

中新世以来上印度扇水道堤岸体系几何学特征及演化

李章鹏,梁 杰,李 森,陈建文,廖 晶,龚建明,张银国,王建强,杨艳秋,杨传胜,雷宝华

Geometric characteristics and evolution of channel-levee system in Upper India Fan since the Miocene

LI Zhangpeng, LIANG Jie, LI Sen, CHEN Jianwen, LIAO Jing, GONG Jianming, ZHANG Yinguo, WANG Jianqiang, YANG Yanqiu, YANG Chuansheng, and LEI Baohua

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022122201

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海南部北康盆地中中新世深水沉积体类型、特征及意义

MIDDLE MIOCENE DEEP–WATER SEDIMENTS IN THE BEIKANG BASIN, SOUTHERN SOUTH CHINA SEA: TYPES, CHARACTERISTICS AND IMPLICATIONS

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(6): 110-118

海盆沉积"源-汇"系统分析:南海北部珠江海谷-西北次海盆第四纪深水浊积扇

"Source to sink" analysis of a sea basin: The Quaternary deepwater turbidite fan system in Pearl River Valley–Northwest subbasin, Northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 1-12

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

南海南部北康--曾母盆地早中新世层序内部优质砂岩精细刻画

Study of high-quality sandstone in Early Miocene sequence of Beikang-Zengmu Basin, the Southern South China Sea 海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 111-123

珠江口盆地白云凹陷北坡第四纪层序地层和沉积体系演化及其控制因素

Quaternary sequence stratigraphic evolution of the Pearl River Mouth Basin and controlling factors over depositional systems 海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 25-37

"点-线-面-体"三维等时融合技术刻画海底扇沉积微相

Three-dimensional isochronous integration technique for depicting microfacies of submarine fans 海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 183-191



关注微信公众号,获得更多资讯信息

李章鹏,梁杰,李森,等.中新世以来上印度扇水道-堤岸体系几何学特征及演化[J].海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 30-43. LI Zhangpeng, LIANG Jie, LI Sen, et al. Geometric characteristics and evolution of channel-levee system in Upper India Fan since the Miocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 30-43.

中新世以来上印度扇水道-堤岸体系几何学特征及演化

李章鹏^{1,2,3},梁杰^{1,2,3},李森^{2,3},陈建文^{2,3},廖晶^{2,3},龚建明^{2,3},张银国^{2,3},王建强^{2,3},杨艳秋^{2,3},杨传胜^{2,3},雷宝华^{2,3}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

3. 崂山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:以中新世以来上印度扇水道-堤岸体系为研究对象,利用高精度二维地震资料开展地震精细解释与几何学分析,刻画水 道-堤岸体系几何学特征及时空演化过程,探讨中新世以来上印度扇发育演化主要期次及特征。结果表明,中新世以来上印 度扇水道-堤岸体系可划分为中新世、上新世及更新世至今三大期次,整体表现出"单期水道-侧向迁移-扁长型"到"多期水道-垂向叠置-厚窄型"的演化特征。深入探讨中新世以来上印度扇水道-堤岸体系的几何学特征及演化可为重力流水道的沉积构 型样式研究提供新的例证,并为深海油气勘探开发提供参考。

关键词:深水沉积;水道-堤岸体系;中新世;上印度扇

中图分类号: P736.21 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022122201

Geometric characteristics and evolution of channel-levee system in Upper India Fan since the Miocene

LI Zhangpeng^{1,2,3}, LIANG Jie^{1,2,3}, LI Sen^{2,3}, CHEN Jianwen^{2,3}, LIAO Jing^{2,3}, GONG Jianming^{2,3}, ZHANG Yinguo^{2,3}, WANG Jianqiang^{2,3}, YANG Yanqiu^{2,3}, YANG Chuansheng^{2,3}, LEI Baohua^{2,3}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

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

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

Abstract: Taking the Miocene Upper Indian fan channel-levee system as the research object, we used high-precision two-dimensional seismic data to carry out seismic fine interpretation and geometric analysis, depicted the geometric characteristics of the channel-levee system and the spatio-temporal evolution process, and discussed the main stages and characteristics of the development and evolution of the Miocene Upper Indian fan. Results show that the Miocene Upper India fan channel-levee system can be divided into three developmental phases: the Miocene, the Pliocene, and the Pleistocene to present. The channel-levee system evolved from "single-phase channel–leteral migration–flat type" to "multi-phase channel–vertical stacking–thick-narrow type". An in-depth discussion of the geometric characteristics and evolution of channel-levee system in Upper India Fan since the Miocene can provide new examples for the study of the sedimentary architecture of gravity flow channels, and provide reference for deep-sea oil and gas exploration and development.

