

尼罗河三角洲盆地油气地质特征与勘探方向

赵 阳,胡孝林,刘 琼,吕彩丽

(中海油研究总院,北京 100028)

摘 要:尼罗河三角洲盆地已经进行了 60 余年的勘探实践,但是近年来随着勘探研究和钻探活动的继续深入,仍然不断有新的问题产生和新的勘探领域被发掘,显示出新的生命力和良好的勘探前景。尼罗河三角洲盆地虽然是一个世界级的富油气区,然而由于种种原因,中国油公司甚少涉及该盆地的研究,鲜见相关文献发表。通过对尼罗河三角洲盆地构造演化与沉积充填、烃源岩、储层等石油地质条件的研究,分析了尼罗河三角洲盆地的油气成藏特征与勘探潜力,并结合现今勘探现状指出了尼罗河三角洲盆地未来主要勘探领域与勘探方向:浅水区勘探程度较高,生产设施完善,经济门槛低,是实施滚动勘探的最佳区域;中深水—深水区渐新统是今后 10 年中—大型天然气田发现的主要潜力区;超深水区存在中新统和上新统大型生物气藏勘探潜力。

关键词:尼罗河三角洲盆地;石油地质条件;油气成藏;勘探潜力;勘探方向

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.01005

长期以来,三角洲都是进行石油勘探的重要场所。沉积速度对石油生成具有重要影响,快速沉积可以使有机质迅速埋藏,避免氧化,有利于石油生成^[1]。沉积速度越大,对油气生成越有利。而大型三角洲体系往往都具有大型河流输入,其沉积速度远远超过相邻陆架地区,这一独特的沉积环境为油气生成和聚集提供了良好的生储盖与圈闭条件。一方面,河流可以搬运来大量有机质和营养物质,使得三角洲沉积物中陆源和海生有机物的含量极其丰富,再加上快速沉积埋藏所形成的良好还原环境,对有机质的保存与转化十分有利,易于形成优质烃源岩;另一方面,三角洲通

常也是形成优质储层的有利地区,可形成水下分流河道、河口坝、远砂坝和前缘席状砂等不同类型的砂岩,由于河流的远距离搬运和海水作用的长期改造,这些砂岩通常具有较高的成分成熟度和结构成熟度,具有良好的孔、渗等物性条件,是非常好的油气储层;此外,由于三角洲沉积速率快、沉积地层厚度大,导致大量同沉积断层发育,既有利于形成滚动背斜、断背斜、断块等多种类型的构造圈闭,又可以提供良好的油气运移通道。

大型河流最终入海往往在入海处形成规模巨大的三角洲沉积,而且一般来说,发育于被动陆缘的三角洲通常要比发育于主动陆缘的三角洲具有更大的规模和更成熟的结构^[2]。尼罗河三角洲是由发育于渐新世的尼罗河在稳定被动陆缘背景下形成的大型三角洲体系。远源流长的尼罗河带来的丰富的碎屑沉积物,使得盆地三角洲和深水沉积发育,在深水区常常形成以低密度浊流为特征的重力流沉积,水道弯曲度大、延伸长,而且推进距离

收稿日期:2017-07-24

基金项目:国家科技重大专项“非洲重点区油气勘探潜力综合评价”(2017ZX05032-002)

作者简介:赵 阳(1976—),男,博士,高级工程师,主要从事海外油气勘探方面的研究工作。E-mail: zhaoyang3@cnooc.com.cn

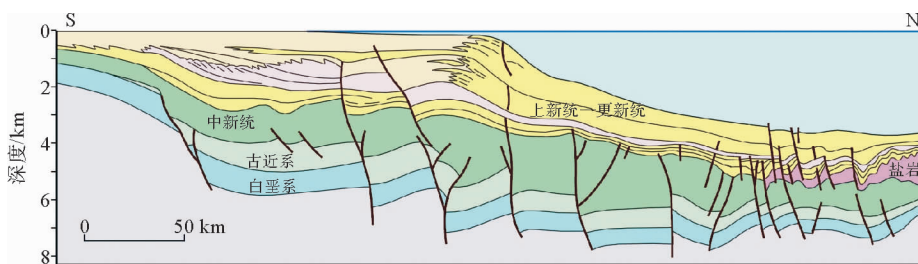


图 2 尼罗河三角洲盆地地区剖面

Fig. 2 Regional geological profile of the Nile Delta Basin

中生代该地区位于新特提斯洋南岸,属于随新特提斯洋打开形成的被动陆缘盆地。在晚白垩世—始新世时期,受特提斯洋关闭导致压扭作用影响,形成 NE—SW 走向的叙利亚弧构造体系。整体上该时期仍为以碎屑岩为主的被动陆缘沉积,但中始新统为碳酸盐岩台地沉积。

