

引用: 秦雁群, 张光亚, 刘计国, 等. 东非海域深水油气形成地质背景、成藏条件与勘探潜力 [J]. 中国石油勘探, 2022, 27(6): 110-121.

Qin Yanqun, Zhang Guangya, Liu Jiguo, et al. Geological settings, hydrocarbon accumulation conditions and exploration prospects of deep-water oil and gas in East Africa [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(6): 110-121.

东非海域深水油气形成地质背景、成藏条件与勘探潜力

秦雁群 张光亚 刘计国 陈忠民 肖高杰

(中国石油勘探开发研究院)

摘要: 被动大陆边缘深水油气勘探是近年来全球油气勘探热点领域, 新发现的大油气田中海域特别是深水区域已占主导地位。将同一大陆边缘盆地群进行统一的构造演化与地层充填分析, 统计已发现油气田的地质特征, 明确其成藏条件和成藏模式, 对于区域级别油气区带优选和新项目的获取具有重要指导意义。文章通过 IHS、Wood Mackenzie 等油气田数据库资料, 结合油气勘探新发现和部分内部新项目评价资料等, 系统分析东非海域 9 个盆地深水油气形成的地质背景及油气成藏条件, 指出深水油气有利区带分布。研究表明, 东非海域盆地群经历了早石炭世—三叠纪卡鲁裂谷、侏罗纪马达加斯加裂谷和白垩纪至今的被动大陆边缘 3 个演化阶段, 基底断裂受印度洋转换断层、大陆边缘伸展断裂系统和东非裂谷系断裂系统联合控制, 由北往南可划分为 4 个构造段, 不同构造段盆地剖面结构和地层充填差异明显。东非海域共发育下侏罗统、中上侏罗统一白垩系和古近系 3 套烃源岩; 形成了海相浊积砂岩和三角洲砂岩两种类型优质储层和海相厚层页岩区域性盖层, 储盖组合良好; 可划分为证实的新生界和白垩系及推测的上二叠统一侏罗系 3 套深水成藏组合; 形成了漂移早—中期供源、漂移期成藏, 裂谷期与漂移早期供源、裂谷期—漂移期成藏, 以及裂谷期供源、漂移期成藏 3 种深水油气成藏模式。东非海域被动大陆边缘时期, 形成了大型三角洲及深水重力流沉积物混合的扇复合体和无大型古河流供给、以滑塌形成为主的近岸叠置小型扇朵叶体两种类型的深水扇体; 白垩系和古近系深水油气有利区带具有一定的继承性, 主要位于坦桑尼亚盆地南部、鲁伍马盆地北部等地区, 勘探目标以天然气勘探和碎屑岩勘探为主。

关键词: 被动大陆边缘; 深水; 东非; 大气田; 坦桑尼亚盆地; 鲁伍马盆地

中图分类号: TE111.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.06.012

Geological settings, hydrocarbon accumulation conditions and exploration prospects of deep-water oil and gas in East Africa

Qin Yanqun, Zhang Guangya, Liu Jiguo, Chen Zhongmin, Xiao Gaojie

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development)

Abstract: In recent years, the deep-water area in the passive continental margin has become a hotspot of global petroleum exploration, and the large-scale new oil and gas fields are mostly discovered in sea area, especially the deep-water area. Therefore, a unified analysis of tectonic evolution and sediments filling of a group of basins at the same continental margin, and the geological characteristics study of the discovered oil and gas fields, as well as the defined hydrocarbon accumulation conditions and patterns will provide important guidance to screen regional-

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“海外重点领域油气勘探关键技术研究”(2021DJ3103); 中油锐思研发项目“中西非裂谷盆地中深层油气勘探关键技术研究”(2022-FW-022)。

第一作者简介: 秦雁群(1982-), 男, 安徽巢湖人, 博士, 2011年毕业于中国地质大学(北京), 高级工程师, 现主要从事非洲地区油气勘探技术支持工作。地址: 北京市海淀区学院路20号910信箱, 邮政编码: 100083。E-mail: yqqin@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-07-21; 修改日期: 2022-10-24

level favorable oil and gas plays and acquire new projects. By using oil and gas field data base, such as IHS and Wood Mackenzie, and integrating with the new discoveries and internal evaluation data of new venture projects, the geological settings and hydrocarbon accumulation conditions of nine basins in the deep-water area in East Africa are systematically analyzed, and the favorable oil and gas plays in deep-water area are proposed. The study results show that the basin group in East African sea area experienced three stages of tectonic evolution, i.e., Karoo rift in the Early Carboniferous-Triassic, Madagascar rift in the Jurassic, and passive continental margin since the Cretaceous. Jointly controlled by transfer faults in the Indian Ocean, extensional fault system at the continental margin, and fault system in the East African rift system, the basement faults are divided into four tectonic segments from north to south, and significantly different section structure and sediment filling characteristics show in various basin segments. Three sets of source rocks were developed in East African sea area, including the Lower Jurassic, Middle-Upper Jurassic to Cretaceous and Paleogene. Two types of superior reservoirs of marine turbidite sandstone and delta sandstone were deposited, which formed a good reservoir and cap rock assemblage associated with the regional massive marine shale. Three sets of deep-water hydrocarbon accumulation assemblages are identified, including two proven assemblages in the Cenozoic and Cretaceous, as well as the inferred assemblage in the Upper Permian-Jurassic. Three types of deep-water hydrocarbon accumulation patterns are established: (1) hydrocarbon generation and supply in the early-middle stage of drift period and hydrocarbon accumulation during the drift period; (2) hydrocarbon generation and supply during the rift period and early stage of drift period, and hydrocarbon accumulation in the rift-drift period; (3) hydrocarbon generation and supply in the rift period, and hydrocarbon accumulation in the drift period. Two types of deep-water fan bodies were formed in the passive continental margin period in East African sea area, namely the fan complex mixed by the large-scale delta and deep-water gravity flow sediments, and the nearshore superimposed small fan lobes dominated by slumping and without any material supply from the large-scale paleo rivers. The Paleogene favorable deep-water oil and gas plays have certain inheritance to those of the Cretaceous, which are mainly developed in the southern Tanzania Basin and the northern Rovuma Basin, and the exploration targets are dominated by natural gas and clastic rocks.

Key words: passive continental margin, deep water, East Africa, large gas fields, Tanzanian Basin, Rovuma Basin

0 引言

近年来,全球常规油气勘探实践表明,海域特别是深水区油气发现已占比达65%以上^[1]。2010—2020年,全球共发现101个大型油气田,可采储量为 218×10^8 t油当量,其中海域深水区共发现68个,可采储量占大发现总储量的74%^[1]。目前,全球深水油气勘探已从早期的西非、巴西东部和墨西哥湾三大传统“深水黄金带”向东非、西北非、东地中海、巴伦支海、东南亚等海域全面扩展^[1-3]。

东非海域包括塞伽莱(Sagaleh)、索马里(Somali)、摩加迪休(Mogadishu)、拉穆(Lamu)、坦桑尼亚(Tanzanian)、鲁伍马(Rovuma)、莫桑比克(Mozambique)、马任加(Majunga)和穆伦达瓦(Morondava)等9个盆地,总沉积面积超过 3.7×10^6 km²,其中海域面积占60%以上。自2010年首个深水大气田发现以来,目前共发现油田、油气田12个,油气可采储量为 1.2×10^8 t油当量;共发现气田70个,天然气可采储量为 3.9×10^{12} m³,已成为全球深水油气勘探的热点地区之一^[3-6]。