Key words: deep water deposit; channel-levee system; Miocene; Upper Indian Fan

随着深水沉积勘探领域的不断升温,深水沉积构造成为近年来海洋地质沉积构造的研究热点及油气增储上产的主力来源,并由此推动了深水沉积 理论体系的快速发展¹¹。海底扇作为大型深水沉积 构造单元,在巴西、墨西哥湾以及西非等地区展现 出优秀的油气产出能力,其中,深水水道沉积作为 海底扇的重要组成部位,已经被证实在海底扇的油 气富集作用中起到关键作用^[24]。目前对重力流水

资助项目:崂山实验室科技创新项目(LSKJ202203401、LSKJ202203404);国家海洋专项项目(DD20160215、DD20191003、DD20191032、 DD20190581、DD20211353、DD20221723、DD20230317);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:李章鹏(1999—),男,硕士生,主要从事沉积地质学、地震资料解释方面的研究工作,E-mail: 1725658695@qq.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与评价方面的研究工作,E-mail: lj_100@163.com 收稿日期:2022-12-22; 改回日期:2023-02-13. 文凤英编辑

道研究以露头及地震资料为主,通过沉积学方法及 地球物理方法对其进行表征,进而定性分析其形成 过程、主控因素及形态结构演化模式,但缺乏就水 道自身的形态分析及对其剖面和平面形态内在联 系的定量研究^[5-7]。

上印度扇是现代近海盆地中最大的沉积体之一,其深水区是现今国际上油气勘探的热点区域,同时也是深水沉积勘探研究的优良区域,在其扇体内部形成了多期次、多级次、多叠覆的水道堤岸体系,是研究不同级次水道堤岸体系时空演化模式的最佳区域^[8-9]。前人对上印度扇开展了较多的地层与沉积特征调研,从其形成历程、物源输送、构造演化以及沉积特征等角度进行了分析,但仍缺少对地层中沉积体系的精细化认识^[10-12]。本文以地震地层学分析理论及技术作为研究基础,使用新采集的高精度二维地震资料及解释成果,选取区内三条具

备典型水道沉积特征测线为材料,根据上印度扇水 道堤岸体系的实际发育情况,研究上印度扇中新世 以来的水道-堤岸体系几何学特征及形成演化,明 确了上印度扇水道-堤岸体系在不同时期的沉积特 征,为后续确定上印度扇油气勘探有利目标提供新 的思路。

1 研究区概况

1.1 区域地理位置

印度扇是发育在巴基斯坦—印度被动大陆边缘 西侧的海底扇体(图1),纵向展布距离达1.6× 10³ km,宽约1.1×10³ km,覆盖面积约1.25×10⁵ km², 扇体范围内最大沉积厚度约11 km,是世界上第二 大海底扇。物源主要来自印度河流域,可进一步将



Fig.1 Location of the survey lines in the study area

印度扇分为上扇、中扇、下扇^[11-12]。研究区位于印 度扇近海盆地,隶属巴基斯坦专属经济区内,属于 上印度扇,水深400~3000 m,印度扇近海盆地自北 向南可划分为默里脊、派肯坳陷和索拉斯特拉隆 起3个次一级构造单元^[8]。

1.2 区域地质背景

印度板块的形成与演化自侏罗纪末期冈瓦纳 大陆的裂解开始,随后印度板块发生漂移并向着北 东方向开始移动,研究区所处的现印度河盆地区域 从非洲大陆裂离,至中生代形成裂陷盆地;在白垩 世晚期,印度板块漂移到留尼汪热点之上,发生了 长时间的火山喷发活动,在板块西南部形成大面积 溢流相的德干玄武岩覆盖层,同时由于留尼汪地幔 柱的形成,印度板块加速北移;古新世期间,印度板 块火山活动减少,火成岩台地上开始发育生物礁, 至始新世早期一直处于缓慢沉降状态。之后自始 新世起,由于印度板块与欧亚板块的碰撞,大量碎 屑沉积物注入印度板块近海盆地中,印度扇开始沉 积发育^[8-9,13]。

根据目前已有的上印度扇海上钻井结果,结合 区域重磁资料和构造演化历史,上印度扇陆域发育



Fig.2 Bar chart of offshore and onshore strata of the Indian Fan Offshore Basin^[14]

有中生界侏罗系、下白垩统、上白垩统,海域则缺 少中生界钻井资料;海域及陆域均发育新生界古近 系古新统、始新统、渐新统,新生界新近系中新统、 上新统和新生界第四系更新统、全新统(图 2)^[12,14]。

中生界主要为印度板块脱离联合古陆过程中 发生的裂陷式沉积,范围相对局限,主要发生在研 究区的东部和北部,岩性种类较为复杂,晚白垩世 时期由于构造活动强烈,火山活动频繁,发育有特 征性火山岩沉积地层,沉积地层被火山岩侵入明 显,上白垩统下段地层二分性明显,下部为泥岩,上 部为厚层砂岩;下白垩统以泥岩为主,全区广泛分 布,是印度河盆地重要的生油岩,在陆架边缘发育 三角洲前缘和斜坡扇砂岩,为下印度河盆地重要储 集砂岩^[14]。新生界地层广泛发育碳酸盐岩台地,在 喜马拉雅山脉隆升后注入大量碎屑沉积,古新世至 始新世期间为上印度扇碳酸盐岩台地形成并增厚 的过程,随着海平面持续上升,原有的火山岩台地 被海水覆盖,赋予了碳酸盐岩台地沉积的条件,沉 积过程较为稳定[15-16]。渐新世时期发生退积,在上 印度扇北部残留地层中见部分渐新统岩性,主要以 灰岩和泥灰岩为主,尚未有井位钻遇渐新统地层[12]。 中新世发育大型复合河道体系,岩性以砂岩、粉砂 岩、泥页岩为主,早中新世晚期见有明显海平面下 降,河道下切深度明显增加,在印度扇北端喜马拉 雅山脉抬升剥蚀产生的大量沉积物质供应下,印度 扇近海盆地沉积厚度大幅增加[17]。上新世至全新

