



印度扇近海盆地重磁场融合与油气盆地构造解析

张菲菲, 韩 波, 朱莹洁, 廖 晶, 王万银

Tectonic division of the offshore Indus Basin by integrated gravity and magnetic study

ZHANG Feifei, HAN Bo, ZHU Yingjie, LIAO Jing, and WANG Wanyin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024070102>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27-41

南黄海盆地崂山隆起构造特征与油气勘探方向

Structural characteristics and hydrocarbon exploration prospect of the Laoshan uplift in the South Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 131-143

巴基斯坦东部海域中生代地层发现与油气意义

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

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(3): 115-124

东海陆架盆地南部深部地层格架与油气资源潜力

Deep stratigraphic framework and hydrocarbon resource potential in the Southern East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 158-171

青岛海洋地质研究所45年来海域油气资源调查进展

Progress in marine oil and gas survey in Qingdao Institute of Marine Geology over the past 45 Years

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(3): 1-22

东非鲁伍马盆地深水沉积体系及油气勘探意义

Deep water depositional system in Rovuma Basin, East Africa and its bearing on hydrocarbon exploration

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 173-180



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张菲菲, 韩波, 朱莹洁, 等. 印度扇近海盆地重磁场融合与油气盆地构造解析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 132-143.

ZHANG Feifei, HAN Bo, ZHU Yingjie, et al. Tectonic division of the offshore Indus Basin by integrated gravity and magnetic study[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 132-143.

印度扇近海盆地重磁场融合与油气盆地构造解析

张菲菲^{1,2,3}, 韩波², 朱莹洁², 廖晶², 王万银^{1,3,4}

1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

3. 海洋油气勘探国家工程研究中心, 北京 100028

4. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

摘要:印度扇近海盆地是巴基斯坦海域重要的油气勘探目标区,但盆地尚处于勘探早期,受限于勘探资料的数量和品质,对盆地内部结构认识不够清晰,制约了该地区油气调查工作的进一步深入。以新一代卫星测高重力异常数据(V29.1)和EMGA2地磁网格数据(V2)为基础,利用重、磁场融合技术得到印度扇近海盆地及邻区重磁场融合结果,并对该研究区盆地内部油气构造格架进行研究。通过研究表明,重磁场融合结果能够很好刻画印度扇近海盆地内部结构:低磁低重对应盆地沉积拗陷区,高磁低重对应岩浆岩侵入的拗陷区,高磁高重对应盆地隆起区,低磁高重对应碳酸盐岩台地区;结合钻井和二维地震资料,推断印度扇近海盆地呈现“三拗两隆”的构造格架,且受不同期次构造运动的影响,盆地“东西分块”特征明显。本次新划定盆地西南部的西部拗陷、西部隆起,南部拗陷面积增大,盆地南缘位于帕拉蒂纳脊附近。该研究成果为印度扇近海盆地及邻区基础地质、油气勘探研究提供依据。

关键词:重磁场融合;构造格架;油气勘探;印度扇近海盆地

中图分类号:P738

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024070102

Tectonic division of the offshore Indus Basin by integrated gravity and magnetic study

ZHANG Feifei^{1,2,3}, HAN Bo², ZHU Yingjie², LIAO Jing², WANG Wanyin^{1,3,4}

1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

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

3. National Engineering Research Center of offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100028, China

4. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: The offshore Indus Basin (OIB) is an important oil and gas exploration target area in Pakistan sea area. The exploration of the basin, limited by the quantity and quality of exploration data, is still in the early stage, which restricts the oil and gas investigation in this area. Based on the new generation of satellite altimetry gravity anomaly data (V29.1) and magnetic data from the Earth Magnetic Anomaly Grid (EMAG2-V2), the integrated gravity and magnetic field technique was applied to study the tectonic framework of the OIB, with which the integrated gravity and magnetic field was established and the structure of the OIB was interpreted. Results show that the areas of low-value magnetic and low-value gravity correspond to the sedimentary depressions, while those of high-value magnetic and low-value gravity correspond to the depressions with magma intrusions, whereas the areas of high-value magnetic and high-value gravity correspond to the uplift areas of the basin, and the areas of low-value magnetic and high-value gravity correspond to the carbonate platforms. Combined with the ocean drilling and 2D seismic profile data, three depressions and two uplifts in E-W in the OIB were inferred. Based on the previous tectonic division, the western depression and the western uplift in the southwestern corner of the basin were re-defined, the scope of the southern depression was expanded, and the southern edge of the basin was extended to near the Palatina ridge. This study provided evidence for basic geological and oil-gas exploration in the OIB and its adjacent areas.

Key words: integrated gravity and magnetic field; tectonic framework; oil and gas exploration; offshore Indus Basin

资助项目:中国地质调查局地质调查专项(DD20230643, DD20191003);国家自然科学基金项目“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);山东省自然科学基金“利用变参数界面反演方法圈定渤海古陆核”(ZR202112030094)

作者简介:张菲菲(1983—),女,博士,副研究员,主要从事从事海洋重磁数据处理与解释研究, E-mail: ffeizhang@126.com

通讯作者:王万银(1962—),男,博士,教授,主要从事重磁位场理论及应用研究, E-mail: wwy7902@chd.edu.cn

收稿日期:2024-07-01; **改回日期:**2024-08-19. 周立君编辑

印度扇位于印度板块、阿拉伯板块和欧亚板块交汇处^[1-2], 地处默里脊系统东南部, 是印度河入海形成的巨型重力流水下扇, 印度扇面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是世界上第二大海底扇^[3-4]。前人结合重磁资料, 将巴基斯坦海域划分为多个次级构造单元, 由东南向西北依次为印度扇近海盆地、默里脊系统、阿曼深海平原、马克兰增生楔^[5-7](图 1), 区内构造演化过程复杂, 是研究板块构造运动及圈层相互作用的理想区域, 同时也是海域油气勘探的潜力区。

巴基斯坦海域油气勘探始于 20 世纪 70 年代, 主要勘探区域为西部的马克兰增生楔和东部的印度扇近海盆地。由于该地区实际测量工作开展较困难, 缺乏实测数据, 因此油气勘探程度比较低^[8-10]。目前巴基斯坦近海已有钻井 17 口^[8-9], 仅印度扇盆地内派肯-1(PakCan-1)井在浅水陆架区钻遇非商业性天然气, 其他均未发现油气。通过巴基斯坦海域二维多道地震、钻井等地质资料, 研究人员综合分析了巴基斯坦海域油气盆地的构造演化^[3,5-8]、油气地质条件^[9-10]、盆地地层分布特征^[11-12], 初步探讨了油气勘探的方向, 指出印度扇近海盆地油气成藏条件优越, 是巴基斯坦海域油气勘探目标区。

印度扇近海盆地是中新世裂谷型被动大陆边缘盆地^[11], 东部边界为印度大陆西北缘, 西部边

界为默里脊系统, 南部以拉克希米脊为边界。已有研究中划分了盆地的二级构造单元, 整个盆地呈现“两隆一坳”构造格局^[4-5,9-10], 主要包括南默里脊、派肯坳陷和索拉斯特拉隆起(图 1), 其中派肯坳陷进一步划分为派肯凹陷和索门纳斯脊。盆地内新生界沉积地层巨厚, 最大厚度可达 11 km, 是油气勘探的深水区, 具有较好的油气勘探前景。受限于实测数据的采集密度低和数据质量差, 印度扇近海盆地油气构造区划比较粗糙, 仅划分了二级构造单元, 对盆地内部的次级油气构造单元划分和展布关系研究较少, 很大程度上限制了该盆地的油气资源潜力调查评价工作。

