

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.

巴基斯坦东部海域中—新生代沉积研究进展

李森^{1,2}, 梁杰^{1,2*}, 龚建明^{1,2}, 廖晶^{1,2}, 陈建文^{1,2}, 张银国^{1,2}, 王建强^{1,2}, 杨传胜^{1,2}, 袁勇^{1,2}, 雷宝华^{1,2}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237;

2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237)

摘要: 巴基斯坦海域地处全球三大板块交汇区域, 地质历史时期经历过复杂的构造-沉积演化; 新生代以来, 印度板块与欧亚板块碰撞导致喜马拉雅快速隆升, 并在巴基斯坦东部海域发育世界第 2 大深水扇——印度扇; 此外, 还位于亚洲两大季风区之一的印度季风区, 是研究“构造-沉积-气候”耦合问题的天然有利场所。通过归纳总结前人研究成果, 对巴基斯坦东部海域中—新生代沉积研究现状进行了综述, 提出了该区尚存争议的主要问题和下一步研究方向。目前, 针对巴基斯坦东部海域沉积研究主要有 4 大方向: 中新世以来印度扇沉积研究现状; 中—新生代其他典型地质体沉积研究现状; 晚第四纪末次浊流沉积研究现状; 构造-沉积-气候耦合研究现状。相比较而言, 对于德干玄武岩之下的中生代沉积、典型沉积体系之外的区域沉积演化、陆域-海域沉积体系对比等方面报道较少, 尚需更加深入地研究。

关键词: 巴基斯坦东部海域; 沉积演化; 印度扇; 耦合关系

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.016

0 引言

巴基斯坦海域东邻印度西海岸、西接霍尔木兹海峡、北邻巴基斯坦南部海岸线、南接北印度洋, 战略位置极为重要(图 1)。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^[1-4]。结合重磁资料, 一般将巴基斯坦海域划分为西部的马克兰增生楔、阿曼深海平原、东部的印度扇近海盆地以及分隔印度-阿拉伯板块的默里脊 4 个构造单元^[5-6](图 1)。中新世以来, 由于印度板块与欧亚板块碰撞导致的青藏高原快速隆升, 在海域东部发育规模仅次于孟加拉扇的世界第 2 大海底扇——印度扇, 其物源主

要来自于喜马拉雅造山带, 经由陆域的印度河盆地阿拉伯海输送, 延伸长度可达 1 500 km, 覆盖面积约 125 000 km², 局部厚度超过 7 km^[2,7]。因此, 印度扇新生代以来的沉积物记录了印度板块与欧亚板块的碰撞信息, 以及喜马拉雅隆升、亚洲季风等重要的构造、古气候信息^[8-10]。综合来看, 巴基斯坦东部海域是研究全球板块运动、青藏高原隆升以及对亚洲季风气候影响等重大科学问题的“实验室”, 具有极高的科学研究价值。

关于该区地质历史时期及现今的板块构造运动^[1,3,11-12]、盆地构造演化^[13-14]等科学问题前人已经做过大量研究, 如 CHATTERJEE 等^[3]系统梳理了印度板块的构造演化, 将其划分为 9 个重要的构造演化事件(图 2); 此外, KHAN 和 LIU^[13]通过分析印度扇近海盆地内不同类型断裂的发育特征, 认为其经历过复杂的构造变形期次, 并将盆地演化划分为裂陷、漂移、碰撞、转换挤压、反转伸展 5 大阶段, 其中转换挤压与反转伸展发生在第四纪以来, 盆地整体构造演化阶段与 CHATTERJEE 等的板块运动分析结果相吻合。

根据海陆对比和钻井揭示地层, 巴基斯坦海域自上而下发育的地层为: 第四系全新统、更新统, 新

收稿日期: 2021-01-26

资助项目: 中国博士后科学基金面上项目(2020M682134); 山东省博士后创新项目; 青岛市博士后应用研究项目; 国家自然科学基金面上项目(42076220)

作者简介: 李森(1992—), 男, 博士后, 主要从事海域油气资源调查方面的研究工作。E-mail: justdoitlisen@126.com

* 通讯作者: 梁杰(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海域油气资源调查方面的研究工作。E-mail: lj_100@163.com

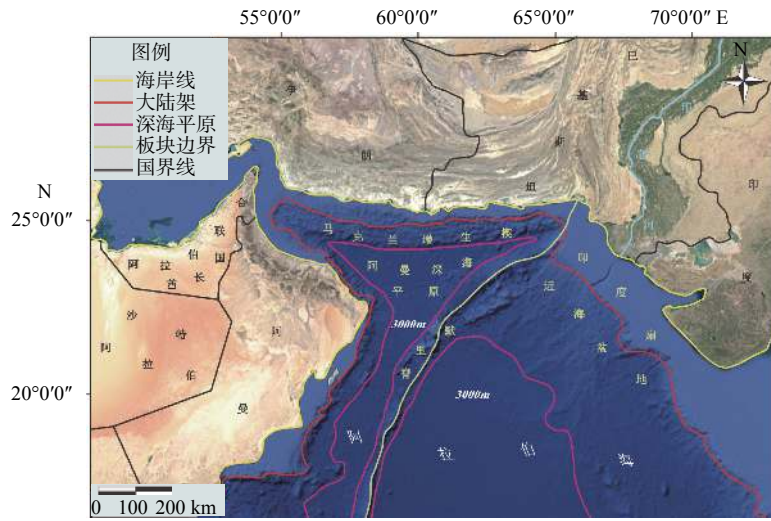


图1 巴基斯坦海域地理位置及构造单元组成

Fig.1 Geographical and tectonic map of Pakistan sea area

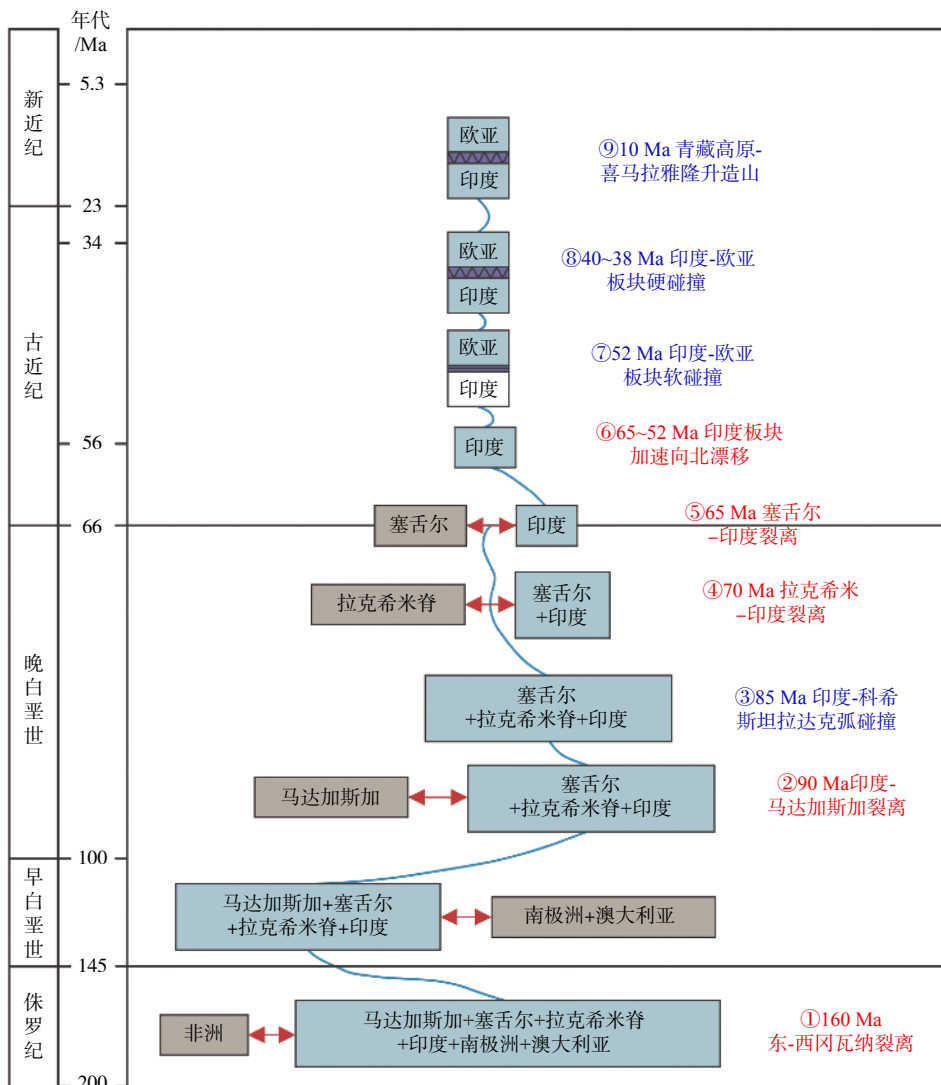


图2 中生代以来印度板块关键构造事件^[3]