世期间上印度扇区域内未有大型构造活动,盆地内 部持续沉降碎屑物质,水道-堤岸体系不断加积,在 地震反射界面可见明显侧向迁移^[18]。

2 材料与方法

2.1 研究数据

本文所用数据收集自近年来最新采集的地震资料,采样间隔为2ms,道间距31.25m,覆盖次数96次,炮间距为12.5m,地震剖面以SEG-D8058格式记录。在记录的地震剖面中,地震振幅强弱大致反映了沉积物的岩性^[19]。

以近、中、远物源端为空间变量,以中新世、上 新世、更新世至今3个时期为时间变量,在研究区 内测线中分别在近端、中端、远端选取三条水道--堤岸体系发育结构最为清晰的地震剖面,对中新世 以来上印度扇的内部结构、水道--堤岸体系演化进 行分析解释(图3、图4)。

2.2 研究方法

2.2.1 水道-堤岸体系识别方法

本次研究参考 Deptuck 等 (2003) 定义的水道--堤岸体系概念, 根据区域地质背景以及实际地震资 料解释成果, 将研究区地震剖面数据中具备标准重 力流水道结构单元(自然堤岸、水道沉积等) 提取出



图 3 研究区水道-堤岸体系识别及划分示意图(中端西侧)

Fig.3 Identification and division of the channel-levee system in the study area (the western side of the middle end)



图 4 研究区水道--堤岸体系识别及划分示意图(中端东侧)

Fig.4 Identification and division of the channel-levee system in the study area (the eastern side of the middle end)

来并进行统计划分^[9]。

34

水道-堤岸体系由时间上连续发育的单期水 道、堤岸沉积组成,在地震剖面中表现出典型的 "U"型或"V"型形态结构特征(图 5),内部地震相 较为均一,具有完整的水道沉积、内堤岸、外堤岸 及侵蚀基底结构,单期水道在空间上呈垂向或侧向 叠置并连续展布,不存在强连续地震同相轴或地层 分隔,在顶、底界面为局部下切侵蚀界面^[20-21]。水道 -堤岸体系可以独立发育或处于更高级次的复合体 系内部,独立发育的水道-堤岸体系表明上游发育 下切水道但规模有限,活动时间较短,沉积过程中 水道被淹没或物源停止输送导致废弃^[22]。据此,在 地震反射单元中依照属性值特征、形态结构来识别 解释水道--堤岸体系。

2.2.2 水道-堤岸体系划分方法

依照地震反射特征以及岩性分层来划分水道-堤岸体系内部结构之间的差异性:水道沉积呈中--强振幅、低连续性杂乱反射特征,可依据强振幅、 连续下凸同相轴划分不同期次水道充填;内堤岸以 弱振幅、低连续性特征为主,主要发育在水道带内 中下部位置;外堤岸内幕结构清晰,同相轴连续性 较强,可根据强振幅、高连续同相轴划分不同沉积 期次^[3]。此外,单期水道经外力因素影响常表现出 多期叠覆的特征,在垂向及侧向均有偏移叠加倾向



Fig.5 Seismic profile of the channel-unit structure

(图 6),因此,在划分不同级次水道--堤岸体系时应 当注意水道内部地震杂乱反射的垂向连续性及延 伸性。

2.2.3 参数统计

依据深水沉积理论中关于重力流水道的沉积 特征描述^[25],水道-堤岸体系在单期沉积形成时的 初始阶段,其宽度与厚度常表现出强烈的正相关 性,而伴随水道-堤岸体系的延伸,在远端处则表现 出明显的负相关性,故对水道-堤岸体系进行宽度、 厚度及宽厚比统计工作,所获得的结果可以帮助解 释研究区内近、中、远端水道-堤岸体系的沉积结 构发育情况。

本次研究主要进行测量统计的关键参数有:

(1)水道-堤岸体系厚度,水道沉积单元在垂向 上从最高堤岸脊到水道底部的垂直距离;

(2)水道-堤岸体系宽度,水道沉积体外堤岸两 侧末端之间的水平距离;

(3)水道-堤岸体系宽/厚比,水道-堤岸体系的 宽度与厚度值之间的比值。

根据测量统计得到的水道-堤岸体系的宽度、 厚度及宽厚比值,可以从整体上总结出水道-堤岸 体系在发育过程中的规模以及下切侵蚀程度的变 化,从水道-堤岸体系的几何学形态变化及其演化 来得到水道-堤岸体系的演化模式。

3 结果与讨论

在深水水道内部结构、剖面形态的相互影响及 外部构造活动、火山活动的制约作用共同控制下, 水道沉积的发育程度往往有着显著的差异性^[26]。 前人研究在深水沉积学理论中将外部影响因素对 水道沉积演化过程中的控制作用已经给出较多描述,但对水道沉积内部结构、形态的发育程度等自 身因素与其沉积演化的关系尚未有明确解释^[21]。 因此,本次通过定量分析研究,获取高精度的水道 -堤岸体几何学数据以进行统计学分析,为后续完 善深水沉积理论及油气勘探方向优选提供思路。