自渐新世以来,随着红海的打开和中部非洲的持续隆升,地层向北倾斜,尼罗河三角洲开始发育,中新世及以后为尼罗河三角洲的高建设期,由于尼罗河物源丰富,沉积速率非常快,在尼罗河三角洲地区形成巨厚的三角洲沉积(图 1、2)。

在晚中新世,由于板块汇聚,地中海西端海峡变浅,使地中海与大洋成为隔绝状态,至梅辛期

(Messinian)发生了整个地中海范围的盐度危机(干涸)事件,海平面快速下降^[5-7],地中海范围大大收缩,并在该期沉积了厚层盐岩,越往深海方向越发育,向陆方向盐岩层变薄。

同时,由于该时期地中海海退,河道下切作用进一步加强,造成尼罗河三角洲河流—侵蚀河谷非常发育,特别是晚中新世,在陆架边缘—陆坡区普遍发育大中型切谷。随着海平面的再次上升,大量陆架砂岩沿着水下河道被带到陆坡及深水盆地(图 3)。在上新世,陆架—陆坡区仍持续地发育大量切谷—水道沉积,这些水道型砂体孔渗条件好,成为尼罗河三角洲盆地的主要储层类型,现今的油气发现基本上都集中在此类储层中。

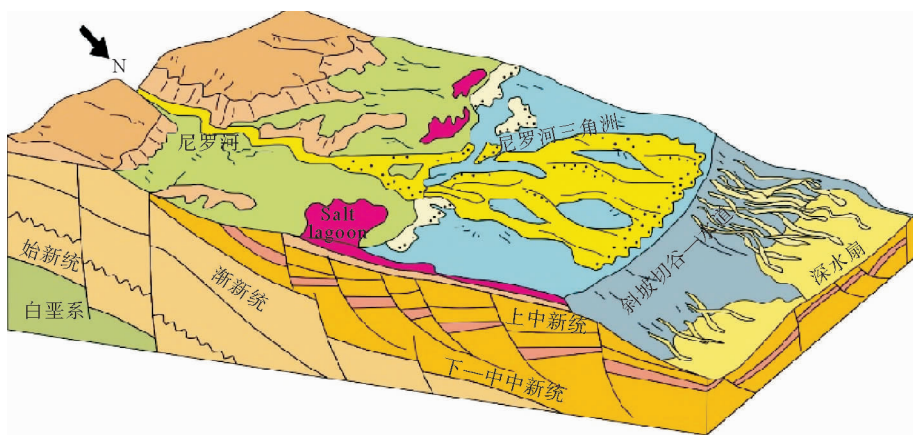


图 3 尼罗河三角洲盆地沉积模式(据文献[8]修改)

Fig. 3 Deposition model of the Nile Delta Basin (modified from reference [8])

3 盆地油气地质特征

3.1 烃源岩特征

尽管尼罗河三角洲盆地的油气勘探已经取得

了非常可观的成果,但对其烃源岩的研究与分析一直存在争论,尤其是关于热成因气和生物气之争以及渐新统烃源岩的贡献等。笔者通过多方面的资料分析认为,在尼罗河三角洲盆地主要存在 3 套烃源岩,包括 1 套主要烃源岩(渐新统泥岩)和 2 套重要烃源岩(下中新统泥岩和上新统泥

岩),既存在热成因气,也存在生物气,还存在被生物降解的热成因气。

由于尼罗河的物源非常丰富,带来了大量的陆源生物,3套烃源岩均以Ⅲ型干酪根为主,且TOC含量较平均,没有明显的富集段。渐新统陆源海相泥岩是尼罗河三角洲盆地的主要烃源岩,为Ⅱ—Ⅲ型干酪根,以Ⅲ型干酪根为主,TOC为0.8%~2.2%,HI约为100~300 mg/g TOC,属于优质烃源岩;下中新统泥岩TOC为2%~5%,HI约为46~183 mg HC/g TOC,Ⅲ型干酪根,属于中等—好烃源岩;上新统泥岩TOC为0.7%~2.5%,Ⅲ型干酪根,属于中等—好烃源岩。