本文利用新一代高精度卫星测高重力数据和 EMAG2 世界地磁网格数据, 采用低纬度化极、位场分离、重磁融合等技术得到相应的重磁场处理结果, 开展印度扇近海盆地(图 1 红色框范围)重磁场特征及油气构造研究。结合前人研究成果, 刻画盆地隆坳格架, 圈定油气远景区, 为该区域后续油气勘探提供技术支撑。

1 区域地质背景

印度扇近海盆地位于巴基斯坦专属经济区内,

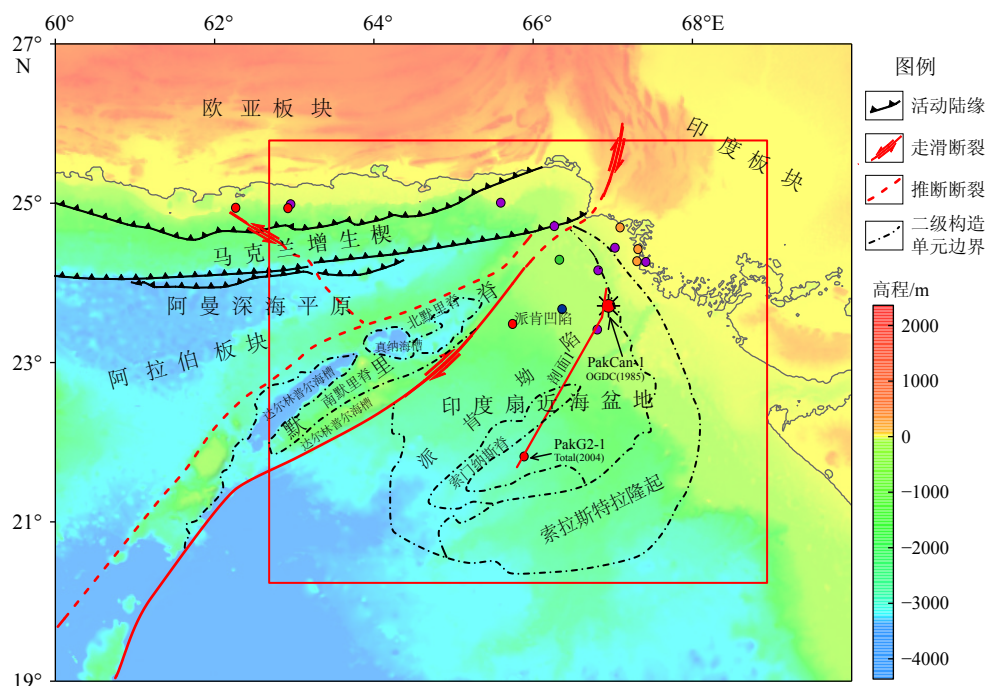


图 1 印度扇近海盆地及邻域构造单元划分示意图^[5,8]

红色实线框为研究区, 圆点为钻井位置。

Fig.1 Schematic diagram of tectonic division in the offshore Indus Basin and adjacent areas^[5,8]

Red frame is the study area, and the dots are the drilling positions.

由浅水陆架区向深水区呈 SN 向延伸,水深为 1000~4500 m,盆地整体近似椭圆形分布^[4],面积约 6×10⁴ km²。根据钻井资料和海陆对比结果,印度扇近海盆地内主要发育中新世地层。印度扇近海盆地中 PakG2-1 井揭示盆地内新生代地层的分布特征(图 2),新生界盆地基底为晚白垩世末形成的德干玄武岩^[1,4,11],其上发育一系列浅海碳酸盐岩台地,沉积地层以泥岩、页岩、砂岩为主,中新世以来发育大型复合水道体系^[1,4,11]。通过最新的高品质二维地震剖面解释^[11],揭示了盆地内广泛分布中生代地层,主要包括侏罗系和白垩系,受控于同期构造活动影响,被分割成多个规模不等的次级凹陷构造,地层受德干火山岩破坏影响明显^[11]。

印度扇近海盆地形成与印度板块、欧亚板块及阿拉伯板块之间的构造演化息息相关,盆地经历了复杂的构造变形期次。长期以来,众多学者对印度扇近海盆地的研究集中于新生代盆地,对德干玄武岩之下的中生代盆地认识甚少。根据前人研究结果,将新生代盆地演化划分为 3 个构造演化阶段^[4-5]: ① 盆地裂陷期:晚白垩世末期到早古新世,伴随大陆架裂解发生了大规模岩浆活动,形成德干玄武岩,索门纳斯脊的玄武岩厚度可达 7000 m; ② 盆地热沉降期:古新世到始新世为盆地主要沉积期,派肯凹陷内沉积了巨厚古新统一始新统泥页岩,在德干火山岩基底上发育形成了碳酸盐岩台地和生物礁建造^[4-5]; ③ 印度扇发育期:渐新世至第四纪,随着印度板块与欧亚板块的碰撞拼合,大量沉积物进入印度扇近海盆地,在盆地内堆积形成印度扇巨层

序^[1,3]。在盆地近端发育大规模的水道-堤岸沉积体系^[5],层厚度整体从 NE 向 SW 呈现减薄趋势。

2 数据及方法

2.1 数据

本次研究使用的重力数据源于美国 Scripps 海洋研究所发布的卫星测高重力数据(SS V29.1)^[13-15](图 3),它是利用卫星测高数据反演得到的自由空间重力异常。该数据体在海域的数据网度为 1'×1',总精度可以达到 3.03×10⁻⁵ m/s²,局部地区接近 1.00×10⁻⁵ m/s²^[16-17],可以满足 1:50 万比例尺地质构造研究需求;在陆域的数据网度为 5'×5',总精度可达 4.13×10⁻⁵ m/s²^[17]。ΔT 磁力异常来源于 EMAG2 地磁网格数据库(V2)^[18-19](图 4),该数据体由海洋磁力测量、航空磁力测量及卫星磁力测量数据融合编制而成,是相对于大地水准面以上 4 km 的磁力数据,由 NGDC(National Geographic Data Center)发布,空间分辨率为 2'×2'^[19]。上述数据库中的重、磁数据在海域区域构造、油气勘探、火成岩识别等方面得到广泛应用^[20-25]。

为满足重力数据处理需求,收集了研究区内的地形数据。地形高程数据来源于美国国家海洋和大气局下属的国家地理数据中心发布的地形高程数据,该数据体包含了海洋水深数据,数据网度为 15"×15",是目前使用最为广泛的高程数据之一,可以满足重力布格校正的精度需求。

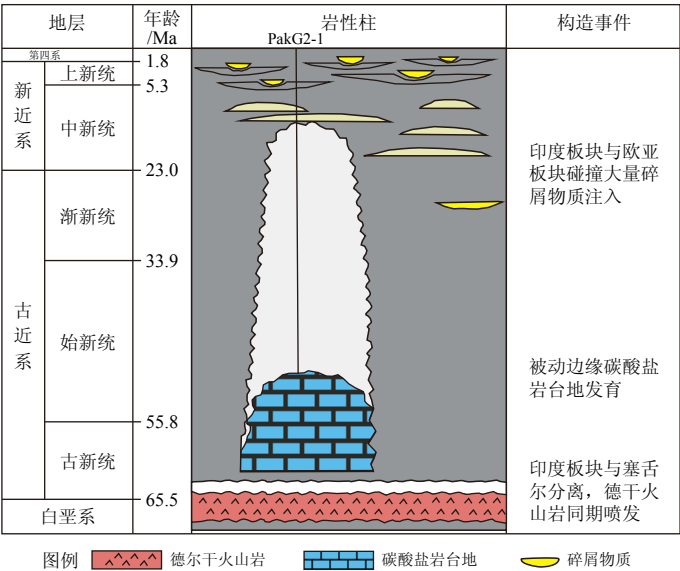


图 2 印度扇近海盆地地层柱状图^[1]

