

何家雄,姚永坚,于俊峰,等.中国近海盆地油气地质特征及勘探开发进展[J].海洋地质前沿,2022,38(11):1-17.

HE Jiaxiong, YAO Yongjian, YU Junfeng, et al. Petroleum geological characteristics and progress of exploration and development in offshore basins of China[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(11): 1-17.

中国近海盆地油气地质特征及勘探开发进展

何家雄^{1,2},姚永坚^{3*},于俊峰⁴,张金锋⁵

(1 中国科学院大学,北京 100049; 2 中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640; 3 自然资源部海底矿产资源重点实验室,中国地质调查局广州海洋地质调查局,广州 511455; 4 广东石油化工学院,广东茂名 525000; 5 中山大学海洋学院,珠海 519000)

摘要:通过半个多世纪的海洋油气勘探实践与科技创新,中国近海盆地油气勘探开发取得了长足进展和里程碑式的突破。2010年,中国海洋油气年产量突破 $5\,000\times 10^4$ t油当量大关,实现了建成“海上大庆”的目标。2011年以来,中国近海油气勘探开发进入了高速发展阶段,海域油气产量增长迅猛,目前,渤海盆地原油年产量已超过 $3\,000\times 10^4$ t且油气产能还在递增。系统阐明了中国近海含油气盆地构造结构类型、沉积充填特征、油气成因类型及烃源供给关系、油气成藏组合类型及运聚成藏模式等基本油气地质特点,概括分析了中国近海主要盆地油气(水合物)勘探开发进展,以期为挖掘已获得重大发现的盆地的剩余资源以及有效指导新盆地油气的高效勘探开发提供借鉴。

关键词:中国近海盆地;主要烃源岩;油气成因类型;油气运聚成藏模式;勘探开发进展

中图分类号:P744.4 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.180

0 引言

自 20 世纪 50 年代以来,海洋油气资源已逐渐成为全球油气储量新的增长点,特别是近 10 年,全球新增油气储量 60% 以上来自海域,海域大油气田储量占比超过 70%^[1]。目前海洋油气勘探开发的热点区域主要集中于墨西哥湾、中-南大西洋两岸、东非海域、东地中海及波斯湾周边等;而未来海洋油气勘探开发的热点领域可能集中于阿根廷海域、加勒比海、加拿大东海岸、北极地区、东非索马里海域和中国南海等区域。

中国近海盆地是海洋油气资源获得重大勘探发现和突破的主战场之一,主要包括中国东部沿海陆架盆地和中国东南部陆缘区的南海北部陆架陆

坡盆地。自 1957 年开展莺歌海盆地沿岸油气苗调查及浅井钻探以来,尤其是 1966 年在渤海盆地歧南断阶带钻探第 1 口海洋探井(海 1 井)并在新统明化镇组下段砂岩中获日产 49 t 原油开始,中国正式拉开了近海盆地油气勘探开发的历史序幕。目前,中国近海盆地已累计探明石油地质储量约 30.2×10^8 t,探明天然气地质储量约 $6\,387.4\times 10^8$ m³。2010 年,中国海洋石油总公司(简称“中海油”,下同)在中国近海海域油气总产量已达年产 $5\,000\times 10^4$ t 油当量大关,并保持稳定增长和高速发展。中国近海盆地特殊的区域构造背景和地质演化历程造就了其独特的油气地质特征,加之海洋油气勘探开发自身的“三高”特点(高风险、高成本、高技术),决定了中国近海盆地油气勘探开发的特殊性及其复杂性^[2-3]。

1 中国近海盆地展布及油气勘探概况

中国近海海域主要由渤海、黄海、东海和南海四大海域构成(图 1)。其中,渤海、黄海及东海基本上位于中国东部及东南部广大陆缘区的大陆架之上,邻近陆缘区,属于中国的近海海域;南海跨越陆架-陆坡及大洋,其北部邻近中国东南部陆缘区,属

收稿日期:2022-06-15

资助项目:国家自然科学基金(U20A20100,42106079);中化石油勘探开发有限公司科技攻关项目(000-11-2013-017);国家天然气水合物专项(GZH201100305)

作者简介:何家雄(1956—),男,博士,教授,主要从事深水油气及水合物成藏综合研究。E-mail:hejx@gig.ac.cn

* 通讯作者:姚永坚(1964—),女,博士,教授级高级工程师,主要从事海洋油气地质与构造地质方面的研究工作。E-mail:yjyao64@yahoo.com.cn



图1 中国东部及东南部陆缘区近海主要含油气盆地分布特征

Fig.1 Distribution of main oil-gas basins in offshore continental margin in the eastern and southeastern China

于近海海域,而中南部则远离东南部陆缘区,属于中国唯一的远海海域。

中国近海海域面积约 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$, 目前油气勘探主要集中在近海海域的 10 个含油气盆地,其有效油气勘探面积达 $90 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。油气勘探获得重大突破的盆地有 6 个:渤海、东海、珠江口、琼东南、莺歌海及北部湾盆地;尚无商业性重大油气发现的盆地 4 个:北黄海、南黄海、台西及台西南盆地。

2 中国近海盆地结构类型与构造沉积特征

2.1 盆地结构类型及特点

与中国东部新生代陆相断陷盆地类似,中国近海新生代盆地也经历了早期陆相裂陷和晚期海相拗陷两大主要发展演化阶段。早期陆相伸展裂陷阶段,形成了古近系半地堑或地堑式陆相断陷及其湖相陆源沉积物;晚期海相拗陷阶段则形成了新近系及第四系大套的海相沉积物,其间经历了大型破裂不整合,在剖面上构成了典型的“下断上拗、下陆上海”的断拗双层叠置的结构特征(图 2)。

早期陆相伸展裂陷/断陷是中国近海盆地油气形成的基本单元和地质基础。早期古近系陆相伸

展裂陷作用,形成了规模不同数量众多的基底张性断裂,且伴生了一系列半地堑/地堑洼陷,而每个半地堑洼陷即为一个独立沉积充填及油气生成的基本地质单元。区域分布上半地堑之间往往存在一个相对隆起区,其为半地堑洼陷沉积的近物源供给区,进而构成了近海盆地古近纪多凸多凹、凸凹相间的基本地质构造格局及油气形成的基本地质单元,且最终决定了盆地中生烃凹陷展布规模及其含油气系统的基本地质特点。

2.2 构造沉积充填特征

中国近海盆地新生代自下而上主要沉积充填了 3 套地层系统及烃源岩。其中,古近纪陆相断陷阶段早期主要沉积充填了少量古新统河流冲积相地层和大套始新统中深湖相地层及烃源岩;古近纪陆相断陷晚期主要沉积充填了大套的渐新统海陆过渡相/河湖相煤系和浅海相地层与煤系烃源岩及海相陆源烃源岩;新近纪裂后热沉降海相拗陷期演化阶段,则主要沉积充填了大套的海相新近系碎屑岩储集层及巨厚的区域泥岩(泥质)封盖层,局部沉积中新统海相陆源烃源岩。

早期古近纪陆相断陷演化阶段,中国近海盆地均由许多彼此分割的半地堑或地堑所组成,构成了盆地古近—新近纪“多凸多凹、凸凹相间”的基本构造格局,为该区新生代盆地油气运聚成藏提供了基本的地质条件。在中国近海陆相断陷盆地的伸展张裂阶段,由于受区域构造应力场控制,半地堑陆相断陷/洼陷主要沿 NE-NNE 向正断裂分布,断陷规模亦随相关主断裂展布规模而变化,这些断裂一般呈叠瓦状排列,其受控断陷亦呈 NE-NNE 方向展布,而且断陷/洼陷规模大小不一,从几十到上万平方千米。古近纪陆相半地堑是中国近海盆地中最重要的富生烃凹陷,是大量油气形成的基本地质单元和物质基础。因此,确定了近海盆地中富烃凹陷类型、规模与展布特征,即可在主要油气优势运聚区范围找到大油气田或油气田群。由于中国近海盆地中富烃凹陷多形成于始新世及渐新世主裂谷断陷期,且处于欠补偿快速沉降沉积充填阶段,故往往能够形成有利于各种生物(浮游、底栖生物和藻类)大量繁殖和生长发育的古地貌地理环境及条件,因此,富生烃凹陷一般均沉积充填了较大规模的始新统中深湖相富有机质泥页岩及渐新统海陆过渡相富有机质的煤系,生烃潜力大,为该区油气藏形成奠定了雄厚的烃源物质基础,为形成大中型