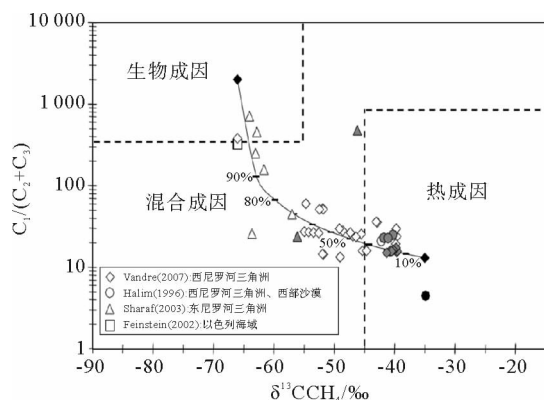
根据盆地地温梯度和地层厚度特征,渐新统泥岩在盆地大部分范围、下中新统烃源岩在盆地局部地区已达到成熟生气阶段,可以生成大量天然气,其成熟度随埋藏深度和烃源层段不同存在相应的变化^[9],现今获得的渐新统和中新统的油气储量绝大部分都来自于此;上新统由于埋藏浅、地温梯度低,该层烃源岩均未达到成熟,但不可忽视其在该背景下的生物气潜力,尼罗河三角洲盆地上新统已经发现了大量以生物气为主的气藏;同时,由于盆地中新统,尤其是深水区的中新统的烃源岩因未达到成熟,长期未引起足够重视,但2015年Zohr大型生物气田的发现揭示,在深水—超深水区域中新统烃源岩仍然存在巨大的生物气潜力。

近年来,多位学者^[10,11]通过对天然气成分和同位素等多方面大量的样品测定和精细对比研究发现,尼罗河三角洲盆地的天然气大部分具有混合成因特征^[10],既有传统的热成因气,又有典型的生物气,还有已经被生物严重降解、具有类似于生物气特征的热成因气^[11](图4)。而且它们的分布在纵向上具有明显地规律:生物气比重向浅层增加、热成因气比重向深层增加。

3.2 沉积相与储层特征

从古生代至今,尼罗河三角洲盆地受多期构造活动的影响。受晚白垩世—始新世构造活动的影响,发育一系列雁列式的同沉积断层(图3),盆地内发生明显的沉降,尼罗河三角洲自渐新世—中新世早期开始接受沉积。

在晚渐新世—早中新世,Qantara组和Sidi



注:黑色、灰色、白色点分别为白垩系、中新统和上新统样品

图4 尼罗河三角洲气藏地化参数特征显示大部分具有混合成因(据文献^[11])

Fig. 4 Geo-chemical parameters crossplot of the Nile Delta Basin showing the characteristics of mixed gas origin (from reference ^[11])

Salim组的泥岩沉积分布广泛,主要为河流、浅海、陆坡等环境。该时期砂岩含量相对较低,这些砂体的分布,主要受到局部因素的影响,例如海底沟道的分布、海洋洋流的变化、沿岸三角洲和滨岸砂迁移路径等。

晚中新世Qawasim组沉积时期发生全区范围的海退事件,盆内三角洲沉积广泛分布,较前期三角洲的建造明显加快,沉积厚度可达1 km以上^[12]。受到海平面下降所影响,造成一个新的侵蚀沉积旋回的活化,基准面的下降,早期河道下切作用进一步加强,带来了大量的陆源碎屑物。随着海平面的下降,地中海盆地水体循环开始受限,在Qawasim组沉积末期,整个三角洲转变成冲泛平原,海岸线向北进一步退却。受干旱气候的影响,地中海盆地水体减少,高盐度水体盆地出现,Rosetta组蒸发岩开始发育,相应的在原来深海区域形成了广泛分布的盐岩沉积。

早上新世在海侵作用下,盆内沉积了一套泥页岩层系,但河流—三角洲沉积依旧发育,砂岩等粗碎屑岩层表现为向上变细的沉积特征,厚度一般为数十米,最终逐渐转变为泥页岩。由于河流的负载能力下降,陆源粗碎屑物供应量也相对减少,盆内多以滨岸带的砂岩沉积为主,海水覆盖了Messinian阶沉积时期暴露的地表。晚上新世海平面下降,河流—三角洲沉积再一次覆盖了盆地大部分区域^[12]。晚上新世到更新世盆内仍以河