3.1 水道-堤岸体系结构单元识别特征

在对3个沉积时期地震剖面观察与分析的基础 上,将各时期水道-堤岸体系结构单元进行精细解 释,比对不同时期水道-堤岸体系的形态差异,为细 化几何学特征分析提供依据^[19,21]。

(1)中新世

根据中新世时期典型水道-堤岸体系地震资料 解释(图 7a),可识别出下切水道、内堤岸与外堤岸 单元,下切水道单元内地震以强---弱振幅、低连续 --杂乱反射为主,可依据强振幅、连续下凸同相轴 划分不同期次水道充填;内堤岸单元以弱振幅、低 连续反射特征为主,主要发育在水道--堤岸体系内 部中下位置;外堤岸内幕结构清晰,同相轴连续性 较强,可根据强振幅、高连续同相轴划分不同沉积 期次。

(2)上新世

从典型地震剖面来看(图 7b),该期内以多期叠 置的水道-堤岸体系为主,发育有中新世以来规模 最大、内幕结构最丰富的水道-堤岸体系。下切水 道内幕地震反射同相轴垂向上可见侧向迁移摆动, 发育规模由早到晚逐渐变窄;内堤岸结构单元发 育,由于水道摆动在垂向上形成多套叠置关系;外



图 6 水道-堤岸体系叠覆发育类型图^[24] Fig.6 Pattern of overlaying development of the channel-levee system^[24]



图 7 中新世以来典型水道-堤岸体系地震剖面 Fig.7 Seismic profile of typical channel-levee system since the Miocene

堤岸单元内幕强振幅连续同相轴发育,存在广泛砂 泥交互。

(3)更新世至今

更新世至今为印度扇发育的衰退期,该期内水 道-堤岸体系在整体上仍表现为多期叠置发育(图 7c),但单期内下切水道更窄、堤岸沉积厚度加大。 如图所示,下切水道单元窄而深,地震同相轴以强 振幅、低连续一杂乱反射为主,垂向上侧向迁移摆 动;内、外堤岸结构较为发育,外堤岸以宽泛弱振 幅、中一高连续地震同相轴为主,表明内幕岩性组 成均一。

3.2 几何学特征

据新采集的二维地震剖面中水道-堤岸体系参数统计的结果(表1),除中新世由于大量沉积碎屑倾泻于近端导致其近端处的厚度增加外,上新世、更新世至今两个时期内水道-堤岸体系的发育情况均表现出清晰的几何学"折返"特征,即水道在由近至远端的规模先增大后减小。时间尺度方面,在近端、中端和远端的水道沉积发育情况也表现出曲折的变化关系。

3.2.1 不同空间位置水道-堤岸体系几何学特征

中新世时期来自北部的巨量山脉隆升摩擦碎 肩给予近物源端丰富的沉积物质;上新世时期由于 陆架向海推移,更多的粗粒沉积能够到达中物源端 位置并堆积;更新世至今,区域性沉积模式逐渐稳 定,水道-堤岸体系内部结构单元展布范围增加^[12]。 距物源区远近在很大程度上影响着水道-堤岸体系 的演化成熟度,因此,将时间作为固定量,将距物源 端远近为变量,研究水道-堤岸体系在不同空间位 置的形态、规模特征变化。

(1)中新世水道-堤岸体系

中新世时期水道-堤岸体系与上新世、更新世 至今两个时期的几何学特征存在明显差异(图 8), 中物源端处水道-堤岸体系的平均宽度相较于近物 源端处大幅提高,但平均沉积厚度反而明显减小; 远物源端处仍表现出参数纬度上的回缩,但其平均 宽度仍大于近物源端处(图 8a)。该时期内水道-堤 岸体系在近端与中端处均发育宽度更大、平面展布 更广的水道滞留沉积,推断原因为中新世早期相对 海平面的下降,使得陆架边缘环境具有不稳定性, 陆架坡折区由于海底滑塌作用发育规模大小形态 中新世

表 1

19755

14182

10520

中新世以来水道--堤岸体系平均宽度、平均厚度、平均宽厚比

Table 1 The average width, thickness, and width-thickness ratio of the channel-levee system since the Miocene									
	平均宽度/m			平均厚度/m			平均宽厚比		
	近端	中端	远端	近端	中端	远端	近端	中端	远靖
更新世至今	5 3 2 8	19087	13 003	547	738	524	9.9	24.7	26.2
上新世	4564	17608	11734	438	571	559	12.3	33.3	22.0

629

543

452

16.1

37.8



图 8 不同空间位置水道-堤岸体系几何学特征差异 Fig.8 Geometric characteristics in different spatial positions of the channel-levee system

不一的海底峡谷,切割早期高位域时期沉积的陆架 三角洲,开辟了上印度扇近海盆地内水道的物源通 道。在上陆坡处由于陆坡较陡,主要发育侵蚀性水 道,且物源随深水重力流冲击拓宽水道,至下陆坡 部位,由于海底坡度变缓,水道沉积满溢外堤,侵蚀 性减弱而沉积作用加强,在中物源端及远物源端发 育更大规模的水道-堤岸体系。