Fig.2 Key tectonic events of Indian Plate since Mesozoic^[3]

近系上新统、中新统, 古近系渐新统、始新统、古新统和中生界上白垩统、下白垩统、侏罗系^[2](图 3)。其中, 新生界主要以碎屑岩沉积为主, 尤其是中新统以来, 研究区主要发育大型复合水下分流水道体系, 岩性以砂岩为主, 夹泥岩; 新生界早期, 古新统一始新统时期, 派肯坳陷内沉积了大套厚层烃源岩, 而在索拉斯特拉隆起上主要发育台地相碳酸盐岩, 局部火山高点上发育浅水相碳酸盐岩。中生代时期, 海上与陆上为一体, 同属于印度河同裂谷和内陆断陷盆地。从目前陆上钻井揭示的地层岩性来看, 侏罗纪时期, 盆地不同区带地层分布特征不同: 东部为浅海相碎屑岩, 中心区为深水相碳酸盐岩和页岩, 西部为高能碳酸盐岩。下白垩统地层以泥岩为主, 全区广泛分布, 为印度河盆地重要的生油岩, 只在当时的陆架和陆架边缘发育三角洲前缘和斜

坡扇砂岩, 为下印度河盆地重要的储集砂岩。上白垩统下段具有明显的二分性, 下部为泥岩, 在盆地内广泛分布, 为盆地内重要的盖层段, 上部为厚层砂岩。

在沉积特征及演化方面, 早期研究人员多借助二维地震资料对印度扇开展解剖^[7,15-16], 分析其具体的起源时间^[8,17-18]、垂向沉积演变过程^[19-20], 以及控制其发育的主要影响因素^[21]等。随着 Dabbo Creek-1、Pak G2-1 等钻井对古新—始新世碳酸盐岩台地发育的证实, 有学者^[22-24]也对碳酸盐岩台地的发育期次、地震反射结构、沉积演化模式等进行了分析。近年来, 越来越多的学者发现印度扇沉积物对于揭示喜马拉雅山隆升与剥蚀过程^[9,25]、亚洲季风演变^[26-27]等重要科学问题所发挥的关键作用。此外, 石油工业界在该区的油气勘探从未停止, Sun、Wintshall、Total 等石油公司先后钻井 18 口, 认为巴

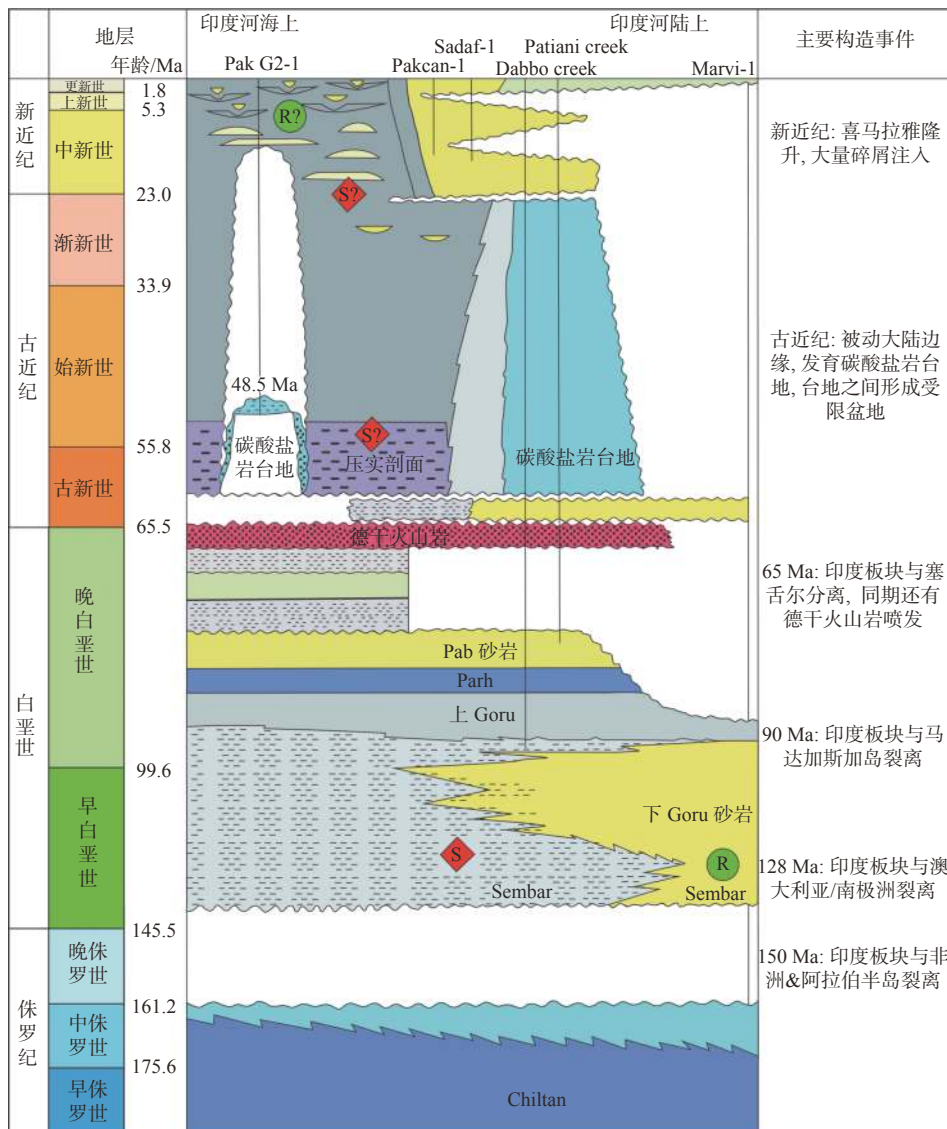


图 3 巴基斯坦海域-陆地地层对比柱状图^[2]

Fig.3 Stratigraphic correlation between the land and sea of Pakistan^[2]

巴基斯坦海域东部烃源岩普遍存在,具有宽广的油气勘探前景,而勘探成功的关键是寻找有利储层^[28-29]。

本文系统总结了巴基斯坦东部海域中—新生代沉积特征及演化、印度扇发育模式及主控因素、沉积对喜马拉雅山隆升和气候变化尤其是南亚季风的耦合关系等方面的研究进展,以期引起国内学者更为广泛的关注,同时,也对其现存问题进行初步探讨,为后续研究提供方向。

1 中新世以来印度扇沉积研究现状

印度扇作为巴基斯坦东部海域发育规模最大、特征最显著的沉积体系,在二维地震资料上表现为多期叠置的典型水道-堤岸复合结构,此外多口钻井(Pak-G2-1等)也钻遇了该沉积体,国外学者应用上述资料,围绕印度扇起源、沉积特征及演化、物质来源等方面展开了大量研究。