前人对该地区的研究主要集中在单一盆地油气地质^[7-10]、区域构造沉积演化^[11-14]、盆地结构与构造地质^[15]、烃源岩分布与预测^[16]、大油气田主控因素^[4,6]、油气潜力与勘探方向^[11,17]等方面,从区域深水油气成藏角度进行系统的地质分析较少。本文根据IHS、Wood Mackenzie等油气田数据库资料^[3,5],结合近

年油气勘探新发现和新项目评价资料,系统地分析东非海域深水区油气形成的地质背景和成藏特征,指出有利砂体类型和区带分布,为该地区新项目获取和深水勘探提供指导建议。

1 油气形成地质背景

1.1 基底断裂与构造段

东非海域盆地群基底是在泛非运动期间固结形成的,受印度洋转换断层、大陆边缘伸展断裂系统、东非裂谷系断裂系统等联合控制(图1)^[5]。其中与东非大陆边缘有关的转换断层主要有4种走向:北东向(Owen断裂带)、近南北向(Davie断裂)、北北东向(莫桑比克断裂带)和北东向(Agulhas断裂),不同走向转换断层控制东非海域盆地群之间构造与沉积特征的差异,由此划分为4个构造段(图1)。

I段(塞伽莱盆地—索马里盆地):与Owen断裂带近似平行发育,受转换断层左行走滑作用,印度大陆与非洲大陆分裂时呈北东向运动。侏罗纪—早白垩世时,该地区盆地处于浅水环境,晚白垩世后逐渐形成被动大陆边缘。

II段(摩加迪休盆地—拉穆盆地、马任加盆地):受Owen断裂带和Davie断裂之间的转换断层小角度剪切作用,该段内盆地基底断裂发育具有显著的右行走滑分量。盆地内沉积充填起源于侏罗纪马达加斯加岛北部与非洲大陆裂解。

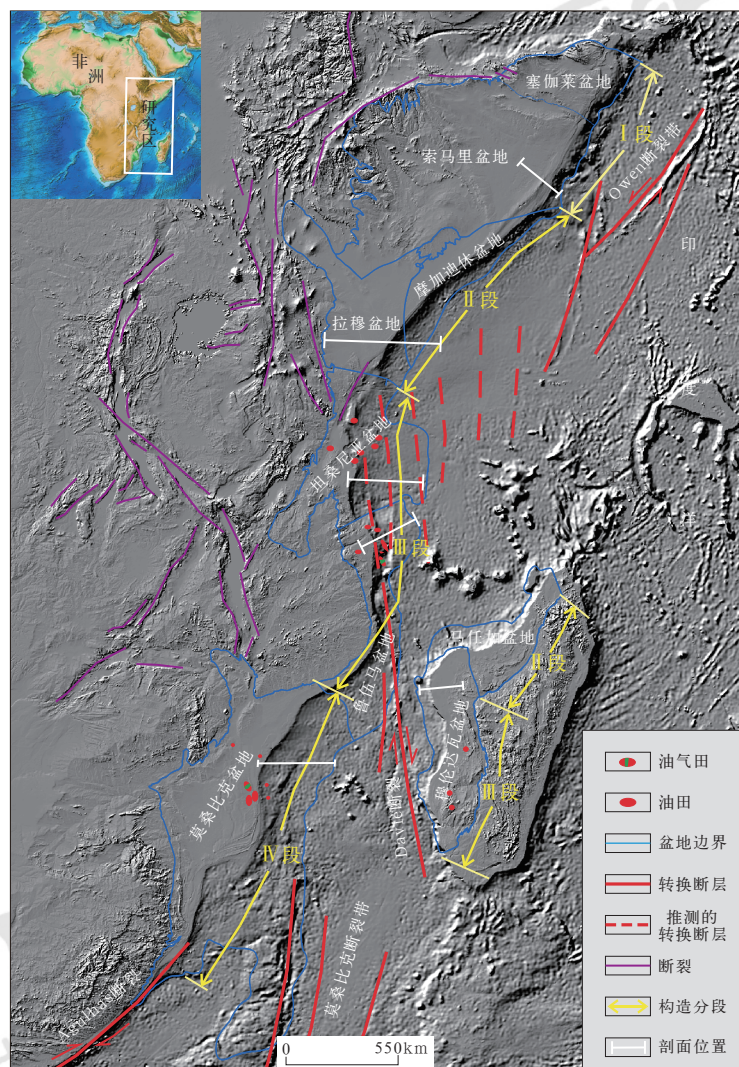


图1 东非海域盆地主要基底断裂与构造段分布图

Fig.1 Distribution of the main basement faults and tectonic segments of basins in East African sea area

Ⅲ段(坦桑尼亚盆地—鲁伍马盆地、穆伦达瓦盆地):该构造段南北两端分离时间约为中—晚侏罗世到早—中白垩世,是Davie断裂右行走滑的结果,与Ⅰ段区别主要是盆地与转换断层距离近,受其控制强烈,形成的转换脊之间直接接受陆源物质供给,形成剖面上坳陷型沉积。

Ⅳ段(莫桑比克盆地):该构造段形成于三叠纪—早侏罗世时期,先后受Agulhas断裂、莫桑比克断裂带和Davie断裂联合控制,盆地平面呈北东向菱形。盆地地质特征较Ⅱ段复杂,大陆边缘结构也呈现多样性,向海方向不同的转换脊之间形成多个凹陷区。

1.2 盆地剖面结构

东非海域盆地群剖面总体上显示为双层结构,即下部裂谷期断块与上部大陆边缘楔形沉积体垂向叠

置,不同构造段盆地剖面结构差异性明显(图2)。

Ⅰ段早白垩世以来地层发育很少,物源供给少,坳陷填平沉积特征明显,大陆边缘与盆地基底断裂发育少。Ⅱ段早白垩世以来发育的地层厚度达7km,巨厚地层在古地貌及先存构造的影响下发育向海倾及反向调节伸展断裂系统,靠陆边缘火山岩诱导部分裂谷期断裂直达海底表层。Ⅲ段坦桑尼亚盆地和鲁伍马盆地发育侏罗系盐岩,局限环境下盐岩发育形成了裂谷期与盐相关的构造,控制着局部地层充填样式。坦桑尼亚盆地早白垩世时地层沉积坡度大,快速充填后形成楔形体。鲁伍马盆地受渐新世鲁伍马三角洲体系持续供给,形成大陆边缘伸展至深海前缘挤压逆冲构造系统,地层充填厚度也较坦桑尼亚盆地大。穆伦达瓦盆地虽然剖面未过深海区,但是从共轭关系对比来看,与坦桑尼亚盆地非常相似,大陆边缘高角度裂谷