(2)上新世水道--堤岸体系

上新世时期,陆坡峡谷区整体向盆地推进,同时供源峡谷数量增多,规模明显扩大^[12]。盆地内水 道-堤岸体系整体上呈 NE-SW 向展布,水道-堤岸 体系在中物源端处的平均宽度为17608 m,平均厚 度571 m,高于近端与远端的宽度与厚度(图8b);远 物源端处仅有宽度回落幅度较大,平均厚度相比于 中物源端处仅略有缩减,且远物源端处水道-堤岸 体系的形态似扁平透镜体,水道滞留沉积较薄,在 整体上仍表现出形态先增大后减小的折返特征。 从整体上看,上新世水道-堤岸体系以水道结构单 元为主,平面展布范围较大,砂质沉积范围广,且中 物源端的高宽厚度主要以下切水道内部砂质沉积 为主。

(3)更新世至今水道-堤岸体系

35.2

更新世至今,供源峡谷在数量上有所减少^[13],盆 地内水道-堤岸体系在数量上虽然有所减少,但单 期次水道-堤岸体系在规模上进一步扩大。在中物 源端处的水道-堤岸体系宽度与厚度的参数纬度均 远超近物源端处(图 8c),其平均宽度自近物源端水 道的5328m发展至中物源端处19087m,平均厚度 自近端547m至中端738m,而在远物源端处两个 参数相比中端均大幅回落,厚度略薄于近物源端, 平均宽度稍大于近物源端处,在规模上表现出典型 的折返形态。相较于前两个时期,该时期内水道结 构单元展布最广,平面分布范围最大,砂质沉积范 围最大。

3.2.2 不同时期水道-堤岸体系几何学特征

在不同期次内发生的专属地质活动影响着水 道-堤岸体系的形成,因此,将距物源区远近作为固 定量,时间期次为变量,研究水道-堤岸体系在同一 地理位置的不同时期所形成的形态、规模特征。

(1)近物源端水道-堤岸体系

近物源端处的水道-堤岸体系几何学特征差异 图(图 9a)显示,中新世时期水道-堤岸体系的平均 宽度为10520 m,平均厚度为629 m,均远超上新世 与更新世的平均宽厚数值,这一特征与该时期陆域 边缘碰撞产生的大量碎屑沉降对应^{115]}。在中新世 时期近物源端获得更大数量级的碎屑物质,因此形 成的水道-堤岸体系在3个期次内规模最大、展布 最广;上新世在近物源端处形成的水道-堤岸体系 平均厚度又薄于更新世至今时期,推断是由于上新 世5.1 MaBP前的海平面快速上升造成了该时期内 沉积厚度的差异特征,该期内水道-堤岸体朵体构 造的形成位置以及水道延伸距离更远证明了这一点。

(2)中物源端水道-堤岸体系

中物源端处自中新世至今的水道--堤岸体系平 均宽度变化幅度不大(图 9b),但平均厚度稳定增 加,水道--堤岸体系在此处的沉积演化较为稳定,来 自峡谷的物源供给持续且充足,在上新世时期来自 陆源的碎屑供应通道增加了两条峡谷来源通道,在 上新世末期消失。在中物源端处,水道--堤岸体系 的最厚时期为中新世(19755 m),最薄时期为上新 世(17608 m),但上新世时期同时也发育了最多的 水道--堤岸体系,上新世晚期盆地内共沉积了9条 规模不等的水道--堤岸体系。

(3)远物源端水道-堤岸体系

根据远物源端水道-堤岸体系几何学特征差异(图 9c),中新世、上新世、更新世至今时期内的水



Fig.9 Geometric characteristics in different periods of the channel-levee system development

道-堤岸体系在远物源端处均表现出沉积厚度增加 的趋势,但平均宽度在总体上略有下降。由于喜马 拉雅山脉隆起产生的巨量碎屑持续供应,印度扇近 海盆地的沉积物质来源充足,且远物源端处海底坡 度较缓,满溢水道泥质沉积丰富,外堤厚度较大,水 道-堤岸体在尾端易形成朵体。

3.2.3 几何学数据统计结果分析

根据统计结果,建立不同时期各个位置水道--堤岸体系平均宽度与厚度模式图(图 10),可以更加 直观地比较上述差异及特征。

在空间尺度方面,近物源端处的中新世时期水 道-堤岸体系平均宽度与厚度明显大于上、更新世 时期,在中、远物源端则相反。中新世时期由于海 平面下降,使得陆架边缘环境具有不稳定性,陆架 坡折区由于海底滑塌作用发育规模大小形态不等 的海底峡谷,切割早期高位域时期沉积的陆架三角 洲,在近物源端由于坡度较陡,主要发育了侵蚀型 水道-堤岸体系,至远物源端,由于地形坡度变缓, 水道沉积侵蚀性减弱,沉积作用加强,同时由于粗 粒碎屑大量堆积于近物源端,在远物源端发育大规 模多期次水道-堤岸体系复合结构,远物源端处沉 积物发生卸载,部分能量较强的水道携带沉积物继 续向深海流入,部分能量较弱的则会散开沉积,从 而形成大规模叠置的朵体沉积。