1.1 印度扇起源

关于印度扇具体的起源时间在 20 世纪末引起

多方争论。通过多道二维地震剖面,研究人员在巴基斯坦东部海域中中新世以来地层中发现存在具有大规模下切杂乱反射结构的河道-堤岸沉积体系,更早的地层中则表现为平行连续反射结构^[15-16],似乎表明印度扇起源于中中新世^[30]。然而随着大洋钻探取芯和地震地层等分析研究,发现印度扇真正的起源时间要远早于中中新世,达到古新—始新世时期。首先,有学者在巴基斯坦海域西部马克兰增生楔及东伊朗地区发现存在厚层古—始新世浊流沉积物^[31],表明在古近纪时期印度扇沉积主要位于现今巴基斯坦海域西部位置,后期由于河道迁移等因素被埋藏在新近纪碎屑沉积物之下。此外,CLIFT等^[17]对深海钻探计划(DSDP)224号站位中始新世砂岩样品进行原位离子探针分析,发现其来源于印度河缝合带乃至更北部。这一结果要求印度-欧亚板块碰撞在这一时期已经发生,并且印度河系统在碰撞后迅速活跃起并向阿拉伯海输送泥砂。BASTIA和RADHAKRISHNA^[32]系统总结了前人成果(图4),将印度扇的发育阶段与喜马拉雅造山带演化紧密联系,早始新世(~53 Ma)印度与欧亚板块西部发

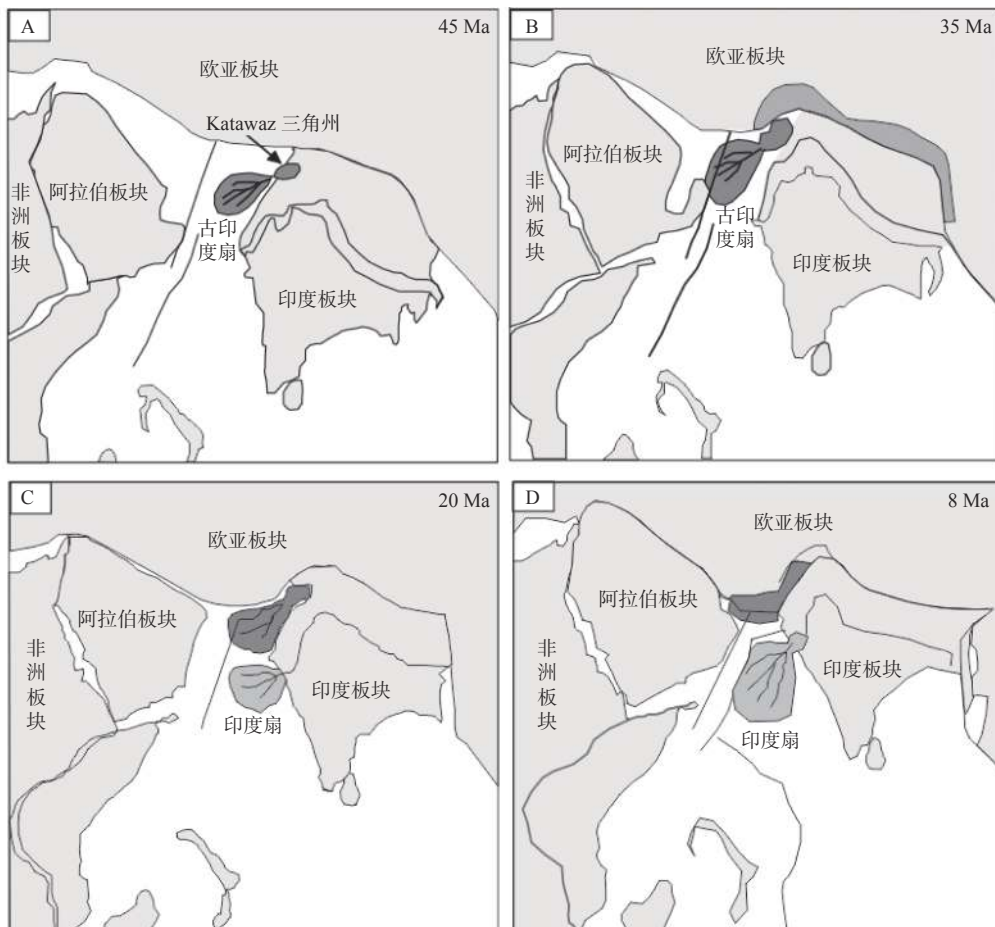


图4 始新世以来巴基斯坦海域板块恢复结果及印度扇演化模拟^[32-33]

Fig.4 Simulation of Indus Fan evolution in Pakistan sea area after plate reconstruction since Eocene^[32-33]

生早期碰撞(一般认为软碰撞), 古印度扇在现今马克兰增生楔的位置开始发育, 但规模有限; 随后, 印度板块与欧亚板块发生自西向东延伸的持续碰撞, 在晚中新世(~ 10 Ma)发生硬碰撞, 导致喜马拉雅山的快速隆升和剥蚀, 同时也导致印度扇在中—晚中新世时期的大规模发育, 并且沉积中心也由巴基斯坦海域西部迁移至海域东部印度扇近海盆地。

1.2 沉积特征及演化

印度扇在阿拉伯海深处发育有典型的扇体形态, 其分布的水深范围从坡脚的 1 500 m 一直到嘉士伯海脊附近远端的 4 500 m。KOLLA 和 COUMES^[15] 根据形态特征、水深变化以及地形走势将印度扇划分为上扇、中扇和下扇 3 部分; 并且绘制了印度扇的总沉积物厚度分布图, 表明沉积物厚度

(TWT)的范围从扇体远端 $<0.5\sim 1.0$ s 到扇体近端区域高达 6.0 s。此外, 在印度扇范围内显示出 3 个宽阔盆地(印度扇近海盆地、西部盆地、东部盆地), 相互之间被山脊或基底隆起所分隔, 印度扇在 3 个盆地中的最大沉积厚度分别超过 6、3 和 2 s。分隔西部和东部盆地的拉克希米洋脊中发育裂谷, 作为印度河沉积物从近端向远端输送浊流的通道。

此外, 多位学者^[25,34-35] 结合地震地层学理论及时-深转换, 计算了不同时期印度扇的沉积速率, 最新结果^[35] 认为印度扇(上部)在古新世时开始沉积, 沉积速率约 1.4×10^3 km³/Ma; 在晚中新世初期(~ 11 Ma)沉积速率达到峰值, 约 39.5×10^3 km³/Ma; 之后开始持续下降, 直到晚上新世至今达到最小值, 约 4.5×10^3 km³/Ma(图 5)。

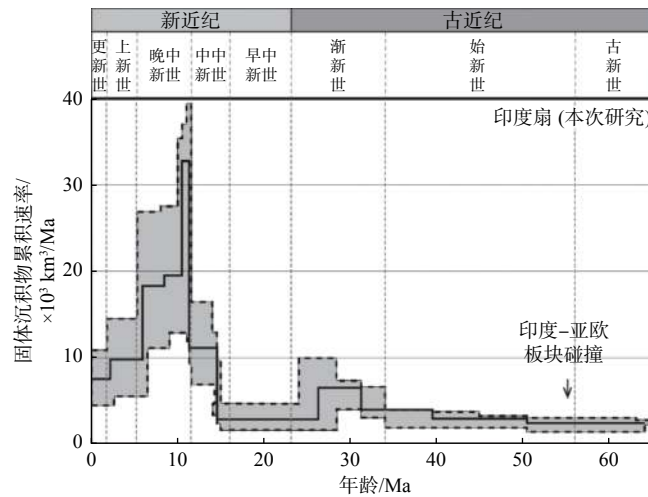


图 5 古近纪以来印度扇(上部)沉积速率演化^[34]

Fig.5 Sedimentation rate map of upper Indus Fan since Paleogene^[34]

由于海域钻井稀疏, 因此针对中中新世以来印度扇外部形态、内部结构等的研究多借助地震资料开展^[7,15-16,20]。通过二维地震剖面, 印度扇的上扇部分由多个大型水道-堤岸体系垂向重叠和堆积组成(图 6)。其中, 最常见的地震相之一为高振幅、高度不连续并且内部杂乱反射, 对应水道相; 侧向上, 与平行分层或者半透明的地震反射相接, 并且地震同相轴向两侧方向收敛, 厚度变薄, 对应堤坝相。这两种地震相组成了水道-堤岸体系的结构单元。根据地震地层学分析, 这些水道-堤岸体系主要分布于中中新统之上, 在上中新统发育规模最大, 建造周期为 10~100 万 a, 而在中中新统之下堤岸较少且振幅较低^[19]。

