

海上丝绸之路沿线深水油气资源勘探方向

王建强^{1,2}, 赵青芳^{1,2}, 梁杰^{1,2}, 陈建文^{1,2}, 董贺平^{1,2}, 李双林^{1,2}, 孙晶^{1,2}

WANG Jianqiang^{1,2}, ZHAO Qingfang^{1,2}, LIANG Jie^{1,2}, CHEN Jianwen^{1,2}, DONG Heping^{1,2},
LI Shuanglin^{1,2}, SUN Jing^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家试点实验室海洋矿产资源评价与探测功能实验室, 山东 青岛 266071

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, Shandong, China;

2. Pilot Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China

摘要:深水油气成为全球常规油气最重要的接替领域。海上丝绸之路(简称海丝路)沿线油气资源丰富,是全球油气勘探开发最活跃的地区,深水油气已取得了重大突破,但是部分地区勘探程度较低,发现的油气田较少,勘探潜力巨大。海丝路沿线深水盆地主要呈“一横一纵”的分布格局,“一横”主要指近东西向的新特提斯构造域深水盆地群,“一纵”主要指近南北向的东非陆缘深水盆地群。最新深水油气发现证实,海丝路沿线盆地具备形成大油气田的物质基础,存在高效的油气运移通道。海丝路沿线深水油气整体勘探程度较低,未来深水油气以寻找构造和岩性两大类圈闭为主。孟加拉湾深水盆地以新生代浊积砂体形成的岩性圈闭为目标。巴基斯坦深水盆地以新生代生物礁和河道砂体形成的岩性圈闭为目标。东非海岸深水盆地以近岸的中—新生代发育的生物礁、海底浊积砂体形成的岩性地层圈闭为目标。东南亚深水盆地以寻找大型构造型油气田为目标。

关键词:海上丝绸之路;深水油气;一横一纵;盆地群;物质基础;运移通道

中图分类号:P618.130.2⁺7;P5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)02/03-0219-14

Wang J Q, Zhao Q F, Liang J, Chen J W, Dong H P, Li S L, Sun J. Exploration guide of deepwater oil and gas resources along the Maritime Silk Road. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 219-232

Abstract: Deepwater oil and gas has become the most important worldwide replacement resources for conventional oil and gas. The Maritime Silk Road is rich in oil and gas resources, and is the most active area for oil and gas exploration and development in the world. Significant breakthroughs have been made in deepwater oil and gas, but some areas are less explored and have less discovered oil and gas fields, so these areas exhibit great potential for exploration. The deepwater basins along the Maritime Silk Road mainly present “one horizontal and longitudinal” distribution pattern. The “one horizontal” mainly refers to the deepwater basin groups in the near east-west direction within the Neotethys tectonic domain and the “one longitudinal” mainly refers to the deepwater basin groups in the near north-south direction in the continental margin of East Africa. The latest deepwater oil and gas discoveries have confirmed that the basins along the Silk Road have the material basis for the formation of large oil and gas fields, and there exist efficient oil and gas migration channels. The overall exploration degree of deepwater oil and gas along the Maritime Silk Road is relatively low. The future oil and gas exploration in deep water area will focus on searching for two kinds of traps, including structure and lithology. As for exploration of oil

收稿日期:2020-04-29; **修订日期:**2020-12-03

资助项目:中国地质调查局项目《东海南部闽江-基隆凹陷中生界油气资源调查》(编号:DD20190211)、《崂山隆起构造沉积条件地质调查》(编号:DD20190818)、《深海调查——印度洋》(编号:DD20191032)、国家自然科学基金项目《南黄海崂山隆起中南部海底渗漏烃类源区示踪与运移路径重建》(批准号:41776075)和山东省基金项目《南黄海盆地崂山隆起海底烃类渗漏成因及其三维模型构建》(编号:ZR2019BD067)

作者简介:王建强(1985-),男,博士,高级工程师,从事石油地质和海域油气战略研究。E-mail: wangjianqiang163@163.com

通信作者:董贺平(1973-),男,博士,教授级高级工程师,从事海域油气战略研究。E-mail: dheping@mail.cgs.gov.cn

and gas in deepwater area, the Bay of Bengal is targeted at lithologic traps formed by Cenozoic turbidite sand bodies, while Pakistan aims at lithologic traps formed by Cenozoic reefs and river sand bodies. East Africa coast is aimed at lithologic and stratigraphic traps formed by offshore reefs and seabed turbidite sand bodies developed in Mesozoic and Cenozoic, while Southeast Asia aims to search for large structure-controlled oil and gas fields.

Key words: Maritime Silk Road; deepwater oil and gas; one horizontal and one vertical; basin group; material basis; transport channel

目前,全球油气资源勘探和开发呈现储量、产量持续上升的态势,全球油气勘探日趋复杂,勘探重点领域向“深海、深层和非常规”不断转变^[1-2]。深水油气勘探始于 20 世纪 70 年代末期,迄今全球深水区处于勘探早期阶段,钻探程度低,发现巨型、大型油气区的潜力大。随着海上地球物理勘探技术和深海钻探技术的进步,全球海域油气勘探已从中浅水走向深水、超深水,发现的深水油气越来越多,全球超过一半的重大油气发现位于深水区,未来 40% 的油气储量可能在海洋深水区被发现。油气勘探实践表明,全球海域待发现油气资源量超过 1200×10^8 t 油当量,其中大部分分布在深水区域^[3]。深水油气资源丰富,深水油气勘探已成为全球油气勘探开发主热点,是未来油气勘探的重要领域之一^[4-5]。从当前已探明情况看,蕴藏大量油气资源的深水盆地主要分布在东非海域、南海、澳大利亚西北陆架、墨西哥湾、巴西南部陆缘、西非陆缘及挪威中部陆架,主要位于被动(离散)大陆边缘,总体呈“三纵两横”的分布格局^[6-7]。

全球深水油气资源禀赋好、开发成本逐年降低,深水油气储量、产量不断提高,已成为支撑世界石油公司未来发展的新领域。近 5 年来,全球油气发现近 76% 的储量来自海域,其中 48% 来自深水—超深水。海上丝绸之路沿线(以下简称海丝路沿线)分布众多的深水盆地,是目前全球油气勘探热点区,也是中国开展境外海域油气勘探开发合作的重要对象,加强与相关国家的能源资源合作,是保障国家能源安全和建设“21 世纪海上丝绸之路”非常重要的内容。据 IHS 和 Tellus 油气田数据库,海丝路沿线已发现 54 个深水油气田。海丝路沿线深水盆地主要分布在新特提斯盆地带和东非陆缘海域,具有数量多、类型多、构造—沉积期次多等特点,油气成藏条件优越,油气资源潜力巨大。目前已发现证实的油气田以气为主,储层以深水浊积砂岩和三角洲—滨海相砂岩为主。本文通过收集整理海丝路沿线不同区域的烃源岩、储层、盖层等石油地质

条件数据,阐释了海丝路沿线深水盆地群分布格局与油气特征,探讨了深水盆地大油气田形成的控制因素,提出未来深水油气的勘探方向,为推进海上丝绸之路油气合作勘探提供思路。

1 区域地质背景

海丝路沿线主要涉及印度洋沿岸和东南亚地区,构造复杂、盆地类型多样。海丝路沿线盆地现今构造格局为侏罗纪以来冈瓦纳大陆裂解,欧亚板块、印澳板块及太平洋板块碰撞的结果,经历了复杂的裂解和分离事件,并伴随溢流玄武岩喷发及碰撞事件^[8],呈现错综复杂的构造格局,记录了泛大陆解体、海底扩张、碰撞造山等构造事件,形成了离散型、汇聚型、转换型等板块边界,是全球构造最活跃的地区之一。这一地区主体构造主要为不同时期地块裂解、碰撞、拼合而成^[9],在地块拼合过程中,经历复杂的构造和沉积演化过程,在结晶基底之上形成不同时期的沉积地层,发育不同类型的古生代—新生代沉积盆地(图 1),中—新生代是海丝路沿线含油气盆地的主要成盆期。

海丝路沿线周缘被动大陆边缘盆地主要分布在非洲东海岸、印度东西两岸等。弧后盆地主要分布在苏门答腊—爪哇岛俯冲带的东北侧,是印澳板块向欧亚板块俯冲的产物。弧前盆地主要分布在苏门答腊岛西南侧。