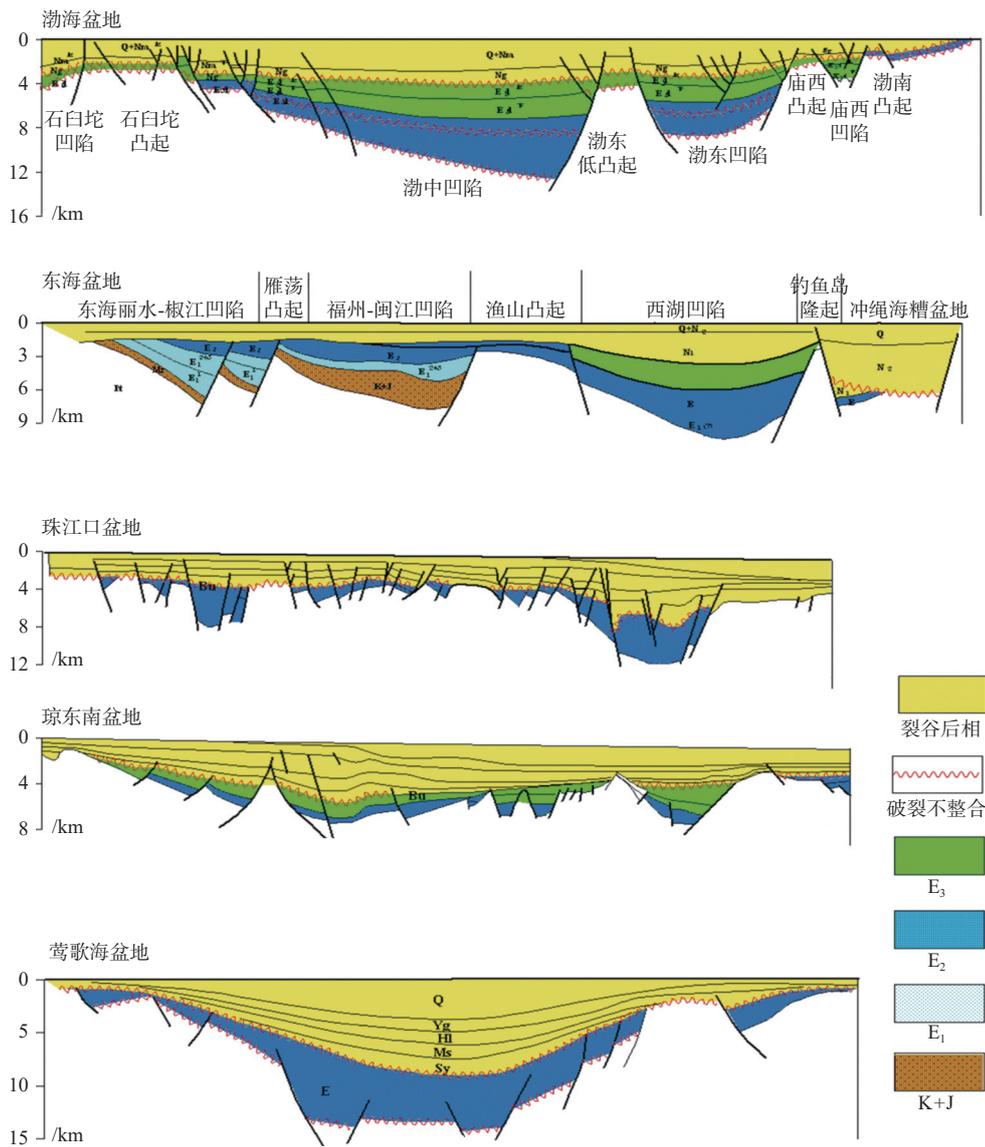


图 2 中国近海海域主要陆相断陷盆地结构类型及断坳双层叠置特征典型剖面对比

Fig.2 Structural types of main continental faulted basins in offshore China and comparison of typical sections of double-layer superimposed characteristics of fault depression

油气田提供充足的烃源。中国近海盆地中富烃凹陷均沉积充填规模较大,其新生界沉积厚度一般可达 8~12 km,古近纪主裂陷期的沉积速率至少在 350 m/Ma 以上,且始新统湖相及渐新统煤系烃源岩规模巨大。

中国近海盆地晚期热沉降海相拗陷阶段,往往能够形成有利油气富集的海相碎屑岩储盖组合类型。晚渐新世—中中新世,中国近海发生海底扩张和洋壳增生,往往导致盆地沉降沉积中心由陆向海一侧逐渐迁移,沉积充填厚度向海一侧变厚,海相沉积分布广泛,中国近海盆地形成了分布广泛的有利海相碎屑岩储盖组合,且与深部古近系陆相烃源岩构成了油气成藏组合类型。渤海盆地、东海盆地

和南海北部珠江口、琼东南、莺歌海及北部湾盆地等,在剖面上均形成了“下生上储”、“陆生海储”及局部的“海生海储”的有利生储盖成藏组合类型,在区域上则形成了一系列大中型油气田群。

3 中国近海盆地地层系统与主要烃源岩类型

3.1 新生代地层系统构成及特征

中国近海盆地油气勘探中已钻遇地层层序及地层系统见图 3,渤海盆地钻遇了元古宇、太古宇等古老基底,且新生界地层系统较全;其次地层系

的烃源岩。

3.1.4 南海北部大陆边缘盆地新生代地层系统

该地层系统主要由前古近系基底(中、古生界花岗岩及变质岩系)、上覆古近系古新统(神狐组/长流组)、始新统(文昌组/流沙港组)、渐新统(涠洲组/崖城组及陵水组/恩平组及珠海组)与新近系下中新统(三亚组、珠江组、下洋组)、中中新统(梅山组、韩江组、角尾组)、上中新统(黄流组、粤海组、灯楼角组)、上新统(莺歌海组、万山组、望楼港组)及第四系(乐东组)所构成。其中,古近系地层主要为一套较厚的陆相断陷沉积,断陷早期沉积的始新统中深湖相泥页岩/油页岩是该区大中型油气田群的主要烃源岩,断陷晚期沉积的渐新统海陆过渡相煤系及河湖沼泽相煤系以及半封闭浅海相泥页岩,是该区超大气田及大中型气田群的主要烃源岩;晚渐新世及中新世(海相拗陷期)沉积的海相碎屑岩系中大套砂岩和泥页岩互层,是该区重要的海相碎屑岩储集层与油气封盖层,其与下伏的古近系陆相断陷烃源岩构成了非常好的“下生上储、陆生海储”的含油气储盖组合类型。

对于南海北部大陆边缘盆地前古近系基底构成及其岩性特征,根据野外地质调查及勘测到的大陆边缘盆地陆缘区附近的海南岛地质露头,推测其最老地层为中元古界抱板群,为一套深水碎屑浊积岩夹镁铁质火山岩沉积,且属于角闪岩相区域变质作用而形成的混合片麻岩、混合岩化片岩夹斜长角闪岩系,其最终构成了海南岛陆缘区的前古近系结晶基底,该结晶基底的锆石 U-Pb 同位素年龄为 17.51 亿 a 和 14.63 亿 a^[5]。另外,南海北部中生界普遍发育中酸性-酸性火山岩,地震剖面显示的多属小型断陷盆地伴生的火山活动所致,且地层沉积厚度变化较大。总之,基底之上覆的新生代沉积巨厚,且新生代地层系统构成及地层层序较完整、地层发育较全,基本不缺失或仅缺失较少地层。该区盆地新生代地层总厚度多超过 10 km,其中莺歌海盆地新近系及第四系最大厚度超过 17 km^[6],为油气资源形成奠定了地质基础。

3.2 新生代主要烃源岩类型及分布

中国近海各个盆地的新生代主要烃源岩类型及分布特征有所差异,大中型油气田群分布区及其主要烃源岩(生油岩)主要集中分布在渤海盆地、珠江口盆地以及北部湾盆地;大中型气田群及其主要气源岩则主要集中在东海盆地、莺歌海盆地、琼东

南盆地及珠江口盆地南部深水区。

3.2.1 渤海盆地

新生代沉积充填较厚,且以古近系陆相断陷湖盆沉积为主,其主要烃源岩系为古近系始新统中上部沙河街组三段(沙三段)大面积的中深湖相灰色及灰黑色泥岩及钙质泥岩和油页岩,局部夹少量薄砂岩层。这种类型的湖相烃源岩展布规模大,区域分布较稳定,且具有巨大的生烃潜力^[7-8]。该湖相烃源岩生源母质多属于腐泥型或偏腐泥混合型,主要以 I、II₁ 型干酪根有机质为主,且有机质丰度高,其 TOC 一般为 2%~6%,最高可达 8%,为一套生油潜力极大的主要烃源岩。始新统沙三段湖相烃源岩生烃量几乎占整个盆地总生烃量的 70% 以上,且以生油为主,具有巨大的生烃潜力。渤海盆地次要烃源岩则主要为下渐新统沙一、二段浅湖相烃源岩和上渐新统东营组滨浅湖相烃源岩,这种类型的烃源岩总体上分布厚度较大,但埋藏相对较浅,其有机质热演化程度相对较低,生烃潜力受到了一定的影响和制约。

3.2.2 东海盆地

展布规模巨大,盆地面积高达约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其主要生烃凹陷为西湖凹陷、椒江及丽水凹陷,主要的富生烃凹陷为西湖凹陷。主要烃源岩分布于古新统及始新统煤系及河湖相沉积岩系中。如椒江和丽水凹陷煤系及湖相烃源层系主要为下古新统月桂峰组、中始新统灵峰组和上始新统明月峰组,这种类型的煤系及河湖相烃源岩有机质类型以 III 型干酪根为主,仅有少量的 II₁、II₂ 型。其中,月桂峰组煤系烃源岩成熟度偏高,处于成熟—过成熟阶段,且有机质丰度高,TOC 值为 0.57%~3.81%,均值为 1.36%;灵峰组煤系烃源岩成熟度相对较低,处于成熟阶段,TOC 值在 0.24%~2.89%,均值为 1.07%^[9]。西湖富生烃凹陷主要烃源岩为上始新统平湖组煤系烃源岩,其主要由煤、炭质泥岩和暗色泥岩等岩系构成,有机质丰度高,TOC 平均值为 1.49%,烃源岩有机质热演化程度高,处在成熟—高成熟甚至过熟阶段,主要以生气为主伴生少量凝析油,是东海盆地最主要的煤系烃源岩^[10]。目前,盆地油气勘探发现的大中型气田群及中小型凝析油气田,其烃源供给均主要来自西湖凹陷的上始新统平湖组煤系烃源岩。

3.2.3 南海北部大陆边缘盆地

北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地、珠江口盆地和台西及台西南盆地展布规模大,总盆地面

积约 $58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。古近纪断陷作用形成了 36 个生烃凹陷/断陷,是油气形成的基本地质单元,构成了该区油气形成的地质基础。南海北部新生代盆地主要发育 3 套烃源岩。

(1) 始新统中深湖相烃源岩 该套烃源岩是南海北部目前勘探开发的大中型油气田群的主要烃源岩,有机质丰度高,属偏腐泥混合型生源母质类型,生烃潜力大。如珠江口盆地始新统文昌组中深湖相烃源岩和北部湾盆地始新统流沙港组中深湖相烃源岩,均是该区大中型油气田群的主要烃源岩。这些地区目前勘探开发的诸多大中型油气田群的烃源供给主要来自这种有机质丰度高、偏腐泥混合型且处在正常成油窗的优质湖相烃源岩。如北部湾盆地涠西南富生烃凹陷始新统流沙港组中深湖相泥页岩/油页岩烃源岩,即是一套非常好的优质生油岩,其生油能力极强,是北部湾盆地目前勘探发现的所有中小型油气田群的主要烃源岩,具有“一源多流”的运聚成藏特征,该区不同区带不同类型不同层位油气藏的烃源供给均来自这套陆相断陷沉积的中深湖相烃源岩的贡献。流沙港组烃源岩系主要由流沙港组二段中深湖相泥页岩/油页岩和流沙港组三段浅湖相泥岩所组成。其中,流沙港组三段(流三段)浅湖相烃源岩,有机质丰度较高,TOC 均值高达 2.16%,其生源母质类型属偏腐殖混合型,且处在成油窗范围,生烃潜力较大;流沙港组二段(流二段)中深湖相烃源岩,有机质丰度更高,TOC 均值高达 2.74% 以上,生源母质类型属偏腐泥混合型^[11],是一套生烃潜力大的优质烃源岩。