1.3 物质来源

印度-欧亚大陆碰撞导致喜马拉雅山的快速隆升, 并在印度大陆东、西两侧分别发育了印度扇和孟加拉扇, 然而两大海底扇的沉积物源具有较大差异。CLIFT 等^[17] 最先对印度扇的物源开展研究, 通过古近纪和新近纪沉积-侵蚀的物质平衡恢复以及大洋钻探样品的同位素分析结果认为, 印度扇物源主要来自印度河缝合带(Indus Suture Zone)沿线和更北部。自始新世印度河形成以来, 这种侵蚀模式整体没有发生较大变化, 仅有来自高喜马拉雅(High Himalaya)和低喜马拉雅(Lesser Himalaya)2 个次级物源区的输入信号有所波动, 其原因被解释

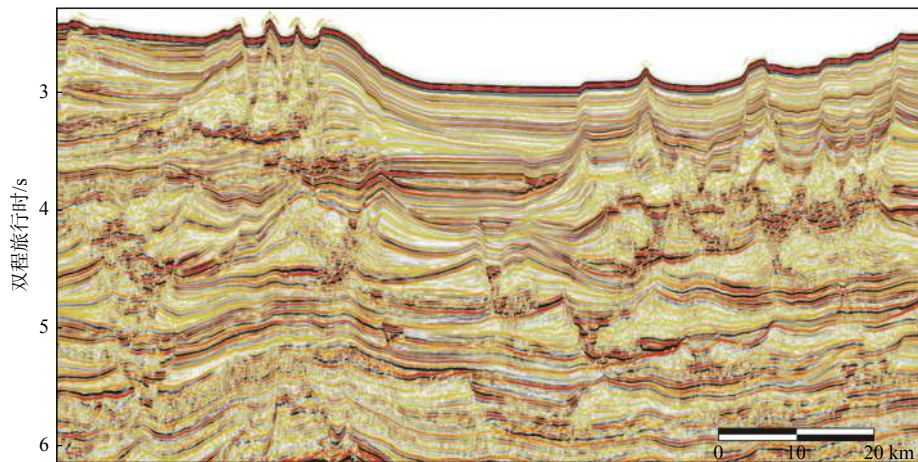


图 6 多道二维地震剖面显示印度扇内部结构

Fig.6 Multichannel 2D seismic profiles displaying the internal structure of Indus Fan

为这些次级物源区的差异隆升以及这些单元所在区域在整个新近纪时期不断向西后退所导致。而在孟加拉扇系统中,来自高喜马拉雅山脉(High Himalaya)物源区的大量碎屑物质构成了沉积物的主要组分,掩盖了缝合带单元(Indus Suture Zone)的物源信号^[17,19]。因此,对印度扇系统碎屑沉积物源的分析,有助于重建印度河缝合带和喜马拉雅造山带的演化历程。ZHUANG等^[36]通过巴基斯坦陆域印度河盆地沿线和海域系统取样和同位素分析,综合前人物源示踪结果,更进一步恢复了印度板块与欧亚板块碰撞前、碰撞时、碰撞后3个阶段下印度河与印度扇的物源输入演化(图7),认为碰撞前物源

主要来自印度河缝合带的柯希斯坦-拉达克弧、德干玄武岩与比拉蛇绿岩等,碰撞后逐渐向特提斯喜马拉雅、喀喇昆仑山等输入信号漂移。

1.4 发育主控因素

印度扇的发展和演化主要受控于喜马拉雅造山带(物源)、印度河及其海底峡谷(搬运通道)以及自晚渐新世/中新世以来海平面波动对其的极大影响。INAM和TAHIR^[21]认为浊流是影响印度扇沉积特征和扇体展布的主要控制过程,而浊流的强度和频率随着海平面波动而变化。低海平面时期,浊流将大量沉积物从印度河三角洲通过印度河峡谷

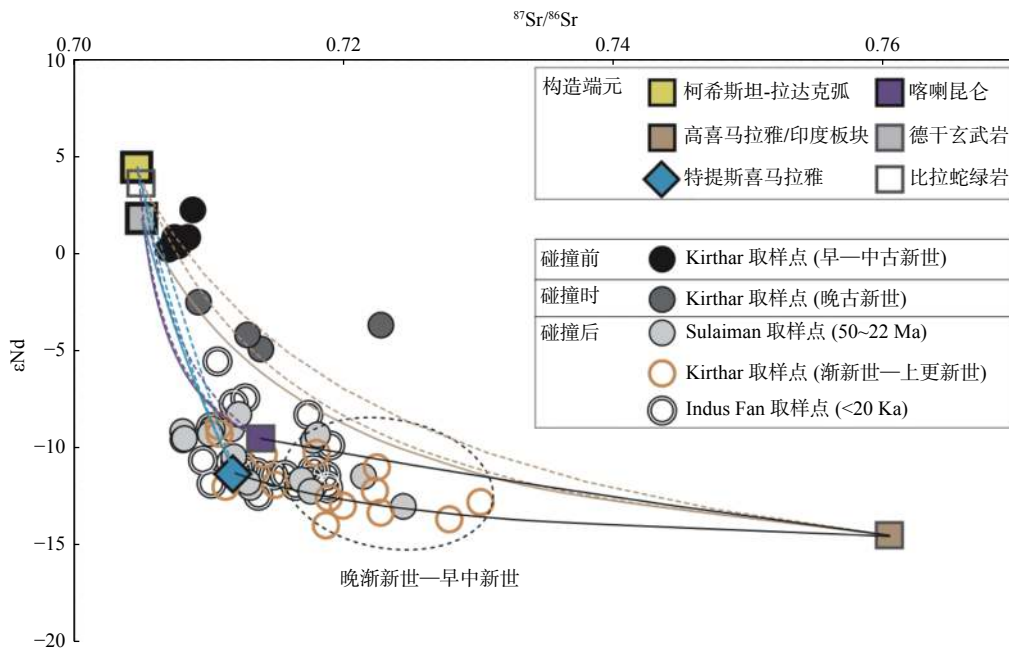


图 7 $\epsilon Nd-^{87}Sr/^{86}Sr$ 同位素交汇图显示下印度河与印度扇物源输入信号演化^[36]

Fig.7 Neodymium and strontium isotopes diagram showing the evolution of the source input signals of the lower Indus River and the Indus Fan^[36]

搬运至深海平原, 水道-堤岸体系高度发育; 而在高海平面时期, 陆源碎屑物质主要堆积在印度河三角洲, 印度扇以半远洋-远洋沉积为主, 水道-堤岸体系废弃并被细粒沉积物所覆盖。此外, 另一个控制因素是水道的迁移摆动, 活动水道的废弃使得远洋/半远洋沉积物覆盖在水道-堤岸系统之上, 直到水道再活化或另一条水道摆动至该区域^[21]。

2 中—新生代其他典型地质体沉积研究现状

受系列构造事件及古气候背景控制, 巴基斯坦东部海域中—新生代除印度扇外, 发育了多种类型的地质体。国内外研究人员基于二维地震资料, 针对上述地质体的特征、分布、期次及差异等先后进行了系统研究。

2.1 晚白垩世—古新世德干火山岩

CARMICHAEL 等^[2] 在海域东南部发现一系列 NE-SW 向展布的海底火山岛链以及索拉斯特拉火山岩台地 (Saurashtra Volcanic Platform); 并刻画了火山岩内部地震反射结构。海底火山发育有圆形或长条形的山脊, 沿山脊侧翼具有典型进积地震反射的地层单元。这种围绕火山脊核心的进积反射被解释为近地表玄武岩岩浆流, 从侵入中心延伸到海洋环境中, 经过冷却和固化, 形成类似于进积三角洲的进积反射样式。CALVES 等^[37] 系统总结了火山地层单元及地震反射对应图版, 并对印度扇近海盆地内火山机构及地震相组成进行了精细划分。此外, 通过对比索拉斯特拉台地火山岩与留尼汪、夏威夷等地幔热点的地震反射结构, 发现发育特征具有高度相似性; 并且通过几何学形态与内部地震相分析认为主要岩性是拉班玄武岩和近地表至浅海侵入岩。通过将印度洋火山活动与该地区板块构造运动进行耦合分析, 最终认为该地区火山岩与晚白垩世 (75~65.5 Ma) 时期前德干大陆溢流玄武岩的爆发有紧密关联。