2 海丝路沿线深水盆地地质特征

海丝路沿线深水盆地群主要呈“一横一纵”分布(图 2)。“一横”主要指近东西向的新特提斯构造域深水盆地带,主体处于被动大陆边缘。早期处于被动大陆边缘伸展作用下,后期受碰撞造山作用影响处于挤压背景,主要包括南中国海(南海)北部陆缘深水盆地、南海南部的曾母盆地及文莱—沙巴盆地、缅甸湾深水盆地、孟加拉湾深水盆地、阿拉伯湾深水盆地等。“一纵”主要指近南北向的东非陆缘深水盆地群,为典型的被动大陆边缘盆地,处于

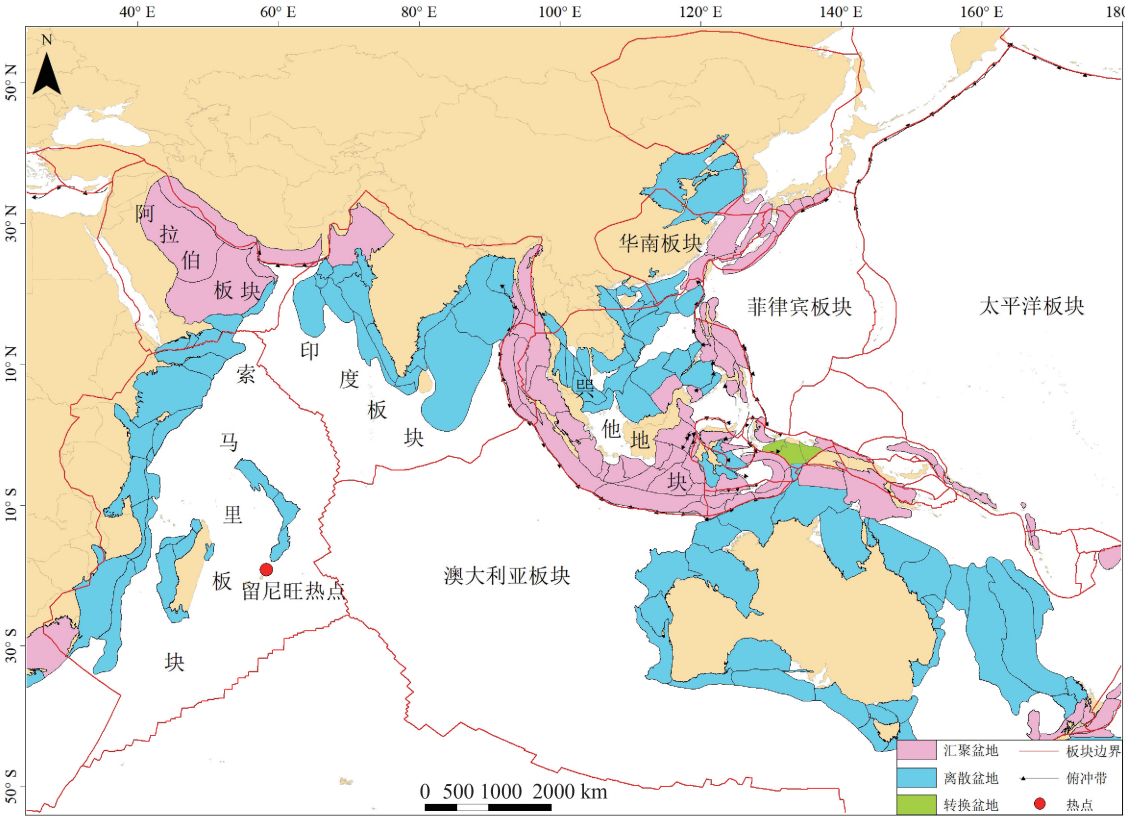


图 1 海上丝绸之路沿线及其周缘大陆构造略图(据参考文献[9]修改)

Fig. 1 Simplified tectonic map of continents along the Maritime Silk Road and its periphery

伸展背景,主要包括索马里盆地、鲁伍马盆地、坦桑尼亚盆地、莫桑比克盆地。

2.1 新特提斯域深水盆地群地质特征

特提斯构造域指早古生代—晚白垩世分开劳亚大陆和冈瓦纳大陆之间的东西向海沟,三叠纪—古近纪表现为新特提斯洋^[10-12]。新特提斯构造域深水盆地群的形成与特提斯洋的形成、演化、造山和消亡过程密切相关。新特提斯洋是在晚二叠世东冈瓦纳大陆裂解开始形成的,发育在基梅里大陆(群)和东冈瓦纳大陆之间的中生代洋盆^[13-14],该时期在特提斯洋两侧发育陆内裂陷型沉积。至侏罗纪,新特提斯洋强烈扩张,发育克拉通内坳陷或被动陆缘沉积。于白垩纪开始向欧亚板块俯冲,北侧在晚白垩世转为活动陆缘。至始新世或中新世,阿拉伯板块、印澳板块及欧亚板块碰撞,导致新特提斯洋逐渐关闭,该时期由于印度板块与欧亚板块高速碰撞,造成巽他地块、印支地块向东南挤出,形成了新生代具有走滑性质的弧前盆地或弧后裂陷

盆地。

东南亚地区自古新世以来主要经历了裂陷期、热沉降期及反转期 3 期构造演化阶段^[15]。古新世—早渐新世整体处于裂谷发育期,以河流、湖相碎屑岩沉积为主。直至晚渐新世,进入热沉降期,发生大范围海侵,沉积环境由陆相变为海相,沉积了广泛的浅海相泥岩和碳酸盐岩。到晚中新世,新生洋壳向陆地俯冲,造成了区域的挤压或走滑,同时伴随多次的海退和海进,发育大规模的三角洲—海底扇沉积。

2.2 东非陆缘深水盆地群地质特征

东非被动大陆边缘盆地群历经东冈瓦纳大陆裂解、印度洋扩张等多期作用的影响,产生的系列盆地,其主要经历了裂谷、漂移和被动大陆边缘 3 期构造演化阶段,形成“下断上拗”的双层结构^[16-17](图 3)。于晚石炭世开始进入裂谷初期,冈瓦纳大陆东部卡鲁地幔柱开始活动,地壳上升、断裂和火山活动强烈,形成一系列地堑式裂谷^[18],充填了一