Fig.2 Schematic stratigraphic column of the offshore Indus Basin^[1]

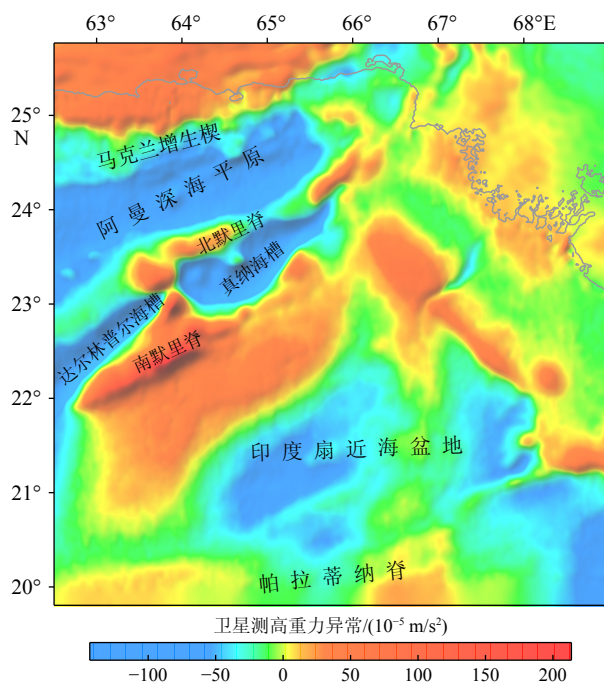
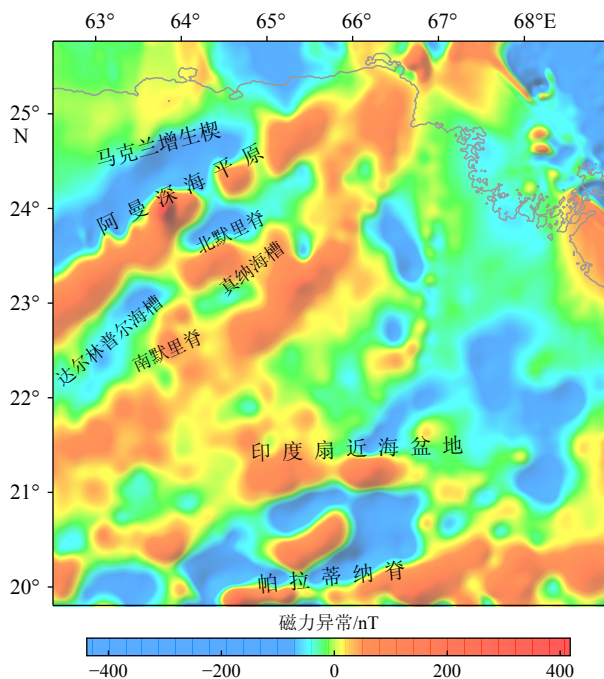


图 3 印度扇近海盆地卫星测高重力异常图

Fig.3 Map of the satellite altimetry gravity anomaly in the offshore Indus Basin

图 4 印度扇近海盆地 ΔT 磁力异常图Fig.4 Map of the ΔT magnetic anomaly in the offshore Indus Basin

2.2 方法

本文以重、磁融合场分区成果为基础, 结合已知油气资源信息的综合地质-地球物理解释方法进行油气盆地构造格架研究。为了消除干扰信息, 获

得更丰富的地质认识, 需采用相关技术对重、磁异常进行处理, 具体包括:

(1) 通常卫星测高重力数据存在噪声问题, 使用最小曲率噪声压制方法进行数据去噪处理, 根据前人研究结果^[16], 该方法可以有效压制噪声, 保留原始数据的有用信息。本次采用最小曲率叠加步长隐式迭代格式对卫星测高重力数据进行噪声压制处理, 选择的迭代步长为 1, 迭代次数为 5 次。此外, 研究区位于海陆交互区, 为了消除地形起伏和海水层对重力异常的影响, 利用广义地形改正方法^[26]对卫星测高重力异常进行地形改正得到研究区的布格重力异常。计算过程中, 取地壳平均密度 $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 海水密度 $1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 地形校正半径 166.7 km。

(2) 为了提高 ΔT 磁力异常的分辨率, 采用向下延拓方法^[27]将其延拓至海平面处, 得到海平面高度的 ΔT 磁力异常。该研究区位于低纬度地区, 磁化倾角范围为 $29.6^\circ \sim 41.1^\circ$, 受斜磁化的影响, ΔT 磁力异常正值与其对应的磁性体会发生水平位置上的偏移, 这对正确认识磁性体造成困难, 通常对其采取化极措施消除斜磁化影响。本次采用全变倾角化极技术^[28]计算得到研究区的化极磁力异常, 该方法能够根据研究区内地磁倾角和地磁偏角的变化, 自适应选择地磁倾角对磁力异常数据进行化极处理, 在中低纬度地区有很好的适用性。

(3) 为了更加准确获取地质体的异常特征, 需要对局部重、磁异常进行信息提取, 使用最小曲率位场分离方法对布格重力异常和化极磁力异常进行场分离^[29-30], 计算得到研究区的剩余布格重力异常和剩余化极磁力异常。根据研究区内重磁异常变化趋势, 最小曲率位场分离计算中选择的迭代步长为 5, 迭代次数为 50 次。

(4) 地质构造的形成、发育经历了复杂的地质历史, 地球内部磁性和密度特征会随构造运动被改造, 不同地质构造在密度和磁性分布上存在差异性。利用重力异常或磁力异常单独解释, 获得地质构造在密度或磁性方面的结果, 而重磁场融合结果是地质体的密度和磁性的综合体现。采用重、磁场融合技术^[31-32]将剩余布格重力异常和剩余化极磁力异常进行场融合, 研究重磁场融合结果的分区特性。

3 结果

3.1 重力异常特征

印度扇近海盆地及其邻区卫星测高重力异常

(图3)的幅值为 $(-143.30 \sim 213.70) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 异常特征反映了研究区内区域构造的展布情况, 在陆地区、海脊及岩浆岩分布区表现为高重力异常, 海盆、海槽及盆地地区以低重力异常为主。布格重力异常(图5)的幅值为 $(-54.72 \sim 286.70) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 由陆区到海区重力异常值表现为由低到高逐步抬升的特点, 反映了深部地壳构造的变化特征。为了进一步得到反映局部构造的重力异常, 计算得到研究区内剩余布格重力异常(图6), 异常幅值为 $(-70.33 \sim 79.44) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。剩余布格重力异常能够清晰反映盆地内部的密度分布特征, 对构造边界的刻画更加清晰。

在卫星测高重力异常图上(图3), 陆区为相对高重力异常, 东西海岸重力异常特征有所区别, 其中东部海岸为低缓高重力异常, NW走向, 由陆到海表现为高低相间平缓过渡特征; 西部海岸为高重力异常, 近EW走向, 由陆及海表现为陡峭的重力异常梯级带特征, 反映该区域的板块俯冲拼合的构造特征。阿曼深海平原、达尔林普尔海槽、真纳海槽为构造凹陷区, 表现为明显的低重力异常, 北默里脊和南默里脊为构造隆起区, 表现为高重力异常, 不同构造之间为重力异常梯级带, 受阿拉伯板块构造运动方向影响, 重力异常走向为NE向。印度扇近海盆地表现为高低相间重力异常特征, 整体表现为“东西分块”, 东部以NW向重力异常为主, 西部以NE和NEE向为主。

