



巴基斯坦东部海域中生代地层发现与油气意义

梁杰, 李森, 陈建文, 廖晶, 龚建明, 陆凯, 刘鸿, 张银国

Discovery of Mesozoic strata in the eastern region of offshore Pakistan and its oil and gas significance

LIANG Jie, LI Sen, CHEN Jianwen, LIAO Jing, GONG Jianming, LU Kai, LIU Hong, and ZHANG YinGuo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024010401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东海陆架盆地南部中生代构造-沉积演化与油气勘探方向

Tectono-sedimentary evolution of the Mesozoic in the southern East China Sea Shelf Basin and its bearing on petroleum exploration

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 30-40

中国海域油气资源潜力分析与黄东海海域油气资源调查进展

Regional evaluation of oil and gas resources in offshore China and exploration of marine Paleo-Mesozoic oil and gas in the Yellow Sea and East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 1-29

中国海域前新生代地层分布及其油气勘查方向

Distribution of Pre-Cenozoic strata and petroleum prospecting directions in China Seas

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 1-25

东海陆架盆地西部坳陷带中生界残留盆地分布特征与勘探潜力

Distribution of residual Mesozoic basins and their exploration potential in the western depression zone of East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 41-51

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151-162

东海陆架盆地南部中生代断裂系统与盆地结构

Mesozoic fault system in the Southern East China Sea Shelf Basin and its bearing on basin structures

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 52-61



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

梁杰, 李森, 陈建文, 等. 巴基斯坦东部海域中生代地层发现与油气意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 115-124.

LIANG Jie, LI Sen, CHEN Jianwen, et al. Discovery of Mesozoic strata in the eastern region of offshore Pakistan and its oil and gas significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 115-124.

巴基斯坦东部海域中生代地层发现与油气意义

梁杰^{1,2,3,4}, 李森^{2,5}, 陈建文^{1,2,4}, 廖晶^{1,2}, 龚建明^{1,2}, 陆凯^{1,2}, 刘鸿^{1,2}, 张银国^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

4. 河海大学海洋学院, 南京 210024

5. 山东省地质科学研究所, 济南 250013

摘要: 巴基斯坦海域历经 60 余年油气勘探, 长期以新生界为主要目标, 对中生代地层展布、构造演化特征等认识不清。巴基斯坦东部海域中—新生代时期经历了复杂的构造—沉积演化过程, 新生代受喜马拉雅隆升影响而沉积了巨量陆缘碎屑物质, 因此是研究诸多重大基础科学问题的极佳场所。受白垩纪晚期区域火成岩影响, 对该区中生代地层是否存在、如何展布等问题一直存在较大争议, 这极大限制了区域油气勘探活动的开展。本研究基于新采集的高品质二维地震剖面, 突破了火成岩层的屏蔽作用, 通过地震反射界面刻画、地震波组特征分析和层速度分析等手段, 揭示了中生代地层在巴基斯坦东部海域广泛分布, 中生代地层受控于同期活动的强烈伸展断陷作用, 被隆坳相间的构造古地理格局分割在多个规模不等的次级凹陷内部。整体厚度 800~10000 m, 表现为东南厚、西北薄, 向北和向西超覆, 最大沉积厚度位于研究区东南和西北两个区域, 该套地层在陆域下印度河盆地已证实为重要烃源岩层, 因此海域中生代地层的发现有效拓展了该区未来油气勘探方向和潜在价值。

关键词: 地震反射波组; 烃源岩; 油气勘探; 中生代; 巴基斯坦东部海域

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024010401

Discovery of Mesozoic strata in the eastern region of offshore Pakistan and its oil and gas significance

LIANG Jie^{1,2,3,4}, LI Sen^{2,5}, CHEN Jianwen^{1,2,4}, LIAO Jing^{1,2}, GONG Jianming^{1,2}, LU Kai^{1,2}, LIU Hong^{1,2}, ZHANG YinGuo^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

3. School of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

4. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210024, China

5. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China

Abstract: After more than 60 years of oil and gas exploration in the offshore areas of Pakistan, the primary focus has long been on the Cenozoic strata. The distribution of Mesozoic formations and the tectonic evolution remain unclear. The eastern offshore areas of Pakistan underwent a complex tectonic-sedimentary evolution during the Neogene. Influenced by the Himalayan uplift during the Neogene, a significant amount of detritus from continental margin deposited, making it an excellent location for studying numerous fundamental scientific questions. Due to the impact of regional volcanic rocks in the late Cretaceous, there has been considerable controversy regarding the existence and distribution of the Mesozoic strata in the region, significantly hindering the regional oil and gas exploration activities. Based on high-quality 2D geological profiles, overcomes the previous shielding effect of volcanic rock layers. By means of seismic reflection interface delineation, analysis of seismic wave group characteristics, and layer velocity analysis, the extensive distribution of the Mesozoic strata in the eastern offshore areas of Pakistan was clarified. The Mesozoic formations, controlled by intense extensional faulting in the same period, are segmented within multiple secondary basins of varying scales, forming a paleo-tectono-geographic pattern of alternating uplifts and depressions. The overall thickness

资助项目: 国家海洋专项项目 (DD20160215, DD20189643, DD20191003, DD20191032, DD20190581, DD20211353, DD20221723, DD20230317); 崂山实验室科技创新项目 (LSKJ202203401, LSKJ202203404); 国家自然科学基金面上项目“马克兰增生楔低角度俯冲区断层‘接力’过程及其对水合物成藏的控制”(42076069)

作者简介: 梁杰 (1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海域油气资源调查与评价方面的研究工作, E-mail: lj_100@163.com

收稿日期: 2024-01-04; 改回日期: 2024-01-30. 周立君编辑

ranges from 800 to 10000 m, thicker in the southeast and thinner in the northwest. Overlapping towards the north and west, the maximum sedimentary thickness is located in the southeast and northwest regions of the study area. The stratigraphic unit was confirmed as an important hydrocarbon source rock layer in the onshore of the lower Indus River Basin, which effectively expanded the future directions and potential value of oil and gas exploration in the offshore areas.