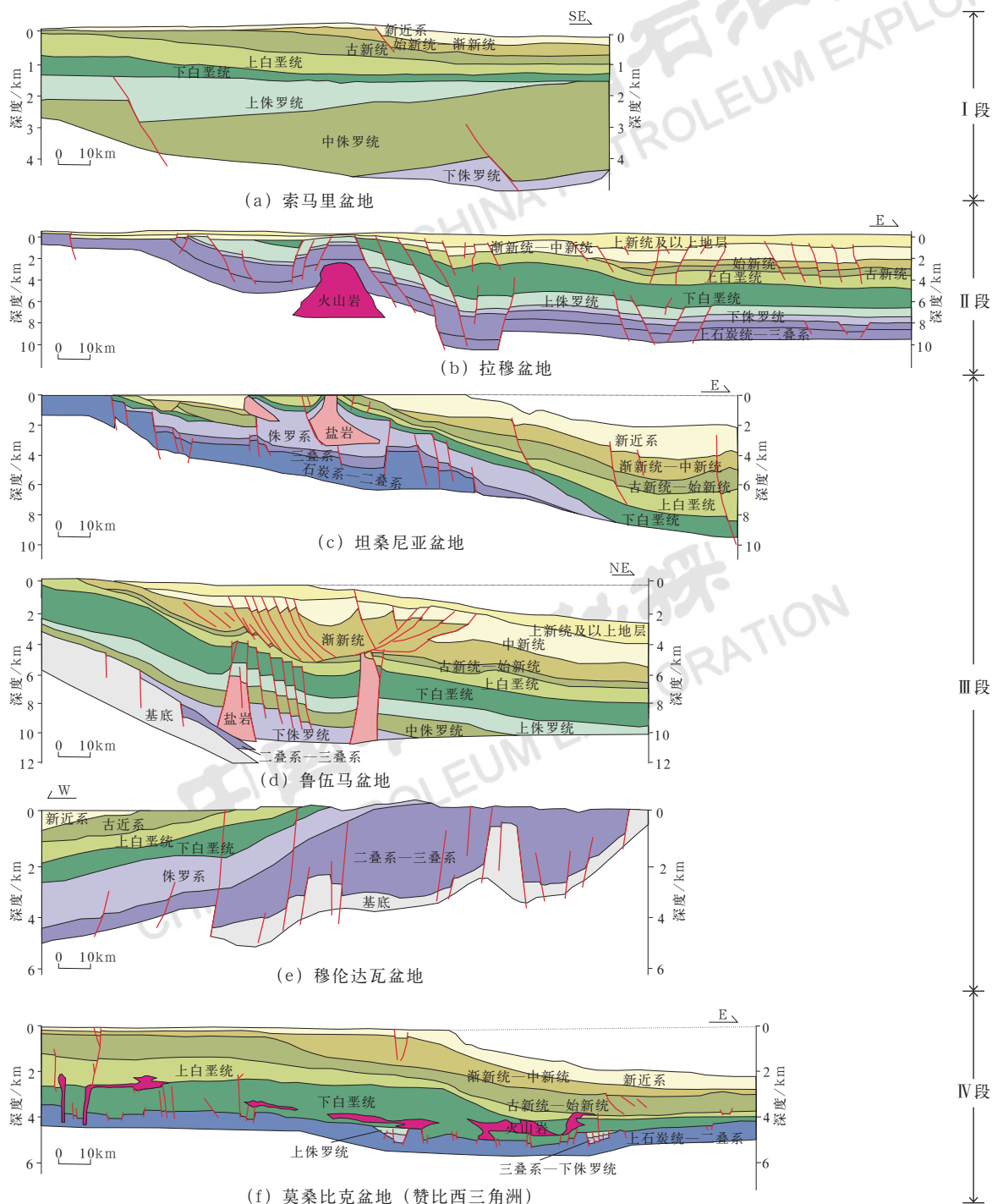


图2 东非海域盆地群不同构造段剖面结构图(剖面位置见图1, 据文献[3]修改)

Fig.2 Section structure of different tectonic segments of basins in East African sea area (location map is in Fig.1, modified after reference [3])

期断裂向海方向上覆地层快速进积, 靠陆边缘侏罗系及其下部地层翘倾程度大。IV段莫桑比克盆地北部是赞比西三角洲, 但三角洲总体沉积厚度较鲁伍马三角洲体系薄, 下部火山岩流动对上部局部地层产生影响, 三叠系—侏罗系发育较少, 地层充填以下白垩统及以上地层为主。莫桑比克盆地南部受莫桑比克断裂带及Agulhas断裂联合控制, 形成了转换脊和局部凹陷等

构造单元。

1.3 地层充填与沉积演化

东非海域盆地群总体上经历了早石炭世—三叠纪卡鲁裂谷、侏罗纪马达加斯加裂谷和白垩纪至今的被动大陆边缘3个演化阶段, 相应地形成了3套构造地层层序(图3)。

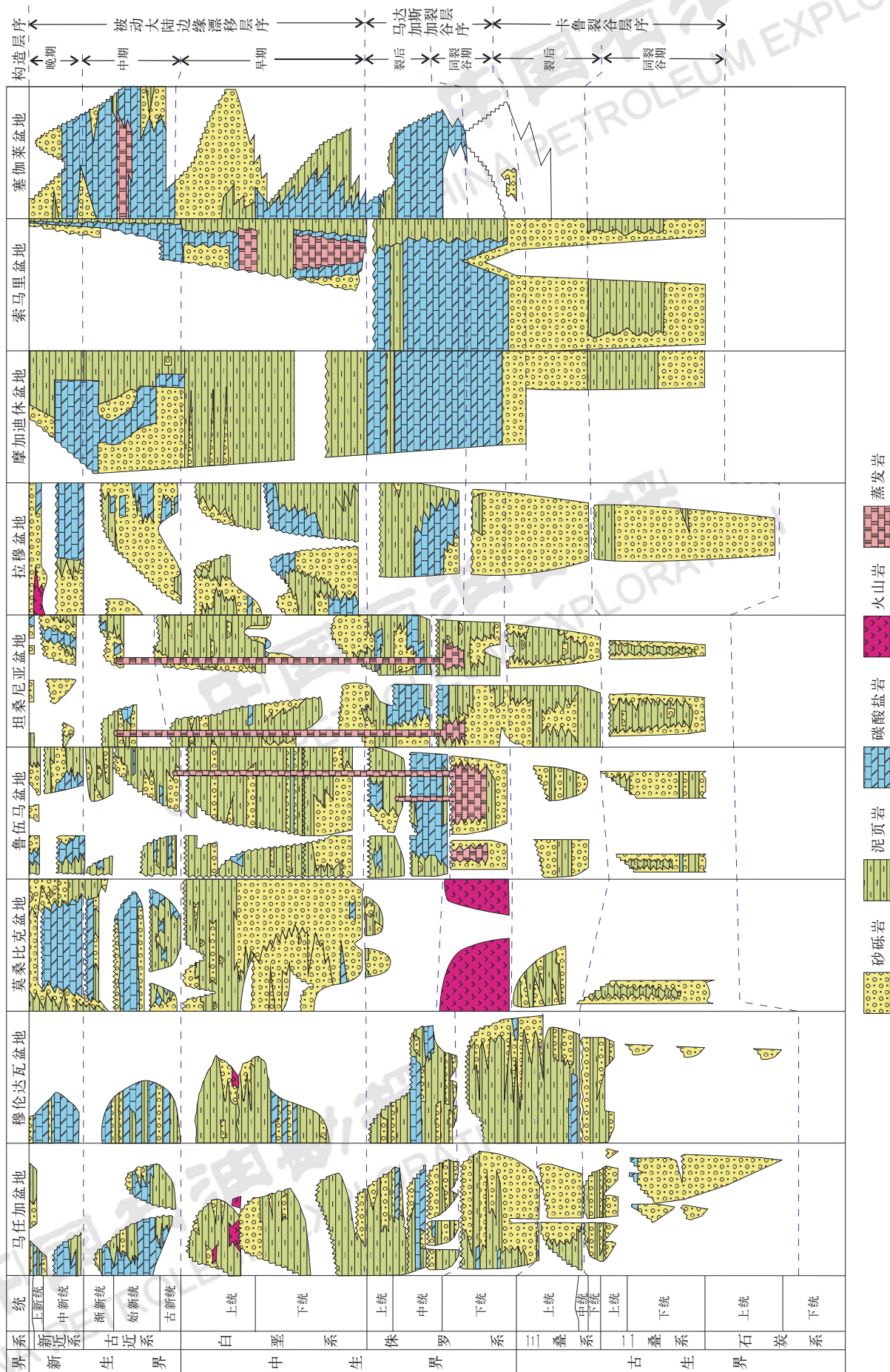


图3 东非海域盆地地层对比与构造层序划分图 (据文献 [3,5] 修改)