在时间尺度方面,不同时期各个位置的水道-





堤岸体系几何学特征变化较为明显,上印度扇内部 自中新世到更新世至今呈现出由"单期水道-扁长 型"到"多期水道-厚窄型"的演化特点(图7)。中新 世水道-堤岸体系多以单期发育为主,水道及天然 堤内部结构简单,不同期次水道-堤岸体系空间上 相互分隔且距离较远;上新世水道-堤岸体系多以 多期叠置为主,水道及天然堤内部可根据下切侵蚀 面或强振幅连续界面划分出不同期次,不同二级体 系空间上往往发生一定程度叠置;更新世至今水 道-堤岸体系规模进一步扩大,以多期叠置为主,内 堤岸结构清晰,不同水道-堤岸体系在空间上叠置 程度加大。

3.3 上印度扇水道-堤岸体系演化阶段

在海平面周期性升降旋回的不同阶段,深水沉 积的沉积供应类型与数量存在差异。一个理想的 深水沉积层序具有4个阶段:海退期、低位域期、海 侵期、高位域期,上印度扇水道-堤岸体系的演化过 程亦受海平面升降约束,在其几何学特征中可以看 出深水沉积的阶段性表现。

3.3.1 中新世

综合多类地质、地球物理资料,包括二维多道 地震测线(网格密度 5 km×5 km、9 km×9 km)剖面解 释、钻井数据(Kekra-1、Pak G2-1 井)以及对其宽厚 参数的统计分析等^[14, 27-28],对中新世上印度扇水道-堤岸体系几何学特征、平面展布进行了分析。其 中,二维地震资料分别采集自 20 世纪 90 年代和 21 世纪初,地震数据覆盖了陆坡至盆地超深水环境 (200~3 500 m 以上)。

(1)中新世前期

中新世早期(图 11a), 深水水道体系主要发育 于研究区西北部(靠近陆缘一侧), 水道-堤岸体系 的平均宽度、厚度较小, 砂质沉积较少, 相互之间的 规模有所差异, 在近物源端偶见大规模水道沉积, 整体轴向呈 NE-SW 向。

(2)中新世中期

中新世中期,来自峡谷的砂质沉积物持续供 给,研究区内发育有6条水道-堤岸复合体系(图11b), 数量较早期翻倍,上印度扇深水水道沉积体系正式 开始形成,且整体向研究区东部发生明显迁移,呈 NW-SE向展布。

(3)中新世晚期

该时期研究区内共发育4条水道-堤岸体系 (图 11c),数量较中期相对减少,但每个水道-堤岸 体的规模较前期增大,宽度与厚度出现明显增加,



Fig.11 The development of the channel-levee system in the Miocene

在参数统计中出现个别水道宽、厚远超平均值的现象,水道沉积中砂质碎屑明显增多。在空间上进一步发生逆时针偏转,呈 NNW-SSE 向。

中新世时期为印度扇发育的初始时期,印度板 块与欧亚板块加速挤压碰撞,碎屑物质通过印度河 充注阿拉伯海。除此之外,由于海平面下降以及印 度河汛期洪水,渐新世时期于陆架边缘处形成的退 积沉积物失稳,以滑动-滑塌-碎屑颗粒流的形式沿 陆坡进入上印度扇。上印度扇在中新世时期沉积 速率持续增加,在晚中新世达到(20~30)×10³ km³/Ma, 对该时期内的水道-堤岸体系的沉积演化产生深刻 影响^[12],在近物源端与远物源端形成了中新世以来 最为宽厚的水道-堤岸体系(图 12a)。

3.3.2 上新世

综合前人对印度扇沉积演化的研究^[8,29],结合参数统计数据分析,上新世时期陆坡峡谷区整体向上印度扇推进,提供陆源碎屑供给的峡谷数量增加,且陆源碎屑数量、规模明显增大,中新世中后期 停止、较少供源的峡谷重新开启供源,并且在数量 上增多,为上印度扇西北部水道-堤岸体系的形成 提供了丰厚物质来源。因此上新世时期盆地内水道-堤岸体系的数量、规模较中新世时期有所扩大,在 中物源端形成水道-堤岸体系体量上的峰值(图 12b), 是上印度扇水道沉积的快速发育期。

3.3.3 更新世至今

通过对研究区内测线 L1 至测线 L3 剖面中水 道-堤岸体系的参数统计数据进行分析,综合区域 地质演化情况^[16,30,32],由于构造活动趋于稳定,在更 新世至全新世期间通过河流输运沉积物质不断累 积,水道-堤岸体系的沉积演化多为继承发育,在峡 谷-陆坡-盆地存在多条大规模水道-堤岸体系,研究 区内的水道-堤岸体系在叠合的基础上表现出更高 的宽厚比,在中物源端水道-堤岸体系的宽厚比平 均值达到中新世以来的峰值。另一方面,由于水道 沉积的顺畅发育,沉积物质经历较长距离搬运,重 力流沉积物的粒度在远物源端整体偏细,水道-堤 岸体系也在远物源端发生分叉,大量细粒沉积物溢 出水道形成较宽的外堤岸,故远物源端宽厚比表现