Key words: seismic reflection wave group; source rock; oil and gas exploration activity; Mesozoic; eastern region of offshore Pakistan

巴基斯坦海域东临印度西海岸、西接霍尔木兹海峡、北邻巴基斯坦南部海岸线、南接印度洋,同时在构造上处于欧亚板块、阿拉伯板块与印度板块的交汇处,地质历史时期经受过复杂的板块构造运动^[1-5]。新生代以来,由于青藏高原的迅速隆升,在巴基斯坦海域的东部形成了规模仅次于孟加拉扇的世界第二大海底扇——印度扇,其沉积来源主要来自于青藏高原隆升时产生的陆缘碎屑,经印度河流域向阿拉伯海输送^[6-8]。因此,巴基斯坦东部海域是研究全球板块活动、青藏高原起源以及对亚洲季风气候影响等重大科学问题的极佳场所^[9-11]。

自20世纪60年代以来,巴基斯坦海域累计采集二维地震测线约95000 km,三维地震数据约10450 km²^[12-14]。东部海域累计采集二维地震调查测线约70000 km,大部分区域测网密度达到4 km×4 km,局部达2 km×4 km,5个三维地震区块覆盖面积8336 km²^[4]。截止目前,巴基斯坦海上钻井18口,其中,7口井见油气显示,1口井发现少量油气(PakCan-1),但是,巴基斯坦海域油气勘探始终未取得商业性突破,大部分井钻在陆棚上,只有3口井(Kekra-1、Pak G2-1、Anne-1)在深水区,因此,海域中生代地层的发现显得极为重要^[1,15-17]。

巴基斯坦东部海域新生界沉积物巨厚,最厚处能达到一万多米,新生界盆地基底为晚白垩世末留尼汪热点火山喷发溢流形成的德干玄武岩^[14,18]。由于这套火山岩的遮挡作用,地震反射波难以到达深部的中生代地层。陆架和深海虽然分布有多口钻井,但都没有钻穿新生代盆地基底,最老揭示到古新世—始新世地层,所以早期众多学者对盆地地层发育、地质结构的研究集中于德干玄武岩之上的新生代盆地,对德干玄武岩之下的中生代盆地的认识甚少,而近年来在近岸多口钻井揭示了中生界地层,如Dabbo Creek井钻遇早白垩世地层,Patiani Creek井钻遇晚白垩世地层等,为巴基斯坦东部海域中生代地层的发现提供了依据。

本研究通过高品质二维地震剖面解释,结合海陆对比,对印度扇近海盆地中、新生代两期叠合盆地纵向和横向地质结构进行详细对比,综合地震、钻井、测录井等多种资料开展层序地层分析,明确

了印度扇近海盆地海域中生代地层的归属、展布规律及对巴基斯坦海域勘探的石油地质意义。

1 地质背景

巴基斯坦专属经济区面积 21×10^4 km²,水深0~4500 m,横跨欧亚板块、阿拉伯板块、印度板块三大板块,其海底地形可分为大陆架、大陆坡、海底隆起、深海海槽、深海平原5种海底地形,自西向东分别是马克兰增生楔、阿曼深海平原、默里脊和印度扇近海盆地四个构造单元^[1](图1)。

1.1 构造演化背景

早侏罗世(约180 Ma),东、西冈瓦纳古陆之间发生初始裂离并形成了一个海峡,在索马里、莫桑比克近岸和威德尔海盆(已知的最老的海底磁异常156 Ma)可能发生海底扩张。伴随着多期次裂解事件,整个西北印度洋经历了一个双板块系统→三板块系统→双板块系统的演化过程,其深部动力机制可能与留尼汪热点的活动有关。随后印度板块继续快速向北移动,速度为150~200 mm/a,直到古新世与始新世之交(55 Ma),印度与欧亚大陆块体之间初步碰撞接触。在渐新世—中新世早期(23 Ma),板块几何学的重大变化导致了红海-亚丁湾的打开。约8~10 Ma和约 1.9 ± 0.9 Ma沿印度-阿拉伯板块边界发生两次主要变形。8~10 Ma时期的标志事件是默里脊隆起的形成,这一事件与中新世晚期全球板块重组事件有关,表现为印度洋中部板块内的变形,达尔林普尔槽随后打开,与阿曼深海平原的区域性不整合作用处于同一时期,标志着马克兰增生楔的构造重组和北默里脊的最后隆升^[3-5]。

1.2 地层发育特征

1.2.1 巴基斯坦陆域地层

巴基斯坦陆域的印度河盆地位于印度板块西部,喜马拉雅碰撞带以南。盆地基底是前寒武纪变质岩和侵入岩,自下而上分别发育寒武系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及新生界,缺失奥陶系—石炭系^[6-9,14]。因古生代地层钻井揭示较少,以下重点

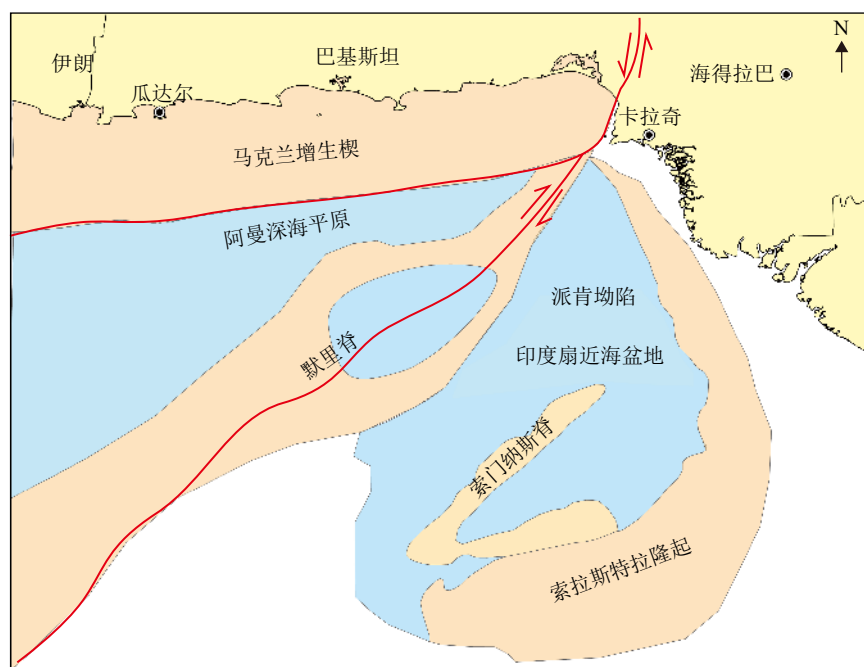


图 1 北阿拉伯海及邻区大地构造图

Fig.1 Tectonic map of the North Arabian Sea and adjacent areas

阐述中生代以来的沉积地层记录及沉积环境(图 2)。

三叠系: 岩性主要为页岩、砂岩和粉砂岩, 为浅海相沉积^[4]。

侏罗系: 地层主要发育一套浅海相灰岩、页岩和砂岩沉积。中侏罗世发生大规模海进, 沉积了一套半深海相灰岩^[4]。

白垩系: 印度河盆地在白垩纪早期进入同裂陷阶段, 发生大规模海进, 岩性主要为砂岩、粉砂岩和黑色页岩夹砂岩, 其中的页岩是主要烃源岩, 其中的砂岩构成自生自储式储层^[3-5]。白垩纪晚期主要发育浅海相沉积, 岩性主要为灰岩、砂岩和粉砂岩, 其砂岩与灰岩沉积是盆地的主要储层之一^[4]。