研究区布格重力异常走向反映了该地区不同板块的构造走向(图5), 西北部马克兰增生楔及北部陆区属于欧亚板块, 异常走向为近EW向; 研究区东北部为印度板块, 异常走向为NW向; 阿曼深海平原和默里脊系统的异常走向为NE向。剩余布格重力异常反映印度扇近海盆地整体呈现三角形(图6), 盆地内部“东西分块”特征明显, 以中部NW向高重力异常带为界, 东部为低重力异常区, 呈NW走向, 西部重力异常以NE、NEE向为主, 高低重力异常相间分布。默里脊系统表现为明显的高低相间重力异常特征, 海槽区为低重力异常, 两侧海脊区为高重力异常条带, 北默里脊异常宽度大于南默里脊。阿曼深海平原以低重力异常为主, 局部分布零星串珠状高重力异常圈闭, 推测为岩浆岩分布。

3.2 磁力异常特征

印度扇近海盆地 ΔT 磁力异常幅值为 $-438.40 \sim 417.78 \text{ nT}$ (图4), 受斜磁化影响, 磁力异常与构造单

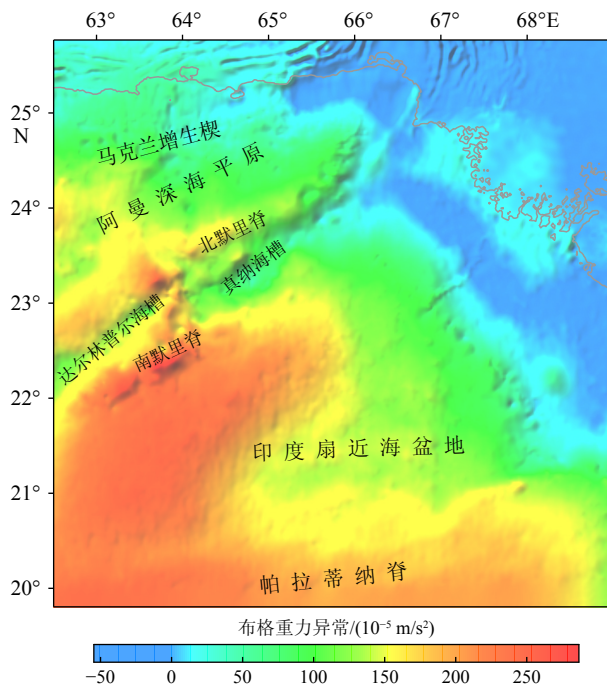


图5 印度扇近海盆地布格重力异常图

Fig.5 Map of the Bouguer gravity anomaly in the offshore Indus Basin

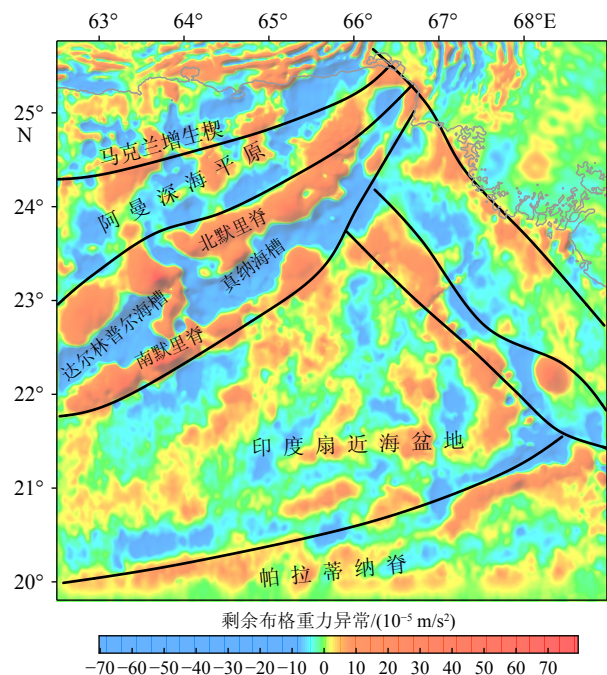


图6 印度扇近海盆地剩余布格重力异常图

Fig.6 Map of the residue Bouguer gravity anomaly of the offshore Indus Basin

元位置对应存在偏差, 例如北默里脊对应负磁力异常, 而真纳海槽对应正磁力异常。经过化极后, 磁力异常位置发生了偏移, 化极磁力异常幅值(图7)为 $-531.63 \sim 497.22 \text{ nT}$, 磁力异常与已知构造的对应关系更加明确, 异常走向及特征分布更为明显。剩