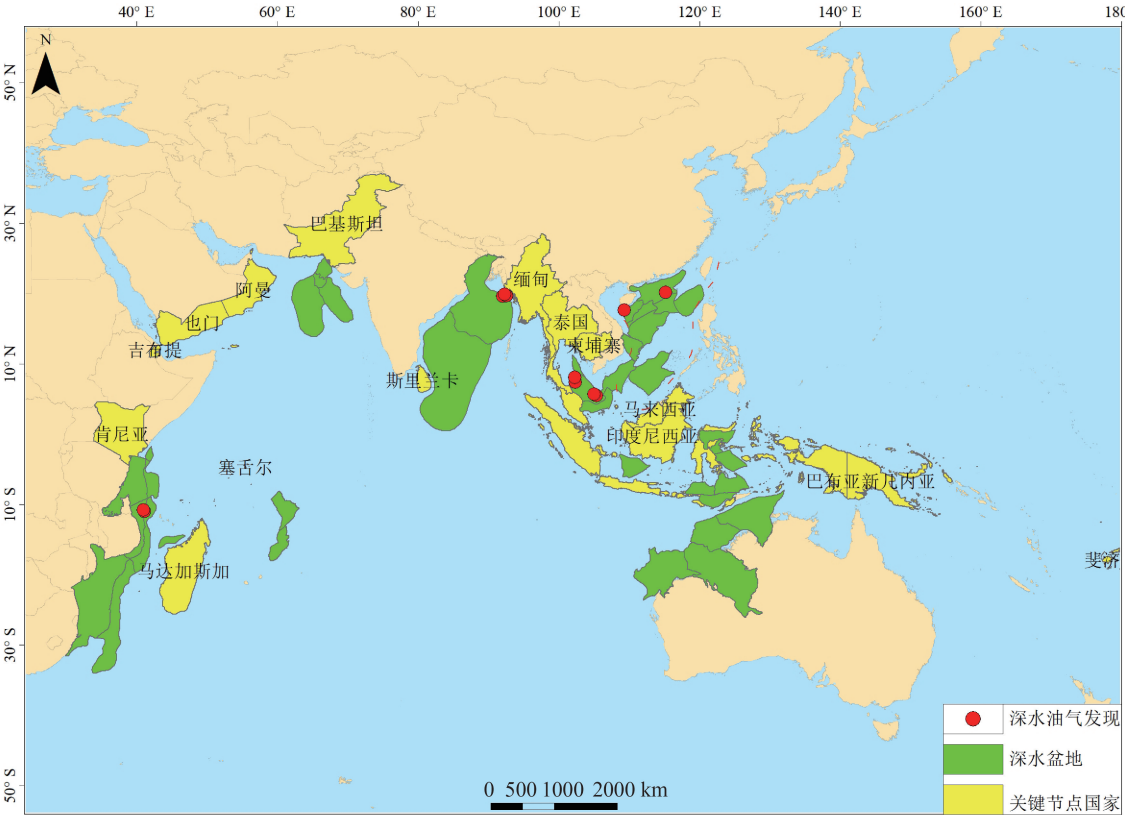


图 2 海上丝绸之路沿线深水盆地分布

Fig. 2 Distribution of deepwater basins along the Maritime Silk Road

套以陆相河流、湖泊及煤系沉积为主的地层。中侏罗世冈瓦纳大陆由西北向东南开始发生裂解,在现今的索马里、坦桑尼亚、马达加斯加等地区裂陷作用强烈,发生大范围海侵,形成一套陆棚碳酸盐岩台地建造^[19],沉积环境由河流、湖泊相向海相过渡。南部的莫桑比克盆地位于卡鲁盆地周缘,火山作用强烈,发育大量的火山岩沉积^[20]。晚侏罗世—早白垩世漂移期间,东冈瓦纳大陆整体向南漂移,海底持续扩张,随着南北印度洋的贯通,海平面持续上升,处于广泛海相沉积环境,并超覆于下伏裂谷沉积地层之上^[21]。于晚白垩世进入被动大陆边缘阶段,受火山作用的影响,粗碎屑的物源供给充足。于古新世和始新世,东非大陆边缘进入台地稳定期,在浅水陆架区广泛发育碳酸盐岩沉积。自进入渐新世—中新世以来,全球海平面下降,非洲克拉通抬升。伴随海平面升降,海上盆地广泛发育滨海泻湖相、潮间带、潮上带、浅海陆棚相、浅海陆架碳酸盐岩台地、近海浊流沉积和深海相沉积。

3 海丝路沿线油气资源分布与深水油气大发现

3.1 海丝路沿线油气资源分布特征

海丝路沿线国家或地区幅员辽阔,海洋矿产资源丰富,尤其是油气资源,既是世界上油气资源最丰富的地区,也是全球油气勘探开发最活跃的地区。海丝路沿线海域重点含油气盆地油气勘探程度表明,新特提斯深水盆地群中的孟加拉湾与阿拉伯海深水盆地、东非陆缘深水盆地群、西太平洋部分深水盆地部分地区勘探程度较低,发现的油气田较少(图 4)。

海丝路沿线国家海域及海陆一体分布约 181 个含油气盆地,主要分布在新特提斯域含油气带和印度洋域含油气带。根据 USGS(美国地质调查局)和 BP(英国石油公司)油气储量统计,海丝路沿线探明资源量 2973×10^8 t 油当量,其中石油 1722×10^8 t 油当量,天然气 1251×10^8 t 油当量(图 5)。待探明资

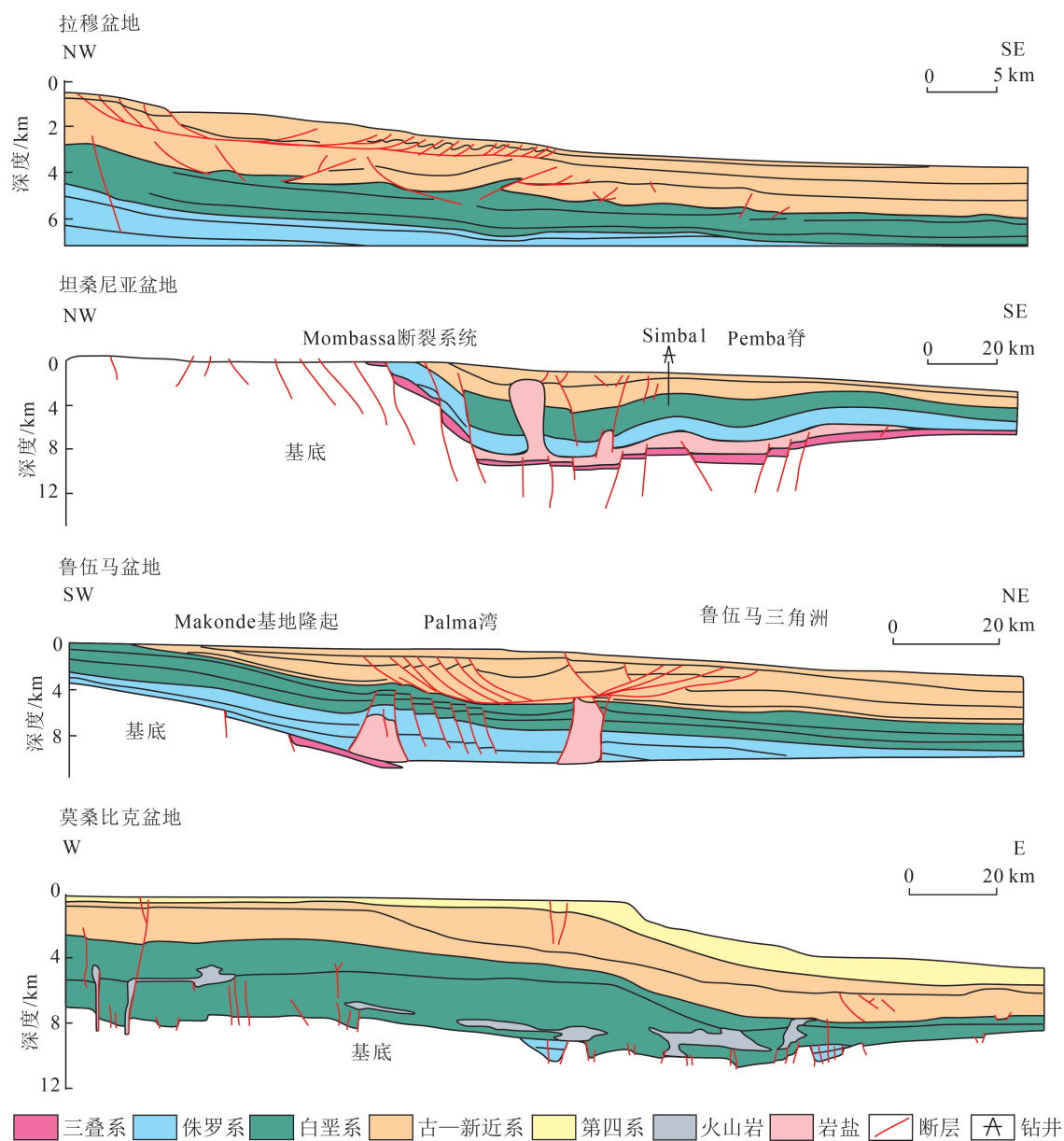


图 3 东非海岸典型盆地地质剖面(据参考文献[17,22]修改)

Fig. 3 Geological profile of typical basins along East African Coast

源量 986×10^8 t 油当量,其中石油 431×10^8 t 油当量,天然气 555×10^8 t 油当量(图 5)。海丝路沿线 128 个油气田,从储层地质时代看,主要为中生代和新生代;从储层岩性看,主要为砂岩和碳酸盐岩;从圈闭类型看,主要为构造圈闭(图 6)。

孟加拉湾是南亚地区油气资源前景较好的海域^[23]。20 世纪 90 年代起,孟加拉湾近海浅水区相继发现了一系列气田。近年来,孟加拉、缅甸和印度在孟加拉湾加大了深水油气勘探力度,并取得一系列突破。

该区预计天然气剩余可采储量约 2.6×10^{12} m³。

东南亚海域油气资源主要分布在泰国、马来西亚和印度尼西亚^[24-25]。泰国的油气资源以天然气为主,主要分布在泰国湾盆地。泰国在产油气田近 120 个,半数以上位于海上,其中 Benchams 油田、Plamuk 油田、Jasmine 油田、Arthit 气田和 Pailin 气田是泰国的主力油气田,都位于泰国湾盆地。马来西亚主要的油气区为泰国湾-马来盆地、沙捞越盆地和沙巴盆地,待发现石油资源量为 4.8×10^8 t,天然气

待发现资源量为 $3609 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。印度尼西亚油气资源丰富,石油资源量主要位于陆上,但 70% 以上的天然气资源位于海上,主要在纳土纳海和东加里曼丹海。另外,印度尼西亚-东帝汶海域也拥有丰富的油气资源。

自 2006 年以来,东非油气勘探取得多个重大突

破,目前已圈定近海沿岸带、深水区等多个油气资源有利区带^[26]。其中,海上油气资源主要集中在莫桑比克和坦桑尼亚近海。莫桑比克管辖海域发现 13 个气田,探明地质储量 $5.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采储量 $4.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。坦桑尼亚海上探井约有 50 口,共发现 21 个气田,探明地质储量 $1.35 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采储量 $1.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[10, 27]。