流—三角洲—浅海环境为主,盆地沉积中心向北迁移,大量的陆源碎屑物沿着广泛分布的浊积沟道搬运至盆地北部的深水地区。

结合其沉积特点,尼罗河三角洲盆地的储层主要是从渐新统到更新统发育的各种类型的砂岩:渐新统浊积水道型砂岩孔隙度为 14%~23%,渗透率为 $216 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;下中新统河流—浅海相砂岩孔隙度为 20%,渗透率为 $1\,678 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;中中新统浊积砂岩孔隙度为 14%~30%,渗透率为 $(10 \sim 700) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;上中新统河流—分流河道相砂岩孔隙度为 15%~20%,渗透率为 $(40 \sim 660) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;上新统水道砂和海底扇砂岩孔隙度为 20%~37%,渗透率为 $(10 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因尼罗河三角洲盆地的砂岩储层沉积整体上以叠置或孤立的切谷—水道为主,向深水区过渡为朵叶复合体和海底扇,均可与盆地广泛发育的厚层泥岩配合形成优质储盖组合。

在尼罗河三角洲的发育过程中,由于受到红海裂谷和中部非洲隆升等构造活动的影响,尼罗河的主水道从渐新世、中新世到上新世具有总体上从东向西迁移的趋势,造成其深水地区储层发育程度随着沉积演化由东向西逐渐增强。

3.3 油气成藏特征

目前,尼罗河三角洲盆地已发现的油气主要集中在上新统和中中新统储层中(图 5),且主要分布于 1 000 m 水深线以内的陆架边缘和陆坡区,储层类型以河道、河口坝、浊积水道、浊积扇砂体为主。由于河流—三角洲的多次改道、迁移、侵蚀,形成了叠拼式的复合储层单元^[13]。盆地深部(渐新统和中中新统)聚集的油气主要来自于晚渐新

世和早中新世烃源岩,通过断层运移至此,以垂向运移为主;而浅层(上新统和部分中新统)的油气除了来自于该套烃源岩的贡献外,还包括上新统和中中新统的生物气的贡献,属于混合成因,油气沿横向和垂向 2 种路径运移。

在晚白垩世以来,由于特提斯洋关闭和叙利亚弧的多期压扭作用,导致尼罗河三角洲盆地发育了 NE 向和 NW 向 2 组区域走滑断裂带(Rosetta 断裂带和 Tamsah 断裂带)(图 6),这 2 组大断裂后期的多次活化^[14,15]和持续活动,不仅使渐新世以来的地层形成了多个压扭背斜构造带^[16],同时,也为沟通深部成熟的渐新统气源岩提供了高效的运移通道。正因为如此,尼罗河三角洲油气藏的平面分布具有很强的规律性,渐新统成熟油气沿断层垂向运移至浅层聚集,主要沿着西部 NW 向的 Rosetta 断裂带、东部 NW 向的 Tamsah 断裂带和中部的近 SN 向的断裂带向浅部发生垂向运移,然后在沟通的浅部砂体中发生距离不等的侧向运移,最终在相应的圈闭中聚集成藏。三大断裂带沟通的浅层圈闭(包括渐新统、中新统和上新统)是油气的主要聚集区,从而形成西部、东部和中部三大气田发育区(图 6)。由于切谷—水道的发育方向多与岸线垂直,而断层和挤压构造形成的背斜等构造轴向多与岸线平行或斜交,所以油气圈闭在形式上多表现为长条状的切谷—水道型砂体以不同角度与背斜类构造叠置形成的构造—岩性复合圈闭^[17],平面分布上靠近