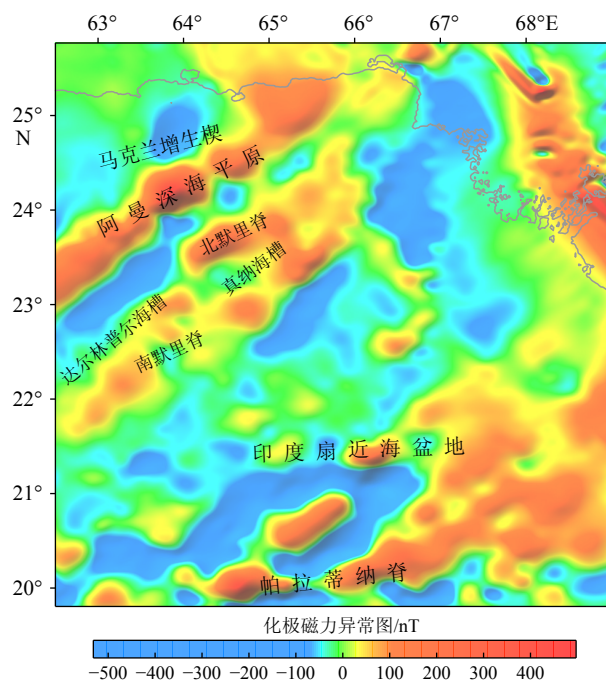


图 7 印度扇近海盆地化极磁力异常图

Fig.7 Map of the RTP magnetic anomaly in the offshore Indus Basin

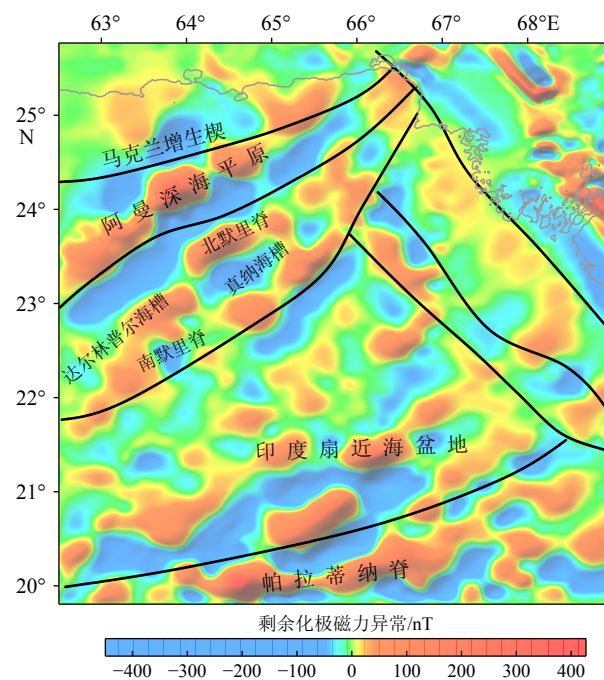


图 8 印度扇近海盆地剩余化极磁力异常图

Fig.8 Map of the residue RTP magnetic anomaly in the offshore Indus Basin

余化极磁力异常幅值为 $-449.47 \sim 427.06$ nT(图 8), 反映了研究区内岩浆岩的分布特征。

马克兰增生楔表现为低负磁力异常区, 异常走向不明显; 阿曼深海平原和默里脊系统呈现明显的正负相间的条带状磁异常分布特征, NE 走向, 正磁力异常显示了默里脊隆起及岩浆岩活动范围; 印度扇近海盆地磁力异常表现为“东西分块”特征, 东部以 NW 向的低负磁力异常为主, 西部磁力异常走向以 NE 向、近 EW 向的平缓低负磁力异常为主, 局部发育正磁力异常圈闭, 两者之间为一狭长的 NW 向正磁力异常条带, 表明盆地内部存在不同期次的沉积构造活动。印度扇近海盆地东南为块状的正磁力异常区, 对应帕拉蒂纳脊, 表明该处存在岩浆活动。剩余化极磁力异常图上, 研究区岩浆岩分布特征有所区别, 东部以 NW 向为主, 西部则以 NE 向、NEE 向为主, 反映了不同期次、不同构造活动下岩浆岩的分布特征。

3.3 重磁场融合

印度扇近海盆地及其邻域重磁场融合结果相较于布格重力异常和化极磁力异常, 更加清晰地反映了研究区内的构造单元边界和展布情况(图 9)。在重磁融合结果上, 研究区的构造格局简单明了, 构造单元边界及走向展布清晰。

研究区东北部以 NW 构造走向为主, 海陆过渡

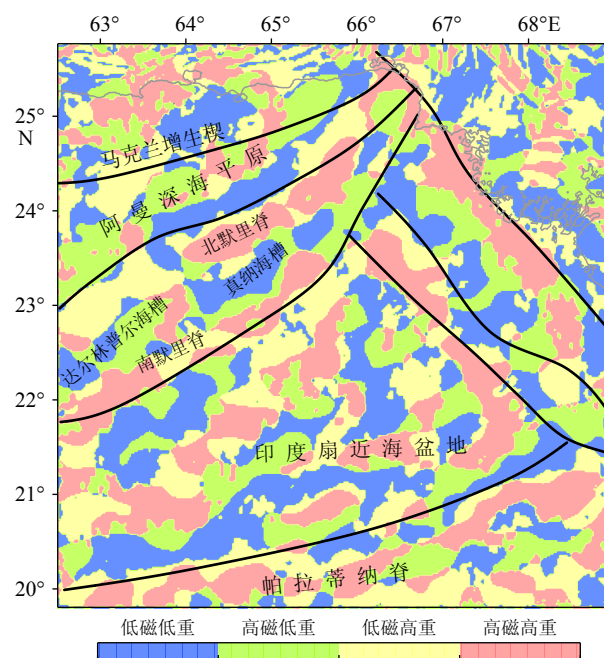


图 9 印度扇近海盆地重磁场融合结果图

Fig.9 Result of integrated gravity and magnetic field in the offshore Indus Basin

区为高磁高重条带区, 控制了印度扇近海盆地的东北缘, 西侧以高磁低重和低磁低重区为主, 其中低磁低重区呈块状分布, 展示了地层沉积中心的分布情况。西北部以 NE 向构造为主, 主要反映了阿拉伯板块在研究区内的分布特征, 其中阿曼深海平原

呈现为北窄南宽的三角状,整个区域以低磁低重和高磁低重为主,其间分布串珠状高磁高重;默里脊系统为 NE 向条带状构造,两侧的海脊多为典型的高磁高重区,反映了地幔隆起、岩浆上涌的构造特征,中间海槽为低磁低重和高磁低重区。南部边缘为 NEE 向的高磁高重条带,控制了印度扇近海盆地的南缘。中部重磁融合特征相对复杂,高磁高重区对应盆地隆起带或低凸起,低磁低重区则反映盆地内沉积中心的展布情况。

4 讨论

4.1 重磁场融合特征与区域构造对应关系

受印度板块、阿拉伯板块和欧亚板块构造活动的影响,研究区构造演化过程复杂。北部的马克兰增生楔位于欧亚板块与阿拉伯板块的交汇处,为活动大陆边缘;西部的默里脊系统,为走滑型板块边界;东部印度大陆西北缘为火山型被动大陆边缘^[1,5]。不同构造单元的构造走向、展布特征各异,在重力、磁力及重磁融合特征上有很好的对应关系。

表 1 为研究区内主要构造单元的重、磁场特征

对应关系。受新生代阿拉伯板块向北俯冲的构造活动的影响,研究区整体呈 NE 走向,不同构造单元构造走向有所不同,其中马克兰增生楔为近 EW 走向,阿曼深海平原和默里脊系统以 NE 走向为主,三者向北延伸汇聚于巴基斯坦中部的查曼走滑断裂(Chaman Fault),构造向北转为 NNE 走向。阿曼深海平原、北默里脊和南默里脊地区普遍存在高磁异常条带,但重磁融合特征有所不同。阿曼深海平原内高磁异常带的重磁融合结果为高磁低重,因此推测该条带为岩浆岩侵入,地壳未发生变形活动;北默里脊和南默里脊高磁异常带的重磁融合结果为高磁高重,说明该处为地幔上隆伴随岩浆岩上涌,这说明阿曼深海平原与默里脊受到不同时期构造活动影响,形成了不同的构造特征。

印度扇近海盆地受到印度板块、欧亚板块与阿拉伯板块之间多期构造活动影响,以 NW 向大陆坡折带为界分为东西两个构造分区。印度扇东北部构造走向与巴基斯坦陆缘走向一致,呈 NW 走向,低磁低重特征明显,反映了该区沉积环境较稳定,受断裂和岩浆活动影响较小;而西部构造走向以 NE-NEE 向为主,区内构造展布复杂,隆拗构造相间分布,局部高磁异常分布较广,说明区内断裂和岩

表 1 研究区内构造单元的重磁特征
Table 1 The gravity and magnetic characteristics of each tectonic unit in the study area

构造单元	构造走向	重力场特征	磁力场特征	重磁融合
马克兰增生楔	近EW	条带状低重力异常,西宽东窄,两侧重力梯级带特征明显	磁力低异常区,分布2个磁力低异常圈闭。异常区南侧为明显的磁力梯级带	低磁低重
阿曼深海平原	NE向	“三角状”低重力异常区,西宽东窄。剩余布格重力异常上分布3个重力高异常圈闭	高低相间条带状磁力异常,北高南低。高磁力异常条带自西向东分为4段;低磁力异常条带向西与北默里脊的西南段相连	北侧为高磁低重、南侧为低磁低重,局部分布高磁高重
北默里脊	NE向	条带状重力高异常带,自西向东分为3段。西段与中段之间为NW向重力低,东段异常走向转为NNE向,截止于查曼走滑断裂	条带状磁力异常,分为东西两段。东段为高磁力异常条带,南段为低磁力异常条带,两段之间磁力异常梯级带	东段为高磁高重 西段为低磁高重
达尔林普尔海槽	NE向	条带状重力低异常,海槽东端被NW向高重力异常条带截断	高磁力异常	低磁低重
真纳海槽	NE向	条带状重力低异常,向东延伸异常转为NNE向	分布2个块状低磁力异常圈闭,之间为NW向高磁力异常条带	低磁低重
南默里脊	NE向	狭长重力低异常条带,向东北延伸至查曼走滑断裂	自西向东分为2段,西段为条带状磁力高异常,东部为3个串珠状磁力高异常,不同磁力高异常之间为NW向磁力低异常	高磁高重
印度扇近海盆地	东部NW向 西部NE-NEE向	分为东西两个异常区,中间以NW向重力高异常带为界,北宽南窄。东部为重力低异常带,呈NW走向;西部为高低相间重力异常分布,自北向南异常走向由NE向逐渐转为NEE向	分为东西两个异常区,中间以狭长的磁力高异常条带为界。东部为磁力低异常区,局部发育NE向磁力高异常条带;西部高低相间磁力异常特征,可细分为北中南3个异常区,北区位于南默里脊南侧,表现为条带状磁力低异常;中区以磁力高异常为主;南区以磁力低异常为主,局部发育块状磁力高异常	东部低磁低重; 中部高磁高重; 西部以低磁低重、高磁高重相间分布