2.2 古新—始新世碳酸盐岩台地

在巴基斯坦海域东南部早期火山岩台地之上发育大规模古新—始新世碳酸盐岩台地, KHAN 等^[22] 通过 Pak G2-1 井古生物化石分析, 认为碳酸盐岩台地主要为海山边缘的内陆架至中陆架沉积背景, 水深 < 200 m。生物地层学分析指出水深向上逐渐变

浅, 此外典型有孔虫 *Alveolina* 的发现显示该时期气候极端温暖, 导致了有孔虫的多样化^[22]。

借助二维地震资料, 研究人员^[23-24] 对碳酸盐岩台地内部结构、演化期次进行了精细解剖。SHAHZAD 等^[23] 将其划分为 7 个地震地层单元, 并划为 3 套结构, 反映了碳酸盐岩台地形成、陡崖沉积和台地淹没的演化过程。此外, 台地的沉积趋势受火山边缘岩石圈冷却引起的持续热沉降控制, 并且是浅水碳酸盐沉积序列垂向持续发育的可容纳空间的重要贡献者。随后, SHAHZAD 等^[24] 通过进一步解剖碳酸盐岩台地内部地震反射结构与时空演化 (图 8), 在巴基斯坦海域东部共识别出 9 个碳酸盐岩台地 (比 2018 年研究中多识别 5 个)。此外, 还将碳酸盐岩台地演化与周缘构造活动建立耦合关系: 晚古新世到早始新世, 为区域热沉降阶段, 在 9 个台地上碳酸盐岩均有大规模发育; 从早始新世开始, 一直到早渐新世为止, 受持续性海平面升高, 导致碳酸盐岩台地从东向西依次淹没于水下并消亡。该研究还发现台地的发育在地震剖面上具有不对称性 (图 8), 东部迎风面为连续退积型台地边缘, 西部背风面为逐步退积型台地边缘; 认为早—始新世时期盆地沉降速率的改变导致相对海平面升高, 促使了孤立碳酸盐台地的消亡。

3 晚第四纪末次浊流沉积研究现状

作为世界第二大深海扇, 印度扇自古—始新世开始发育, 在晚第四纪时期活动停止, 其末次浊流沉积特征及精确的演化结束时间也是地质学家所关注的重要科学问题^[38-52]。通过 DSDP 和 ODP 航次, 科学家在巴基斯坦东部海域多个站位进行取芯, 研究末次浊流沉积特征。

PRINS 等^[38] 通过对印度河峡谷和印度扇中部的取芯样品进行分析发现, 末次浊流沉积, 即印度扇最年轻的水道-堤岸体系发育始自氧同位素第 3 到第 2 过渡阶段 (约 24.8 ¹⁴C ka BP), 并在末次冰期消退阶段 (约 11.5 ¹⁴C ka BP) 发育结束, 印度扇随后被全新世时期的钙质软泥所覆盖。而 GOVIL 和 NAIDU^[39] 对印度扇中部 720A 站位沉积物样品进行了详细的沉积学、地球化学和同位素分析, 发现存在 0~375 ka 高 Ca、低 Al、Ti 值和 375~525 ka 低 Ca、高 Al、Ti 值 2 个典型沉积层序, 对应的岩性分别是远洋物质和黏土组分以及高陆缘输入的由砂和粉砂组成的粗粒沉积组分。分析认为, 375~

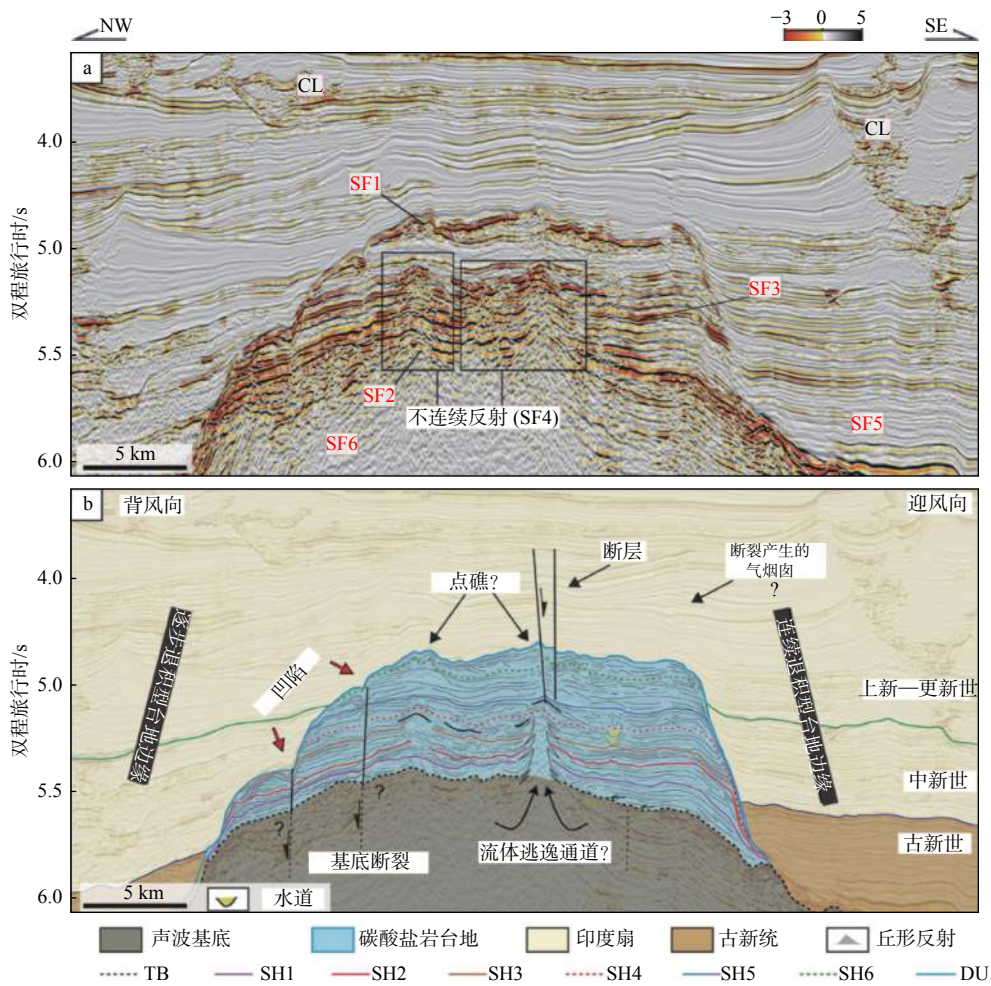


图8 典型碳酸盐岩台地地震反射特征^[24]

Fig.8 Seismic reflection characteristics of a typical carbonate platform^[24]

525 ka 发生了晚第四纪时期最后一次大规模的浊流沉积事件; 在 375 ka 之后, 大部分活动水道被远洋沉积掩埋。BOURGET 等^[41] 根据欧文断裂带上 20°N 盆地里的样品分析, 提出了更新的转换时间和沉积模式。认为在海平面下降的最后一个阶段(122~21 ka), 至少有 2 个水道-堤坝系统是活跃的, 并且由 1 个进积三角洲(强制退积)供给, 沿外陆架和陆架断裂分布多个沉积物输入通道; 随着水平面持续下降达到最低点(~21 ka), 印度河越来越盘踞在单一峡谷内, 并逐渐将其泥沙排放集中到印度河峡谷中, 这些系统内的浊积岩运移局部减少, 这导致了较老水道-堤坝系统的断开, 并形成了点源浊积岩系统(图 9)。