图 12 不同时期水道-堤岸体系宽厚比浮动条形图 Fig.12 Floating bar chart in width-depth ratio of different periods channel-levee system

出增大的趋势(图 12c),但水道沉积整体仍发育良好。

综上,上印度扇水道-堤岸体系的形成主要经 历了3个演化时期:①中新世时期,水道-堤岸体数 量较少,延伸距离短,近物源端接收大量碎屑沉降 形成规模较大水道-堤岸体系;②上新世时期,峡谷 供源增加,水道数量、规模增大,延伸距离更远,水 道滞留砂质沉积范围占比快速增加;③更新世至 今,水道数量有所减少,但单一水道-堤岸体系规模 更大,下切水道平面分布最宽,水道-堤岸体系在此 时期内平稳沉积,叠覆堆积形成复合体系。

据此,上印度扇水道-堤岸体系的形成历程为: "单期水道-侧向迁移-扁长型发育"到"多期水道-垂 向叠置-厚窄型"。研究区内水道-堤岸体系在3个 时期内的发育演化具有相似的过程,由单一深水水 道沉积经过迁移、叠合、继承发育成为复合型水道 -堤岸体系,单期水道沉积之上不断发生水道叠覆, 多期叠覆后外堤岸宽度逐渐减小,进一步限制了水 道在平面上的宽度,使得多期水道累积后形成"厚 窄型"的整体形态(图13)。

4 结论

(1)根据地震剖面识别出的水道侵蚀界面,上 印度扇中新世以来的水道--堤岸体系大致可划分为 3期:中新世、上新世和更新世至今。其中,水道 -堤岸体系在中新世中期发生逆时针扭转,水道整 体向 NW-SE 向偏转,期间主要以单期发育为主,水 道沉积内部结构简单,未见其他期次下切侵蚀面, 内堤岸发育不完全,外侧主要以天然堤横向拓展为 主;上新世水道--堤岸体系垂向多期次叠覆较多,内 堤岸发育,水道滞留沉积厚度增加;更新世至今水 道--堤岸体系的规模进一步扩大,水道多以叠置继 承沉积存在,内部堤岸结构清晰。

(2)水道-堤岸体系在形成初期往往形成宽度、 厚度均较大的形态,在后续的继承发育过程中,后 期叠覆水道-堤岸体系受到早期水道结构的限制, 宽度往往与初期水道宽度相似。而上印度扇水道-堤岸体系在3个阶段的发育初期均表现出宽度大、



Fig.13 Sedimentary evolution model of the Upper Indian fan integral channel-levee system since the Miocene

深度小的发育特点,依据几何学特征分析,中新世 以来上印度扇水道-堤岸体系的发育存在清晰的几 何学"折返"特征,在形成过程中表现出由"宽浅型" 结构向"窄深型"结构发育的深水沉积特征。

参考文献 (References)

- 朱筱敏, 谈明轩, 董艳蕾, 等. 当今沉积学研究热点讨论: 第20届国际 沉积学大会评述[J]. 沉积学报, 2019, 37(1): 1-16. [ZHU Xiaomin, TAN Mingxuan, DONG Yanlei, et al. Current hot topics of sedimentology: comment on the 20th international sedimentological congress [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(1): 1-16.]
- [2] 侯云超,樊太亮,王宏语,等.墨西哥湾西北部古近纪早期(62~48 Ma)源汇体系与沉积格局变迁[J]. 沉积学报, 2020, 38(6): 1272-1283. [HOU Yunchao, FAN Tailiang, WANG Hongyu, et al. Changes of source-to-sink systems and sedimentary patterns in the Early Paleogene (62-48 Ma) of the northwestern gulf of Mexico [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(6): 1272-1283.]
- [3] 刘亚雷,马嫡,柳永杰,等. 刚果扇X区块中新统重力流水道储层分 布特征[J].中国海上油气,2016,28(4): 16-23. [LIU Yalei, MA Di, LIU Yongjie, et al. Reservoir distribution characteristics of Miocene gravity flow channel in Block X of Congo fan [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(4): 16-23.]
- [4] 谈明轩, 吴峰, 马皓然, 等. 海底扇沉积相模式、沉积过程及其沉积 记录的指示意义[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 435-449. [TAN Mingxuan, WU Feng, MA Haoran, et al. Facies model, sedimentary process and depositional record of submarine fans, and their implica-

tions [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 435-449.]

- [5] 张旭,卜范青,段瑞凯,等.尼日尔三角洲盆地深水区E油田重力流水 道复合体沉积特征与内部期次解剖[J].海相油气地质,2021, 26(2): 170-178.[ZHANG Xu, BU Fanqing, DUAN Ruikai, et al. Sedimentary characteristics and internal phase anatomy of gravity flow channel complex of E Oilfield in deep water area of Niger Delta Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(2): 170-178.]
- [6] 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.
- [7] 刘化清, 冯明, 郭精义,等. 坳陷湖盆斜坡区深水重力流水道地震响 应及沉积特征: 以松辽盆地LHP地区嫩江组一段为例[J]. 岩性油气 藏, 2021, 33 (3): 1-12. [LIU Huaqing, FENG Ming, GUO Jingyi, et al. Seismic reflection and sedimentary characteristics of deep-water gravity flow channels on the slope of lacustrine depression basin: first member of Nenjiang Formation in LHP area, Songliao Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33 (3): 1-12.]
- [8] 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.]
- [9] Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, et al. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20 (6-8): 649-676.
- [10] 浩克, 纪友亮, 张胜久, 等. 印度河扇水道堤岸外侧更新世沉积物波 发育特征与形成过程分析[J]. 古地理学报, 2022, 24(2): 389-404.