浆岩活频繁, 存在大量岩浆岩侵入, 地层切割特征明显。

4.2 印度扇近海盆地构造格架

结合已有钻井岩芯的物性分析结果和地震剖面发现, 在印度扇近海盆地中, 低磁低重和高磁低重区对应沉积拗陷区, 高磁高重和低磁高重对应盆

地隆起区和碳酸盐岩台地。在已有盆地区域构造划分基础上, 依据重磁融合结果进一步细化了印度扇近海盆地的油气构造格局(图 10)。图中红色实线为印度扇近海盆地边界线, 多为连续高磁高重条带的边缘; 黑色实线为盆地内二级构造单元边界线, 多为低磁低重与高磁高重区的分界, 分别对应盆地内部的隆起和拗陷构造单元; 黑色虚线为三级

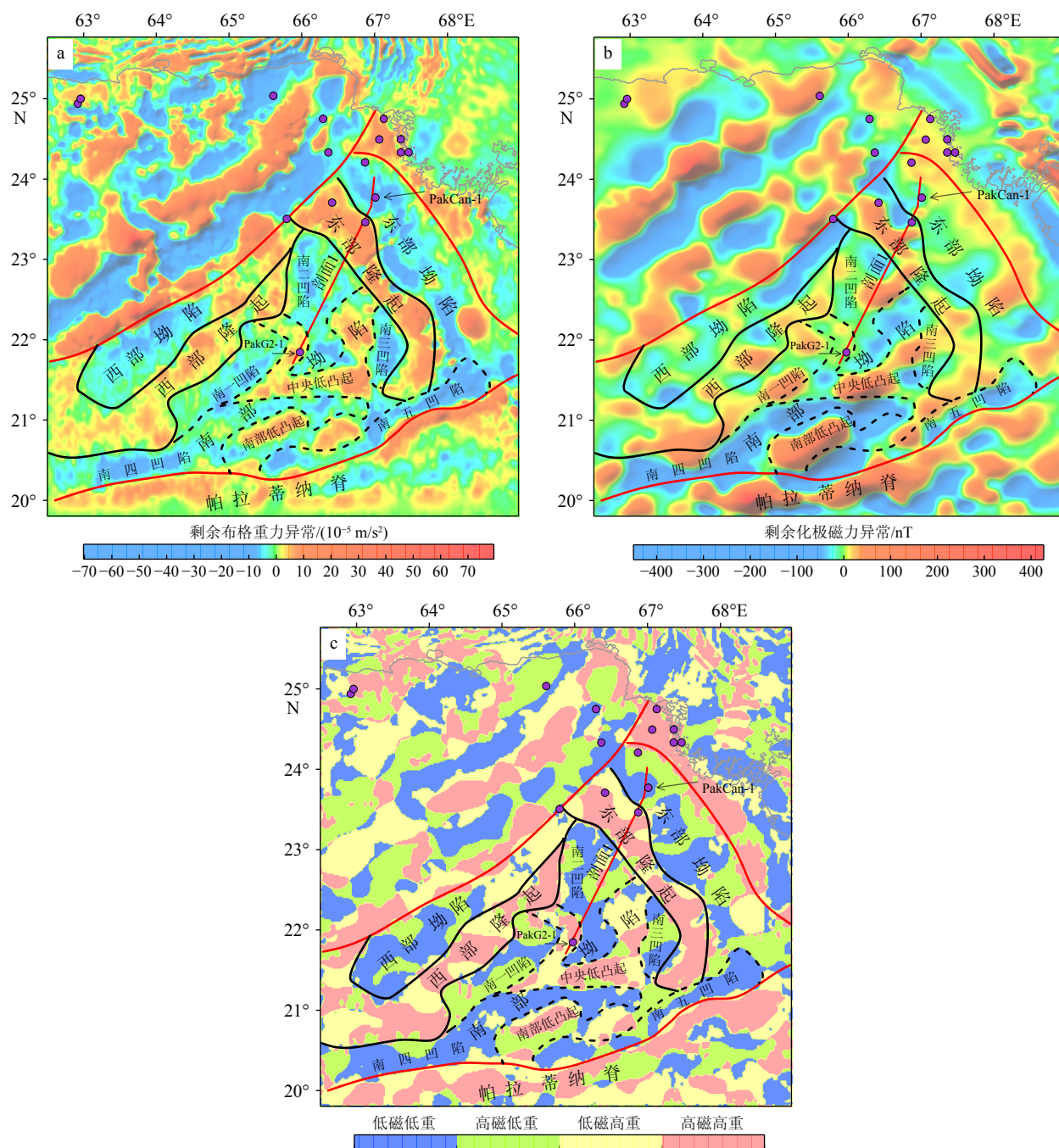


图 10 印度扇近海盆地油气构造划分结果

a: 剩余布格重力异常图, b: 剩余化极磁力异常图, c: 重磁融合结果图。

Fig.10 The hydrocarbon structure division in the offshore Indus Basin

a: The residue Bouguer gravity anomaly, b: the residue RTP magnetic anomaly, c: the integrated result of gravity and magnetic field.

构造单元边界线,对应盆地内次一级构造单元的凸起和凹陷。

根据盆地构造单元划分结果,印度扇近海盆地整体呈现“三角状”,盆地西北缘为南默里脊隆起,表现为 NE 向高磁高重条带;东北缘为巴基斯坦陆缘隆起,重磁融合结果呈现为 NW 走向高磁高重条带;南缘为帕拉蒂纳脊,表现为近 EW 走向高磁高重条带。盆地整体呈现明显的“东西分块”特征,盆地东北部地区构造相对简单,以 NW 向构造为主,条带状分布;盆地西南部地区以 NE 向构造为主,区内构造相对复杂,具有明显“南北分带”特征。根据重磁融合结果将整个盆地划分为“三拗两隆”构造格架,主要包括东部拗陷、东部隆起、西部拗陷、西部隆起和南部拗陷。

(1)东部拗陷:东部拗陷位于盆地东北部,巴基斯坦陆缘隆起带西侧,呈现 NW 走向,面积约 2.73 万 km²,对应前人构造划分中的派肯凹陷北部。整个拗陷内重磁融合结果以低磁低重为主,自北向南分布 4 个低磁低重异常区,不同异常区之间分布 NE 向高磁低重条带,推测 4 个低磁低重区为重要的沉积凹陷中心,不同沉积凹陷之间为高磁性的岩浆岩带。由图 10 中钻井位置可得出,钻遇天然气的派肯-1(PakCan-1)井位于东部拗陷带的北部沉积凹陷内,为低磁低重特征区。整个东部拗陷区内重磁特征变化不大,以低磁低重为主,这表明该区沉积地层稳定分布,受断裂和岩浆岩活动影响较小。在地震剖面上(图 11),东部拗陷处于地壳抬升区,地层连续且无明显断裂,形成稳定的油气储层