4 构造-沉积-气候耦合研究现状

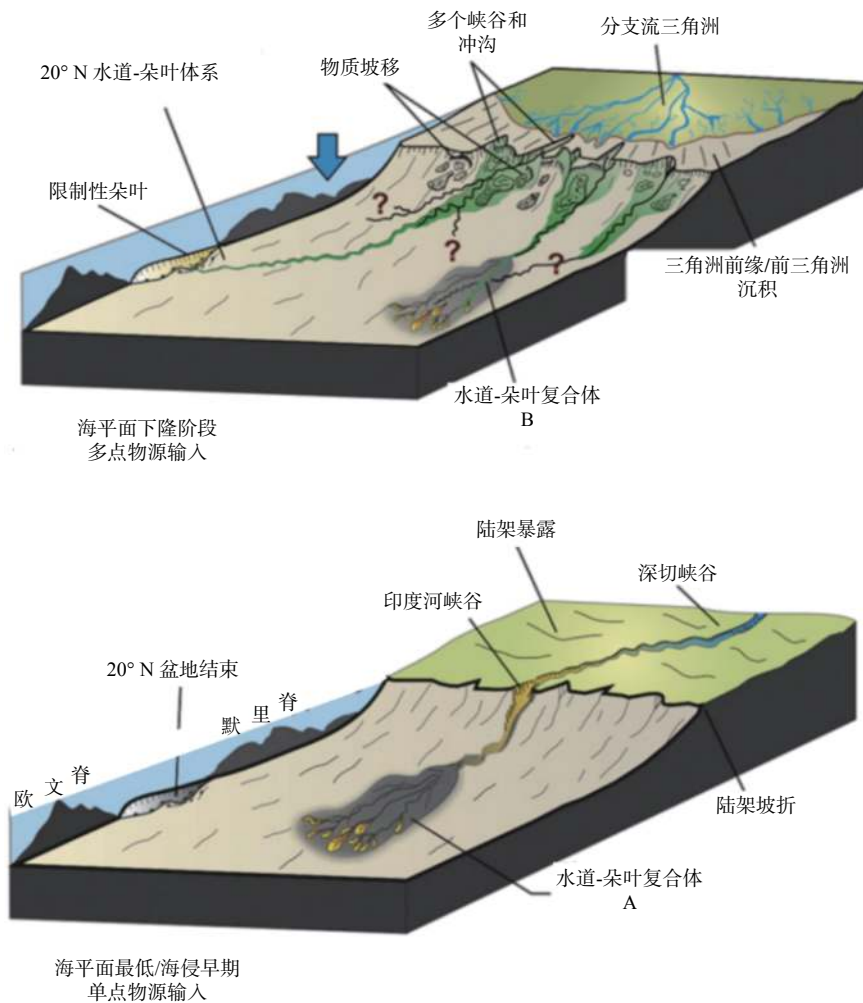
“构造-沉积-气候”耦合问题是全球变化研究的重要内容, 印度扇作为世界第 2 大海底扇, 沉积

物主要来自喜马拉雅山脉西部及印度河缝合带, 且处于亚洲两大季风区之一的印度季风区, 是研究三者相互关系的天然实验室。

4.1 喜马拉雅隆升剥蚀对气候变化和沉积作用的控制

尽管大多数数据表明, 印度-欧亚大陆碰撞始于 45~55 Ma 前, 但喜马拉雅-西藏造山带的构造以新近纪(<23 Ma)发育的强烈隆升变形为主导。同时, 地层记录与热年代学数据表明, 随着这个构造阶段的开始, 喜马拉雅山的侵蚀加剧, 并在 15 Ma 左右达到峰值, 直到 10.5 Ma 前一直保持高位, 随后逐渐放缓至 3.5 Ma, 但在上新世晚期和更新世又开始回升^[43]。而这一时期也是亚洲季风气候的活跃阶段, 因此研究喜马拉雅隆升剥蚀与气候变化和沉积作用的耦合关系成为全球热点问题^[25,35,39-47]。

巴基斯坦东部海域作为喜马拉雅造山带重要

图 9 晚第四纪印度扇浊流沉积演化模式^[41]Fig. 9 Evolution model of turbidite deposits in the late Quaternary Indus Fan^[41]

的剥蚀沉积物卸载场所之一, 保存记录着新近纪以来完整的构造、气候演变的信号。CLIFT 等^[43]通过 ODP 站位取芯和 Indus Marine A-1 钻井样品的化学风化指标分析, 与前人对印度扇沉积速率以及喜马拉雅剥蚀速率计算结果进行比对, 认为喜马拉雅-青藏高原隆升对亚洲季风气候的加强产生了强烈影响。早中新世时期, 青藏高原已经发展到足够的规模和高度, 导致了季风的加强并在高原南部产生强烈的夏季暴雨, 大大加快了侵蚀速率, 这一现状一直持续到晚中新世早期; 晚中新世夏季季风的减弱导致了 10 Ma 之后缓慢的剥蚀速率, 可能与中新世中期之后全球降温事件有关; 在大约 4 Ma 之后, 剥露和侵蚀的加速与自那时以来季风的再次加强有密切联系。

CALVES^[35] 在 Clift 等人研究的基础上将“构造-沉积-气候”耦合分析纳入更多参数(如巴基斯坦前陆盆地地层特征、青藏高原隆升模型等), 并且重新计算了印度扇不同时期沉积速率模型(图 10), 发

现在中—晚中新世沉积高峰期(15~10 Ma)之前, 渐新世时期(34~23 Ma)也有过一次沉积速率加速阶段, 该时期在巴基斯坦前陆盆地表现为地层缺失(图 10A、D), 表明该时期前陆盆地为—个充满或者过路区域, 导致侵蚀物质搬运到海洋。此外, 15~16 Ma 的主中央冲断带(MCT)与 12 Ma 的主边界冲断带(MBT)活动都与印度扇的沉积速率高峰期较好耦合(图 10A、E)。

4.2 晚新生代以来印度扇沉积物记录的印度季风演化

印度季风是地球气候系统最活跃的组成部分之一。前人研究发现除喜马拉雅-青藏高原隆升、印度-阿拉伯海地区的地质演化以及全球气温变化对印度季风具有重要影响作用外^[25,35,43-47], 在轨道尺度上太阳辐射也影响着印度季风的周期性活动^[48-50]。CLEMENS 等^[50]发现印度季风在过去 3.5 Ma 相对于地球轨道变化的相位是不稳定的, 在 2.6、1.7 和

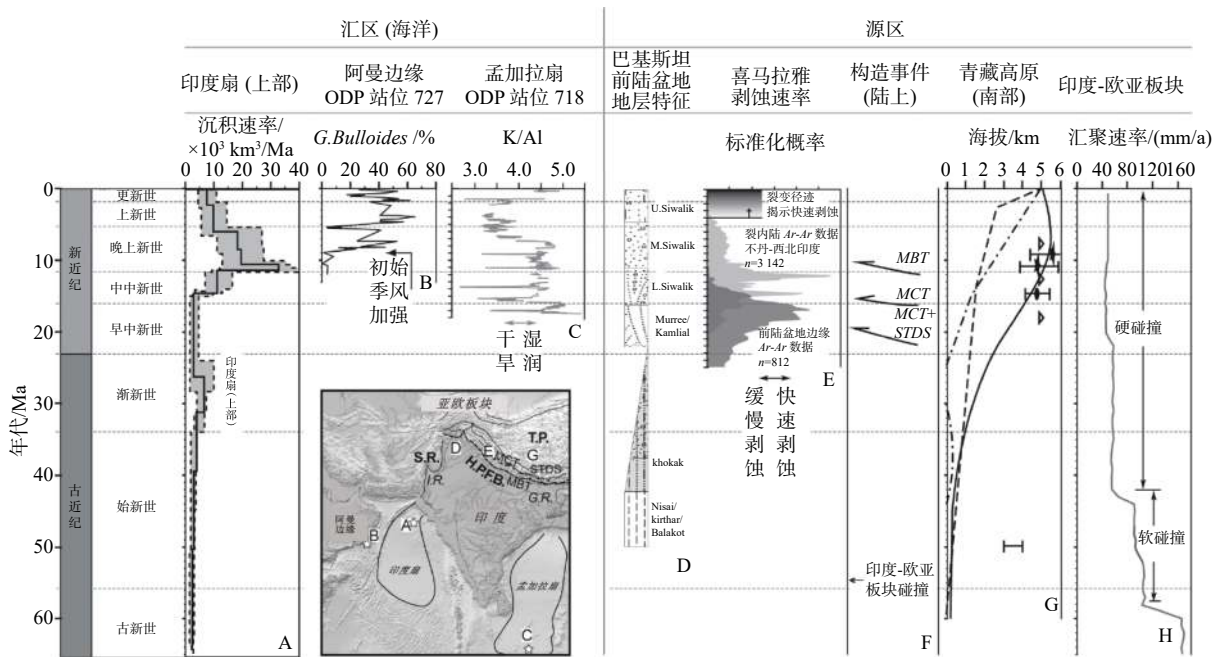


图 10 中-新生代南亚和印度洋地区构造-沉积-气候耦合分析^[35]