(2) 渐新统海陆过渡相煤系、湖沼相煤系及半封闭浅海相陆源烃源岩 其属于该区主要的气源岩,南海北部目前勘探发现的大中型气田群的烃源供给均主要来自这套煤系烃源岩的重大贡献。这种断陷晚期形成的煤系烃源岩有机质丰度高,生源母质类型属腐殖型、偏腐殖混合型,且处在高熟—过熟气窗阶段,生气潜力极大,属于该区优质的煤系气源岩。如珠江口盆地渐新统恩平组煤系烃源岩和琼东南盆地渐新统崖城组含煤岩系烃源岩即为其典型实例。珠江口盆地恩平组和琼东南盆地崖城组及陵水组煤系烃源岩,根据大量探井样品地球化学分析,其大部分烃源岩样品有机质丰度极高,TOC 均 $> 3\%$,尤其是碳质泥岩及煤线、煤层的有机质丰度则更高,TOC 均 $> 12\%$ 。琼东南盆地崖南凹陷崖 13-1 气田区钻遇的崖城组含煤地层,煤层 TOC 值达 40%,具有明显富集型有机质的典型

特征。而且,这套煤系烃源岩有机质热演化程度高,均处于高熟—过熟气窗范围,烃源岩成熟度及气田天然气计算成熟度 R_o 为 1.2%~2.2%^[12],属于生气潜力极大的优质气源岩。

(3) 中新统海相陆源泥岩烃源岩 该类烃源岩有机质丰度相对较低,TOC 一般多 $< 1\%$,平均约 0.5%,区域分布亦比较局限,仅限于莺歌海盆地中部坳陷带与琼东南盆地南部及珠江口盆地南部深水区这些新近系沉积充填较厚的区域。这种中新统烃源岩(三亚组、梅山组及黄流组与珠江组)生源母质类型均属偏腐殖混合型或腐殖型,虽然形成于海相沉积环境,但具有陆源有机质输入的特点,故称为海相陆源烃源岩。中新统海相烃源岩主要分布于南海西北部莺歌海盆地中部(莺歌海)坳陷区,在琼东南盆地南部深水区及珠江口盆地南部深水区等局部区域亦有分布,但其成熟度较低,生烃潜力有限。中新统海相陆源泥岩烃源岩虽然有有机质丰度相对较低,但在局部区域(莺歌海盆地东南部)有机质丰度相对较高^[13](中新统泥岩 TOC 含量为 0.4%~0.65%,凹陷中心有所增高,可达 2.97%),且有机质热演化成熟度亦高、生气潜力大,属于优质气源岩,该类中新统烃源岩是莺歌海盆地中浅层大中型气田群主要的气源岩,该区浅层及中深层大中型气田群的烃源供给,均主要来自这种类型的海相陆源烃源岩的重大贡献。如莺歌海盆地中央泥底辟带目前勘探开发生产的浅层及中深层气田群(东方 1-1、东方 13-1/2 和乐东 15-1/22-1 及乐东 10-1 等气田群)的烃源供给,均来自中新统三亚-梅山组成熟-高熟海相陆源烃源岩的重要贡献。

4 中国近海盆地油气成因类型与烃源供给关系

中国近海盆地油气成因类型与主要烃源岩特征及烃源供给关系具有几点重要共识,但不同盆地不同区带主要油气成因类型与烃源供给关系尚存在一定的差异。

4.1 渤海盆地大中型及超大型油气田

本区产出的油气均属湖相成因油气,油气成因类型比较单一,烃源供给具有“一源多流”的特点。油气成因均属成熟—高熟陆源石蜡型油及油型气,且与古近系湖相沉积烃源岩密切相关。这种湖相成因类型油气的轻烃化合物组成中,一般均具有二

甲基环戊烷(ΣDMCYC_5)和正庚烷($n\text{C}_7$)相对含量远高于甲基环己烷(MCH)的特点,即具有明显的油型气特征。该区超大型油田与超大型油型凝析气田的烃源供给,均主要来自湖相腐泥型或偏腐泥混合型烃源岩。而且该区这种类型的湖相烃源岩系,主要由始新统沙河街组三段(沙三段)中深湖相与下渐新统沙河街组一段(沙一段)滨浅湖相 2 套烃源岩所构成,故其烃源供给体系构成具有一定的混源特征,但仍以沙三段中深湖相烃源/油气源为主,且已被该区原油及天然气碳同位素组成特征与沙三段湖相烃源岩烃类抽提物的碳同位素特征的系统对比所证实。另外,通过沙三段与沙一段烃源岩藻类生物标志物 4-甲基甾烷丰度与表征沉积环境的 ΣC_{29} 甾烷含量相比,得到进一步佐证。沙三段中深湖相偏腐泥混合型烃源岩及其生成的原油,通常均具有较高的 4-甲基甾烷/ ΣC_{29} 甾烷比值,而沙一段浅湖相烃源岩该比值相对较低,即代表低等生物藻类标志物的 4-甲基甾烷含量相对较低^[14],因此,2 种不同沉积环境形成烃源岩所构成的混合烃源供给体系基本清楚。始新统沙三段中深湖相烃源岩是该区超大型及大中型油气田和超大型凝析气田的主要烃源岩,且分布广泛生烃潜力巨大。

4.2 东海盆地中小型凝析油气田及大中型气田群

本区产出的油气以煤系油气为主,成因类型多属于成熟—高熟煤型凝析油气,与该区古近系煤系沉积密切相关,烃源供给主要来自偏腐殖型混合型或富集型煤系腐殖型烃源岩的重大贡献^[15]。这种类型的煤系凝析油气田天然气地球化学特征一般均具有 $i\text{C}_4/n\text{C}_4 \geq 0.8$ 和 $\delta^{13}\text{C}_2 \geq -28\%$ 的特点;同时,根据天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 关系图版发现,除了少数井部分浅层罐顶气样品甲烷碳同位素分布在生物区域外,其他探井天然气样品甲烷碳同位素点群均主要分布于成熟—高熟热解气区。由此可见,东海盆地中部坳陷带西湖富生烃凹陷及邻区的大中型凝析气田及大中型气田群产出的大量天然气及伴生少量凝析油,均属成熟—高熟的煤型气与煤系凝析油气,少量 CO_2 等非烃气属于干酪根热降解的伴生产物,部分浅层 CO_2 可能是细菌生物化学作用所形成。该区尚存在一些高含 CO_2 的油气藏,气源则主要来自深部断裂活动输导及火山幔源活动。另外,该区煤系凝析油气田天然气轻烃分析获得的 C_{6-7} 正构烷烃-异构烷烃和环烷烃构成中,绝大多数天然气样品点群均分布于典型的煤型气区域,亦

具有明显的煤型气特征^[16]。总之,东海盆地西湖凹陷中小型凝析油气田及大中型气田的烃源供给,均主要来源于偏腐殖混合型烃源岩和富集型煤系腐殖型烃源岩的贡献,非烃气 CO_2 则具有生物成因和非生物成因等多种成因类型。

4.3 南海北部大陆边缘盆地大中型油气田及大中型气田群

本区油气成因类型比较复杂,但仍以陆相成因油气为主,其中,石油成因类型均属成熟陆源石蜡型;天然气成因类型则以成熟—高熟煤型气或偏腐殖混合气为主。另外,该区中浅层(2 300 m 以上)生物气及亚生物气分布亦较普遍,且具有较大的资源潜力。南海北部深水海底浅表层水合物成因类型多属以生物气为主的混合气成因气或即次生生物气^[17],其下伏的深部油气田即深水大中型气田群的天然气成因类型均属于成熟—高熟的偏腐殖混合型或煤系腐殖型天然气且伴生少量煤系凝析油。目前开发生产的大中型油田群的陆源石蜡型石油,其烃源供给主要来自始新统陆相断陷中深湖相偏腐泥混合型烃源岩,油气藏均具有“下生上储”及“陆生海储”的基本特点,与中国近海东北部渤海盆地超大型油气田的烃源供给完全一致,均主要来自始新统中深湖相偏腐泥混合型烃源岩^[11, 18-19],且不同盆地不同区域的原油甾萜类生物标志物分布特征基本相同(图 4),其生源母质类型特征及烃源供给关系均可以对比追踪。

大量天然气及凝析油的成因类型均属成熟—高成熟或过熟的煤型天然气及煤系凝析油,其烃源供给主要来自渐新统崖城组-陵水组/恩平组海陆过渡相煤系及浅海相陆源烃源岩和中新统海相陆源烃源岩的重大贡献,且浅水区与深水区大中型气田群中伴生少量凝析油及轻质油甾萜类煤系生物标志物分布特征完全一致,均具有高丰度陆源高等植物标志物 WT 双杜松烷和奥利烷的特点(图 5),其烃源供给主要来自渐新统崖城组煤系烃源岩及半封闭浅海相陆源烃源岩的贡献,已被烃源对比及油气勘探实践所充分证实。该区大中型气田的天然气碳同位素分析,亦进一步证实了其烃源供给主要来自渐新统煤系烃源岩。如琼东南盆地浅水区 YC13-1 气田天然气甲烷碳同位素值 $\delta^{13}\text{C}_1$ 主要介于 $-34\% \sim -39.9\%$,与国内外典型煤型气的甲烷碳同位素分布特征($-32\% \sim -38\%$)基本一致;而天然气乙烷碳同位素值 $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-20\% \sim -27\%$, $> > 28\%$,属于典