古近系: 古新统时期印度板块与澳大利亚板块分离, 印度洋二次扩张发生第 3 次海侵, 沉积一套浅海泥岩, 古新统晚期形成一套半深海相灰岩^[4]。

始新统时期主要发育浅海相沉积, 岩性以灰岩、页岩及砂岩为主。始新世末期, 印度洋第三次扩张, 发生了第四次海进, 在沉积上表现出浅海相—局限海的变化^[5]。

渐新统主要为浅海相灰岩、页岩及砂岩, 沉积环境为浅海相。

新近系—第四系: 中新统岩性主要以页岩、粉砂岩和砂岩为主, 也属浅海相沉积。

1.2.2 印度扇近海盆地地层

印度扇近海盆地海上钻井仅有 14 口, 其中 11 口分布在陆架区, 3 口分布在深水区, 主要钻探

目标层位为中新统砂岩和始新统的生物礁^[12-14]。根据海陆对比和钻井结果, 印度扇近海盆地自下而上主要发育中生代地层侏罗系、白垩系及新生代地层古近系、新近系、第四系^[6-10]。

侏罗系: 沉积范围相对局限, 根据陆域钻井特征, 推测地层以灰岩、页岩为主。根据构造演化背景, 推测侏罗纪时期盆地沉积沉降中心位于印度扇近海盆地, 向北西方向逐渐减薄尖灭。

白垩系: 根据陆域钻井特征, 推测下白垩统地层以泥岩为主, 在当时的陆架和陆架边缘发育三角洲和斜坡扇砂岩; 上白垩统岩性主要为页岩、粉砂岩和砂岩, 并且存在明显的火成岩, 沉积地层被德干火山岩破坏明显, 地层中间夹杂有溢流相的火山熔岩或侵入地层中的火山岩。

古近系: 古新统一始新统是盆地进入坳陷期后的首套沉积, 岩性主要为泥岩、页岩和砂岩等, 在派肯坳陷沉积了一套厚层泥岩, 始新世末, 在索拉斯特拉平台上发育一套薄—中等厚度的台地相灰岩; 渐新统沉积在全区内比较稳定, 主要为泥质岩。

新近系—第四系: 中新世以来, 研究区主要发育大型复合水道体系, 岩性以砂岩为主, 夹泥岩。

2 创新地震探测及处理技术获取中生代地震反射

巴基斯坦东部海域深部地层早期地震资料品

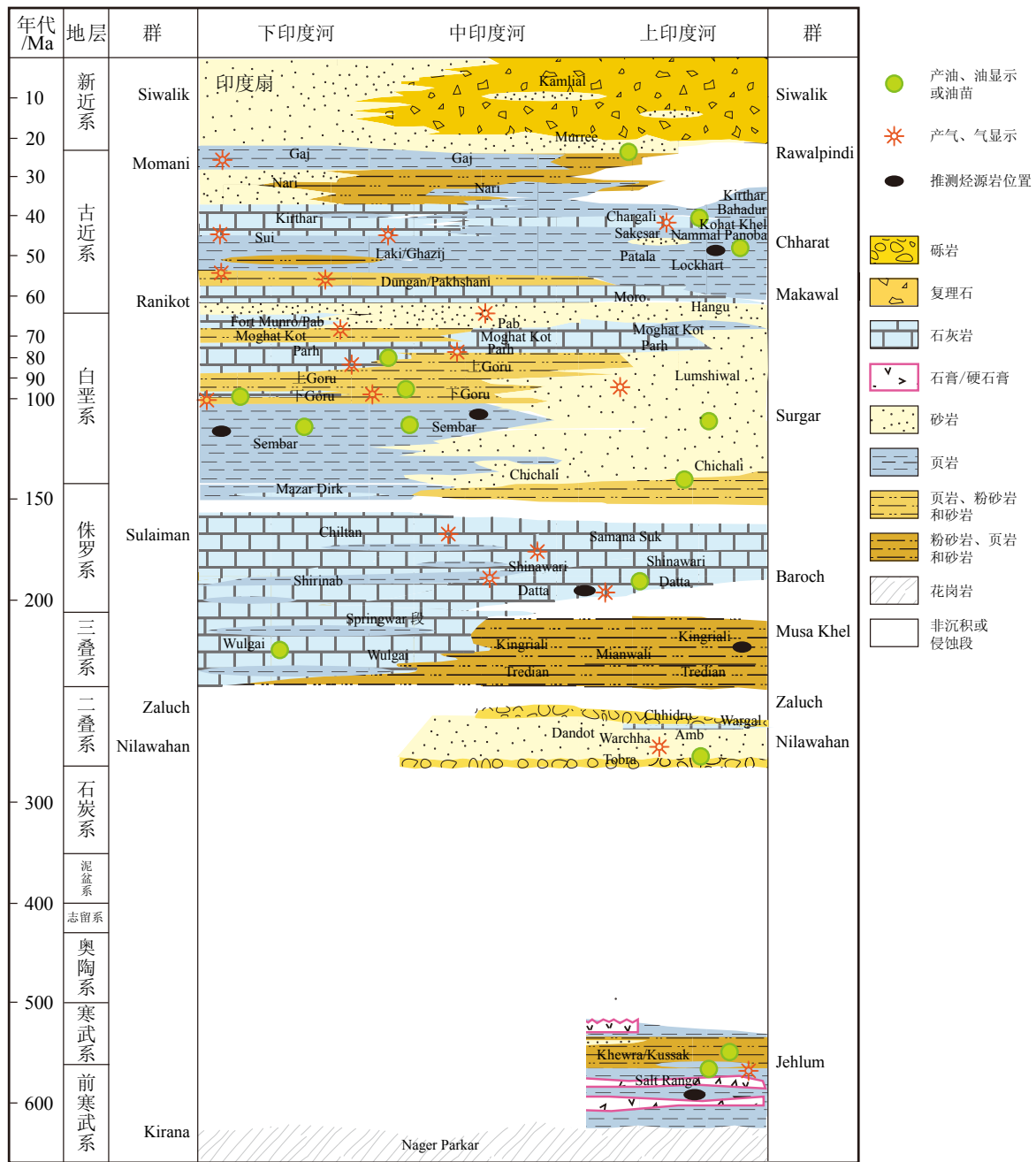


图2 巴基斯坦海域、陆域地层综合柱状图^[19]

Fig.2 Stratigraphic column of offshore and onshore Pakistan^[19]

质相对较差,原因在于晚白垩纪时期研究区广泛发育的火山溢流相沉积,在区域上形成能量屏蔽层,吸收地震波反射,造成火山岩层之下的深部地震反射不清晰,难以判断中生界发育情况。本研究采用针对性处理技术,利用曲波变换多次压制、FXF 剩余多次压制等技术,获得了一批高品质的地震资料成果数据。

研究区水深变化大、海底地形多变,多次波发育特征差异大,根据多次波发育特点不同,采用分区、分段针对性的去多次技术组合进行多次波压

制:①浅水资料多次采用确定性海底多次波预测(DWMP)、表面多次压制(SRME)、高精度拉东方法组合;②深水资料采用表面多次压制、高精度拉东方法组合;③崎岖海底区、强反射界面区残余多次较多,采用多域分频残余多次压制方法。中深层有效反射弱,有效频带较低,需要进行低频补偿。采用自适应去鬼波技术、弱信号恢复(WSR)技术组合,有效提高了中深层成像品质。与老资料相比(图3),成果剖面中深部反射能量和连续性有了明显的提高,该结果为地层对比提供了重要支撑。