圈闭,由此推测整个东部拗陷带为印度扇近海盆地重要的油气潜力区。

(2)东部隆起:东部隆起呈 NW 向条带状分布,是印度扇近海盆地“东西分块”的分界构造,隆起以东以 NW 向构造为主,以西以 NE 向构造为主。该隆起带整体以高磁高重为主,边缘分布高磁低重。由地震剖面资料可以看出(图 11),东部隆起区处于地壳抬升区,区内分布多条深大断裂,向下延伸断穿了德干玄武岩地层,造成了岩浆岩上涌,形成高磁异常条带。该构造隆起带,是地层分布、构造运动的重要分界。东部隆起位于前人构造划分中的派肯拗陷区,该构造在新生代地层中隆起特征不明显,推测该构造反映了盆地深部地层及地壳的隆起状态。

(3)西部拗陷:印度扇近海盆地西部拗陷位于南默里脊南侧,印度扇近海盆地的西北角,为默里斜坡上形成的背斜圈闭,呈 NE 走向,拗陷面积约 1.45 万 km²。在重磁融合结果中该区表现以低磁低重为主,局部发育高磁低重,盆地周围分布高磁高重的构造隆起及岩浆岩。依据最新的二维地震剖面解释成果^[1],该区广泛分布中生界地层,是主要的烃源岩层,拗陷周边德干玄武岩入侵形成油气运输通道,形成“古生新储”式油气成藏模式^[1],是印度扇近海盆地油气勘探的重要目标区。该拗陷区位于原印度扇近海盆地构造区划的西南边界,是依据重磁融合结果新划定的盆地构造单元。

(4)西部隆起:西部隆起位于印度扇近海盆地西南角,向南延伸出原盆地边界至西部拗陷区南

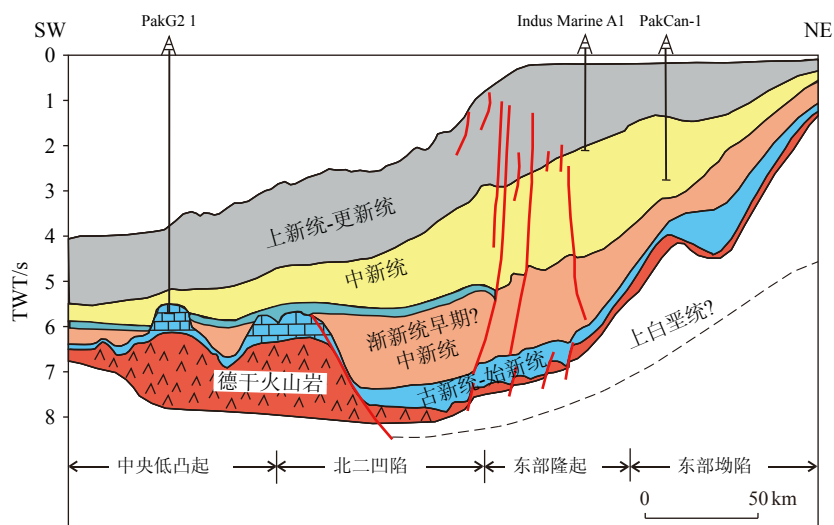


图 11 地震剖面资料解释结果^[1]

剖面位置见图 1。

Fig.11 The interpretation of seismic profile 1^[1]

缘,呈弧形条带状分布,整体呈现 NE 走向,重磁融合结果以高磁高重为主,表明该区为地幔隆起、岩浆岩带状分布区。该隆起东西两端与南默里脊相连,推测该区构造活动与默里脊系统构造活动相关。结合地震剖面 and 钻井地层资料推测,西部隆起为地幔隆起区,多岩浆岩活动。

(5)南部坳陷:南部坳陷位于印度扇近海盆地的西南部,区内构造复杂,西部构造单元以 NE 走向为主,东部靠近东部隆起带处构造单元以近 SN 向为主,南部靠近帕拉蒂纳脊附近以 NEE 向为主。南部坳陷内德干玄武岩分布广泛,盆地内中央低凸起和南部低凸起为典型的岩浆岩构造,对应原盆地构造中的索门纳斯脊和索拉斯特拉隆起。受岩浆岩活动的影响,南部坳陷被分割成多个凹凸次级构造,以高磁高重的中央低凸起为界,可以分为南北两个沉积凹陷带。中央低凸起以北可细分为南一凹陷(0.58 万 km²)、南二凹陷(1.25 万 km²)和南三凹陷(0.41 万 km²);中央低凸起以南以高磁高重的南部低凸起为界,可细分为南四凹陷(1.96 万 km²)和南五凹陷(1.13 万 km²)。该区内沉积层较厚,多发育碳酸盐岩台地,因此,凹陷内以低磁低重为主,局部分布低磁高重和高磁低重。

表 2 为盆地新旧构造划分结果对比,与已有盆地构造划分结果相比,保留了原有的南默里脊和索拉斯特拉隆起,对派肯坳陷的构造格局进行了细致划分。相较于前人划分的印度扇近海盆地范围及构造单元^[1-5],本次划分的盆地范围有所扩大,新划定了盆地西南角的西部坳陷和西部隆起,扩大了南

部坳陷范围,南部边界向南划至帕拉蒂纳脊附近,进一步厘清了印度扇近海盆地的构造格局。

根据本次的划分结果可以看出,印度扇近海盆地内的 11 口钻井,除 PakCan-1 井位于低磁低重的东部坳陷区内,其余 10 口钻井多位于高磁高重的隆起带内,这可能是钻井未获得油气显示的原因。整体来看,印度扇近海盆地的勘探程度较低,西部坳陷、东部坳陷带的南部、南部坳陷开展油气勘探及钻井勘探极少,很大程度上限制了对印度扇近海盆地的油气认识。印度扇近海盆地“东西分块”构造格局的形成,主要受印度板块、欧亚板块和阿拉伯板块构造运动的影响,不同期次、不同方向构造演化使得盆地东西部的沉积环境、油气地质条件会有所区别,因此在后续勘探过程中需要注重东西部地层的对比。

5 结论与建议

本文利用新一代卫星测高重力数据和世界地磁网格数据为基础,分析印度扇近海盆地及邻域的重磁场特征。利用重磁场融合技术得到印度扇近海盆地重磁场融合结果,结合地层、二维地震剖面等地质资料,对印度扇近海盆地内部油气构造单元进行了详细划分,主要结论如下:

(1)重力、磁力及重磁融合结果的分区性与印度扇近海盆地及其邻域的构造单元有很好的对应关系,低磁低重对应盆地坳陷区,为寻找油气的目标区,高磁高重对应盆地隆起区,可以用于识别盆地内岩浆岩的展布情况,为该地区开展油气勘探工作提供支撑。

(2)基于重磁场融合结果,对印度扇近海盆地油气构造格架及次级构造单元进行了划分。印度扇近海盆地呈“三角状”分布,受不同期次、不同方向构造运动影响,盆地“东西分块”特征明显,整个盆地呈现“三坳两隆”的构造格架,其中盆地东部包括 NW 走向的东部坳陷和东部隆起,盆地西部呈现“南北分带”特征,包括 NE-NEE 走向的西部坳陷、西部隆起和南部坳陷,进一步厘清了印度扇近海盆地的构造格局。

(3)本研究基于重磁数据融合开展了印度扇近海盆地构造格架的划分,初步刻画了盆地的隆坳格局,但未针对盆地构造演化及东西部构造差异展开深入研究,后续将进一步收集钻井、地震剖面等资料,开展深部莫霍面构造、盆地演化及油气潜力评价的相关工作。