Fig.3 Stratigraphic correlation and tectonic sequence division of basins in East African sea area (modified after reference [3,5])

1.3.1 早石炭世—三叠纪卡鲁裂谷阶段

早石炭世—三叠纪,东非海域盆地群主要位于冈瓦纳大陆内部,受非洲南部 Karoo 热地幔柱影响,南部地区遭到广泛的裂谷作用,形成刚果克拉通南部、卡拉哈里克拉通北部和马达加斯加东北部的三叉裂谷系,该裂谷系在冈瓦纳大陆真正裂解前夭折,裂谷期地层形成非洲南部卡鲁阶地层序列,主要为一套河流/湖泊—三角洲等陆相沉积物,富含煤系及火山岩等。北部索马里地区受古特提斯洋海侵作用,以陆架区滨浅海相沉积为主^[3,5]。

1.3.2 侏罗纪马达加斯加裂谷阶段

侏罗纪裂谷作用包括南极洲与非洲大陆的裂谷,以及马达加斯加南部局限海盆的形成过程。莫桑比克南部受古南大西洋海侵作用,南极洲与非洲南部裂开,火山岩发育广泛。南极洲、印度大陆(含马达加斯加)、非洲开裂形成局限洋盆,从陆相向海相逐渐过渡发育。肯尼亚—索马里地区受新特提斯洋海侵影响发育浅海—深海相沉积。马达加斯加与非洲之间受 Davie 断裂走滑作用,形成陆内—陆间裂谷体系,充填陆相沉积物^[3,5]。

1.3.3 白垩纪至今的被动大陆边缘阶段

早白垩世,马达加斯加南部局限海盆形成,新特提斯洋继续向南海侵。至中白垩世时,印度大陆(含马达加斯加)、南极洲及非洲东部裂开,形成开阔海洋。晚白垩世时,古印度洋逐渐形成,马达加斯加与印度板块裂解。古新世时,随着全球海平面的下降,马达加斯加西部与东非大陆边缘形成浅海相沉积,红海—亚丁湾开始裂解,火山岩广泛发育,印度洋洋中脊三叉点形成,东非大陆边缘形成诸多小型三角洲和下水扇。之后,伴随着塞舌尔、马斯克林等陆块的漂移,东非海域一直处于印度洋扩张阶段,边缘持续接受被动大陆边缘沉积作用,其中渐新世—中新世期间东非区域翘倾,陆源物质供给充分,形成鲁伍马、赞比西等大型三角洲沉积^[3,5]。

2 油气成藏条件

根据东非海域已发现的 26 个深水油气田数据所揭示的深水油气地质条件信息^[3,5],结合盆地地质与地球物理资料,统计分析了该地区深水油气成藏特征。

2.1 烃源岩特征

东非海域相关盆地共发育下侏罗统、中上侏罗

统一白垩系和古近系 3 套深水油气烃源岩,目前已在坦桑尼亚盆地、鲁伍马盆地和拉穆盆地证实。

下侏罗统烃源岩为一套马达加斯加同裂谷期沉积产物,干酪根类型为 II—III 型,热演化程度高,总体已处于成熟—过成熟阶段,以生气为主,平面分布局限。坦桑尼亚盆地 Nondwa 组盐岩和 Mbua 组页岩烃源岩,沉积环境为局限海、河流/湖泊,其中 Nondwa 组盐岩 TOC 最高达 8.7%;Mbua 组页岩厚度局部超 1000m,净厚度约为 400m,TOC 为 0.3%~10%,氢指数为 40~526mg/g。鲁伍马盆地下侏罗统页岩为优质烃源岩,沉积于局限海环境,埋深大,局部超过 5000m,已越过生烃门限。

中上侏罗统一白垩系烃源岩是马达加斯加裂后和漂移早期浅水环境缓慢沉积的一套地层。潟湖或局限海环境形成缺氧条件导致该套烃源岩品质好、分布广泛。坦桑尼亚盆地中上侏罗统巴柔阶页岩烃源岩干酪根为 II/III 型,TOC 为 1%~6%;上白垩统坎潘阶海相黑色页岩 TOC 为 1.78%~12.2%, R_o 为 1.2%,干酪根类型为 II/III 型。鲁伍马盆地下白垩统为深色粉砂质页岩,TOC 局部达 12%,倾向于生油。索马里盆地、摩加迪休盆地下白垩统浅海相页岩和石灰岩为浅水区烃源岩,TOC 为 1%,倾向于生气。

古近系烃源岩虽然分布较广,但目前证实其主要位于拉穆盆地和索马里盆地等北部地区。拉穆盆地古近系烃源岩为河流三角洲—浅海环境页岩,位于低成熟阶段,TOC 为 0.11%~11.36%,干酪根为 II 型或 II/III 型。索马里盆地古新统烃源岩沉积于浅海环境,演化阶段跨度大,低成熟—过成熟,TOC 为 0.8%~1.4%,主要生气或轻质油等,目前处于生油窗。

2.2 储盖特征

东非海域已发现的深水油气储层类型主要为海相浊积砂岩和三角洲砂岩,浅水或陆上还可见生物礁或碎屑灰岩等碳酸盐岩储层^[3,5]。深水油气储层发育时代以白垩纪和古近纪为主,储层物性普遍良好(表 1)。

东非海域已证实的深水油气盖层包括晚侏罗世马达加斯加裂后湖相—浅海相页岩、白垩纪漂移早期浅海相页岩和古近纪漂移中期海相页岩 3 套。其中古近纪发育的层间页岩是已发现深水油气最主要的盖层,下侏罗统厚层盐岩可作为鲁伍马盆地和坦桑尼亚盆地深水油气潜在盖层。

表1 东非海域深水油气储层特征表(据文献[3,5]统计)

Table 1 Reservoir characteristics of deep-water oil and gas fields in East African sea area (summarized after reference [3,5])

盆地	层系	岩性	净厚度/m	孔隙度/%	渗透率/mD	样品点
拉穆	上白垩统	海相浊积砂岩	52	24	10~1000	Mbawa 气田
	中新统	海相浊积砂岩	37.5	22	850	Sunbird 油气田
坦桑尼亚	古新统	海相浊积砂岩	43	26	20~600	Pweza 气田
	古新统	海相浊积砂岩	31	25	200~800	Chewa 气田
	上白垩统	海相浊积砂岩	89	16	450	Papa 气田
	下白垩统	海相浊积砂岩	160	25	1000	Zafarani 气田
鲁伍马	渐新统	三角洲砂岩	147.5	20	2000	Prosperidade 气田
	中新统	海相浊积砂岩	11	12	180~1320	Chaza 气田
	古新统	海相浊积砂岩	31	20	20~4000	Agulha 气田
	上白垩统	海相浊积砂岩	38	23	600	Cachalote 气田
	下白垩统	海相浊积砂岩	140	25	1000	Coral 气田

2.3 成藏组合

统计已发现的深水油气田,东非海域深水油气成藏组合可分为3类,包括证实的新生界和白垩系深水成藏组合及推测的上二叠统一侏罗系深水成藏组合(图4)。其中,新生界深水成藏组合主要位于古新统一中新统,涵盖鲁伍马盆地碎屑岩气藏和其他盆地碳酸盐岩与碎屑岩混合气藏,油气发现可采储量占全区91.7%,是东非海域最为重要的深水油气成藏组合。白垩系深水成藏组合发现的油气可采储量占全区8.3%,在东非海域北部以油为主,南部则以气为主。上二叠统一侏罗系深水成藏组合在东非海域中部以碳酸盐岩生油气为主,南部和北部以碳酸盐岩和碎屑岩生气为主。