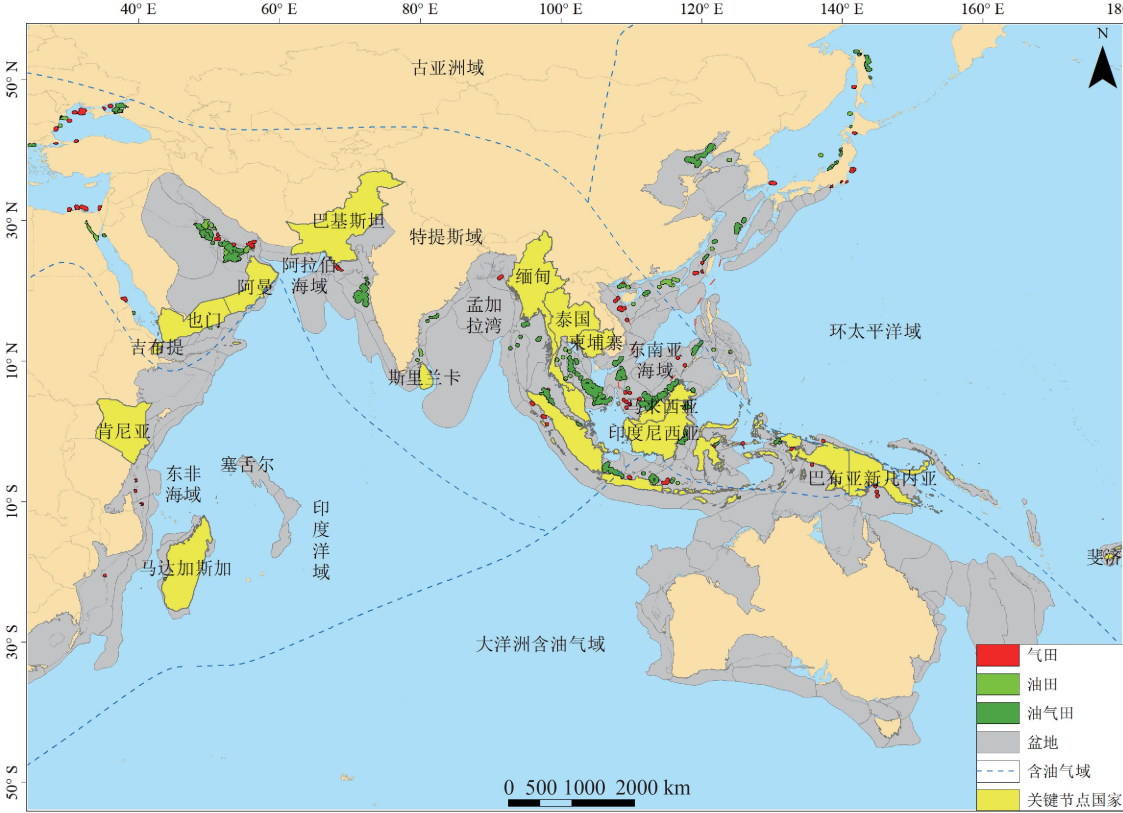


图 4 海上丝绸之路沿线油气资源分布

Fig. 4 Distribution of oil and gas resources along the Maritime Silk Road

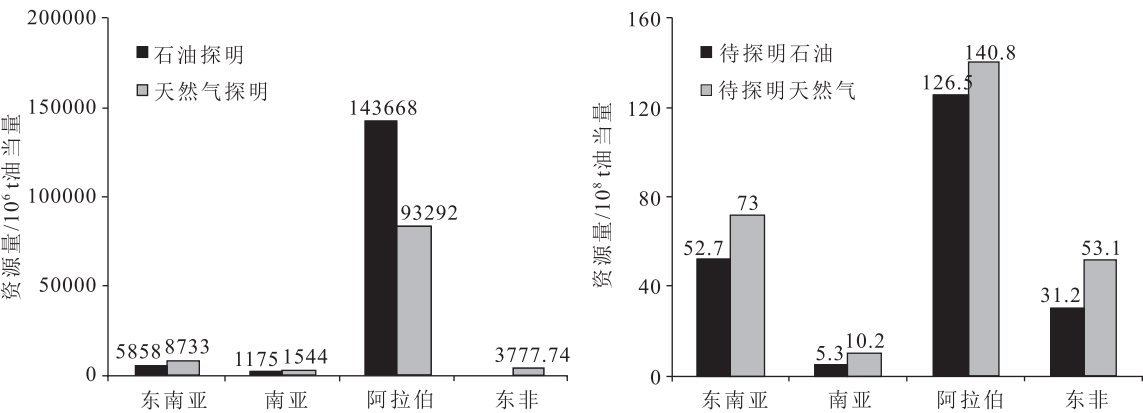


图 5 海上丝绸之路沿线不同区域油气资源量

Fig. 5 Oil and gas resources in different areas along the Maritime Silk Road

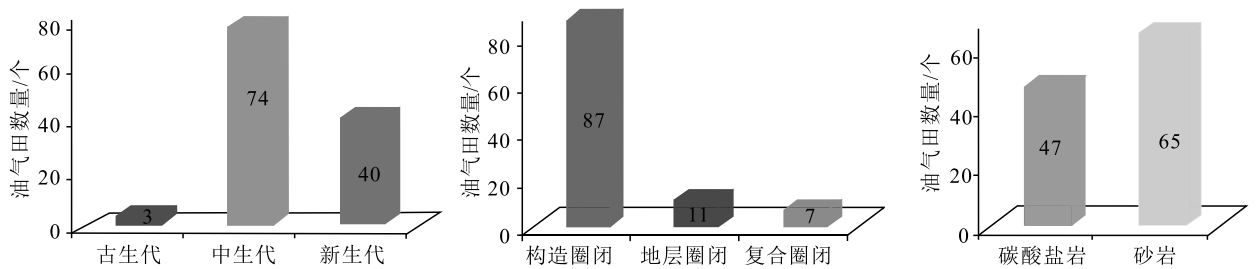


图 6 海上丝绸之路沿线油气田特征

Fig. 6 Characteristics of oil and gas fields along the Maritime Silk Road

表 1 海上丝绸之路沿线国家含油气盆地情况

Table 1 Petroliferous basins in different countries along the Maritime Silk Road

深水油气盆地群	海域	主要盆地	是否存在低勘探盆地	主要涉及国家
特提斯深水区盆地群	东南亚海域	韦伯、北苏门答腊、萨拉瓦提、班达、巴里、弗洛勒斯、望加锡、阿鲁、苏拉威西盆地、威洛彭、龙目、萨武等	是	印度尼西亚、马来西亚、文莱、泰国、柬埔寨、越南和菲律宾、巴布亚新几内亚
	孟加拉湾	克里希那-戈达瓦里、高韦里、若开、孟加拉、孟加拉深水扇等	是	印度、缅甸、孟加拉
	阿拉伯海	阿拉伯湾深水盆地	是	巴基斯坦、阿曼、伊朗、沙特
东非陆缘深水盆地群	西印度洋海域	索马里、拉穆、坦桑尼亚、鲁伍马、赞比西三角洲、穆伦达瓦等	是	索马里、肯尼亚、坦桑尼亚、莫桑比克、马达加斯加

3.2 海丝路沿线深水油气发现

3.2.1 新特提斯域深水盆地群

(1) 孟加拉湾深水区

新特提斯区域中孟加拉湾位于印度大陆以东、缅甸-安达曼-苏门答腊以西、孟加拉国南部海上地区,该区海域发育众多大陆边缘含油气盆地。根据板块位置和构造特征可划分为三大类,分别为西侧被动大陆边缘盆地(包括马哈纳迪、克里希那-戈达瓦里、高韦里、孟买、印度河扇、库奇等盆地)、东侧主动大陆边缘盆地(包括若开、马达班、安达曼和北苏门答腊盆地)及北部残留洋盆地(孟加拉盆地)。孟加拉湾油气勘探主要涉及印度、缅甸和孟加拉三国。目前,该区主要的油气勘探活动位于周缘盆地的陆上及浅水区。近年来在克里希那-戈达瓦里、高韦里及若开盆地都取得了深水天然气的发现(表 2;图 2),证实了该区域深水区良好的天然气勘探前景。

孟加拉湾地区烃源岩以古近系、白垩系为主,其次为新近系,主要发育在被动大陆边缘盆地裂谷期和前陆盆地裂后期^[28]。烃源岩形成于海相和海

陆交互相,以浅海和三角洲环境为主,浅海相烃源岩主要分布在高韦里盆地。三角洲环境形成的烃源岩分布广泛,以煤岩和炭质泥岩为主,主要分布在印度大陆周缘,如孟加拉盆地上古新统一始新统三角洲页岩。烃源岩岩性除印度大陆内部有碳酸