3 巴基斯坦海域中生代地层发现

巴基斯坦东部海域印度扇近海盆地的地质研究与油气勘探起步较晚、调查程度较低。由于古新世—始新世以来印度板块与欧亚板块持续碰撞和喜马拉雅山脉的快速隆升,造成印度扇近海盆地上覆巨厚的新生代地层,平均厚度超7000 m。因此,与陆域以中生代地层为主要勘探目的层系不同,巴基斯坦海域油气勘探更多关注新生代层系。此外,由于白垩纪末期德干火山岩层区域性分布,造成以往地震资料品质较差,只能反映 T_0 界面(新生界底界面)之上的地层反射特征,未能揭示中生界的内幕反射,导致地质学者对巴基斯坦海域是否存在中生界地层及其时空分布特征众说纷纭。因此,严重制约了巴基斯坦海域的油气勘探进程。

3.1 地层发现依据

3.1.1 地震反射界面

通过获取的高品质二维地震剖面,发现在 T_0 界面(新生代底界面)之下存在多个地震反射界面(图4)。地震反射同相轴以削截、上超、下超等形式终止于地震反射界面附近。其中, T_0 界面之下发

现广泛的同相轴削截终止现象,表明 T_0 界面为区域重要的构造变革面; K_{12} 界面之上,在盆地或斜坡边缘发育上超终止现象,说明界面之上地层经历过广泛的海侵作用; K_{11} 界面与 T_g 界面之上均发育下超终止现象,表明界面之上经历过大规模海退事件。根据陆域毗邻钻井所揭示,下印度河盆地中生界自下而上曾发生大规模海侵作用,这在研究区地震反射剖面上得到进一步印证。

3.1.2 地震反射波组

研究发现德干火山岩屏蔽层下存在多套能够连续追踪的密集反射波组(图5),对比分析认为,巴基斯坦东部海域中生界存在4套地震反射波组。第1波组:连续性中等,中弱振幅,中高频,双程反射时间约470 ms;第2波组:连续性中等,中强振幅,高频,双程反射时间约500 ms;第3波组:连续性较好,中弱振幅,中频,双程反射时间约460 ms;第4波组:连续性中等,强振幅,中频,双程反射时间约450 ms。上述四套波组在空间上分布不均一,厚度变化较大。根据钻井及地震揭示,巴基斯坦陆域毗邻的下印度河盆地同样发育4套地层(图6),自上而下依次为上白垩统,下白垩统上段,下白垩统下段和侏罗系。其中,上白垩统上段地层地震反射振幅较弱,连续性中等,中频率;上白