Fig.10 Coupling of tectonics, sedimentation and climate in South Asia and Indian Ocean during Meso-Cenozoic^[35]

1.2~0.6 Ma 经历了重要的主导周期转型。但是, 这些关于印度季风演化周期、转型和驱动机制的认识还有分歧。近年来, 通过 IODP 计划, 科学家在印度扇区域进行钻探和连续取芯, 为认识晚新生代以来印度季风的演化提供了良好的材料^[26-47]。

刘瑞璇等^[27] 通过对取芯样品的高分辨率粒度测试和频谱分析, 认为自 1.18 Ma 以来印度扇陆缘沉积量整体减少、沉积速率减慢、粒度变细, 揭示了中更新世印度季风的阶段性减弱, 降水量减少; 同时, 小波分析发现沉积物粒度变化周期在 1.18 Ma 发生从 41 ka 向长周期(80 与 250 ka 2 个主周期)的转变, 表明中更新世是气候转型期, 轨道尺度上太阳辐射的周期变化影响并控制着印度季风变化的节律。

5 结论与展望

巴基斯坦海域地处全球三大板块交汇区域, 地质历史时期经历过复杂的构造-沉积演化; 新生代以来, 印度板块与欧亚板块碰撞导致喜马拉雅快速隆升, 并在巴基斯坦东部海域发育世界第 2 大深水扇——印度扇; 此外, 该地区还位于亚洲两大季风区之一的印度季风区, 是研究“构造-沉积-气候”耦合问题的天然有利场所, 因而吸引了越来越多国内学者在该区及邻区开展研究^[51-54]。本文通过系统梳理巴基斯坦东部海域中-新生代沉积演化研究成

果, 主要取得以下 4 点认识:

(1) 印度扇在新生代有 2 期发育阶段: 早始新世时期 (~53 Ma), 印度与欧亚板块西部发生碰撞后, 第 1 期印度扇在现今马克兰增生楔的位置开始发育, 但规模有限; 随后, 印度与欧亚板块发生自西向东延伸的持续碰撞, 在晚中新世 (~10 Ma) 随着喜马拉雅山的快速隆升, 第 2 期印度扇在巴基斯坦东部海域大规模发育。一般所研究的印度扇指的是第 2 期发育的大规模水道-堤岸复合体。沉积速率分析表明, 印度扇在晚中新世初期沉积速率达到峰值, 之后开始缓慢下降, 其最大沉积厚度超过 10 km, 主要分布在巴基斯坦海岸的大陆架边缘。与孟加拉扇物源由高喜马拉雅造山带主导不同, 印度扇物源主要来自印度河缝合带和更北部。

(2) 除印度扇外, 在海域南部早期火山岩台地之上发育大规模古新-始新世碳酸盐岩台地。台地主要处于海山边缘的内陆架至中陆架沉积背景, 水深 < 200 m, 有孔虫分析显示该时期气候极端文段, 且水深垂向上不断变浅。基于地震地层分析, 台地可划分为 7 个单元, 并可归纳为 3 个沉积时期, 反映了台地形成、陡崖沉积和淹没的演化过程。平面上, 研究人员共识别出 9 个台地, 受海平面持续升高, 自东向西依次淹没于水下并消亡。

(3) 构造-沉积-气候耦合研究发现, 中新世时期, 青藏高原已经发展到组够的规模和高度, 导致了季风的加强并在高原南部产生强烈的夏季暴雨, 大大

加快了侵蚀速率, 一直持续到晚中新世早期; 晚中新世夏季季风的减弱导致了 10 Ma 之后缓慢的剥蚀速率, 可能与中新世中期之后全球降温事件有关; 在大约 4 Ma 之后, 剥露和侵蚀的加速与自那时以来季风的加强密切相关。

(4) 晚第四纪末次浊流沉积之后, 印度扇被半远洋/远洋泥岩所掩盖。分析认为在海平面下降的最后一个阶段(122~21 ka), 印度扇仍是由印度河三角洲向巴基斯坦海域多点注入碎屑物质, 仍有多个水道-堤岸体系处于活跃状态; 随着海平面下降到最低点(~21 ka), 印度河局限在单一峡谷内, 并与印度河峡谷相连接, 导致了其他较老水道堤岸系统的消亡, 形成单点物源输入系统。

综上所述, 巴基斯坦东部海域中—新生代沉积演化复杂, 与喜马拉雅山隆升以及印度季风演化具有较强耦合效应, 具有重要的科学研究价值。相比较而言, 目前对于德干玄武岩之下的中生代沉积、典型沉积体系之外的区域沉积演化、陆域-海域沉积体系对比等方面报道较少, 尚需更加深入地开展工作。

参考文献:

- [1] SCOTSESE C R, GAHAGAN L M AND LARSON R L. Plate tectonic reconstructions of the Cretaceous and Cenozoic ocean basins[J]. *Tectonophysics*, 1988, 155(1/4): 27-48.
- [2] 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.
- [3] CHATTERJEE S, GOSWAMI A, SCOTSESE C R. The longest voyage: tectonic, magmatic, and paleoclimatic evolution of the Indian plate during its northward flight from Gondwana to Asia[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(1): 238-267.
- [4] 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.
- [5] GAEDICKE C, PREXL A, SCHLÜTER H U, et al. Seismic stratigraphy and correlation of major regional unconformities in the northern Arabian Sea[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2002, 195(1): 25-36.
- [6] SOLANGI S H, NAZEER 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] CLIFT P, SHIMIZU N, LAYNE G, et al. Fifty-five million years of Tibetan evolution recorded in the Indus Fan[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2000, 81(25): 277-281.
- [9] CLIFT P, CALVES G, GIOSAN L, et al. Climate and Tectonic Signals Preserved in the Indus Submarine Fan, Arabian Sea[J]. *AGUFM*, 2007, 2007: OS33A-0995.
- [10] KHIM B K, LEE J, HA S, et al. Variations in $\delta^{13}\text{C}$ values of sedimentary organic matter since late Miocene time in the Indus Fan (IODP Site 1457) of the eastern Arabian Sea[J]. *Geological Magazine*, 2020, 157(6): 1012-1021.
- [11] GOMBOS A M, POWELL W G, NORTON I O. The tectonic evolution of western India and its impact on hydrocarbon occurrences: an overview[J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 96: 119-129.
- [12] MINSHULL T A, LANE C I, COLLIER J S, et al. The relationship between rifting and magmatism in the northeastern Arabian Sea[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(7): 463-467.
- [13] KHAN M, LIU Y. Geodynamic evolution of the offshore Indus Basin Pakistan: the western Indian plate passive continental margin[J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 217(2): 1366-1386.
- [14] KHAN M, ABDELMAKSOU A. Unfolding impacts of freaky tectonics on sedimentary sequences along passive margins: Pioneer findings from western Indian continental margin (Offshore Indus Basin) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020: 104499.
- [15] KOLLA V, COUMES F. Morphology, internal structure, seismic stratigraphy, and sedimentation of Indus Fan[J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(6): 650-677.
- [16] KOLLA V, SCHWAB A M. Indus Fan: multi-channel seismic reflection images of channel-levee-overbank complexes[M]//Atlas of Deep Water Environments. Springer, Dordrecht, 1995: 100-104.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] CLIFT P, GAEDICKE C. Accelerated mass flux to the Arabian Sea during the middle to late Miocene[J]. *Geology*, 2002, 30(3): 207-210.
- [20] 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.
- [21] INAM A, TAHIR M. Channel-levee system-the major controlling mechanism for the sediment deposition on the Indus Fan[C]//Joint International Conference and First Annual Meeting of IGCP-475 DeltaMAP and APN project on the Mega-Deltas of Asia. 2004: 15-20.
- [22] KHAN N, REHMAN K, AHMAD S, et al. Sequence strati-