表 2 孟加拉湾深水区油气勘探发现^[5-6]

Table 2 Discoveries of oil and gas fields in deepwater area of the Bay of Bengal

井名/油气田名称	发现时间	国家	盆地	水深/m
Dhirubhai	2002 年	印度	克里希那-戈达瓦里	2000~3000
CY-III-D5-A1 井	2007 年	印度	高韦里	1185
R1 气田	2012 年	印度	克里希那-戈达瓦里	深水
CY-III-D5-S1 井	2013 年	印度	高韦里	1743
KG-DWN-98/2-m-4 井	2015 年	印度	克里希那-戈达瓦里	深水
Shwe Yee Htun-1 气田	2016 年	缅甸	若开盆地	深水
Thalin-1A 气田	2016 年	缅甸	若开盆地	836

盐岩外,其余盆地均为泥页岩,包含少量的煤系地层。孟加拉湾地区储层的沉积环境主要为滨浅海、三角洲和河流。裂谷期发育冲积扇相、河流相和三角洲相砂岩,裂后期发育浅海相、三角洲相和深水扇砂岩及开阔碳酸盐岩。以新生界盖层为主,其次为中生界盖层。岩性主要为泥页岩,其次为煤层和致密碳酸盐岩^[29-30]。

(2) 东南亚深水区

东南亚深水区的油气资源十分丰富,约占全球深水油气资源量的 17%,深水勘探活动目前总体较活跃,但是勘探程度较低。近年来海域油气勘探大举向深水区推进,并在东南亚地区文莱-沙巴、巴拉望、曾母、库泰等多个盆地或深水区块发现了一批深水油气田(图 2),显示了深水区巨大的勘探前景。

东南亚地处欧亚、印澳、太平洋三大板块交汇处,具有复杂的地质演化过程,经历了板块碰撞、拼合等一系列的地质作用,构造作用强烈,形成多种类型的沉积盆地,主要发育主动陆缘盆地、克拉通盆地、被动陆缘盆地及前陆盆地。东南亚地区约有 100 多个沉积盆地,其中 47 个盆地发现油气,油气资源丰富,已证实古近系油气藏 400 多个,资源量约为 11.95×10^8 t,已证实新近系油气藏 1500 多个,资源量约为 120.24×10^8 t^[31]。据最新资料显示,东南亚地区加里曼岛周缘盆地的发现了大批的深水油气田(表 3),证实东南亚地区深水区具有巨大的勘探潜力。东南亚海域含油气盆地烃源岩主要为近岸三角洲海陆过渡相煤系和炭质泥岩、湖相和海相页岩,以始新统、渐新统和中新统为主^[32]。储层以古近系—新近系的深海浊积岩为主。未来深水区将是东南亚国家油气增储上产的主要区域。

3.2.2 东非陆缘深水盆地群

与北非、西非相比,近年来东非深水区才有较大突破,在鲁伍马、坦桑尼亚等盆地发现了一批世界级深水大气田。东非地区油气勘探始于 20 世纪 50 年代,但勘探活动少,探井数量少,勘探程度普遍较低,20 世纪 90 年代以前仅有少量油气发现,且规模较小,长期未取得重大突破。截至 2010 年,共完钻井 232 口,但仅限于陆上及浅水(小于 100 m)区,且钻井成功率极低,仅在索马里、莫桑比克滨海盆地、坦桑尼亚和鲁伍马盆地陆上和浅水区先后发现

表 3 东南亚海域深水油气勘探发现^[5-6]
Table 3 Discoveries of oil and gas fields in deepwater area of Southeast Asia

井名/油气田名称	发现时间	国家	盆地/区块	水深/m
GT-1X 井	2011 年	越南	MeoTrang 油田	深水
TiungBiru 油田	2012 年	印度尼西亚	东爪哇省甘立区块	深水
NC8SW-1 井	2012 年	马来西亚	婆罗洲岛 SK317 区块	深水
第 3 勘探井	2013 年	越南	05-1b 和 05-1c 海域区块	深水
Marjoram-1 井	2014 年	马来西亚	砂拉越州海上 SK318 区块	1000
Sturgeon 油田	2015 年	越南	越南海上 09/3-12 区块	深水

了 7 个中小型商业天然气田^[10,33-34]。2010 年开始在东非深水区发现了 12 个大气田,平均水深约 1650 m,累计探明储量为 2.7×10^{12} m³。因此,该区成为近年来世界油气勘探活动的热点地区,是深水油气勘探的重要领域之一。其中,2011 年全球十大油气勘探发现中 2 个来自东非,2012 年全球十大油气勘探发现中 7 个来自东非(表 4)。

目前,东非海岸发现的油气类型以天然气为主,主要集中在北段,而在构造属性上与北段相同的马达加斯加以稠油和油砂为主^[35]。另外,鲁伍马和坦桑尼亚盆地已发现的大气田均位于 Davie 断裂带(DFZ)西侧深水区。其中,鲁伍马盆地大气田主要位于远岸深水逆冲断层带及其前缘,而近岸正断层发育区没有发现大气田;坦桑尼亚盆地大气田则沿南北向正断层分布(图 7)。

非洲东海岸发育上石炭统—下侏罗统、中上侏罗统一白垩系 2 套有效烃源岩^[17,33]。上石炭统一下侏罗统烃源岩岩性以陆相页岩和煤系为主,最大厚度近百米。烃源岩干酪根类型主要为 II~III 型,热演化程度高,总体处于成熟—过成熟阶段,以生气为主。但该烃源岩分布较局限,主要分布于索马里盆地东部、拉穆盆地中部、坦桑尼亚盆地、鲁伍马盆地和穆龙达瓦盆地东部。下侏罗统 Nondwa 蒸发岩和 Mbuo 页岩是坦桑尼亚盆地的优质主力烃源岩。中上侏罗统一白垩系烃源岩广泛分布,烃源岩品质

好。其中,坦桑尼亚、鲁伍马和索马里 3 个盆地烃源岩条件最优越。中上侏罗统巴柔阶页岩和上白垩统坎潘阶黑色页岩是主力烃源岩。

非洲东海岸沉积盆地内储集层发育,二叠系—新近系发育多套储集层,储集层物性良好^[21]。除 Karoo 群陆相碎屑岩(砂岩)储集层外,其他主要为中上侏罗统、白垩系—新近系海相碎屑岩和碳酸盐岩。碎屑岩储集层主要为三角洲和近海浊流沉积砂岩,碳酸盐岩储集层主要为生物礁或碎屑灰岩、浅滩相灰岩、礁后鲕粒灰岩、陆架碳酸盐岩等。

非洲东海岸盖层岩性主要为页岩、泥岩和泥质

灰岩等,索马里盆地、坦桑尼亚盆地、穆伦达瓦盆地和鲁伍马盆地中发育的厚层蒸发岩也是盆地内重要的盖层^[21]。

4 海丝路沿线深水盆地大油气田形成的控制因素

4.1 深水大气田形成的物质基础

在深水环境,不同类型的烃源岩均可生成油气。油源岩包括湖相/开阔海相和分散有机质。对于气源,包括产生生物气的分散有机物质,以及超过生油窗的原油热解气。在侏罗系、白垩系和古近系中已经发现世界级的油气田(图 8)。

