the Bohai Bay petroleum region [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 16-20.
- [41] 李春光. 论渤海湾盆地深层油气勘探[J]. *海相油气地质*, 2005, 10(2): 17-21.  
Li Chunguang. Hydrocarbon accumulation and exploration of deep zones in Bohaiwan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005, 10(2): 17-21.

(编辑 徐文明)