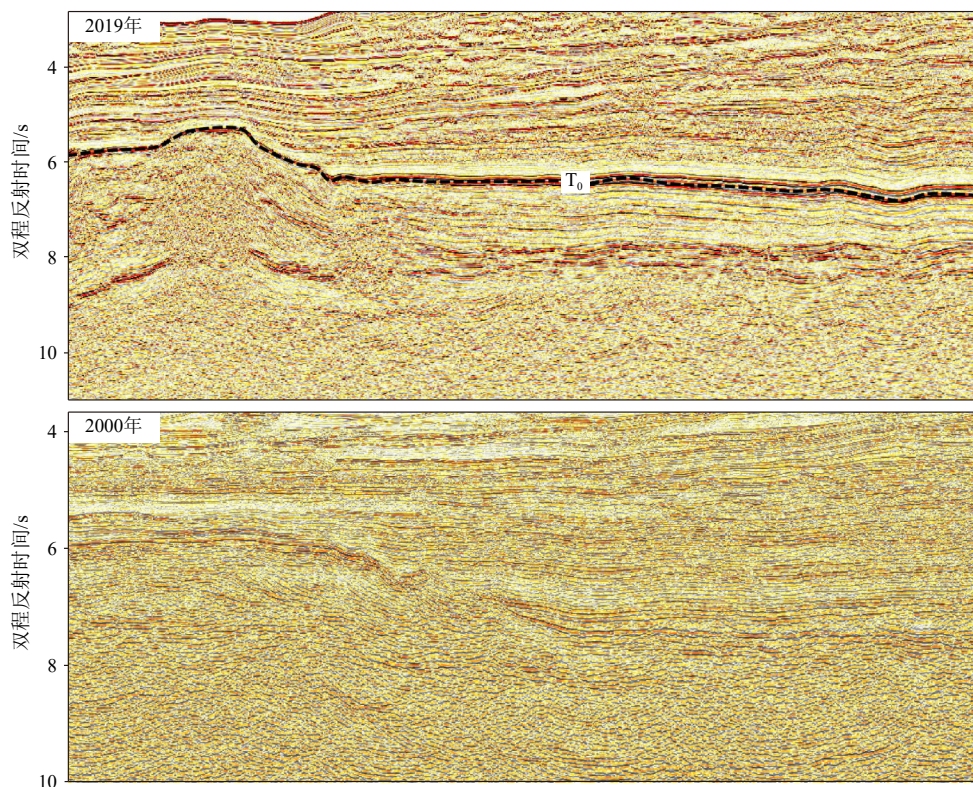


图3 地震采集技术成果剖面对比图

Fig.3 Comparison of seismic profiles using different acquisition technology

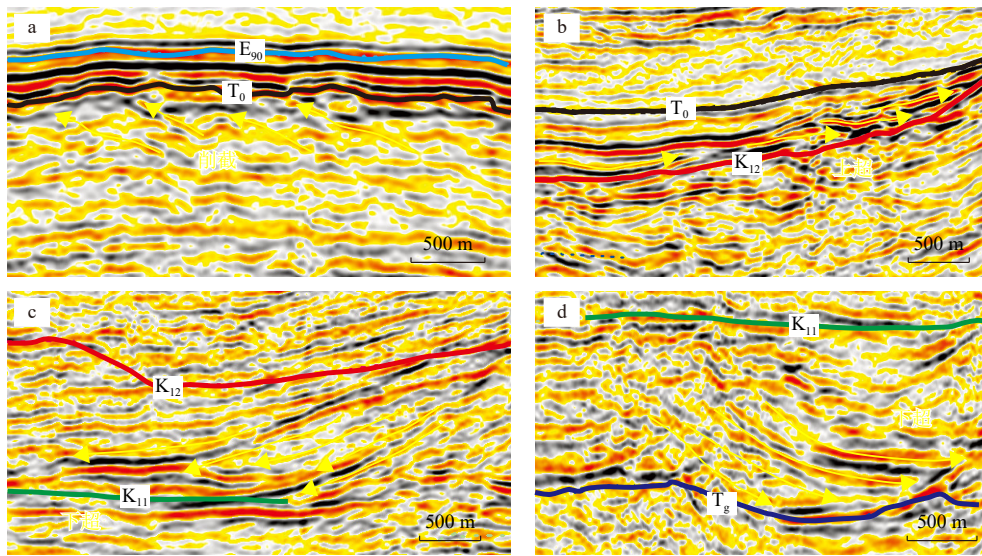


图4 中生界地层典型地震反射终止样式

Fig.4 Typical seismic reflection termination styles in the Mesozoic strata

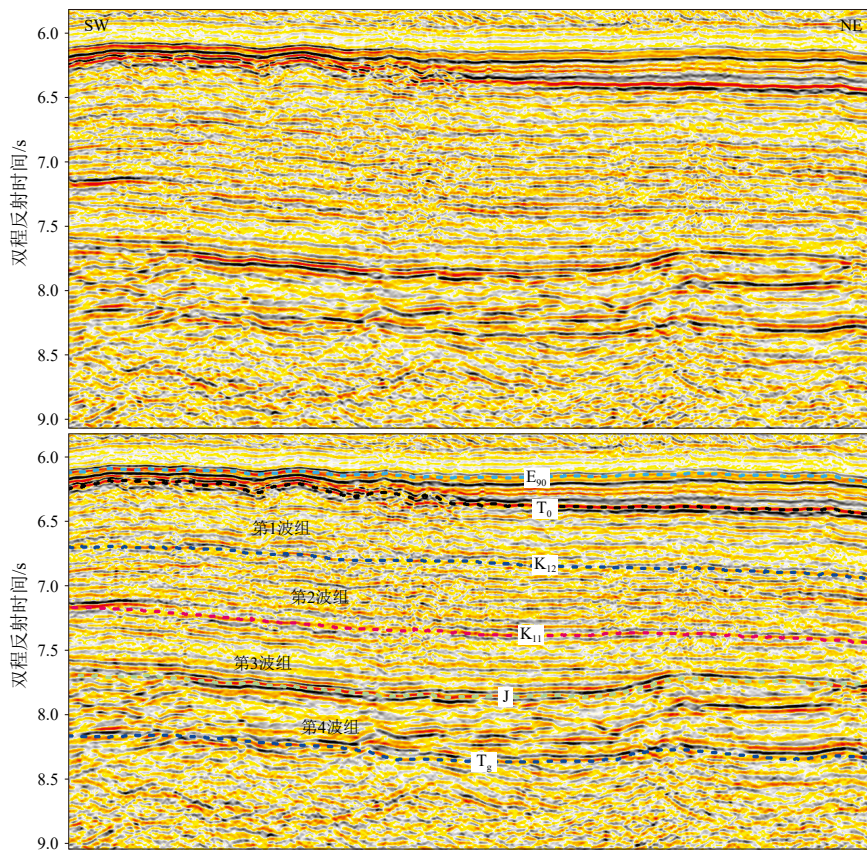


图5 巴基斯坦海域中生界地震层序反射特征

Fig.5 Seismic reflection characteristics of the Mesozoic sequence in the offshore Pakistan

白垩统下段地层地震反射振幅较强,连续性中等,中高频;下白垩统地震反射振幅相对较弱,连续性中等,中频;侏罗系地震反射振幅较强,连续性较好,中高频。整体来看,巴基斯坦东部海域中生界与陆域毗邻下印度河盆地中生界地层地震反射均呈“弱—强—弱—强”的反射结构特征,具有较强

可对比性。

3.1.3 地震层速度

速度场剖面 and 速度谱特征(图7)显示,巴基斯坦东部海域 T_0 (新生代底界面)界面之下,存在一个稳定分布的低速带。 T_0 界面之上,古新统一始新统层速度为 $4000\sim 4500\text{ m/s}$,在浅水区(剖面NW方

向)速度相对较高, 钻井证实为浅水碳酸盐岩台地发育; T_0 界面之下, 存在约 700 m 厚, 较稳定分布的低速带, 层速度为 3500~3700 m/s; 低速带向下, 深部地层层速度突变至 5000 m/s 以上。根据陆域钻井所揭示, 毗邻下印度河盆地中生代白垩系是重要的烃源岩层段, 以海相泥页岩为主, 巴基斯坦南部 Sari 气田、Badin 油田均已证实油气来自该套烃源岩。因此, 巴基斯坦东部海域典型速度场剖面所揭示的 T_0 界面以下的低速带, 一方面证实了巴基斯坦东部海域中生界地层的存在及稳定分布, 另一方面说明陆域白垩系烃源岩在海域同样广泛发育。

3.2 地层发育特征

根据地震剖面反射结构和波组反射特征, 对巴基斯坦东部海域中生代地层进行了精细刻画。从前文所述的地震界面反射特征可知, 研究区中生代自上而下存在 K_{12} 、 K_{11} 、J 和 T_g 四大侵蚀不整合面; 结合波组特征和陆域毗邻中生代地层发育情况, 将巴基斯坦东部海域中生代从上至下划分为第 1、2、3、4 地震层序。

根据东西向典型地震剖面所揭示(图 8), 研究区中生代与新生代地层发育特征具有显著差异, 中生代地层受控于同期活动的强烈伸展断陷作用, 被隆坳相间的构造古地理格局分割在多个规模不等的次级凹陷内部; 相比之下, 新生代地层受断裂活动影响弱, 地层区域性均匀披覆在早期地层之上, 主要受沉积及早期地形影响发生厚度变化。中生代地层内部, 第 4 层序(J— T_g 之间)为断陷初期沉

积的一套地层, 分布范围比较局限, 主要分布在派肯坳陷东南部, 现今索拉斯特拉隆起下面, 向北西方向超覆尖灭, 沉积厚度也由东南向西北减薄(图 a)。第 3 波组(K_{11} —J 之间)、第 2 波组(K_{12} — K_{11} 之间)和第 1 波组(T_0 — K_{12} 之间)为断陷活动强烈期沉积的一套地层, 在研究区内广泛分布, 东南厚、北西薄, 向北和向西超覆, 最大沉积厚度位于研究区东南和北西两个区域, 在派肯坳陷东南部三套地层发育齐全, 西北部只发育第 2 波组、第 1 波组。其中, 第 3 波组、第 2 波组为断陷强烈活动主要发育时期, 在控注断层下降盘可见明显的杂乱楔形体反射, 推测其为与断层活动相关的扇体沉积。第 1 波组发育在断裂活动末期, 在区域上广泛分布, 主要受西北部边界断裂控制。从盆地结构角度, 中生代裂陷早、晚期盆地结构明显不同。早期盆地结构为东南断、北西超的半地堑, 晚期为东南和西北双侧断层控制的地堑(图 8)。