表 4 东非海岸深水区油气勘探新发现 ^[5-6]						
Table 4 New oil and gas discoveries in deepwater area of the coast of East Africa						
油气田名称	发现日期	国家	盆地	水深/m	类型	可采储量/10 ⁸ t(油当量)
Pweza 1	2010-10-16	坦桑尼亚	Mafia Deep	1400	气	0.48
Prosperidade Complex	2010-10-19	莫桑比克	Ruvuma	1585	油、气	7.45
Chewa 1	2010-11-30	坦桑尼亚	Mafia Deep	1315	气	0.34
Tubarao 1	2011-02-15	莫桑比克	Ruvuma	866	气	0.22
Chaza 1	2011-04-15	坦桑尼亚	Ruvuma	952	气	0.01
Mamba complex	2011-10-15	莫桑比克	Ruvuma	1320	油、气	11.54
Zafarani 1	2012-02-17	坦桑尼亚	Mafia Deep	2582	气	0.92
Jodari 1	2012-03-15	坦桑尼亚	Ruvuma	1295	气	0.95
Golfinho/Atum	2012-05-15	莫桑比克	Ruvuma	1027	气	6.59
Mzia 1	2012-05-15	坦桑尼亚	Ruvuma	1639	气	1.21
Coral 1	2012-05-15	莫桑比克	Ruvuma	2261	油、气	2.77
Papa 1	2012-06-04	坦桑尼亚	Mafia Deep	2186	气	0.15
Lavani 1	2012-06-13	坦桑尼亚	Mafia Deep	2400	气	0.88
Orca 1	2013-04-18	莫桑比克	Ruvuma	1061	气	0.25
Agulha 1	2013 年	莫桑比克	Ruvuma	2492	气	1.05
Tangawizi 1	2013-03-28	坦桑尼亚	Mafia Deep	2300	气	0.88
Ngisi 1	2013-03-28	坦桑尼亚	Mafia Deep	1250	气	0.30
Mronge 1	2013-12-01	坦桑尼亚	Mafia Deep	2500	气	0.45
Taachui 1	2014-06-26	坦桑尼亚	坦桑尼亚	609	气	0.23
Piri 1	2014-06-18	坦桑尼亚	Mafia Deep	2360	气	0.44
Giligiliani 1	2014-10-14	坦桑尼亚	Mafia Deep	2500	气	0.21
Kamba 1	2014-10-02	坦桑尼亚	Mafia Deep	1379	气	0.15
Mdalasini 1	2015-03-30	坦桑尼亚	Ruvuma	2296	气	0.25

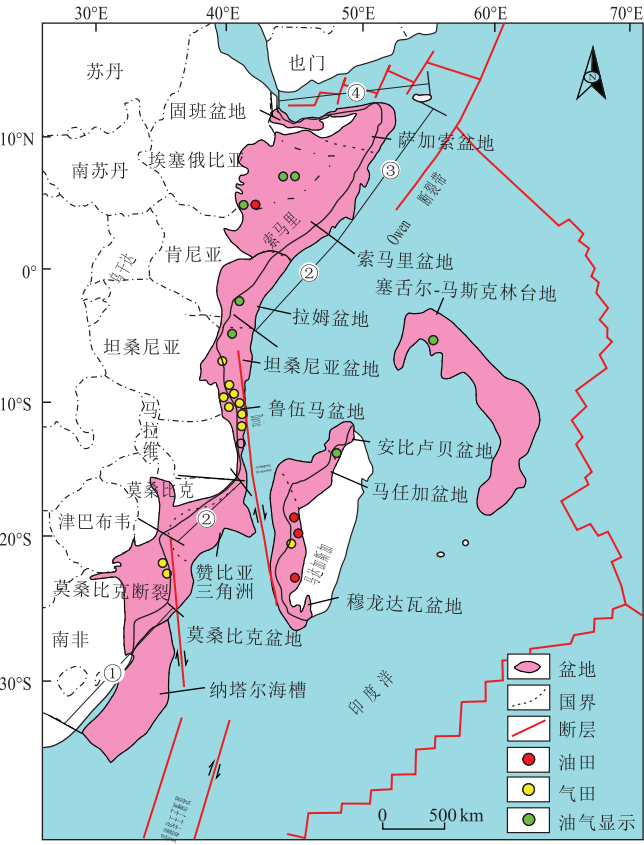


图 7 东非海岸油气田分布图^[20]
Fig. 7 Distribution of oil and gas fields
along East African coast

①—右旋走滑剪切边缘;②—右旋走滑拉张边缘;
③—左旋走滑剪切边缘;④—斜向裂谷边缘

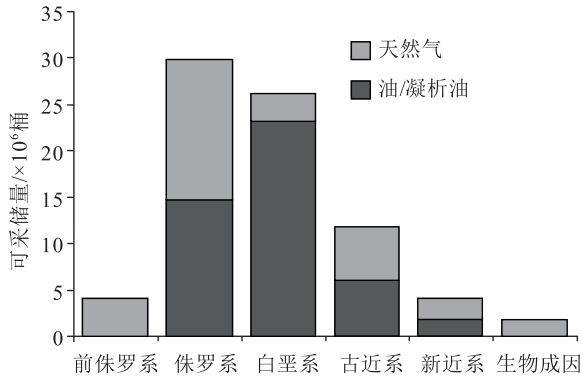


图 8 深水可采储量与烃源岩年代关系
Fig. 8 Relationship between deepwater recoverable
reserves and ages of source rocks

海丝路沿线含油气烃源岩主要集中在中—新生界中,东非地区还发育古生界裂谷成因的卡鲁群烃源岩。烃源岩类型丰富,包括台地相—盆地相碳酸盐

岩(以泥灰岩为主)和海陆过渡相暗色泥岩、炭质泥岩、炭质页岩、煤等。主要发育碳酸盐岩和碎屑岩 2 类储集岩。碳酸盐岩储集岩以浅海相碳酸盐岩、潟湖相、深海陆棚相的白云岩化泥粒灰岩等为主。碎屑岩储集岩以三角洲—滨岸沉积体系中的分流河道砂体、海滩砂体及深水扇砂岩为主,砂岩结构成熟度和成分成熟度均较高,分选性中等—好,磨圆度高。从层位看,分布于古生界—上新统的所有砂岩和碳酸盐岩地层中,但以中—新生界为主(图 9)。

海丝路沿线主要发育一系列大陆裂谷和被动陆缘盆地群。这些盆地群在冈瓦纳板块裂解、新板块构造运动过程中形成,经历了多期构造、沉积作用,形成良好的石油地质条件,具备多种成藏组合(图 9)。另外,中—新生代深水盆地受多期构造运动作用的影响,形成断块、断鼻、断背斜等多种类型的构造圈闭。这些构造圈闭具有良好的继承性,是油气运移和聚集的有利指向地带。深水盆地中发育的地层—岩性圈闭是未来勘探的重要领域。

4.2 高效的油气疏导体系

深水区存在长距离、短距离等多种油气运移方式,烃源岩产生油气后经疏导体系沟通运移到有利圈闭富集成藏,断裂、盐底劈及砂体为油气运移提供了良好的通道^[5, 38]。

孟加拉湾油气富集区与大型河流—三角洲分布有关。已证实的北苏门答腊盆地中,中新统主力成藏组合为海相三角洲沉积环境。油气生成后,经连通砂体、断层面、泥底辟面等运移进入大型河流—三角洲和大型深水浊积扇储集体,在地层—岩性圈闭和滚动背斜圈闭中富集成藏。

东非陆缘深海区油气成藏受断裂控制作用明显,为油气运移成藏提供了重要的运移通道。东非陆缘大油气田主要分布在 Davie 断裂带两侧^[34],发育一系列的通源断层。全球深水油气勘探实践证明,深水褶皱逆冲带的背斜或一侧被逆断层遮挡封盖是最可能发现工业油气的构造^[37-38]。在鲁伍马盆地发现的 Mamba 气田位于 Davie 断裂带东部逆冲推覆体前缘,深水褶皱冲断带内由于逆冲断层活动,导致逆冲断层上部发育众多断层相关褶皱背斜,形成良好的构造圈闭(图 10)。另外,该地区广泛发育深水浊积扇,砂体连通性较好,储层物性好,是一套高效的优质储层。早期海相烃源岩生成的油气(以气为主)沿东侧通源断层运移,充注于古近