- graphic analysis of Eocene Rock Strata, Offshore Indus, southwest Pakistan[J]. *Marine Geophysical Research*, 2016, 37(3): 207-228.
- [23] SHAHZAD K, BETZLER C, AHMED N, et al. Growth and demise of a Paleogene isolated carbonate platform of the Offshore Indus Basin, Pakistan: effects of regional and local controlling factors[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107(2): 481-504.
- [24] 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.
- [25] CLIFT P D. Controls on the erosion of Cenozoic Asia and the flux of clastic sediment to the ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(3/4): 571-580.
- [26] PANDEY D K, CLIFT P D, KULHANEK D K, et al. Expedition 355 summary[J]. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, 2016: 355.
- [27] 刘瑞璇, 鹿化煜, 王珧, 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.
- [28] 龚建明, 廖晶, 梁杰, 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.
- [29] 江凯禧, 姚长华, 郭清正, 等. 印度扇深水区古—始新统烃源岩特征及发育模式[J]. *沉积学报*, 2016, 34(4): 785-793.
- [30] QAYYUM M, LAWRENCE R D, NIEM A R. Discovery of the palaeo-Indus delta-fan complex[J]. *Journal of the Geological Society*, 1997, 154(5): 753-756.
- [31] GARZANTI E, CRITELLI S, INGERSOLL R V. Paleogeographic and paleotectonic evolution of the Himalayan Range as reflected by detrital modes of Tertiary sandstones and modern sands (Indus transect, India and Pakistan) [J]. *Geological society of america bulletin*, 1996, 108(6): 631-642.
- [32] BASTIA R, RADHAKRISHNA M. Sedimentation history and development of fan system along the continental margins of India[M]//*Developments in Petroleum Science*. Elsevier, 2012, 59: 127-160.
- [33] ELLOUZ-ZIMMERMANN N, LALLEMANT S J, CASTILLA R, et al. Offshore frontal part of the Makran Accretionary prism: The Chamak survey (Pakistan) [M]//*Thrust belts and foreland basins*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007: 351-366.
- [34] MÉTIVIER F, GAUDEMER Y, TAPPONNIER P, et al. Mass accumulation rates in Asia during the Cenozoic[J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 137(2): 280-318.
- [35] CALVÈS G. Tectono-stratigraphic and climatic record of the NE Arabian Sea[D]. Aberdeen: University of Aberdeen, 2009.
- [36] ZHUANG G, NAJMAN Y, GUILLOT S, et al. Constraints on the collision and the pre-collision tectonic configuration between India and Asia from detrital geochronology, thermochronology, and geochemistry studies in the lower Indus basin, Pakistan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 432: 363-373.
- [37] CALVÈS G, SCHWAB A M, HUUSE M, et al. Seismic volcanostratigraphy of the western Indian rifted margin: the pre-Deccan igneous province[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B1).
- [38] PRINS M A, POSTMA G, CLEVERINGA J, et al. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Indus Fan[J]. *Marine Geology*, 2000, 169(3/4): 327-349.
- [39] GOVIL P, NAIDU P D. Late Quaternary changes in depositional processes along the western margin of the Indus Fan[J]. *Geo-Marine Letters*, 2008, 28(1): 1-6.
- [40] LIMMER D R, HENSTOCK T J, GIOSAN L, et al. Impacts of sediment supply and local tectonics on clinoform distribution: the seismic stratigraphy of the mid Pleistocene-Holocene Indus Shelf[J]. *Marine Geophysical Research*, 2012, 33(3): 251-267.
- [41] BOURGET J, ZARAGOSI S, RODRIGUEZ M, et al. Late Quaternary megaturbidites of the Indus Fan: Origin and stratigraphic significance[J]. *Marine Geology*, 2013, 336: 10-23.
- [42] CLIFT P D, GIOSAN L, HENSTOCK T J, et al. Sediment storage and reworking on the shelf and in the canyon of the Indus River - fan system since the last glacial maximum[J]. *Basin Research*, 2014, 26(1): 183-202.
- [43] CLIFT P D, HODGES K V, HESLOP D, et al. Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity[J]. *Nature geoscience*, 2008, 1(12): 875-880.
- [44] NAJMAN Y. The detrital record of orogenesis: a review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 74(1/2): 1-72.
- [45] CURRAY J R. Sediment volume and mass beneath the Bay of Bengal[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 125(1/4): 371-383.
- [46] KITO A. Effects of mountain uplift on East Asian summer climate investigated by a coupled atmosphere-ocean GCM[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(4): 783-802.
- [47] ZHISHENG A, KUTZBACH J E, PRELL W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times[J]. *Nature*, 2001, 411(6833): 62-66.
- [48] CLEMENS S, PRELL W, MURRAY D, et al. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon[J]. *Nature*, 1991, 353(6346): 720-725.
- [49] RUDDIMAN W F. What is the timing of orbital-scale monsoon changes?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(7/8): 657-658.
- [50] CLEMENS S C, Murray D W, Prell W L. Nonstationary phase of the Plio-Pleistocene Asian monsoon[J]. *Science*, 1996, 274(5289): 943-948.
- [51] 孙国洪, 田丽艳, 李小虎, 等. 西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 126-138.
- [52] 王小杰, 颜中辉, 刘俊, 等. 基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用[J]. *海洋地质与第四*

- 纪地质, 2021, 41(5): 221-230.
- [53] 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.
- [54] 韩宗珠, 孙苑高, 王传, 等. 西南印度洋中脊玄武岩地球化学特征及其对岩浆过程的指示意义[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(1): 11-19.

Research progress of the Meso-Cenozoic sedimentary evolution in eastern Pakistan sea

LI Sen^{1,2}, LIANG Jie^{1,2*}, GONG Jianming^{1,2}, LIAO Jing^{1,2}, CHEN Jianwen^{1,2}, ZHANG Yinguo^{1,2},
WANG Jianqiang^{1,2}, YANG Chuansheng^{1,2}, YUAN Yong^{1,2}, LEI Baohua^{1,2}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geology Survey, Qingdao 266071, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

Abstract: The East Pakistan sea area, located in the junction of three major plates of the world, has experienced complex tectonic-sedimentary evolution in history. Since Cenozoic era, the collision between the Indian plate and the Eurasian plate has been accelerated, that led to the rapid uplifting of the Himalaya, the form of the Indus deep-water fan, the second largest in the world, and the development of the sea off the Pakistan land. In addition to it, the area is heavily influenced by Indian monsoon as one of the two major monsoon regions in Asia. It is indeed the unique place in the world for study of the coupling relationship and interaction among the tectonic, sedimentary and climatic factors. Upon the basis of previous research results, we summarized in this paper the current research status of sedimentary evolution of the Mesozoic and Cenozoic basins in the Eastern Pakistan sea, put forward some main problems remained in controversy and made suggestions for future researches. Four main research interests and directions are put in front of us, i.e, the Indus fan since Miocene; the typical Meso-Cenozoic sedimentary geological bodies; the latest Quaternary turbidite sedimentology and the interaction of tectonic, sedimentation and climate. So far, few reports are available concerning the Mesozoic sediments beneath the Deccan basalt, the regional sedimentary evolution out of the depositional system, and the correlation of continental-marine sedimentary systems. Further investigations should be accelerated.

Key words: eastern Pakistan sea; sedimentary evolution; Indus Fan; coupling relationship