2.4 成藏模式

东非海域盆地大陆边缘是被转换断层、盐构造、泥构造和漂移期楔形断块等构造要素复杂化的被动大陆边缘。不同时期烃源岩生成的油气在不同类型的大陆边缘和不同的构造部位呈现不同的特征。已发现的深水油气成藏模式可以归纳为3种类型(图5):漂移早、中期供源,漂移期成藏(如拉穆盆地);裂谷期与漂移早期供源,裂谷期—漂移期成藏(如坦桑尼亚盆地);裂谷期供源,漂移期成藏(如鲁伍马盆地)。

拉穆盆地中新统浅海相碎屑灰岩和上白垩统海相砂岩内发现深水油气藏,在下白垩统和始新统见气显示,在上白垩统见油气显示。其深水油气的烃源岩主要是漂移早期白垩系和漂移中期始新统海相页岩,生成的油气在白垩系砂岩与古近系砂岩和碳酸盐岩内成藏。储层形成背景为陆架边缘扇复合体、陆架下坡的深海扇和浅水礁滩边缘相等。输导体系以裂谷期刺穿断裂为主,深水油气以短距离纵向运移为主。圈闭类型包括与断层相关的构造圈闭和砂岩透镜体地层圈闭等。另外,潜在的深水油气藏可能位于三叠系—侏罗系碎屑岩及侏罗系碳酸盐岩(图5a)。

坦桑尼亚盆地发现的深水气田多位于古隆起背斜核部,古隆起边缘和内部均被多条断层复杂化。其深水油气烃源岩包括侏罗系裂谷期页岩、白垩系海相页岩,生成的油气沿背斜附近的断裂向上运移或沿层间向同层内砂体运移,在白垩系和古近系砂岩内成藏。圈闭类型以与断裂或断块有关的构造圈闭为主。潜在的深水油气藏可能位于侏罗系裂谷期砂岩、古近系碳酸盐岩或混合岩性等(图5b、c)。

鲁伍马盆地已发现的深水油气藏主要位于三角洲逆冲带前缘的上部古近系内,局部位于中新统和白垩系,均为砂岩油气藏。深水油气烃源岩为侏罗系裂谷期页岩,潜在的白垩系和古新统海相页岩烃源岩目前没有被证实。深水油气输导体系包括三角洲形成的多种类型的断裂系统和裂谷期的断裂及盐构造边缘断裂

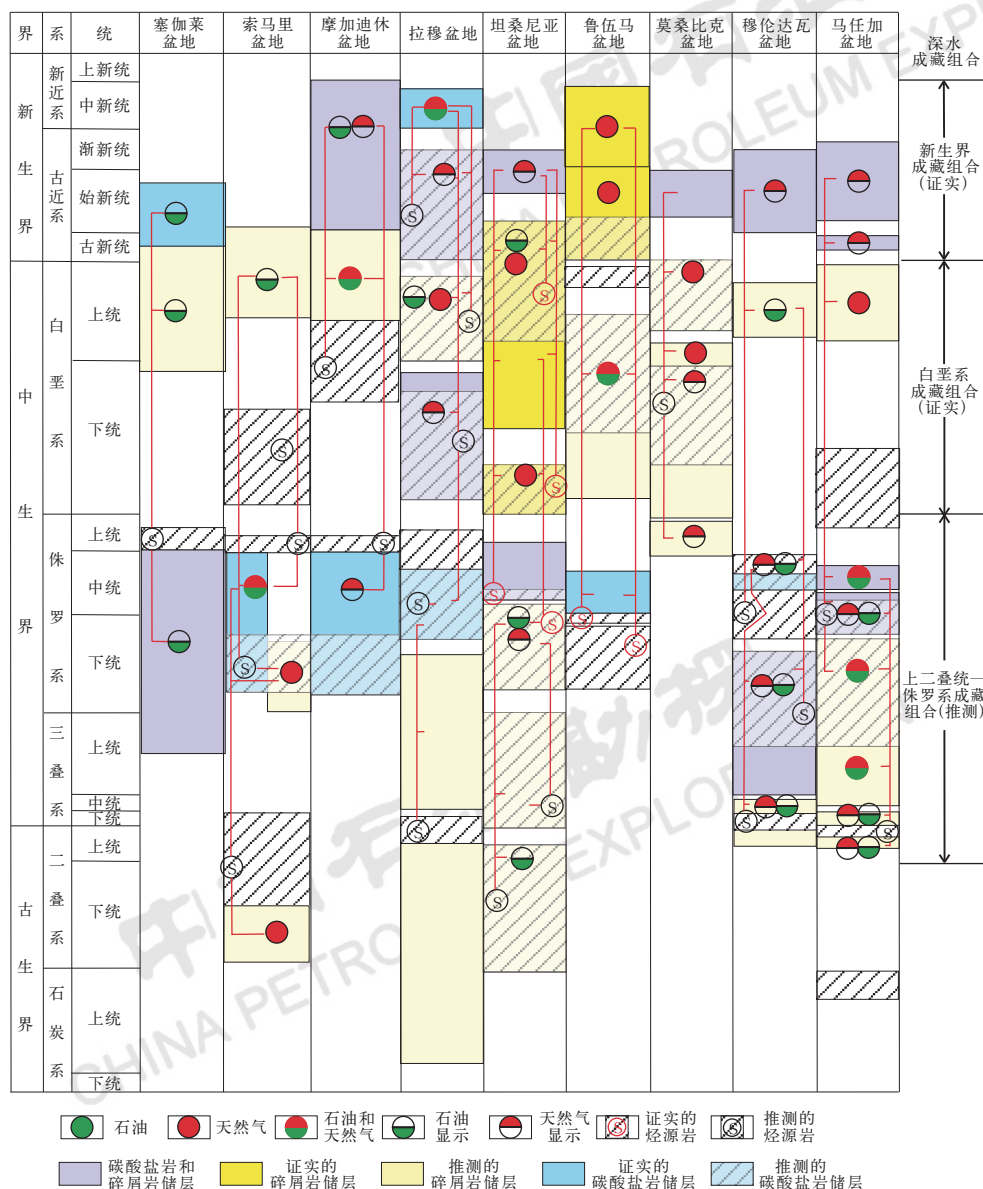


图4 东非海域深水油气成藏组合划分图 (据文献 [3,5] 编制)

Fig.4 Division of deep-water hydrocarbon assemblage in East African sea area (compiled after reference [3,5])

等, 油气运移以沿断层面垂向运移为主。圈闭类型包括与三角洲构造系统相关伸展断块或挤压断块构造圈闭, 以及逆冲带前缘深水重力流扇体形成的透镜状地层圈闭 (图 5d)。

3 油气勘探潜力

3.1 深水沉积特征与有利砂体

3.1.1 地貌要素

运用将今论古方法, 利用高精度数字地貌图, 测量和估算东非大陆边缘现今的陆架宽度和陆坡坡度, 从而推测东非被动大陆边缘阶段可能的深水沉积特征。研究结果显示, 东非地区陆架非常狭窄,