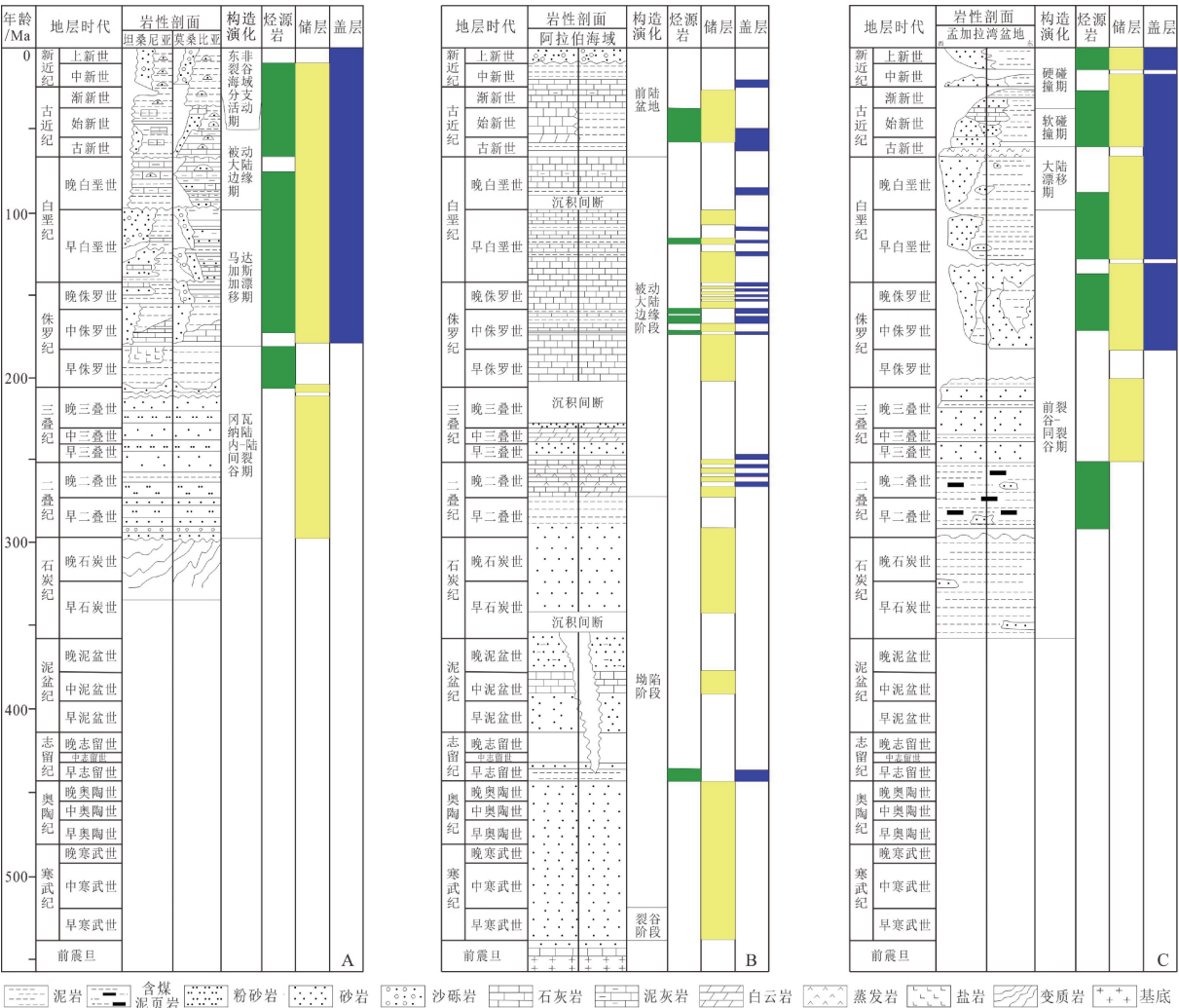


图 9 东非-阿拉伯-孟加拉湾生储盖组合

Fig. 9 Source-reservoir-cover combination of East Africa-Arab-Bay of Bengal

系砂体中,形成岩性-构造油气藏^[17]。

5 勘探前景

目前,海丝路沿线深水区已有多个油气发现。东南亚海域深水油气勘探活动一直较活跃,已获得 17 个深水油气发现,主要集中在马来西亚、印度尼西亚、中国南海、越南等国家。东非海域已有 23 个深水油气发现,其中,莫桑比克 7 个,坦桑尼亚 16 个,预测资源量为 37.72×10^8 t 油当量。印度和缅甸在孟加拉湾深水区也有多个深水天然气发现,主要有 6 个深水油气发现。海丝路沿线深水盆地在油气发现、资源潜力、勘探程度、研究程度等方面存在很大差别,目前已发现的大型油气田以构造圈闭类型

为主(图 11),深水区还有大量的复合圈闭、地层岩性圈闭及构造圈闭待钻探。海丝路沿线深水油气资源丰富,潜力巨大,通过对其油气地质条件、资源潜力对比分析,认为总体上深水油气勘探程度较低,发现大型、巨型油气田的机会较大,存在不少具有一定勘探潜力、值得进一步勘探的目标区。

孟加拉湾近海地区油气勘探程度较高,但深水区具有很好的勘探前景。孟加拉湾是一个大型的河流-三角洲,发育多种类型的大陆边缘盆地,有充足的陆缘有机质注入,储集条件优越,延伸到深海区的新生代浊积砂体是该区最具潜力的勘探区,以寻找岩性圈闭为目标。巴基斯坦东部海域印度扇的物源主要来自印度河,深水区的中新统

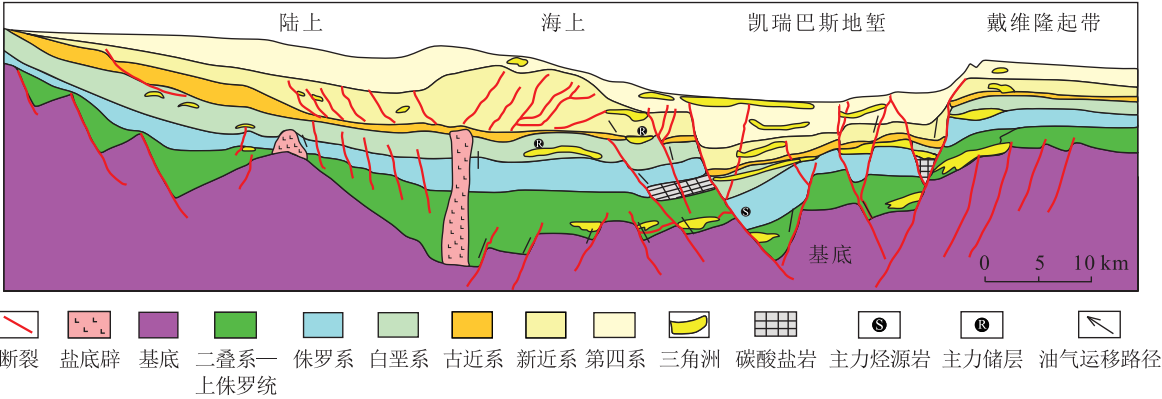


图 10 鲁伍马盆地成藏模式图^[17, 39-40]

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation model in the Rovuma basin

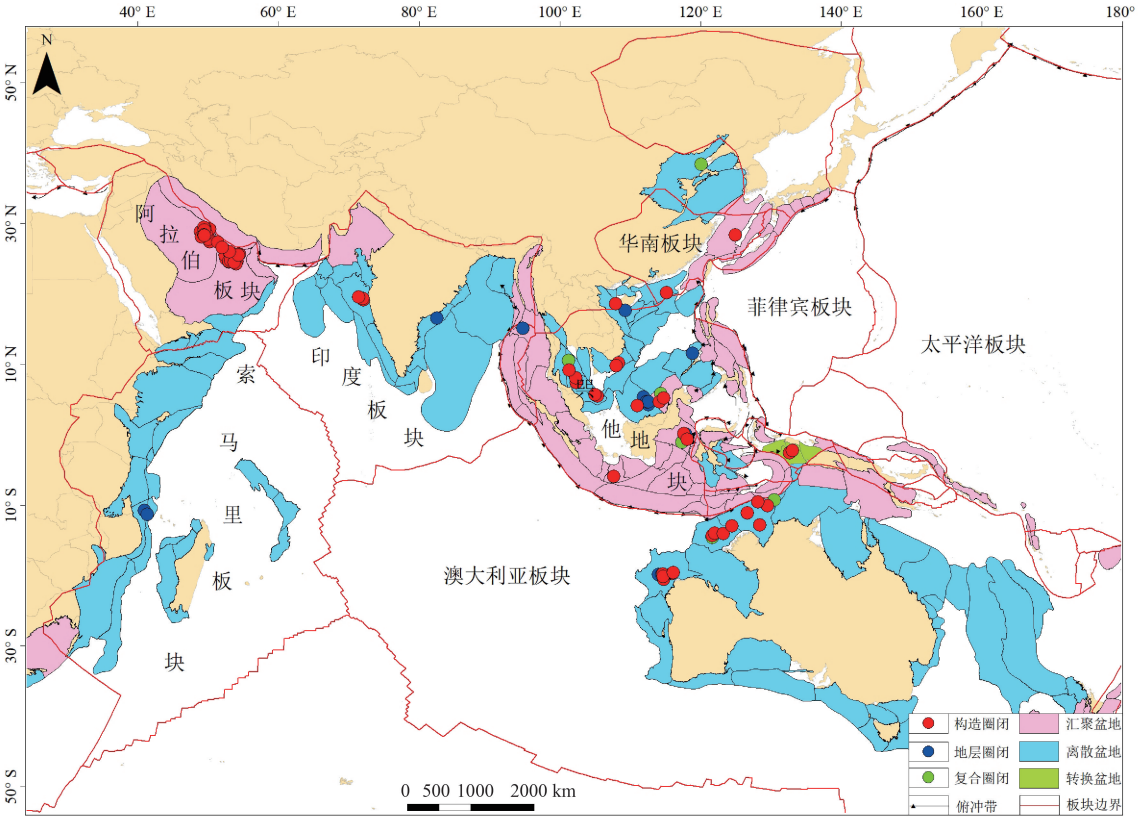


图 11 海上丝绸之路沿线主要含油气圈闭类型

Fig. 11 Main types of hydrocarbon traps along the Maritime Silk Road

河道砂体和始新统礁灰岩分布广、储层质量好, 具有较好的油气勘探前景, 以寻找岩性圈闭为目标^[41]。东南亚海域地处三大板块交界处, 构造演化复杂, 发育多种类型的盆地, 油气资源主要集中在新生代的弧后盆地、裂谷盆地、被动边缘盆地和前陆盆地。东南亚深水区发育众多冲断褶皱带,