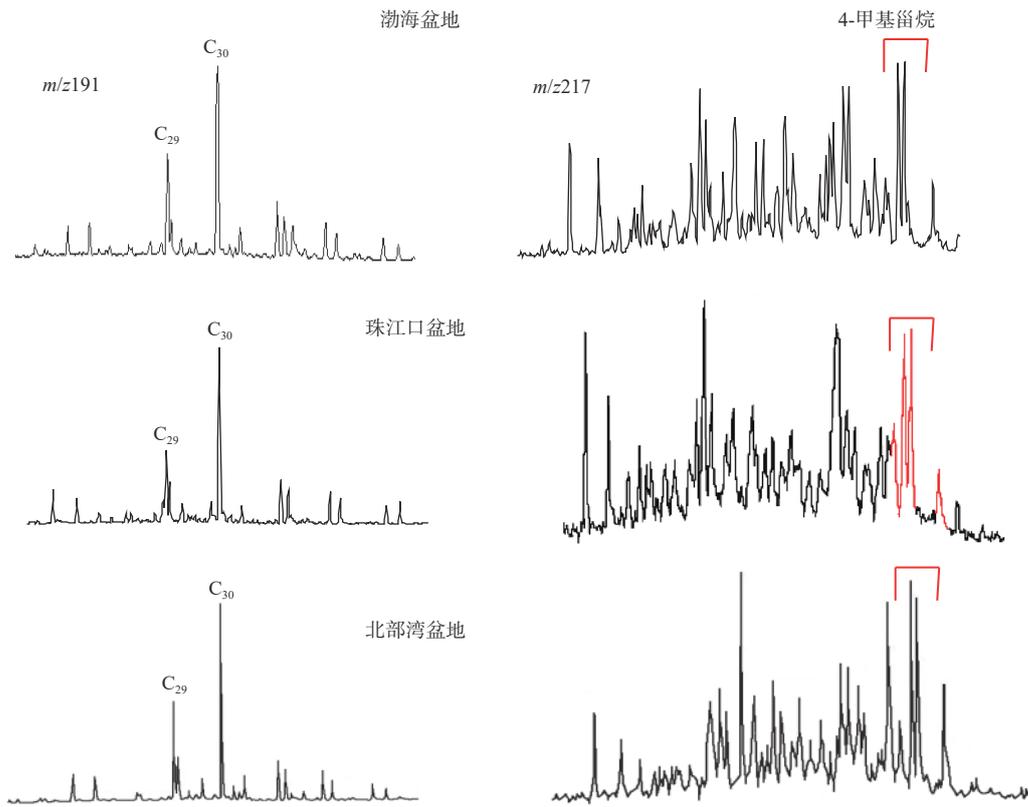


图4 中国近海主要盆地来自湖相烃源岩的石蜡型油甾萜类生物标志物特征对比
 Fig.4 Comparison in characteristics of paraffin oil steroid terpenoid biomarkers from lacustrine source rocks in main offshore basins of China

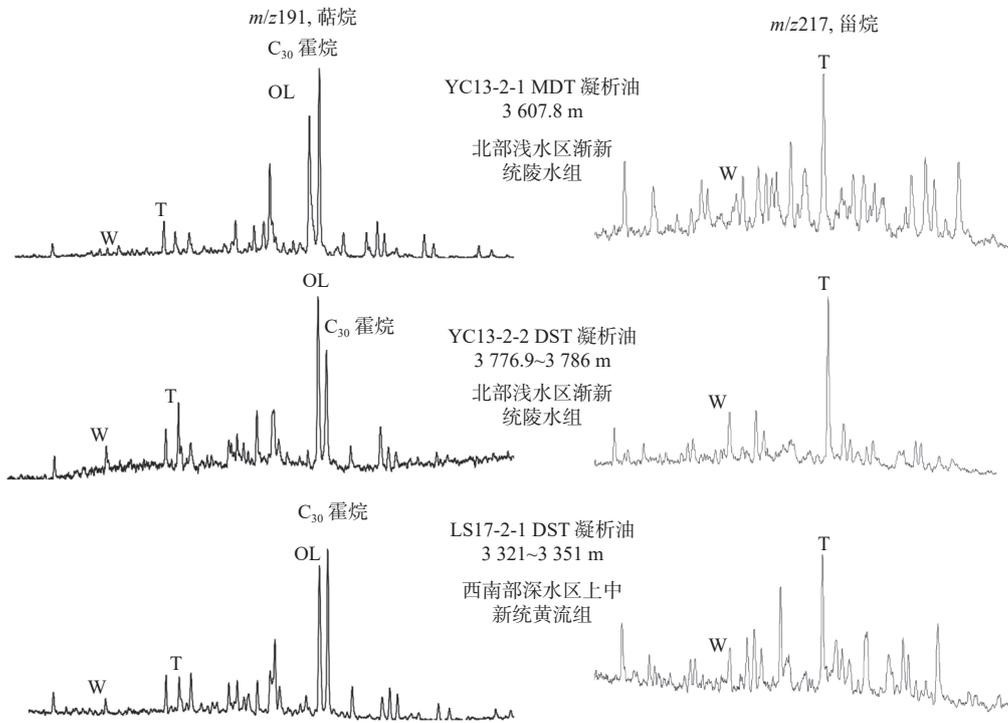


图5 南海北部浅水区与深水区来自渐新统煤系的凝析油甾萜类生物标志物特征对比

Fig.5 Comparison in characteristics of condensate steroids and terpenoids biomarkers from the Oligocene coal measures in shallow and deep-water areas of the northern South China Sea

型煤型气^[19]。再如琼东南盆地南部深水 L25 气田天然气乙烷和丙烷碳同位素亦明显偏重, 其碳同位素分别为 $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-25.57\text{‰} \sim -25.15\text{‰}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 为 $-23.71\text{‰} \sim -23.13\text{‰}$, 亦具有典型的煤型气特征, 其烃源供给则主要来自渐新统崖城组煤系烃源岩^[20]。

另外, 南海北部不同盆地除了大中型煤型气气田群广泛分布外, 生物气及亚生物气在南海北部中浅层亦分布普遍。自西而东从莺歌海盆地、琼东南盆地及珠江口盆地到最东部的台西南盆地等区域, 生物气及亚生物气均有广泛分布, 且均主要集中分布在 2 300 m 以上浅层及中浅层地层系统之中, 其烃源及生物气源供给, 则主要来自该区生烃成熟门槛 ($\pm 3 200 \text{ m}$) 以上未成熟—低成熟生物化学作用带中生物气源岩的贡献^[17,20-22]。

南海北部深水目前勘探发现的天然气水合物矿藏其气源成因类型主要属于以生物成因为主的混合气, 即次生物气, 主要是由大量生物气 (80%) 与深部输送上来的少量热解气 (20%) 混合形成。甲烷碳同位素偏轻/偏负, 具有明显的生物气碳同位素特点, 而乙烷及丙烷等重烃气碳同位素则明显偏重, 又具有典型热解气的碳同位素特征。其水合物气体总组成中生物甲烷居绝对优势, 占比高达 80%, 而乙烷等重烃气成分含量较低, 占比多 $< 20\%$ 。这种混合气源的构成及供给特点, 均来自盆地生烃成熟门槛之上的生物化学作用带中微生物所形成的生物气, 与局部流体运聚通道非常畅通所输送来

的少量深部热解气相互混合而形成。因此, 其气体甲烷同系物碳同位素既有生物气特征 (生物甲烷), 亦有热解气特点 (乙烷等重烃气)。煤层气勘探实践及实验室不同类型天然气混合模拟实验的结果, 均充分证实了混合气源的形成过程及构成机理, 完全符合油气运聚成藏过程中气源构成的基本油气地质规律。

5 中国近海盆地油气成藏组合与运聚成藏模式

中国近海盆地油气成藏组合类型及运聚成藏模式, 主要以“陆生海储、下生上储、新生古储”等“—源多流”的含油气系统及油气运聚成藏模式为主, 且不同盆地不同区域尚存在一定的差异。

(1) 中国近海北部及东部陆缘的渤海盆地超大型及大中型油田群的大量陆源石蜡型原油 主要产自中浅层及浅层上渐新统及中新统碎屑岩储层和深部前古近系不同类型、不同时代、不同岩性的古潜山储层, 其主要烃源岩及烃源供给均来自古新统一渐新统偏腐泥混合型或偏腐泥型湖相烃源岩, 近年来在中深层领域勘探发现的古潜山超大型凝析气田的烃源供给也主要来自这套烃源岩, 因而天然气具有明显的油型气特征。如渤中凹陷渤中 19-6 湖相凝析大气田“新生古储、侧生侧储”天然气运聚成藏模式及分布富集特征^[23] 即是其典型实例 (图 6)。该湖相凝析大气田天然气运聚成藏模式,

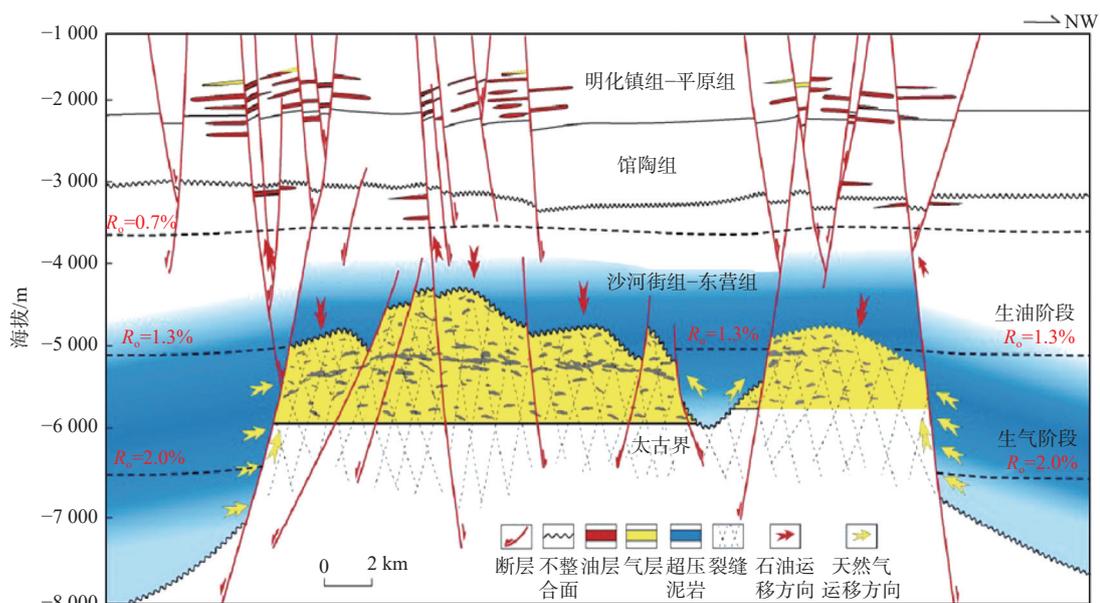


图 6 渤海盆地渤中凹陷渤中 19-6 凝析大气田新生古储、侧生侧储天然气运聚成藏模式及分布特征^[23]

Fig. 6 Migration and accumulation mode and distribution characteristics of new-generation from old-reservoir and lateral-generation with lateral-reservoir natural gas in Bozhong 19-6 condensate gas field in Bozhong Sag, Bohai Basin^[23]