最宽处只有 110km 左右, 最窄处约几千米, 狭窄陆架占据主导地位, 仅在莫桑比克盆地北部和马达加斯加岛西部边缘较宽, 其他地区陆架宽度基本在 20km 以内。这种狭窄陆架特征是大洋转换断层与东非大陆边缘呈小角度斜交或近似平行状的持续剪切的结果。

东非大陆边缘陆坡总体陡峭。坦桑尼亚盆地中部、莫桑比克盆地边缘及穆伦达瓦盆地和马任加盆地中部地区相对较缓, 其他地区陆坡呈近直立状, 与赤道西非边缘转换型被动大陆边缘非常相似^[17-18]。这种陡峭大陆边缘对漂移期的深水沉积物堆积方式具有很强的控制作用, 形成的扇体多呈近岸叠覆状, 规模相对平缓大陆边缘明显要小。

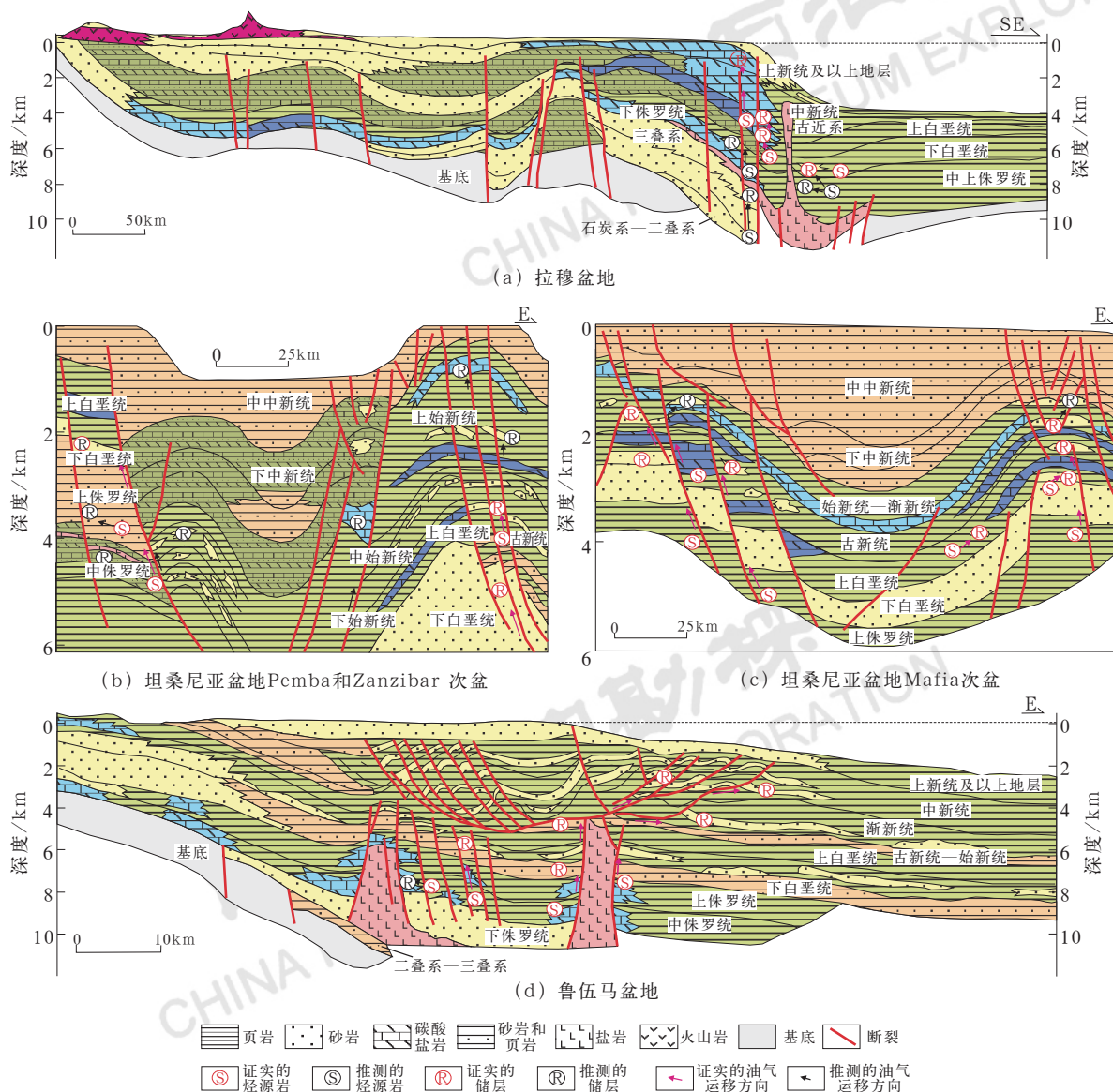


图5 东非海域已发现深水油气成藏模式图(据文献[3,5]修改)

Fig.5 Hydrocarbon accumulation pattern of deep-water discoveries in East African sea area (modified after reference [3,5])

3.1.2 物源体系

古物源体系研究表明^[19-21],东非大陆边缘早期无大型古河流发育,新生代发育的鲁伍马三角洲和赞比西三角洲主要是后期鲁伍马河和古赞比西河在低势大陆边缘入海环境下向海推进形成的三角洲沉积体,分布于现今的鲁伍马盆地北部和莫桑比克盆地北部地区。除此之外,东非大陆边缘其他地区未见大型古河流,这些地区多呈现陆架窄、陆坡陡等现象,物源入海以陆源碎屑直接入海为主,形成多点、多线物源特征,但总体上规模较小。

3.1.3 深水砂体类型

根据前述物源体系,结合地貌要素和地球物理资料,划分东非地区被动大陆边缘时期深水扇体为两种

类型:以鲁伍马盆地和莫桑比克盆地北部为代表的三角洲及深水重力流沉积物混合的扇复合体和无大型古河流供给背景下的沿小型大陆边缘下切谷或陆坡滑塌形成的近岸叠置的小型扇朵叶体(图6)。

三角洲及深水重力流沉积物混合的扇复合体主要发育在鲁伍马三角洲和赞比西三角洲地区。鲁伍马三角洲受Davie断裂控制较强,而赞比西三角洲受莫桑比克断裂带控制较小。三角洲在向海推进过程中,受大陆边缘伸展—中部过渡带和前缘逆冲带断裂系统控制,在前端转换断层带限制下局限发育,随着沉积物逐渐增多,转换断层带被侵蚀,形成下切水道,转换断层带前缘发育重力流沉积叠置的水道复合体和前端朵叶体。