构造圈闭发育, 油气成藏条件优越, 以寻找大型构造型油气田为主。

东非海域主要发育典型的被动大陆边缘盆地, 其石油地质条件丰厚, 发育多套烃源岩, 储盖组合有利, 构造和岩性地层圈闭发育, Davie 断裂带 (DFZ) 东侧发育盐底辟构造, 这些现存条件都有利

于油气的聚集成藏。根据目前的钻探认识,东非海岸深水区有利勘探方向应以近岸的中新生代发育的生物礁、海底浊积砂体形成的岩性地层圈闭为目标。

6 结 论

(1)海丝路沿线主要深水油气盆地呈“一横一纵”的分布格局,主要包含东非陆缘深水盆地群、西太平洋区域的深水盆地群、新特提斯区域的孟加拉湾盆地群、阿拉伯湾深水盆地。海丝路沿线油气资源潜力巨大,以阿拉伯海域为主,其次为东南亚和东非;油气资源主要分布在中—新生界,以构造圈闭为主,储层主要为碳酸盐岩和砂岩。

(2)海丝路沿线深水盆地具备形成大油气田的物质基础,烃源岩以湖相、煤系及海相泥页岩为主;储集层类型多样,以深海的浊积岩和生物礁为主;发育良好盖层;具有高效的油气运移通道。孟加拉湾、巴基斯坦、东非海岸等深水区以新生代浊积砂体和生物礁形成的岩性地层圈闭为目标。东南亚深水区以寻找大型构造型油气田为主。

致谢:中国地质调查局青岛海洋地质研究所刘守全和戴春山研究员对于本项工作给予了支持与帮助,审稿专家给出了宝贵意见和建议,在此致以衷心的感谢。

参考文献

[1] 翟光明,王世洪,何文渊.近十年全球油气勘探热点趋向与启示[J].石油学报,2012,33(S1): 14-19.

[2] 张宁宁,王青,王建君,等.近20年世界油气新发现特征与勘探趋势展望[J].中国石油勘探,2018,23(1): 44-53.

[3] 童晓光,张光亚,王兆明,等.全球油气资源潜力与分布[J].地学前缘,2014,21(3): 1-9.

[4] 杨丽丽,王陆新,潘继平.全球深水油气勘探发现现状、前景及启示[J].中国矿业,2017,26(S2): 21-24.

[5] 张功成,屈红军,张凤廉,等.全球深水油气重大新发现及启示[J].石油学报,2019,40(1): 1-34,55.

[6] 张功成,米立军,屈红军,等.全球深水盆地群分布格局与油气特征[J].石油学报,2011,(3): 5-14.

[7] 屈红军,张功成.全球深水富油气盆地分布格局及成藏主控因素[J].天然气地球科学,2017,28(10): 1478-1487.

[8] Yatheesh V, Dymment J, Bhattacharya G G, et al. Deciphering detailed plate kinematics of the Indian Ocean and developing a unified model for East Gondwanaland reconstruction: An Indian-Australian-French initiative[J]. Deep Continental Studies in India: Newsletter, 2013, 23(1): 2-9.

[9] 李江梅,李洪林,韩喜球.印度洋底大地构造图说明书[M].北京:地质出版社,2015.

[10] 甘克文.特提斯域的演化和油气分布[J].海相油气地质,2000,(22): 21-29.

[11] 康洪全,贾怀存,李明刚,等.地中海油气富集规律与未来勘探方向[J].科技导报,2016,(23): 122-128.

[12] 丘东洲.亚洲特提斯域油气聚集地质特征[J].沉积与特提斯地质,2007,14(2): 3-10.

[13] 金之钧,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): 112-117.

[14] 何登发,董晓光,温志新,等.全球大油气田形成条件与分布规律[M].北京:科学出版社,2015.

[15] 李冬,胡孝林,郭刚,等.印尼加里曼丹岛东部主要含油气盆地油气富集差异[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(4): 129-135.

[16] 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.

[17] 崔贺,金爱民,邬长武,等.东非海岸构造演化及其对南、北主要富油气盆地控藏作用对比[J].海洋地质与第四纪地质,2020,20(1): 101-113.

[18] Bumby A J, Guiraud R. The geodynamic setting of the Phanerozoic basins of Africa [J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43(1/3): 1-12.

[19] Roberts D G, Bally A W. Regional geology and tectonics: Principles of geologic analysis[M]. London: Elsevier, 2012.

[20] 于璇,侯贵廷,代双河,等.东非大陆边缘构造演化与油气成藏模式探析[J].地质科技情报,2015,34(6): 147-154.

[21] 胡良君.非洲东海岸区域构造演化与构造样式及其对生储盖组合的控制作用[D].中国地质大学硕士学位论文,2013.

[22] Cruciani F, Barchi M R. The Lamu Basin deepwater fold-and-thrust belt: an example of a margin-scale, gravity-driven thrust belt along the continental passive margin of East Africa [J]. Tectonics, 2016, 35(3): 491-510.

[23] 姚永坚,高红芳,张道勇,等.东南亚地区油气分布规律与勘探现状[C]//中国地质学会学术年会,2009.

[24] A. 3ααHααpαk, 朱佛宏(译),单连芳(校).孟加拉湾含油气盆地——南亚潜在的烃类储藏区[J].海洋石油,2006,26(1): 7-10.

[25] 叶德燎.东南亚石油资源与勘探潜力[J].中国石油勘探,2005,10(1): 55-60,64.

[26] 许志刚,韩文明,孙玉梅.东非大陆边缘构造演化过程与油气勘探潜力[J].中国地质,2014,1(3): 961-969.

[27] IHS. International energy oil & gas industry solutions[EB/OL]. (2014-12-30) [2020-04-28]. <http://www.ihs.com/industry/oil-gas/international.aspx>. 2014.

[28] 朱光辉,李林涛.孟加拉湾地区大陆边缘盆地勘探概况与油气富集主控因素[J].地质科技情报,2012,31(5): 112-118.

[29] 刘铁树,裘著纲,骆宗强.孟加拉盆地油气分布特征及主控因素[J].石油实验地质,2015,37(3): 361-366.

[30] 韩冰,李学杰,吕建荣,等.孟加拉湾深水盆地油气勘探潜力[J].海洋地质前沿,2012,28(4): 50-56.

[31] 杨福忠,洪国良,祝厚勤,等.东南亚地区成藏组合特征及勘探潜

- 力[J].地学前缘,2014,21(3): 112-117.
- [32] 姚永坚,杨楚鹏,康永尚,等.东南亚地区烃源岩特征及主控因素[J].地球科学(中国地质大学学报),2013,38(2): 367-378.
- [33] 周总瑛,陶冶,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): 35-43.
- [34] 张光亚,刘小兵,温志新,等.东非被动大陆边缘盆地构造-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): 75-84.
- [35] 许志刚,韩文明,孙玉梅.东非共轭型大陆边缘油气成藏差异性分析[J].天然气地球科学,2014,25(5): 732-738.
- [36] 康玉柱.全球主要盆地油气分布规律[J].中国工程科学,2014,16(8): 14-25.
- [37] Morley C K, King R, Hillis R, et al. Deepwater fold and thrust belt classification, tectonics, structure and hydrocarbon prospectivity: A review[J]. Earth Science Reviews, 2011, 104(1/3): 41-91.
- [38] 唐武,郭佳,赵志刚,等.文莱-沙巴盆地深水褶皱冲断带构造变形特征及成因机制[J].地球物理学报,2018,61(10): 4281-4295.
- [39] 陈宇航,姚根顺,唐鹏程,等.东非凯瑞巴斯盆地多期构造变形及对油气聚集的控制作用[J].大地构造与成矿学,2016,40(3): 491-502.
- [40] 陈宇航,姚根顺,吕福亮,等.东非鲁伍马盆地渐新统深水水道-朵体沉积特征及控制因素[J].石油学报,2017,38(9): 79-90.
- [41] 龚建明,廖晶, Khalid M, 等.巴基斯坦海域油气勘探方向探讨[J].海洋地质前沿,2019,35(11): 1-6.