主要由始新统一渐新统沙河街组优质湖相烃源岩生成的大量成熟—高成熟石油天然气,通过高压近源强充注动力在构造活化区发生大规模侧向运移至古潜山储层中聚集,形成早期油气藏,同时在晚期新构造运动之断裂活动时则导致了部分油气通过断裂系统输送至浅部碎屑岩储层,形成浅层次生油气藏。而深层古潜山中早期油气藏则由于高成熟烃源岩晚期生成的天然气源源不断的充注驱替作用,最终导致古潜山中天然气大规模富集,形成目前的湖相油型凝析大气田。这种古潜山大气田的储集层主要为缝洞发育的不同类型、不同时代、不同岩性的基岩古潜山,其中,裂缝及缝洞发育的深层变质岩古潜山储层属于主要的优质储层,与其上覆渐新统沙河街组一段—东营组泥岩构成了较好含油气储盖组合类型。很显然,本区这种不同类型及岩性的古潜山储层与其相邻湖相烃源岩的侧向对接模式,不仅减少了油气运聚过程中的大量损耗,而且避免了油气大规模长距离运聚而发生大范围垂向调整^[14]。因此,即使该区受新构造运动影响,晚期深部油气运聚可能存在一定程度散失,大量油气尤其是高熟天然气仍然主要充注并富集于古潜山储层之中而形成超大型古潜山油型/湖相凝析气田。

(2) 中国近海东南部陆缘东海盆地大中型气田及凝析油气田的油气藏 具有“自生自储、侧生

侧储、下生上储”的油气运聚成藏模式及分布富集特征(图 7),以西湖凹陷平北(西部)斜坡带最为典型^[15]。西湖凹陷发育 2 个主生烃凹陷和多个次级生烃凹陷,平北斜坡带不同区带均具备“双灶供烃、双源混输”的烃源条件,即横向上依靠东侧的主注和邻近的生烃次注提供烃源,纵向上具有始新统宝石组和平湖组 2 套烃源岩混源输入的特点。从平北斜坡带油气勘探目标主要层段和深度看,主要勘探目标体均处于自源生烃灶的生烃门限内,形成了“自生自储”型油气藏。另外,平北斜坡带断裂体系发育,下倾顺向断裂可作为良好的油源输导断层,形成了“下生上储”侧向运聚型油气藏,图 7 左侧所示西部斜坡 Y13-4 等油气藏是典型实例;图 7 中部所示凹中挤压背斜带之背斜油气藏,具有“下生上储”和“自生自储”的成藏组合特征,始新统平湖组煤系烃源岩生成的大量油气,通过纵向断裂通道系统源源不断地运聚至上部的挤压背斜之中富集成藏^[24]。

(3) 中国近海西南部陆缘北部湾盆地中小型油气田的油气成藏组合及运聚成藏模式 一般均具有湖相烃源岩供烃、“下生上储、新生古储”的“一源多流”油气运聚成藏模式及分布富集特征(图 8),如该区主要的富生烃凹陷——涠西南凹陷始新统流沙港组二段中深湖相暗色泥岩及油页岩等主要

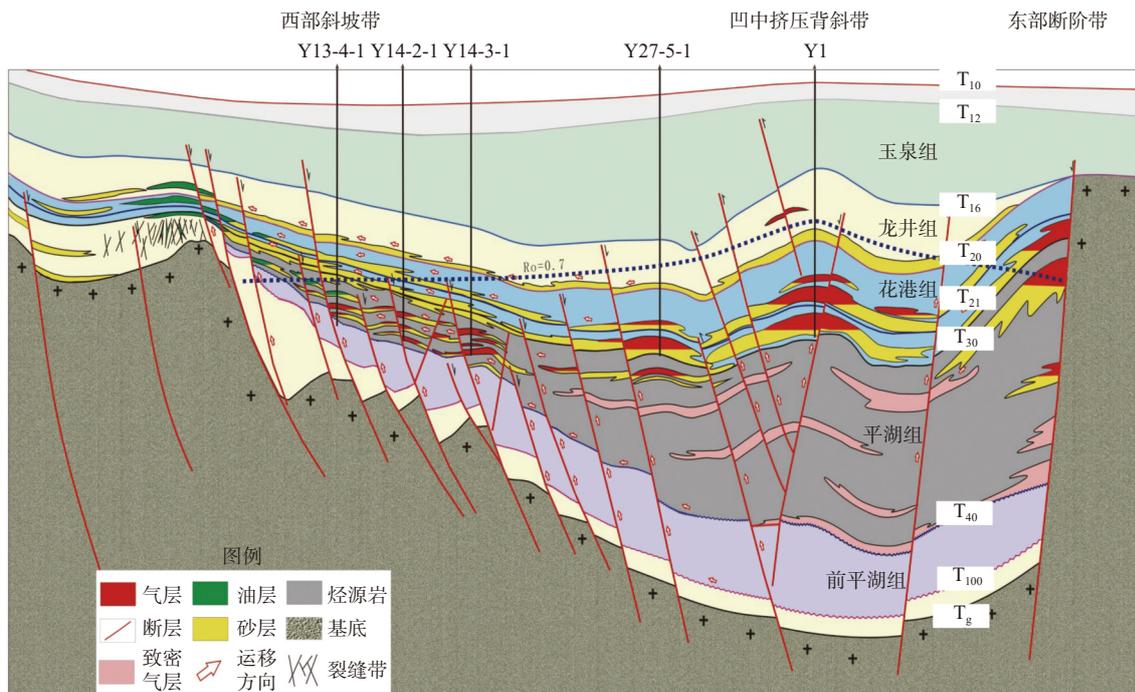


图 7 东海盆地不同区带下生上储、侧生侧储油气运聚成藏模式及分布富集特征^[24]

Fig.7 Migration and accumulation mode and distribution characteristics of lower-generation with upper-reservoir and lateral-generation with lateral-reservoir oil and gas in different zones of the East China Sea Basin^[24]

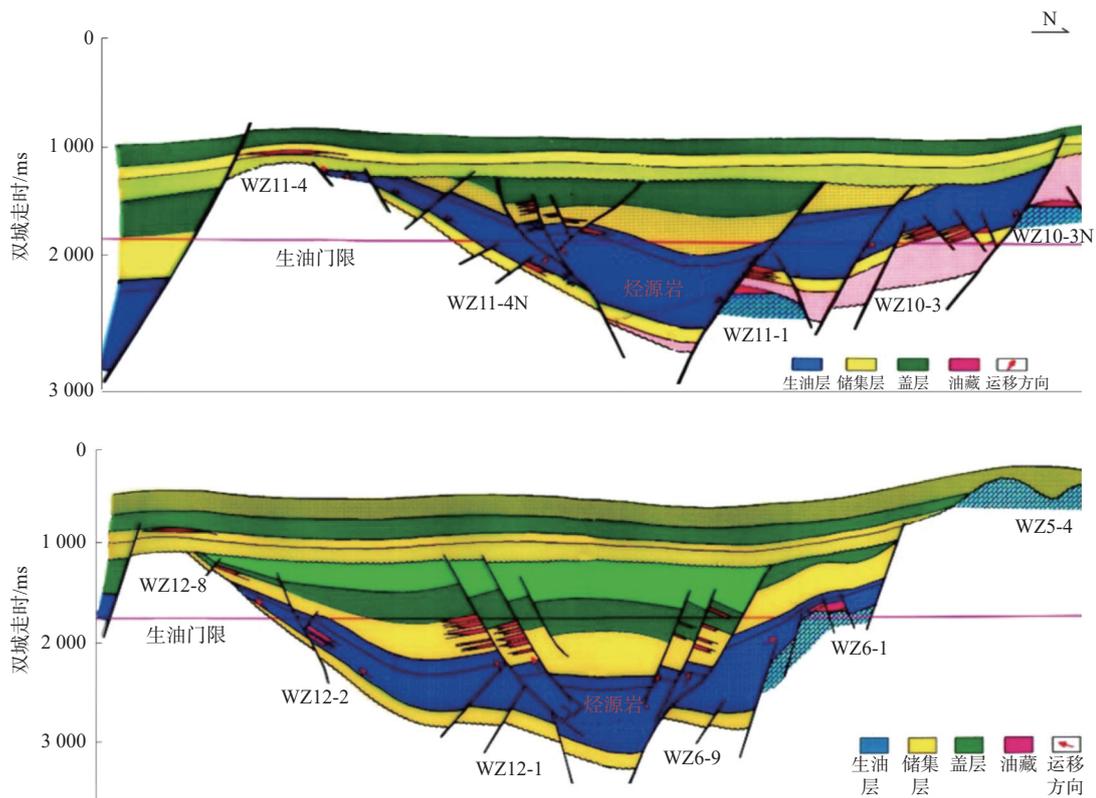


图 8 南海西北部北部湾盆地涠西南凹陷—源多流与下生上储、新生古储油气运聚成藏模式

Fig.8 Migration and accumulation mode of lower-generation with upper-reservoir and new-generation with old-reservoir oil and gas in one source and multiple flows in Weixinan Sag, Beibu Gulf Basin, the northwestern South China Sea

烃源岩,向石炭—二叠系灰岩潜山凸起区“间接接触单向供烃”的运聚成藏模式,以及凹中隆“直接接触多向供烃”的运聚成藏模式等,均具有新生古储的成藏组合特征^[25]。再如涠西南凹陷东区不同区带不同层位层段分布的油气藏,以及深部古潜山灰岩油气藏,其烃源供给均来自流沙港组二段中深湖相偏腐泥混合型优质烃源岩(图 8b),主要含油气层系及产层均为直接覆盖在流沙港组二段成熟烃源岩之上的流沙港组一段底部砂岩或渐新统涠洲组砂岩,以及处在流沙港组二段烃源岩一侧的古潜山灰岩储集层,故形成了“下生上储、侧生侧储、侧生古储”的油气成藏组合类型及油气运聚成藏模式。当然,少量垂向输导的油气尚可进入到较浅较新的地层层系之中。

(4) 中国近海西南部陆缘偏东南的琼东南盆地天然气成藏组合及运聚成藏模式 多属于“下生上储、古生新储”型成藏组合类型及煤系油气运聚成藏模式与含油气系统,最为典型是琼东南盆地南部深水中央坳陷带中浅层中新统/上新统中央峡谷水道型煤系大气田之运聚成藏模式^[26]及含油气系统(图 9)。该区中新统/上新统中央峡谷水道型 L17-2 等煤系大气田的烃源供给与北部浅水区