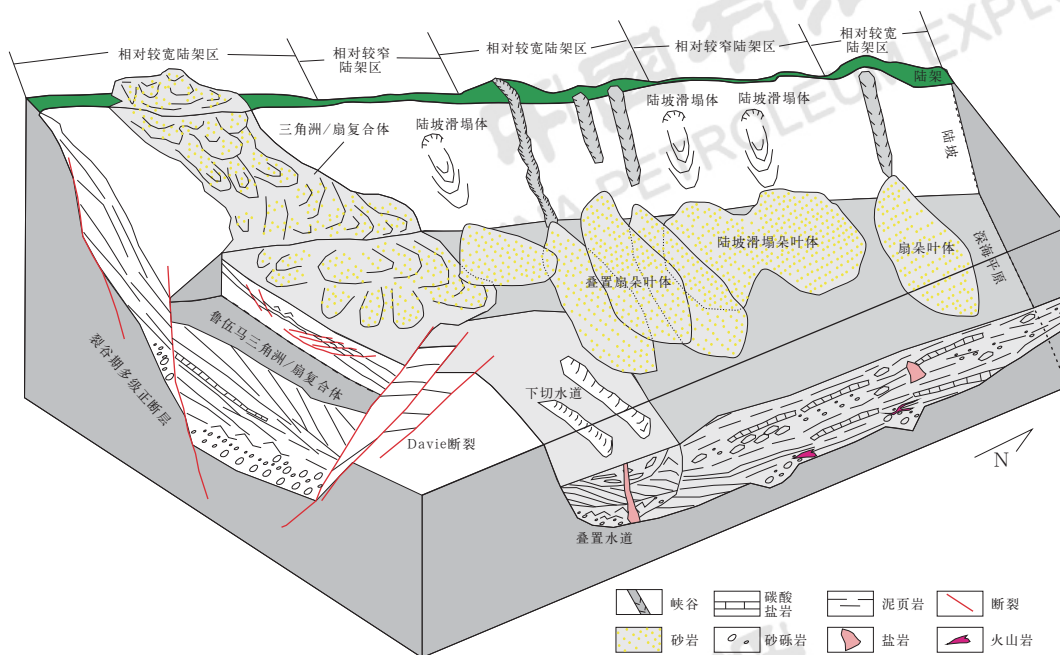


图6 东非海域被动大陆边缘时期深水沉积模式

Fig.6 Depositional pattern during the passive continental margin period in East African deep-water area

近岸叠置的小型扇朵叶体通常规模小,但纵向叠置性强,大陆边缘一次物源下切供给形成一期朵叶体。另外,陡陆坡区受不同的深水触发机制作用,沉积物失稳形成陆坡滑塌朵叶体,不同类型朵叶体在平面上往往呈裙边状,剖面上可呈上凹状、透镜状或叠覆状等^[10,18]。

3.2 深水油气有利区带

东非海域深水油气主要聚集在白垩系和古近系,上二叠统一侏罗系也具有很大的深水勘探潜力。根据已有油气发现、钻井油气显示情况、烃源岩分布范围及砂体类型和储盖发育特征,结合现实的勘探水深范围,分别划分了东非海域白垩系和古近系深水油气有利区带分布范围。

3.2.1 白垩系深水油气有利区带分布

东非海域盆地群白垩系深水油气有利区带包括(图7):摩加迪休盆地中部、拉穆盆地气源岩分布区、坦桑尼亚盆地北部和南部地区、鲁伍马盆地北部、莫桑比克盆地北部及南部油源岩发育区、穆伦达瓦盆地北部气源岩发育区和马任加盆地中部地区。

从成藏组合岩性特征来看,拉穆盆地以碳酸盐岩和碎屑岩混合岩性组合为主要勘探目标,其他盆地均以碎屑岩为主要勘探目标。从烃源岩分布特征来看,摩加迪休盆地、坦桑尼亚盆地北部、莫桑比

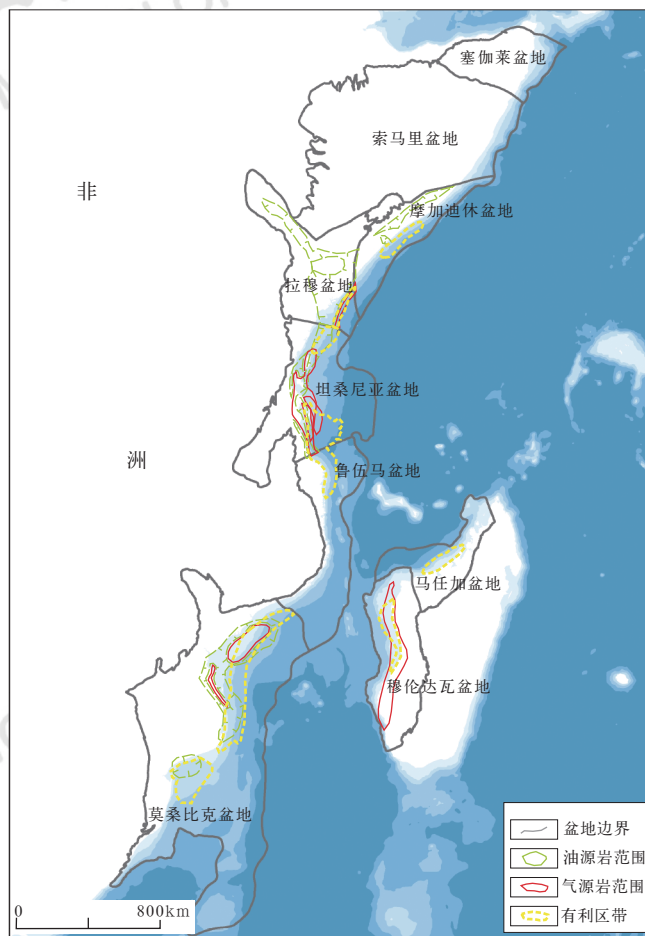


图7 东非大陆边缘白垩系深水油气有利区带分布图

Fig.7 Distribution of favorable plays of the Cretaceous at the continental margin of East African deep-water area

克盆地南部及马任加盆地均以石油勘探为主,其他盆地以天然气勘探为主要目标。在鲁伍马盆地、坦桑尼亚盆地南部和摩加迪休盆地有利区距离大陆边缘较远,局部可达 3000m 水深,其他盆地以 2000m 水深为限。

3.2.2 古近系深水油气有利区带分布

古近系深水油气有利区带与白垩系有利区带分布具有一定的继承性(图8)。其中,坦桑尼亚盆地和莫桑比克盆地有利区带范围有所增大,穆伦达瓦盆地和马任加盆地有利区带范围稍微减小。鲁伍马盆地和莫桑比克盆地三角洲地区有利区范围向海域有所扩展。

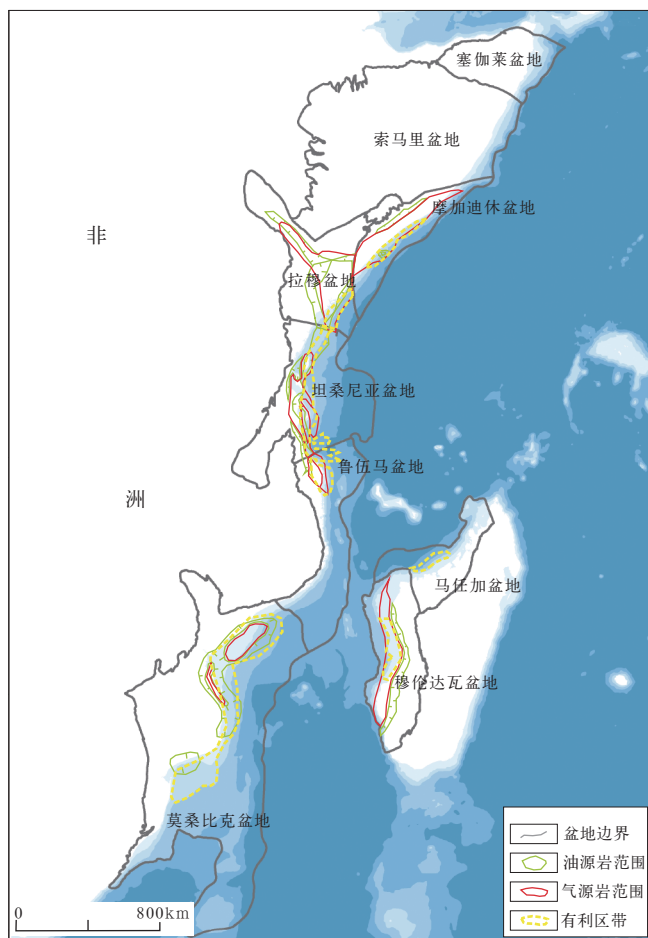


图8 东非大陆边缘古近系深水油气有利区带分布图

Fig.8 Distribution of favorable plays of the Paleogene at the continental margin of East African deep-water area