从南北向典型地震剖面来看(图 9), 中生代地层在派肯坳陷内部稳定分布, 厚度变化不大, 北东方向受后期隆起影响地层抬升, 地层受断裂作用影响较小; 南西方向受晚期断裂及隆起作用影响, 地层被切割较为明显。中生代 4 个反射波组在该条剖面上清晰发育, 第 4 波组地震反射上为一套强反射波组, 速度剖面上为一套高速层, 推测为局限盆地环境下的碳酸盐岩和膏岩沉积。第 3 波组地震上为一套相对弱反射波组, 速度剖面上对应低速层, 根据海陆对比和层速度, 推测为大套泥页岩沉积。第 2 波组地震上为一套相对强反射波组, 速度

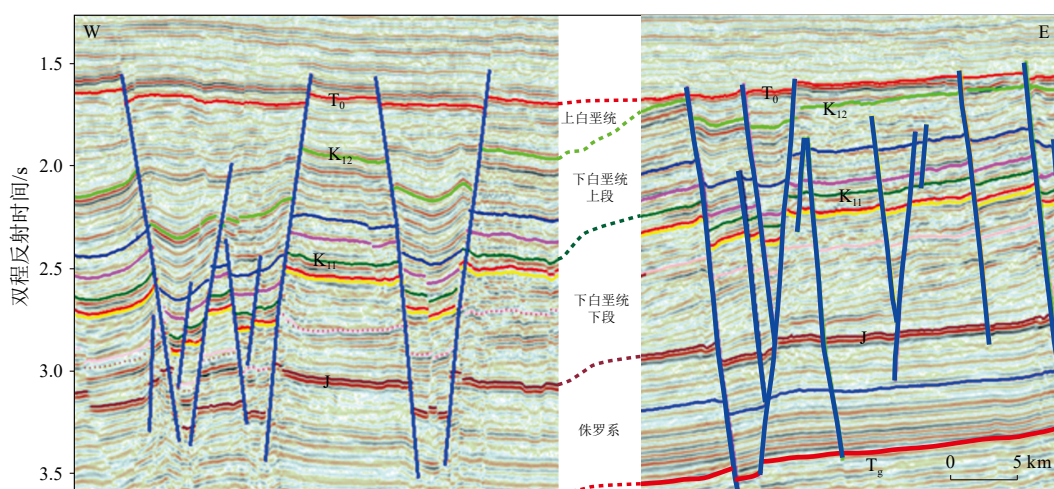


图 6 陆域下印度河盆地中生界地震层序反射特征

据个人通讯。

Fig.6 Reflection characteristics of the Mesozoic sequences in the Lower-Indus Basin

Modified after personal communications.

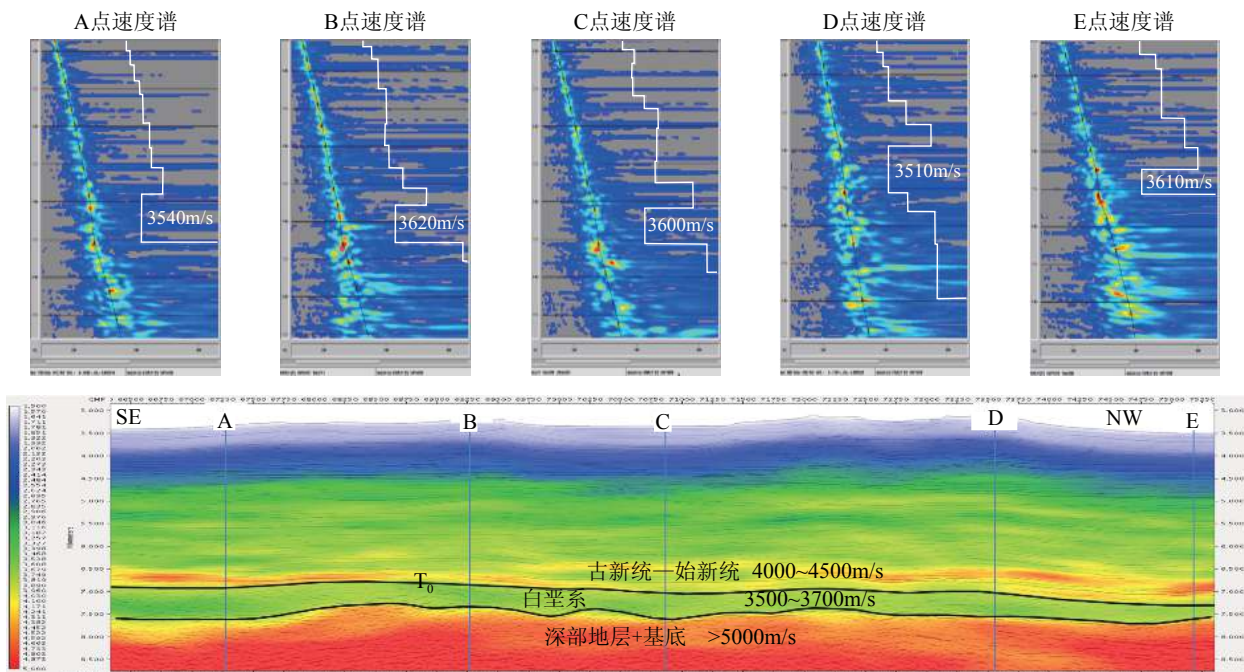


图7 巴基斯坦东部海域典型速度场剖面及速度谱特征

Fig.7 Typical velocity field profile and velocity spectrum offshore Pakistan in the east

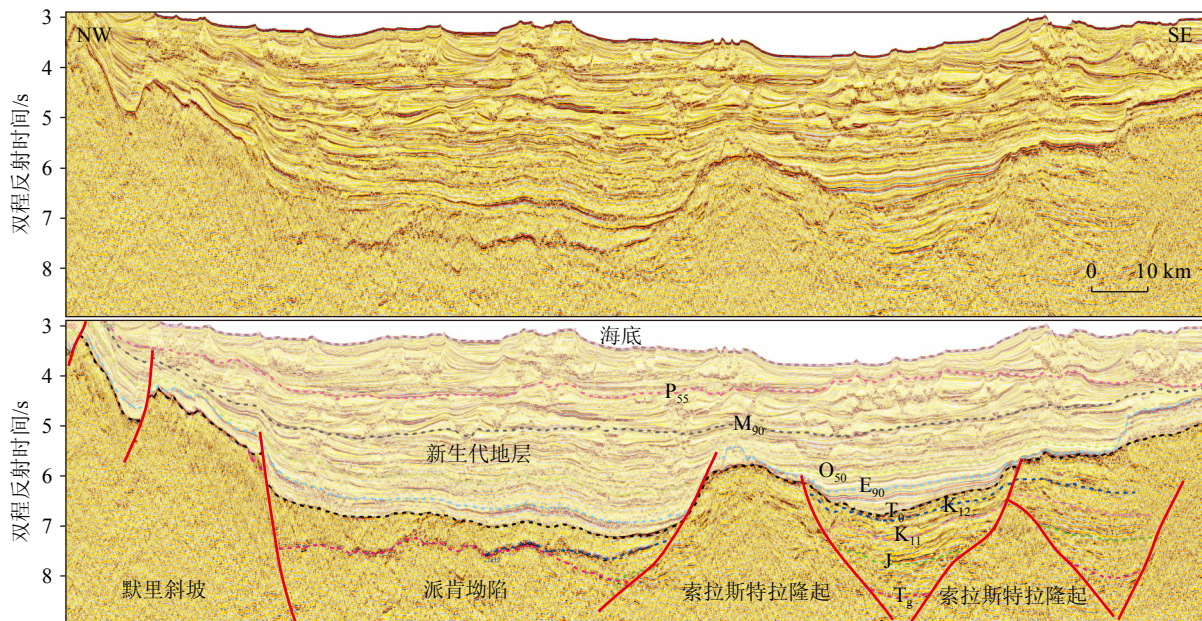


图8 中生界地层东西向发育特征典型地震剖面

Fig.8 Typical east-west seismic profile showing characteristics of the Mesozoic strata