YC13-1 煤系大气田一样,均来自深部渐新统崖城组煤系烃源岩及半封闭浅海相陆源烃源岩的贡献。天然气运聚成藏模式可以总结概括为:盆地南部深水乐东-陵水凹陷深部渐新统崖城组煤系烃源岩之气源,通过断层裂隙及气烟囱等运聚通道系统与上覆中浅层中央峡谷碎屑岩储层及圈闭沟通,形成了“下生上储、新生古储”类型的大中型气田之岩性圈闭气藏^[27-28]。新近纪以来,尤其是中中新世梅山组沉积时期,该区大型海底扇重力流砂岩储集体发育,在深海泥岩的围限下,可形成较好的含油气储盖组合,成为重要的油气勘探目标,这些勘探目标圈闭的油气输导体系及供烃也主要依靠疑似底辟及气烟囱和断层裂隙系统的连接与沟通。莺歌海盆地的天然气运聚富集特征、储盖组合类型与运聚成藏模式,不同区带均有所差异,主要以“下生上储”的泥底辟控制型与断裂控制型的煤系天然气运聚成藏模式为主。其中,中新统梅山组—三亚组高成熟腐殖型泥岩烃源岩为主要气源岩,在重力流作用机制下形成的滨岸砂岩及三角洲砂岩为主要的优质储层,砂岩储层物源进积方向与泥底辟背斜地层倾向相反,在泥底辟背斜外围往往形成岩性圈闭。同时,在泥底辟背斜外围也存在沟通深部异常高压

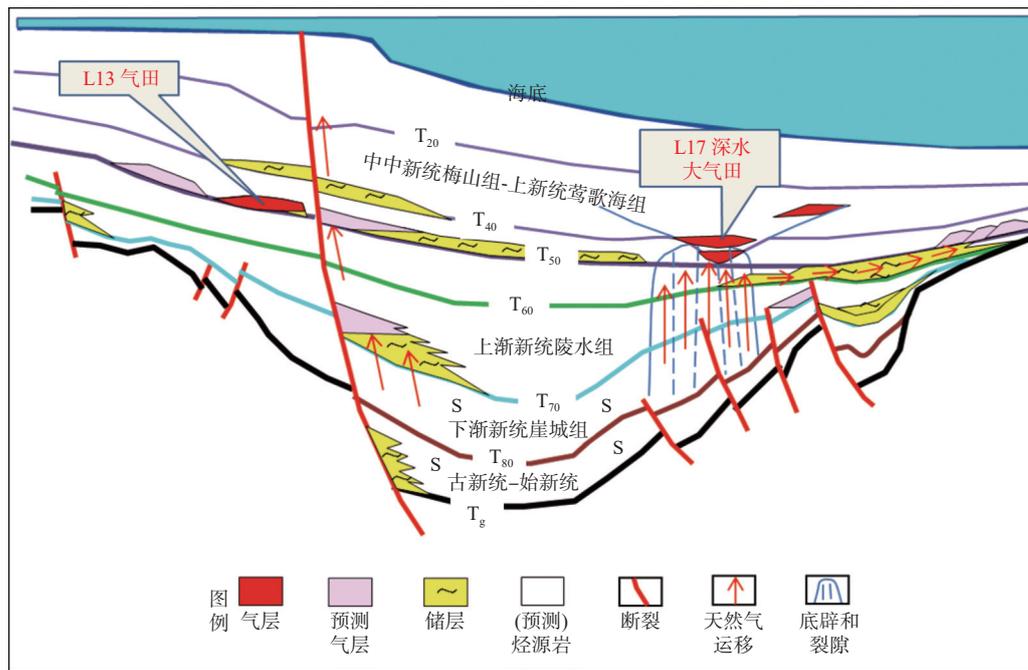


图 9 琼东南盆地乐东-陵水凹陷中中新统-上新统中央峡谷水道下生上储、古生新储大气田运聚成藏模式^[26]

Fig.9 Migration and accumulation model of lower-generation with upper-reservoir and old-generation with new-reservoir gas field in the central canyon channel of the Miocene-Pliocene in Ledong-Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin^[26]

梅山组—三亚组气源岩的断裂,天然气即可沿沟源断层/裂隙垂向运移,最终在上覆中中新统黄流组一段多期重力流沉积的砂岩岩性圈闭中聚集,形成纵向上“多期重力流沉积砂体中油气多期运聚复式富集成藏”的基本特点^[29]。

(5) 中国近海东南部陆缘珠江口盆地北部浅水区珠一坳陷及东沙隆起区 目前开发生产的大中型油气田之大量石油均属于陆源石蜡型原油,其烃源供给主要来自始新统文昌组中深湖相偏腐泥混合型烃源岩,且具有“陆生海储、下生上储”的成藏组合特点,深部始新统文昌组湖相烃源岩供烃,上覆渐新统珠海组及下中新统珠江组海相碎屑岩

储集油气。此外,“下生上储上盖、下生侧储上盖”的“一源多流”之油气运聚成藏模式^[30-31]及其富集特征(图 10),即中浅层海相碎屑岩及碳酸盐岩储层中富集的油气及油气藏的烃源供给,均来自其下伏深部古近纪陆相断陷时期形成的始新统湖相偏腐泥混合型烃源岩的贡献。珠江口盆地南部深水区目前勘探发现的大中型油气田之油气成藏组合类型及油气运聚成藏模式,与北部浅水区有一定的相似性,其烃源供给主要来自下渐新统恩平组煤系和部分始新统文昌组中深湖相烃源岩,油气成藏组合类型亦具有“下生上储、陆生海储”的特点,但其油气运聚成藏模式及油气富集特征则以恩平组

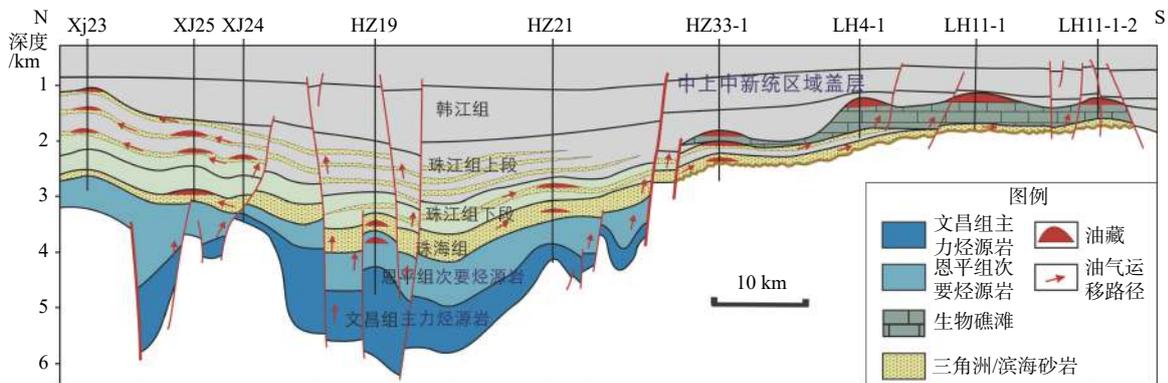


图 10 珠江口盆地浅水区一源多流下生上储、陆生海储湖相油气运聚成藏模式及分布富集特征^[30]

Fig.10 Migration and accumulation mode and distribution characteristics of lower-generation with upper-reservoir and continental-generation with marine-reservoir oil and gas in one source and multiple flows in shallow water area of Pearl River Mouth Basin^[30]

煤系烃源供给为主,“下生上储上盖”“一源多流”。总之,该盆地深水区商业性油气产出均以大量煤型气及少量凝析油及轻质油为主,形成了一些深水大中型气田群。同时,亦形成了部分深水中小型油田群,如 LH16-1、20-2 等中小型油田,其烃源供给可能主要来自文昌组浅湖相烃源岩与恩平组煤系的共同贡献。

(6) 中国近海东南部及南部陆缘区诸盆地(南海北部大陆边缘盆地)除了上述分布广泛的浅水-深水大中型油气田群等常规油气资源外,在深水区尚有资源潜力巨大的非常规天然气资源——深水海底浅表层天然气水合物,均属于以生物气为主的混合成因气或次生生物气,其气源供给主要来自成熟生烃门槛(南海北部约为 3 100 m)以上的生物化学作用带中微生物作用,往往具有“下生上储、自生自储”成藏组合特点,水溶相运移充注、孔隙型/裂隙型方式充填富集特征,以及扩散型、渗漏型和混合型多种运聚成藏模式与颇具特色的天然气水合物含油气系统。

6 中国近海盆地油气勘探开发进展

中国近海海域陆架陆坡区的 10 个含油气盆地,自北而南分别为渤海、北黄海、南黄海、东海、台西、台西南、珠江口、琼东南、莺歌海、北部湾盆地。经过 20 世纪 60—70 年代自营油气勘探的探索、20 世纪 80—90 年代初大规模对外合作油气勘探开发及以后的自营合作并举的油气勘探开发活动,目前已在渤海、东海、珠江口、北部湾、莺歌海、琼东南 6 个盆地勘探开发了大批油气田,尤其是在南海北部陆坡深水区陆续勘探发现了 LS17-2 等一批深水油气田,同时还勘查发现了多个天然气水合物矿藏。迄今为止,中国海上油气年产量已从 20 世纪 80 年代初的 9×10^4 t 油当量跃升至 2010 年以来的 $5\,000 \times 10^4$ t,近年来已达到 $6\,000 \times 10^4$ t。总之,通过引进及消化吸收世界海洋油气勘探开发先进技术和自我创新,目前中国已掌握了海上油气勘探开发完整的技术系列,完全具备了从事近海油气勘探开发的能力。

6.1 中国近海盆地油气勘探开发历程

中国近海盆地油气勘探开发活动及勘探历程主要经历了 3 个主要的关键阶段:①1957—1979 年,早期自营油气勘探阶段,该阶段利用少量

模拟地震资料艰难探索,在近海几十米水深范围发现了一些油气显示(油气苗)和小油田及含油构造(包括莺歌海盆地油气苗调查及浅井钻探和渤海盆地浅井钻探),初创了海洋石油工业;②1979—1997 年,对外合作油气勘探与自营油气勘探并举阶段,通过对外合作油气勘探吸引了大批国际石油公司,近海油气勘探大规模展开,掀起了海洋油气勘探的热潮,但油气勘探成功率较低,同时自营油气勘探活动亦在进行;③1997 年至今,以自营油气勘探活动为主带动合作油气勘探阶段,自营油气勘探活动发展迅猛,逐渐成为中国近海油气勘探的主流,由此带动了对外合作油气勘探活动的开展。总之,“十一五”以来,中国近海油气勘探开发活动进入了发展的快车道。