表 2 印度扇近海盆地新旧构造划分对比
Table 2 Comparison of new and old structure division in offshore Indus Basin

旧构造单元		新构造单元	
南默里脊		南默里脊	
派肯坳陷	派肯凹陷	东部坳陷	
		南部坳陷	南一凹陷
			南二凹陷
	南三凹陷		
	中央低凸起		
	南四凹陷		
索门纳斯脊	南五凹陷		
派肯凹陷	南部低凸起		
索拉斯特拉隆起		东部隆起	
		帕拉蒂纳脊	
		西部坳陷	
		西部隆起	

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] Gaina C, VAN HINSBERGEN D J J, SPAKMAN W. Tectonic interactions between India and Arabia since the Jurassic reconstructed from marine geophysics, ophiolite geology, and seismic tomography[J]. *Tectonics*, 2015, 34: 875-906.
- [3] Clift P D, Shimizu N, Layne G D, et al. Development of the Indus Fan and its significance for the erosional history of the Western Himalaya and Karakoram[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(8): 1039-1051.
- [4] 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 Sliding Structures in the offshore Indus Basin[J], *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(6): 76-79.]
- [5] 程昊峰, 索艳慧, 李三忠, 等. 印度西部洋陆过渡区结构特征及构造演化 [J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(5): 851-860. [CHENG Hao-hao, SUO Yanhui, LI Sanzhong, et al. Structural Properties and Tectonic Evolution of the Western Indian Continental Margin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(5): 851-860.]
- [6] Solangi S H, Naeer A, Abbasi S A, et al. Morphological features of shelf margin: Examples from the Pakistan offshore[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2019, 10: 77-91.
- [7] MCHARGUE T R, WEBB J E. Internal geometry, seismic facies, and petroleum potential of canyons and inner fan channels of the Indus submarine fan[J]. *AAPG bulletin*, 1986, 70(2): 161-180.
- [8] Moin R K, Abid H, Muhammad S, et al. Mud Diapirism induced structuration and implications for the definition and mapping of hydrocarbon traps in Makran accretionary prism, Pakistan[C] // AAPG/SEG International Conference & Exhibition, Melbourne, Australia, 2015: 13-16.
- [9] 龚建明, 廖晶, Muhammad Khalid, 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. [GONG Jianming, LIAO Jing, Muhammad K, et al. Preliminary study on the oil and gas exploration targets in offshore Pakistan[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(11): 1-6.]
- [10] 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*, 46(4): 351-357.]
- [11] 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.]
- [12] 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.]
- [13] Sandwell D T, Smith W H F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*(1978-2012), 2009, 114(B1): B01411.
- [14] Sandwell D T, Garica E, Soofi K, et al. Toward 1 mGal Global Marine Gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1[J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(8): 892-899.
- [15] Sandwell D T, Muller R D, Smith W H F, et al. New global marine gravity model from GryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205): 65-67.
- [16] 张菲菲, 王皓, 张义蜜, 等. 西太平洋海域卫星测高重力数据精度分析 [J/OL]. 武汉大学学报: 信息科学版, 202305. [ZHANG Feifei, WANG Hao, ZHANG Yimi, et al. Accuracy analysis of satellite altimetry gravity data in the Western Pacific Area [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 202305.]
- [17] 张功成, 贾庆军, 王万银, 等. 南海构造格局及其演化 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4194-4215. [ZHANG Gongcheng, JIA Qingjun, WANG Wanyin, et al. On tectonic framework and evolution of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(10): 4194-4215.]
- [18] Maus S, Barckhausen U, Berkenbosch H, et al. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(8).
- [19] 张春灌, 李想, 袁炳强, 等. 地球磁异常 (EMAG2) 数据中海域资料质量评估—以北极地区 Kolbeinsey 脊南段为例 [J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 288-294. [ZHANG Chunguan, LI Xiang, YUAN Bingqiang, et al. Quality evaluation of offshore data in the Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-Minute Resolution): Taking the southern section of the Kolbeinsey Ridge in the Arctic Region as an example[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(3): 288-294.]
- [20] 戴勤奋, 周良勇, 魏合龙. 南黄海卫星重力场及构造演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 67-71. [DAI Qinfeng, ZHOU Liangyong, WEI Helong. Satellite gravity field and tectonic evolution of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(4): 67-71.]
- [21] 纪晓琳, 王万银, 杜向东, 等. 利用重磁资料研究西非中南段含盐盆地构造区划 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(4): 1502-1514. [JI Xiaolin, WANG Wanyin, DU Xiangdong, et al. Tectonic division by gravity and magnetic data of salt-bearing basins, south-central section of West Africa[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(4): 1502-1514.]
- [22] Martín - Español A, Zammit - Mangion A, Clarke P J, et al. Spatial and temporal Antarctic Ice Sheet mass trends, glacio - isostatic adjustment, and surface processes from a joint inversion of satellite altimeter, gravity, and GPS data[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121(2): 182-200.
- [23] Yang M, Wang W, Zhang G, et al. Relationship between the Extent of Igneous Rocks and Deep Structures as Determined by Gravitational and Magnetic Data in the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica* -

- English Edition, 2021, 95(1): 294-304.
- [24] Dobslaw H, Bergmann-Wolf I, Dill R, et al. A new high-resolution model of non-tidal atmosphere and ocean mass variability for de-aliasing of satellite gravity observations: AOD1B RL06. *Geophysical Journal International*, 2017, 211(1): 263-269.
- [25] MA J, WANG W, DU X, et al. Study on System of Faults in the Gulf of Mexico and Adjacent Region based on Gravity Data[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2021, 95(1): 305-318.
- [26] 雷受旻. 重力广义地形改正值和均衡该正值的一种计算方法 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(1): 101-111. [LEI Shoumin. Calculation of generalized topographic and isostatic gravity corrections[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1984, 4(1): 101-111.]
- [27] 刘芬, 王万银, 纪晓琳. 空间域和频率域平面位场延拓影响因素和稳定性分析 [J]. 物探与化探, 2019, 43(2): 320-328. [LIU Fen, WANG Wanyin, JI Xiaolin. Influence factors and stability analysis of plane potential field continuation in space and frequency domains. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(2): 320-328.]
- [28] He T, Xiong S Q, Wang W Y. Three-dimensional transformation of magnetization direction and magnetic field component at low latitudes based on vertical relationship[J]. *Applied Geophysics*, 2022, 19(1): 91-106.
- [29] 纪晓琳, 王万银, 邱之云. 最小曲率位场分离方法研究 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 1042-1058. [JI Xiaolin, WANG Wanyin, QIU Zhiyun. The research to the minimum curvature technique for potential field data separation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 1042-1058.]
- [30] 纪晓琳, 王万银, 邱之云. 最小曲率位场分离方法参数选择试验研究 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4): 1441-1452. [JI Xiaolin, WANG Wanyin, QIU Zhiyun. Parameter choose experimental research to the minimum curvature technique potential field data separation method[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1441-1452.]
- [31] 鲁宝亮, 马涛, 熊盛青, 等. 基于重磁异常相关分析的场源位置及属性识别方法 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(4): 1663-1674. [LU Baoliang, MA Tao, XIONG Shengqing, et al. A new recognition method for source locations and attributes based on correlation analysis of gravity and magnetic anomalies. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(4): 1663-1674.]
- [32] He T, Wang W Y, Bai Z Z, et al. Integrated gravity and magnetic study on patterns of petroleum basin occurrence in the China seas and adjacent areas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(3): 201-214.