剖面上对应低速层,根据海陆对比和层速度,推测为砂泥互层沉积,偏砂质。第1波组地震上相对弱反射波组,速度剖面上对应低速层,推测为砂泥互层沉积,偏泥质。

3.3 地层分布特征

早中侏罗世始,印度板块西缘发生裂谷作用,研究区逐渐被海水覆盖。研究区内断陷湖盆主要

向北西方向延伸,其中最大的断陷位于索拉斯特拉隆起和默里脊之间,即派肯坳陷内。平面上,巴基斯坦东部海域中生界地层分布厚薄不均,整体厚度800~10000 m,表现为东厚西薄、条带状展布,受索拉斯特拉火山岩隆起及区域断裂作用控制,存在多个区域性沉积中心,最大沉积中心位于研究区东南部,厚度超10000 m,在研究区北部存在次一级沉积中心,最大厚度超4000 m。

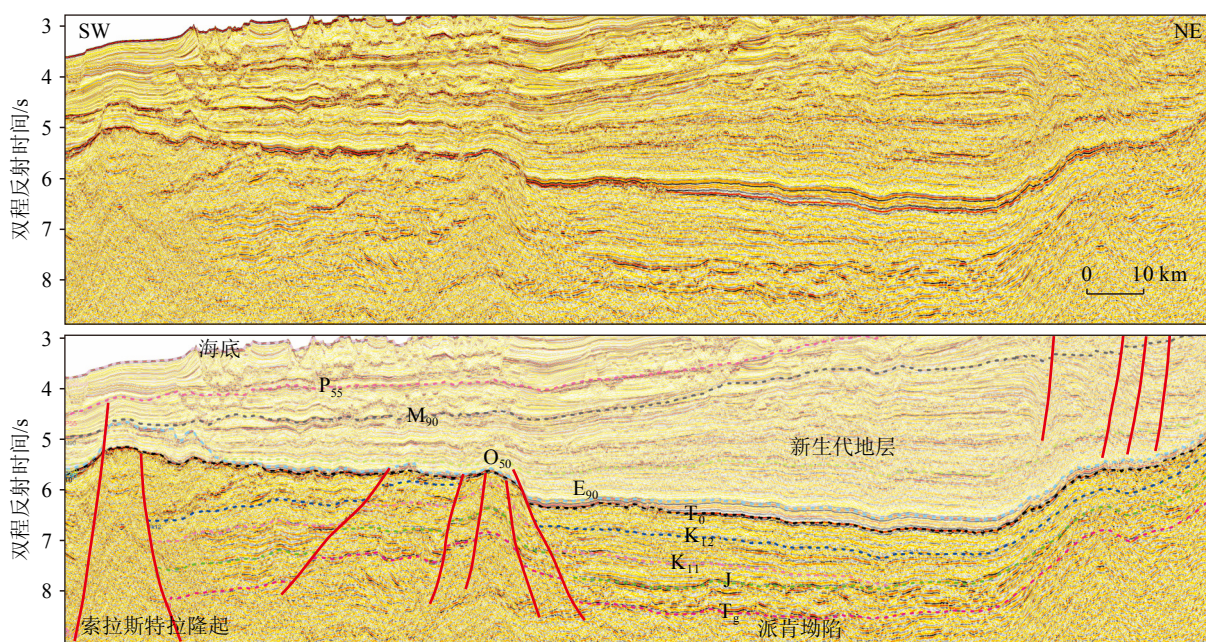


图9 中生界地层南北向发育特征典型地震剖面

Fig.9 Typical north-south seismic profile showing characteristics of the Mesozoic strata

4 油气地质意义

巴基斯坦陆域的印度河盆地烃源岩分析认为主要发育3套烃源岩,自下而上依次为下白垩统下段 Sembar 组海相页岩、下白垩统上段 Goru 组海相页岩以及古近系 Ranikot 浅海相泥岩,其中 Sembar 组页岩和 Goru 组页岩为主力烃源岩^[14]。Sembar 组海相页岩在印度河盆地全区分布,平均厚度 600~800 m(最大厚度 1400 m),有机质丰度(TOC)为 0.5%~3.5%,平均丰度为 1.4%,有机质类型为 II、III 型,镜质体反射率(R_o)全区基本上都大于 0.6,达到生油窗,只有盆地东部小于 0.6,印度河盆地南部 Sari 气田、Badin 油田等均已证实油气来自该套烃源岩;下 Goru 组海相页岩 TOC 最大值达到 2.55%,厚度介于 300~1200 m,已进入生油气阶段,推测为印度河盆地南部的烃源岩^[4-5]。海上白垩系烃源岩发育层段在地震上主要表现为空白反射或弱振幅,中低频、低连续^[20]。中生界烃源岩层段在地震速度上表现为大套低速层,速度 3500~3600 m/s。白垩系烃源岩在派肯坳陷内主要有两个生烃排烃中心,一个位于坳陷的东南部,由多个次一级的洼陷组成,洼陷长轴方向为 NW-SE 向,总体厚度 500~1700 m,另一个位于坳陷的西北部,紧邻陆架边缘,呈 NE-SW 向展布,厚度 400~800 m。

本次研究在新生代底部发现大面积广泛分布的中生代地层,尤其是在近陆棚区和索拉斯特拉隆

起中生界地层分布面积广而厚,早期断陷期断裂基本没有断穿该玄武岩,因此对下覆地层生成的油气起到了很好的遮挡作用,造成中、新生代形成上下两套含油气系统。而在派肯坳陷内,由于德干玄武岩呈零星分布,对下覆油气封盖作用有限,晚白垩世烃源岩生成的油气可以通过断裂很好的运输到默里斜坡上的背斜圈闭里,形成“古生新储”式油气藏。通过本次区域地质研究和油气地质评价及成藏模式认识,未来勘探的重点和研究重点可扩展至印度扇近海盆地下覆中生界地层的岩性、地层展布和区内断裂尤其是控注断裂的分析,同时结合陆上地层和钻井情况,加强区域地层对比研究,有效扩展了该区油气勘探前景。