2006 年以来,中国近海油气勘探投资持续大幅度增长。至 2014 年自营油气勘探投资达到 137 亿元,是 2006 年的 6 倍多。该时期中国近海自营油气勘探三维地震工作量超过 1.8×10^4 km²,是 2006 年的 4 倍多。目前,近海海域油气勘探成熟区已基本完成三维地震全覆盖。在此基础上,优选有利油气勘探区带及钻探目标实施了大量钻井作业。其中,仅 2011 年中国近海海域年度油气勘探活动的探井数量即突破 100 口,特别是近年来近海盆地的三大海域各自的探井数量平均已超过 46 口/a。在油气勘探的探井工作量大幅度增加的情况下,自营油气勘探活动的平均商业成功率均约 30%,保持在国际先进水平,近年来则远超过了 30%。总之,从 2007 年开始中国近海盆地油气勘探即走出了阶段性的低谷,进入了油气勘探的快车道,且连续多年获得重大油气发现和突破,尤其是在渤海盆地、南海北部莺歌海盆地、琼东南盆地及珠江口盆地等近海海域,均先后勘探发现了一批大中型油气田^[32]。随之,中国近海海域自营油气勘探活动获得的油气储量发现则屡创历史新高,仅 2014 年新发现油气三级地质储量即超过 9×10^8 t 油当量。中国近海盆地在“十一五”期间,其油气勘探获得的重大突破和新发现均处于历史高峰(图 11)。在此期间,勘探新发现亿吨级规模油田 7 个,包括蓬莱 9-1、锦州 25-1、金县 1-1、垦利 10-1、秦皇岛 33-15、秦皇岛 29-2、旅大 21-2;勘探新发现千亿立方米级规模气田 4 个,分别是宁波 17-1、陵水 17-2、宁波 21-2、东方 13-2。此外,还发现一批中型油气田群,如 $5\,000 \times 10^4$ t 以上规模的油田 9 个,3 000 万 t 以上规模的油田 9 个,以及 300×10^8 m³ 以上气田 5 个等。

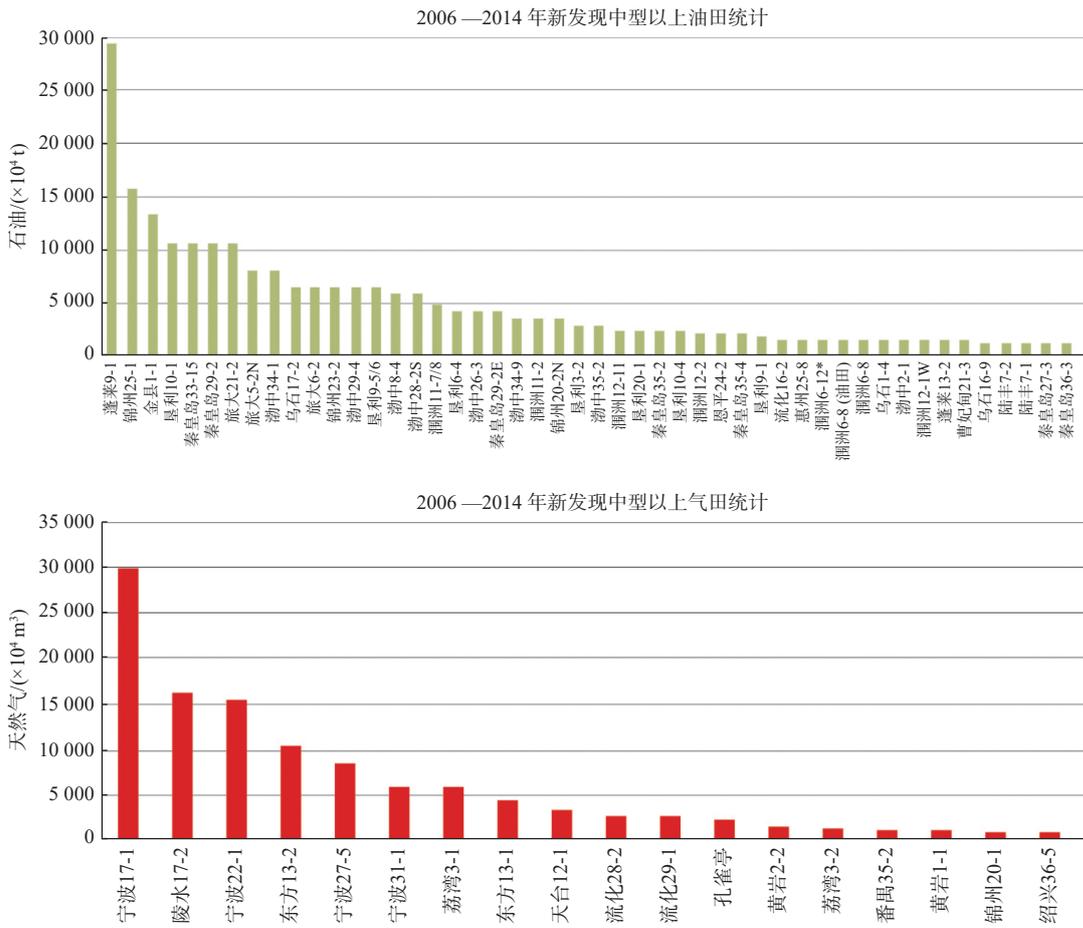


图 11 中国海域主要盆地“十一五”期间所获油气勘探重大突破和发现统计结果^[32]

Fig. 11 Statistical results of major oil and gas exploration breakthroughs and discoveries in major basins in China maritime area during China's "Eleventh Five Year Plan" (2006–2010)^[32]

目前,在中国近海盆地已勘探发现油气田 179 个,其中油田 120 个,气田 59 个;勘探发现含油气构造 145 个;天然气水合物矿藏 2 个(神狐、东沙),以及 2 个尚待进一步证实的天然气水合物矿藏(陵南、松南低凸起)等。

6.2 中国近海主要盆地油气勘探开发进展概况

通过半个多世纪的油气勘探开发实践与研究,目前已构成了“北部油为主、中间气为主、南部气油兼有”的大油气区的基本分布格局。其中,超大型及大中型油田群均主要分布于北部陆缘的渤海盆地,且该盆地深部尚有大型油型凝析气田分布;中小型凝析气田及大中型气田主要分布在其中间(东南部陆缘)的东海盆地;大中型油田群及气田群以及深水气田群和天然气水合物藏,则主要分布于南部及东南部陆缘的南海北部诸盆地(北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地及珠江口盆地)。

(1) 渤海盆地是中国近海盆地石油资源最丰富区域

渤海盆地面积约 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总体规模不大,但石油资源非常丰富,是中国近海盆地目前乃至将来油气勘探最具潜力的区域。自 1965 年勘探以来,历经探索、合作、自营-合作并举等油气勘探 3 个主要阶段,迄今已发现了一系列超大型及大中型油气田群。2005 年底,油气年产量已达 $1\,400 \times 10^4 \text{ t}$ 油当量,以石油为主。2011 年,油气年产量已超过 $3\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 油当量大关。近年来,深层天然气勘探亦获得了重大突破,勘探发现了渤中 19-6 超大型规模的凝析气田,属于在目前的大中型油田群下面找到了湖相超大型凝析气田。该区是中国近海盆地最大也是中国最大的产油气基地之一,具有丰富的油气资源。

(2) 珠江口盆地是重要产油区,亦是深水油气及水合物勘探开发重点区

珠江口盆地展布面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$, 1973 年开

始勘探, 1979 年发现油气并开始对外合作进行油气勘探开发活动, 先后在陆架区发现了一批大中型油田并投入开发生产, 1996 年起油气产能连续稳产在 1 200 万 t/a 以上(主要为石油), 是中国近海盆地的主产油区。前几年在长期未获商业性油气发现的西北部浅水区恩平凹陷油气勘探获得了重大突破, 发现了 1 个中型油田。另外, 在该盆地南部珠二坳陷陆坡深水区, 陆续勘探发现了 LW3-1 气田、LH34-2、LH29-1 大中型气田和 LH16-2、20-2 中小型油田, 开拓了南海北部深水油气勘探新领域。同时, 天然气水合物勘探试采获重大突破。该区是中国近海盆地深水油气勘探开发及天然气水合物勘探试采的主战场之一, 具有丰富的油气及天然气水合物资源。

(3) 北部湾盆地滚动油气勘探成效显著, 属具有一定储量规模产油区

北部湾盆地面积约 $3.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 1963 年开始油气勘探, 1977 年勘探发现油气, 20 世纪 80 年代以来相继发现一些中小型油田, 并逐渐投入开发生产, 1994 年石油产量超过 $100 \times 10^4 \text{ t}$, 2000 年石油产量达 $200 \times 10^4 \text{ t}$, 目前石油年产量保持在 $200 \times 10^4 \text{ t}$ 以上。该盆地整体油气勘探开发程度较低, 长期以来勘探开发活动均主要集中在涠西南凹陷及周缘, 乌石凹陷中东部有所涉及, 但其他广大区域研究程度甚低。该盆地预测石油资源量约 $9.7 \times 10^8 \text{ t}$, 天然气资源量约 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其油气勘探前景较好, 将来可以建成具中等油气产能、规模长期稳产的石油生产基地。

(4) 莺歌海-琼东南盆地属天然气富集区亦是深水油气及水合物产区

莺歌海盆地和琼东南盆地, 展布面积超过 $16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。处在南海西北部的莺歌海盆地基本上均处于浅水区, 新近系及第四系沉积充填巨厚, 最厚逾 17 000 m, 盆地中部坳陷区沉积巨厚且泥底辟异常发育, 自 20 世纪 50 年代末开展沿岸油气苗调查及浅井钻探以来, 先后勘探发现了一批浅层大中型气田群(DF1-1、LD15-1、LD22-1 等)和部分中深层高温超压大中型气田(DF13-1/2、LD10-1 中深层气田等), 获得天然气储量超 $3 000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与莺歌海盆地东部紧密相邻即处于南海西北部及北部的琼东南盆地, 其北部属浅水区, 而南部为深水区与南海西北部洋盆邻近, 处在陆架陆坡及洋陆过渡带, 水深在 800~2 000 m 范围, 是深水油气及天然气水合物勘探开发的有利区域。20 世纪 60 年代初开始

油气勘探, 1983 年在北部浅水区勘探发现了 YC13-1 气田, 属当时全国最大气田, 于 1995 年开发投产, 向香港供气发电, 年产气 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2014 年以来, 该区深水油气勘探获得重大进展, 先后勘探发现了 LS17-2、LS18-1 及 LS25-1 等大中型深水气田群, 最近还发现了 YL8-1/3 古潜山中型气田和 BD21-1 中型凝析气田。同时, 在该区天然气水合物勘探亦获重大发现, 先后发现了陵南低凸起(W01、02 及 03 井区)和松南低凸起(W07、08 及 10 井区)天然气水合物矿藏。总之, 莺-琼盆地深水油气及天然气水合物资源富集, 有望成为中国近海盆地富气高产气大区, 亦是深水油气及天然气水合物资源的富集区。目前莺-琼盆地天然气年产量约为 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产能稳定, 可持续的天然气储量替代之资源基础雄厚, 勘探开发前景广阔。