古近系深水油气勘探应以碳酸盐岩和碎屑岩混合岩性组合为主要目标,除鲁伍马盆地外,浅层碳酸盐岩在该地区其他盆地均有不同程度的发育。其中,拉穆盆地和摩加迪休盆地可勘探石油和天然气,其他盆地以天然气勘探为主。

4 结论

将相似大地构造背景下形成的盆地群进行地质特征的横向、纵向对比,是快速获取低勘探程度盆地油气成藏特征认识的快速手段,随着我国全球化油气勘探进程的不断推进,运用这一方法对国外含油气盆地进行初步筛选和总体认识具有很强的必要性。

东非海域虽然近年来取得了相对丰硕的勘探成果,但较西非海域、南美东部海域等其他被动大陆边缘仍然属于油气的低勘探程度区。文章从东非海域盆地走向分段、纵向分层及沉积充填演化入手,统计分析了深水油气烃源岩、储盖组合和油气成藏等特征。基于现今地貌测量、古物源体系分析,预测了东非海域深水砂体类型,指出了白垩系和古近系深水有利区带分布,为下一步东非海域区带优选和新项目评价具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 中国石油勘探开发研究院(RIPED). 全球油气勘探开发形势及油公司动态(2021年)[M]. 北京:石油工业出版社,2021.
Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPED). Global petroleum E & D trends and company dynamics (2021)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [2] 秦雁群,张光亚,计智峰,等. 印度东部盆地群地质特征、油气成藏与深水勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2017,44(5):691-703.
Qin Yanqun, Zhang Guangya, Ji Zhifeng, et al. Geological features, hydrocarbon accumulation and deep water potential of east Indian basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(5):691-703.
- [3] IHS. IHS energy data[EB/OL]. (2020-12-25) [2021-06-10]. <http://www.ihsenergy.com>.
- [4] 张光亚,刘小兵,赵健,等. 东非被动大陆边缘盆地演化及大气田形成主控因素:以鲁伍马盆地为例[J]. 地学前缘,2018,25(2):24-32.
Zhang Guangya, Liu Xiaobing, Zhao Jian, et al. Passive continental margin basin evolution of east Africa and the main controlling factors of giant gas fields: an example from the Rovuma Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2018,25(2):24-32.
- [5] Tellus. Tellus data[EB/OL]. (2020-12-30)[2021-03-05]. <http://www.fugro-robertson.com/products/tellusFRL>.
- [6] 张光亚,刘小兵,温志新,等. 东非被动大陆边缘构造—沉积特征及其对大气田富集的控制作用[J]. 中国石油勘探,2015,20(4):71-80.
Zhang Guangya, Liu Xiaobing, Wen Zhixin, et al. Structural and sedimentary characteristics of passive continental margin basins in east Africa and their effect on the formation of giant gas fields[J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(4):71-80.
- [7] 孔祥宇. 东非鲁伍马盆地油气地质特征与勘探前景[J]. 岩性油气藏,2013,25(3):21-27.

- Kong Xiangyu. Petroleum geologic characteristics and exploration prospect in Rovuma Basin, east Africa[J]. Lithologic Reservoirs, 2013,25(3):21-27.
- [8] Mahanjane E, Franke D, Lutz R, *et al.* Maturity and petroleum systems modelling in the offshore Zambezi delta depression and angoche basin, northern Mozambique[J]. Journal of Petroleum Geology, 2014,37(4):329-348.
- [9] Mahanjane E. A geotectonic history of the northern Mozambique basin including the Beira high—a contribution for the understanding of its development[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012,36(1):1-12.
- [10] 赵健, 张光亚, 李志, 等. 东非鲁武马盆地始新统超深水重力流砂岩储层特征及成因[J]. 地学前缘, 2018,25(2):83-91.
Zhao Jian, Zhang Guangya, Li Zhi, *et al.* Characteristics and the forming process of the Eocene ultra-deep-water gravity flow sandstone reservoir in the Rovuma Basin, east Africa[J]. Earth Science Frontiers, 2018,25(2):83-91.
- [11] Nyagah K. Stratigraphy, depositional history and environments of deposition of cretaceous through tertiary strata in the Lamu Basin, southeast Kenya and implications for reservoirs for hydrocarbon exploration[J]. Sedimentary Geology, 1995, 96(1/2):43-71.
- [12] 张可宝, 史卜庆, 徐志强, 等. 东非地区沉积盆地油气潜力浅析[J]. 天然气地球科学, 2007,18(6):869-874.
Zhang Kebao, Shi Buqing, Xu Zhiqiang, *et al.* A study on petroleum geology and hydrocarbon potential in eastern Africa[J]. Natural Gas Geoscience, 2007,18(6):869-874.
- [13] 马君, 刘剑平, 潘校华, 等. 东非大陆边缘地质特征及油气勘探前景[J]. 世界地质, 2008,27(4):400-405.
Ma Jun, Liu Jianping, Pan Xiaohua, *et al.* Geological characteristics and prospect on hydrocarbon exploration in east Africa continental margin[J]. Global Geology, 2008,27(4): 400-405.
- [14] 张光亚, 余朝华, 黄彤飞, 等. 非洲地区裂谷盆地类型及油气成藏特征[J]. 中国石油勘探, 2020,25(4):43-51.
Zhang Guangya, Yu Zhaohua, Huang Tongfei, *et al.* Types of rift basins in Africa and their hydrocarbon accumulation characteristics[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(4): 43-51.
- [15] 温志新, 王兆明, 宋成鹏, 等. 东非被动大陆边缘盆地结构构造差异与油气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2015,42(5):671-680.
Wen Zhixin, Wang Zhaoming, Song Chengpeng, *et al.* Structural architecture difference and petroleum exploration of passive continental margin basins in east Africa[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(5):671-680.
- [16] Hiller K, Shoko U. Hydrocarbon source rock potential of the Karoo in Zimbabwe[J]. Journal of African Earth Sciences, 1996,23(1):31-43.
- [17] 周总瑛, 陶治, 李淑筠, 等. 非洲东海岸重点盆地油气资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2013,40(5):543-551.
Zhou Zongying, Tao Ye, Li Shujun, *et al.* Hydrocarbon potential in the key basins in the east coast of Africa[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(5):543-551.
- [18] 秦雁群, 张光亚, 巴丹, 等. 转换型被动陆缘盆地地质特征与深水油气聚集规律: 以赤道大西洋西非边缘盆地群为例[J]. 地学前缘, 2016,23(1):229-239.
Qin Yanqun, Zhang Guangya, Ba Dan, *et al.* Geological characteristics and deep water hydrocarbon accumulation patterns of transformed passive continental marginal basins: a case history from basins of west Africa margin in Equatorial Atlantic[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(1):229-239.
- [19] 孙海涛, 钟大康, 张思梦. 非洲东西部被动大陆边缘盆地油气分布差异[J]. 石油勘探与开发, 2010,37(5):561-567.
Sun Haitao, Zhong Dakang, Zhang Simeng. Difference in hydrocarbon distribution in passive margin basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(5):561-567.
- [20] Harris P, Whiteway T. Global distribution of large submarine canyons: geomorphic differences between active and passive continental margins[J]. Marine Geology, 2011,285(1-4):69-86.
- [21] Salmanac G, Abdula I. Development of the Mozambique and Ruvuma sedimentary basins, offshore Mozambique[J]. Sedimentary Geology, 1995,96(1):7-41.