5 结论

(1)通过地震反射界面刻画、地震反射波组特征和层速度分析,明确了巴基斯坦东部海域 T_0 (新生代底界面)之下,存在 4 个区域性不整合面,可以根据反射特征划分出 1、2、3、4 四套地震波组,反射特征与陆域毗邻下印度河盆地中生代地层反射特征具有较强可对比性,此外速度场剖面揭示 T_0 界面之下,存在稳定分布的低速带,同样证实中生界地层在研究区的广泛分布。

(2)研究区中生代地层受控于同期活动的强烈伸展断陷作用,被隆坳相间的构造古地理格局分割在多个规模不等的次级凹陷内部。整体厚度 800~

10000 m, 表现为东南厚、北西薄, 向北和向西超覆, 最大沉积厚度位于研究区东南和北西两个区域。

(3) 本次研究在新生界底部发现大面积广泛分布的中生代地层, 该套地层在陆域毗邻下印度河盆地是重要的烃源岩层, 晚白垩世烃源岩生成的油气可以通过断裂运输到默里斜坡上的背斜圈闭里, 形成“古生新储”式油气藏, 有效拓展了该区未来油气勘探方向和潜在价值。

参考文献 (References)

- [1] Carmichael S M, Akhter S, Bennett J K, et al. Geology and hydrocarbon potential of the offshore Indus Basin, Pakistan[J]. *Petroleum Geoscience*, 2009, 15(2): 107-116.
- [2] Shahzad K, Betzler C, Qayyum F. Controls on the Paleogene carbonate platform growth under greenhouse climate conditions (Offshore Indus Basin)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 101: 519-539.
- [3] Clift P, Gaedicke C. Accelerated mass flux to the Arabian Sea during the middle to late Miocene[J]. *Geology*, 2002, 30(3): 207-210.
- [4] 李森, 梁杰, 龚建明, 等. 巴基斯坦东部海域中-新生代沉积研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(2): 1-13. [LI Sen, LIANG Jie, GONG Jianming, et al. Research progress of the Meso-Cenozoic sedimentary evolution in eastern Pakistan sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(2): 1-13.]
- [5] 王改云, 刘金萍, 简晓玲, 等. 印度河扇近海盆地沉积演化特征[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(4): 31-38. [WANG Gaiyun, LIU Jinping, JIAN Xiaoling, et al. Sedimentary evolution characteristics of offshore Indus river fan basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(4): 31-38.]
- [6] Clift P, Gaedicke C, Edwards R, et al. The stratigraphic evolution of the Indus Fan and the history of sedimentation in the Arabian Sea[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2002, 23(3): 223-245.
- [7] Ogawa K, Back S. Seismostratigraphic and sedimentological characterization of deepwater channel systems on the NW Borneo margin: Sediment sources and structurally-controlled routing system[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 232: 105126.
- [8] Khan M, Liu Y K. Geodynamic evolution of the offshore Indus Basin Pakistan: the western Indian Plate Passive Continental Margin[J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 217(2): 1366-1386.
- [9] 陈斌. 青藏高原及其周边区域夏季上对流层水汽变化和输送特征研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009. [CHEN Bin. The study on the upper troposphere water vapor change and transportation characteristics over Tibetan Plateau and its adjoint regions in boreal summer[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2009.]
- [10] Talling P J, Wynn R B, Schmidt D N, et al. How did thin submarine debris flows carry boulder-sized intraclasts for remarkable distances across low gradients to the far reaches of the Mississippi fan?[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(10): 829-851.
- [11] 刘瑞璇, 鹿化煜, 王珏, 等. 东阿拉伯海拉克希米盆地浊流沉积序列的粒度变化及其对中更新世气候转型的响应[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(5): 1120-1129. [LIU Ruixuan, LU Huayu, WANG Yao, et al. Grain size analysis of a depositional sequence in the Laxmi Basin (IODP Hole U1456A, Arabian Sea) reveals the Indian monsoon shift at the Mid-Pleistocene Climatic Transition[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(5): 1120-1129.]
- [12] Gaedicke C, Schlüter H U, Roeser H A, et al. Origin of the northern Indus Fan and Murray Ridge, Northern Arabian Sea: interpretation from seismic and magnetic imaging[J]. *Tectonophysics*, 2002, 355(1-4): 127-143.
- [13] 廖晶, 龚建明, 陈建文, 等. 印度扇近海盆地重力滑动构造新发现[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(6): 76-79. [LIAO Jing, GONG Jianming, CHEN Jianwen, et al. New discovery of gravity gliding structure in the offshore Indus Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(6): 76-79.]
- [14] 刘金萍, 王改云, 简晓玲, 等. 巴基斯坦印度扇近海盆地油气地质条件分析[J]. *地质学刊*, 2022, 46(4): 351-357. [LIU Jinping, WANG Gaiyun, JIAN Xiaoling, et al. Analysis of petroleum geological condition in offshore Indus Basin, Pakistan[J]. *Journal of Geology*, 2022, 46(4): 351-357.]
- [15] 李林涛, 李运振, 赵厚祥, 等. 印度河前陆盆地油气富集规律与成藏主控因素[J]. *石油天然气学报*, 2015, 37(9): 7-13. [LI Lintao, LI Yunzhen, ZHAO Houxiang, et al. The oil and gas enrichment patterns and main controlling factors in the Indus foreland basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2015, 37(9): 7-13.]
- [16] 钱凯, 孙晓惠, 许小琼, 等. 下印度河盆地石油地质、油气分布及油气富集区特征[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(12): 1797-1809. [QIAN Kai, SUN Xiaohui, XU Xiaoqiong, et al. Petroleum geology, hydrocarbon distribution and accumulation fairway study in the Lower Indus Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(12): 1797-1809.]
- [17] 朱泽栋, 石雪峰, 康弘男, 等. 深水油气藏地质特征研究——以印度扇盆地 UEPL 区块为例[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2022, 42(2): 100-102. [ZHU Zedong, SHI Xuefeng, KANG Hongnan, et al. Geological characteristics of deepwater oil and gas reservoirs: A case study of the UEPL block in the Indian fan basin[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2022, 42(2): 100-102.]
- [18] Carmichael S M, Akhter S, Bennett J K. 巴基斯坦印度河盆地海域地质概况和油气潜力[J]. 张振, 译. *海洋地质*, 2019(3): 1-11. [Carmichael S M, Akhter S, Bennett J K. Geological overview and oil and gas potential in the Pakistan Indus Basin sea area[J]. ZHANG Zhen, trans. *Marine Geology*, 2019(3): 1-11.]
- [19] Wandrey C J, Law B E, Shah H A. Sembar Goru/Ghazij composite total petroleum system, Indus and Sulaiman-Kirthar geologic provinces, Pakistan and India[M]. Reston V A, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2004.
- [20] UI E H, Ji Y, Hidayat U, et al. Architectural complexities and morphological variations of the indus fan and its elements: Understanding of the turbidite system through seismic characterization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 150.