(5) 东海盆地具较丰富油气资源且勘探开发前景好

东海陆架盆地面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 1974 年开始油气勘探, 1983 年发现了平湖油气田, 其后又发现了几个中小气田, 规模都不大, 属中小型。平湖油气田 1998 年投产, 年产气 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产油 $40 \times 10^4 \text{ t}$ 。

中国近海海域其他盆地, 如北黄海、南黄海、台西及台西南盆地, 具有较好的油气勘探前景, 其中, 北黄海石油资源约 $8.0 \times 10^8 \text{ t}$; 南黄海石油资源约 $4.4 \times 10^8 \text{ t}$, 天然气资源约 $4 163 \times 10^8 \text{ m}^3$; 台西及台西南石油资源约 $4.0 \times 10^8 \text{ t}$, 天然气资源约 $3 638 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。但因复杂因素影响, 勘探及研究程度甚低, 迄今尚无重大商业性油气发现。

(6) 各盆地天然气水合物勘探研究进展

迄今为止, 在南海北部深水区已勘探圈定了两大天然气水合物成藏区带(以千米水深线为界)和三大富集区(6 个远景区、19 个成矿区带、25 个有利区块), 勘探发现了 3 个(1 个尚需落实)超千亿立方米级的天然气水合物矿藏^[33]。2007 年以来, 广州海洋地质调查局开展了 9 个航次的天然气水合物勘查活动, 在南海北部陆坡东部珠江口盆地东沙区及神狐区和陆坡西部琼东南盆地陵南区 and 松南宝岛区, 多次钻获了高纯度、高饱和度天然气水合物实物样品, 发现了的渗漏型天然气水合物伴生产物——九龙甲烷礁和“海马”冷泉区, 以及不同成藏类型的天然气水合物富集区^[34-37](神狐扩散-渗漏型水合物、东沙混合/复合型水合物、陵南渗漏型及扩散型水合物和松南渗漏型及混合型水合物)。在 2017 年和 2020 年分别实施天然气水合物试采, 实

现了从探索性试采向试验性试采的重大跨越^[38-39], 为将来生产性试采及商业化生产奠定基础。根据初步评价预测, 南海北部深水天然气水合物资源量可达 800×10^8 t 油当量。

7 结论与认识

(1) 中国近海盆地面积大, 油气资源丰富, 油气勘探开发前景广阔, 但盆地油气地质条件较复杂。目前油气勘探开发活动主要集中在渤海盆地、东海盆地、珠江口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地、北部湾盆地, 且已获得了超大型、大中型油气田发现的重大突破并投入了大规模的油气勘探开发生产; 而北黄海盆地、南黄海盆地、台西盆地、台西南盆地等, 由于多方面因素影响, 导致油气研究及勘探程度甚低, 迄今尚未获得商业性油气勘探的重大突破。

(2) 中国近海含油气盆地的构造类型、沉积充填、油气成因、成藏组合及运聚成藏模式等均各具特点。深入分析和系统阐明典型油气田的油气运聚成藏规律, 有利于进一步开发已获得重大发现盆地的剩余油气资源, 指导盆地新探区的高效油气勘探。

(3) 目前, 中国近海盆地油气勘探开发进入了高速发展阶段, 证实了近海海域“海上大庆”大油气富集区的巨大规模及资源潜力。

(4) 通过多年的海洋地质调查与勘查, 南海北部深水陆坡东部东沙-神狐区和陆坡西部陵南-松南宝岛区多次钻获高纯度、高饱和度天然气水合物类型, 并取得了2次试采成功, 中国近海海域的非常规油气资源勘探开发进入全新发展阶段。

参考文献:

[1] 中国石油勘探开发研究院. 全球油气勘探开发形势及油公司动态-2019年[M]. 北京: 石油工业出版社有限公司, 2019.

[2] 龚再升, 等. 中国近海大油气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

[3] 朱伟林. 中国近海新生代含油气盆地古湖泊学与烃源条件[M]. 北京: 地质出版社, 2009.

[4] 杜潇瑛. 东营凹陷中生界沉积体系研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.

[5] 王策. 莺歌海盆地上中新统一更新统储层物源识别: 来自碎屑锆石U-Pb年代学和地球化学制约[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2016.

[6] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(1): 75-86.

[7] 郑红菊, 董月霞, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡富油气凹陷烃源岩的形成及其特征[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 78-83.

[8] 杨海风, 涂翔, 赵弟江, 等. 渤海湾盆地莱州湾凹陷沙河街组第三、第四段烃源岩有机相特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(1): 72-81.

[9] 申雯龙, 漆滨汶. 东海盆地丽水凹陷有效烃源岩判定及分布预测[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 77-88.

[10] 蒋一鸣, 刁慧, 曾文倩. 东海盆地西湖凹陷平湖组煤系烃源岩条件及成烃模式[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 30-39.

[11] 杨希冰, 金秋月, 胡林, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷原油成因类型及分布特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 51-60.

[12] 张春良, 沈玉林, 秦勇, 等. 崖南凹陷Y1井崖三段煤系烃源岩发育规律[J]. 沉积学报, 2016, 34(5): 1003-1010.

[13] HAO F, ZOU H, HUANG B. Natural gas generation model and its response in accumulated fluids in the Yinggehai Basin[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(11): 1103-1112.

[14] 薛永安, 王奇, 牛成民, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 891-902.

[15] 周心怀, 高顺莉, 高伟中, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 153-164.

[16] 苏奥, 陈红汉, 王存武, 等. 东海盆地西湖凹陷油气成因及成熟度判别[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 521-527.

[17] 何家雄, 颜文, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地生物气/亚生物气资源与天然气水合物成矿成藏[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 121-134.

[18] 金秋月. 北部湾盆地涠西南凹陷东南斜坡原油成因类型及成藏特征[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(1): 11-18.

[19] 何家雄, 李强, 陈伟煌, 等. 琼东南盆地油气成因类型及近期天然气勘探方向探讨[J]. 海洋石油, 2002, 22(1): 47-56.

[20] 张迎朝, 李绪深, 徐新德, 等. 琼东南盆地深水西区L25气田天然气成因、来源与成藏过程[J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 73-82.

[21] 何家雄, 祝有海, 黄霞, 等. 南海北部边缘盆地不同类型非生物成因CO₂成因成藏机制及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 935-942.

[22] 何家雄, 马文宏, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及运聚规律与勘探新领域[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(4): 1-10.

[23] 薛永安, 王德英. 渤海湾油型湖盆大型天然气藏形成条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 260-271.

[24] 张迎朝, 胡森清, 刘金水, 等. 东海盆地X凹陷天然气成藏条件与成藏模式[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 27-35.

[25] 赵顺兰, 陈林, 李才, 等. 涠西南凹陷碳酸盐岩潜山原油来源及成藏模式[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(6): 1-7.

[26] 张迎朝, 徐新德, 甘军, 等. 琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J]. 地质学报, 2017, 91(7): 1620-1633.

- [27] 李绪深, 张迎朝, 杨希冰, 等. 莺歌海-琼东南盆地天然气勘探新认识与新进展[J]. 中国海上油气, 2017, 29(6): 1-11.
- [28] 姚哲, 王振峰, 左倩媚, 等. 琼东南盆地中央峡谷深水大气田形成关键要素与勘探前景[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1358-1366.
- [29] 谢玉洪, 张迎朝, 李绪深, 等. 莺歌海盆地高温超压气藏控藏要素与成藏模式[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 601-609.
- [30] 陈长民. 珠江口盆地东部石油地质条件及油气藏形成条件初探[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(2): 73-83.
- [31] 陈长民, 施和生. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-266.
- [32] 朱伟林, 张功成, 钟锴. 中国海洋石油总公司“十二五”油气勘探进展及“十三五”展望[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(4): 1-12.
- [33] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 1-14.
- [34] 何家雄, 卢振权, 张伟, 等. 南海北部珠江口盆地深水区天然气水合物成因类型及成矿成藏模式[J]. 现代地质, 2015, 29(5): 1024-1034.
- [35] 何家雄, 卢振权, 苏丕波, 等. 南海北部天然气水合物气源系统与成藏模式[J]. 西南石油大学学报, 2016, 38(6): 8-24.
- [36] 于俊峰, 宋瑞有, 晁彩霞, 等. 琼东南盆地深水区BSR带裂隙系统空间分布特征[J]. 海洋学报, 2020, 42(9): 69-78.
- [37] Wang H B, Yang S X, Wu N Y, et al. Controlling factors for gas hydrate occurrence in Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. Science China (Earth Sciences), 2013, 56(4): 513-520.
- [38] 何家雄, 钟灿鸣, 姚永坚, 等. 南海北部天然气水合物勘查系采及研究进展与勘探前景[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 1-14.
- [39] 何家雄, 宁子杰, 赵斌, 等. 南海天然气水合物资源勘查战略接替区初步分析与预测[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1549-1568.

Petroleum geological characteristics and progress of exploration and development in offshore basins of China

HE Jiexiong^{1,2}, YAO Yongjian^{3*}, YU Junfeng⁴, ZHANG Jinfeng⁵

(1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2 Key Laboratory of Marginal Sea and Ocean Geology, Chinese Academy of Sciences Guangzhou 510640, China;

3 Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources//Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511455, China;

4 Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, Guangdong, China;

5 School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: In the past over 50 years of offshore oil-gas exploration practice, technological innovations and progresses in this regard in China have made great progresses with many major breakthroughs. Especially, since 2011, it welcomed a quick development. In 2010, the annual offshore oil-gas production of China exceeded 50 million tons of oil equivalent, including more than 30 million tons of crude oil from the Bohai Basin, which realized the goal of building an "Offshore Daqing", and oil-gas production in China's sea areas has been growing rapidly. In this review, we systematically summarized the basic petroleum geological features of China offshore oil-gas resources in terms of petroliferous basin sedimentary characteristics, tectonic structure types, genetic types of oil and gas, hydrocarbon source supply, combination type of hydrocarbon accumulation, and accumulation model. In addition, we briefly reviewed the progresses in oil-gas (including hydrate) exploration and development in the main offshore basins in China, provided some important references for further exploration and development of the remaining oil and gas resources in more-mature basins to guide more efficient oil-gas exploration and development in low-mature basins.

Key words: offshore basins of China; main source rocks; petrogenesis types; model of hydrocarbon migration and accumulation; progress in exploration and development