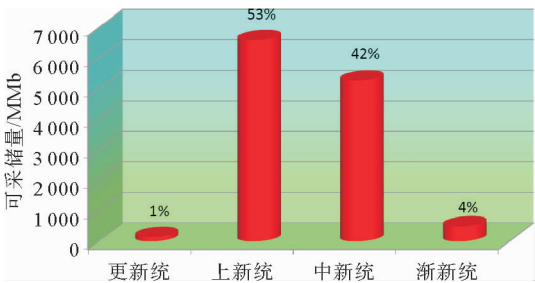


图 5 尼罗河三角洲盆地油气储量分布

Fig. 5 Oil and gas reserves distribution of the Nile Delta Basin

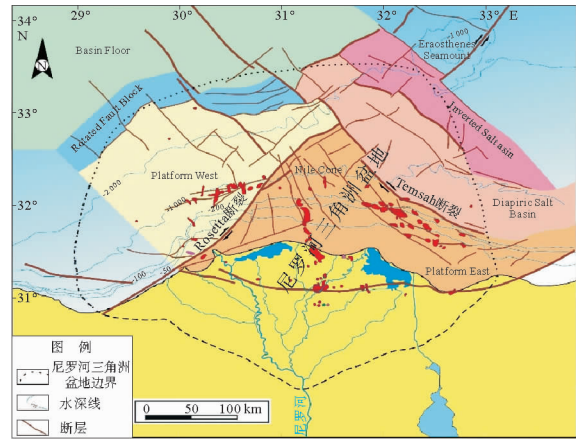


图 6 尼罗河三角洲盆地油气分布与断裂体系
(据文献[18]修改)

Fig. 6 Oil and gas distribution and fault system of the Nile Delta Basin (modified from reference [18])

断裂发育区。由于在向浅部运移的过程中会捕集浅部生成的生物气,所以上新统和中新统聚集的气藏通常都含有数量不等的生物气,且生物气含量向浅层呈逐步升高的趋势。

此外,2015年在尼罗河三角洲超深水区中新统发现了Zohr大型生物气田,储层类型为生物礁,储层厚度可达数百米,目前证实约有22.5 Tcf的可采储量。该发现揭示了在深水—超深水区,中新统还可能存在大型生物礁储层,形成独立的大型生物气聚集,不过该种类型储层发育的普遍性和分布范围尚需进一步的研究。

4 盆地勘探潜力与勘探方向

位于东地中海地区的尼罗河三角洲盆地作为一个天然气资源非常丰富的勘探区已经被大量的勘探成果所证实。尽管该地区已经历了60多年的油气勘探,但勘探程度远没有达到成熟,尤其是海域部分,浅水区勘探程度稍高,中深水区勘探程度中等,深水—超深水区勘探程度极低,仍然存在巨大的勘探潜力。

(1)浅水区勘探程度较高,生产设施完善,经济门槛低,是实施滚动勘探的最佳区域。在已有发现周边滚动勘探,即使只是中小型天然气发现,依然可以依托已有的生产设施快速投产,周期非常短,同样具有可观的经济效益。比如ENI公司于2015年发现的Nooros气藏,规模约800 bcf,从发现到投产仅隔2个月,勘探效益非常明显。

(2)中深水—深水区渐新统是今后10年中—大型天然气田发现的主要潜力区。该区域目前勘探程度低,而且勘探活动主要集中在传统的中新统和上新统勘探层系,鲜有钻井钻至渐新统^[19]。但是近年来,随着勘探研究的不断深入,已有多口钻井证实该区渐新统浊积水道发育,并连续获得了Salamat、Atoll等多个储量可观的渐新统气藏,揭开了尼罗河三角洲深水区渐新统浊积水道这一勘探新领域。

(3)超深水区存在中新统和上新统大型生物气藏勘探潜力。尼罗河三角洲超深水区勘探程度极低,但是有限的钻井已经揭示了超深水区存在上新统和中新统的海底扇沉积,而且在上新统发现了一定的生物气聚集;尤其是Zohr特大生物礁

型生物气藏的发现,预示着尼罗河三角洲超深水区存在大型生物气藏的勘探潜力。

参考文献:

- [1] 周书欣. 三角洲沉积体系与油气聚集[J]. 地质地球化学, 1980, 8(3): 26-37.
- [2] Shanmugam G, Moiola R J. Submarine fans: Characteristics, models, classification, and reservoir potential [J]. Earth Science Reviews, 1988, 24(6): 383-428.
- [3] 谢启红, 邵先杰, 乔雨朋, 等. 尼罗河现代三角洲沉积特征解剖[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2016, 18(2): 31-35.
- [4] IHS. Nile Delta Basin, Egypt, Cyprus, Greece, Cuba [R]. Basin Monitor, 2012.
- [5] 宋怀龙. 晚中新世末期重大环境群发事件的影响与评估——古地中海干涸与世界荒漠及人科动物的形成[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(2): 51-62.
- [6] Jouet G, Berné S, Rabineau M, et al. Shoreface migrations at the shelf edge and sea-level changes around the Last Glacial Maximum (Gulf of Lions, NW Mediterranean) [J]. Marine Geology, 2006, 234(10): 21-42.
- [7] Ryan W B F. Quantitative evaluation of the depth of the Western Mediterranean before, during, and after the Late Miocene salinity crisis [J]. Sedimentology, 1976, 23(6): 791-813.
- [8] Aal A, El Barkooky A, Gerrits M, et al. Tectonic evolution of the Eastern Mediterranean Basin and its significance for the hydrocarbon prospectivity of the Nile delta deep-water area[J]. GeoArabia, 2001, 6(3): 363-384.
- [9] Prinzhofer A, Deville E. Origins of hydrocarbon gas seeping out from offshore mud volcanoes in the Nile delta [J]. Tectonophysics, 2013, 591(3): 52-61.
- [10] Sharaf LM. Source rock evaluation and geochemistry of condensates and natural gases, offshore Nile Delta, Egypt [J]. Journal of Petroleum Geology, 2003, 26(2): 189-209.
- [11] Vandre C, Cramer B, Gerling P, et al. Natural gas formation in the western Nile delta (Eastern Mediterranean): Thermogenic versus microbial [J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(4): 523-539.
- [12] Rizzini A, Vezzani F, Cococcetta V, et al. Stratigraphy and sedimentation of the Neogene-Quaternary section in the Nile delta area [J]. Marine Geology, 1978, 27(3/4): 327-348.
- [13] Nigel E C, Alan C, Robert J C, et al. Three-dimensional seismic geomorphology of a deep-water slope-channel system: The Sequoia field, offshore west Nile Delta, Egypt [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(8): 1063-1086.
- [14] Hussein I M, Abd-Allah A M A. Tectonic evolution of the

- northeastern part of the African continental margin, Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2001, 33(1): 49-68.
- [15] Abd-Allah A M A, Aal M H A, Ghandour A. Structural characteristics and tectonic evolution of the northwestern margin of the Nile Delta, Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2012, 68(4): 82-95.
- [16] Khaled K A, Attia G M, Metwalli F I, et al. Subsurface geology and petroleum system in the eastern offshore area, Nile Delta, Egypt [J]. *Journal of Applied Sciences Research*, 2014, 10(4): 254-270.
- [17] 胡孝林, 赵 阳, 曹向阳, 等. 大型三角洲—深水沉积盆地油气地质与成藏特征比较分析[J]. *西安科技大学学报*, 2017, 37(3): 377-387.
- [18] C&C Reservoirs. Abu Madi-El Qar'a Field, Onshore Nile Delta, Egypt [R]. Field Evaluation Report, 2009.
- [19] El Naggar S, El Morshedy A. Regional study of Oligocene future hydrocarbon potential in Nile Delta, Egypt [C]// SEG Technical Program Expanded Abstracts. SEG Houston 2013 Annual Meeting, September 22-27, 2013, Houston, Texas, USA. 2013: 3016-3020.

PETROLEUM GEOLOGICAL FEATURES AND EXPLORATION POTENTIAL OF THE NILE DELTA BASIN

ZHAO Yang, HU Xiaolin, LIU Qiong, LV Caili

(CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: The Nile Delta Basin has been put under exploration for more than 60 years. With the deepening of exploration and drilling activities, new topics and new frontiers are constantly emerging, showing good exploration prospect. Though the Nile Delta Basin is a world class oil and gas rich area, for some reasons, Chinese oil companies have rarely involved in the study of the basin, and rarely published relevant literatures. Through a general review of the characteristics of tectonic evolution and sedimentary filling history, as well as source rocks, reservoirs and other petroleum geological conditions, we analyzed in this paper the hydrocarbon accumulation characteristics and exploration potential of the Nile Delta Basin. Combined with present exploration situation, future exploration potential and exploration direction of the Basin are also discussed. The shallow water area, because of its high exploration degree, well developed infrastructure and low economic threshold, is the best area for rolling exploration. In the medium-deep and deep water area, however, the Oligocene is the main potential play to explore medium and large gas fields for the next decade; and in the ultra-deep water area, Miocene and Pliocene plays possess big potential for large biogenic gas discoveries.

Key words: Nile Delta Basin; petroleum geological condition; hydrocarbon accumulation; exploration potential; exploration direction