[Haq E U, JI Youliang, ZHANG Shengjiu, et al. Analysis on characteristics and formation process of sediment waves on the Pleistocene channel levee backslope of Indus fan [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2022, 24(2): 389-404.]

- [11] Mchargue T R. 印度海底扇的海底峡谷和扇根水道的内部几何形态、地震相与石油潜力[J]. 樊太亮, 译. 国外油气勘探, 1988 (3): 14-22. [Mchargue T R. Internal geometry, seismic facies and petroleum potential of submarine canyons and fan root channels in the Indian submarine fan [J]. FAN Tailiang, trans. Equipment for Geophysical Prospecting, 1988 (3): 14-22.]
- [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.]
- 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.
- [14] 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.
- [15] Clift P, Gaedicke C. Accelerated mass flux to the Arabian Sea during the Middle to Late Miocene [J]. Geology, 2002, 30(3): 207-210.
- [16] 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.
- [17] 陈红瑾, 徐兆凯, 蔡明江, 等. 30ka以来东阿拉伯海U1456站位粘土粒 级碎屑沉积物来源及其古环境意义[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2803-2817. [CHEN Hongjin, XU Zhaokai, CAI Mingjiang, et al. Provenance of clay-sized detrital sediments and its paleoenvironment-al implications at site U1456 in the Eastern Arabian Sea since 30ka [J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2803-2817.]
- [18] Carter S C, Griffith E M, Clift P D, et al. Clay-fraction strontium and neodymium isotopes in the Indus Fan: implications for sediment transport and provenance [J]. Geological Magazine, 2020, 157 (6): 879-894.
- [19] 苏超. 南图尔盖盆地260D区块上侏罗统河道砂体识别[J]. 石油地质 与工程, 2019, 33 (6): 5-8,14. [SU Chao. Identification of Upper Jurassic channel sand bodies in Block 260D of South Turgai Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33 (6): 5-8,14.]
- [20] 吕彩丽, 吴时国, 袁圣强. 深水水道沉积体系及地震识别特征研究
 [J]. 海洋科学集刊, 2010 (50): 40-49. [LÜ Caili, WU Shiguo, YUAN Shengqiang. Deepwater channel complex sedimentary system and its seismic reflection in Qiongdongnan Basin [J]. Studia Marina Sinica, 2010 (50): 40-49.]
- [21] 陈昱瑶,周江羽,钟佳,等. 南海西北缘深水水道体系的地震响应及 其演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(2): 69-78. [CHEN Yuyao, ZHOU Jiangyu, ZHONG Jia, et al. Seismic characteristics of deepwater channel system in northwestern margin of South China Sea and its evolution [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(2): 69-78.]

- [22] 李华,何幼斌,王振奇.深水高弯度水道--堤岸沉积体系形态及特征
 [J].古地理学报,2011,13(2):139-149.[LI Hua, HE Youbin, WANG Zhenqi. Morphology and characteristics of deep water high sinuous channel-levee system [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(2):139-149.]
- [23] 赵晓明, 刘飞, 葛家旺, 等. 深水水道沉积构型单元分级与结构样式
 [J]. 沉积学报, 2023, 41 (1): 37-51. [ZHAO Xiaoming, LIU Fei, GE Jiawang, et al. Sedimentary architecture unit classification and structural style of deep-water channels [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41 (1): 37-51.]
- [24] Vitor A, Morgan S, Carlos P, et al. Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deep water sinuous channels [J].
 Marine and Petroleum Geology, 2003, 20 (6-8) : 631-648.
- [25] 王允洪,黄建军,刘婷婷,等.坎波斯盆地X油田Marlim组深水扇弯曲水道形态表征及其时空演化[J].特种油气藏,2020,27(2):57-62. [WANG Yunhong, HUANG Jianjun, LIU Tingting, et al. Morphological characterization and spatiotemporal evolution of deep-water fan curved channel in the Marlim formation of X oilfield in Campos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(2):57-62.]
- [26] 李华,何幼斌. 深水重力流水道沉积研究进展[J]. 古地理学报, 2020, 22(1): 161-174. [LI Hua, HE Youbin. Research progress on deepwater gravity flow channel deposit [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(1): 161-174.]
- [27] 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. [JIANG Kaixi, YAO Changhua, GUO Qingzheng, et al. Characteristics and depositional model of Paleocene and Eocene source rocks in deepwater area of Indus fan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(4): 785-793.]
- [28] 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.
- [29] 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.]
- [30] 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.]
- [31] 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 Khalid, et al. Preliminary study on the oll and gas exploration targets in Offshore Pakistan [J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(11): 1-6.]
- [32] GONG Jianming, LIAO Jing, LIANG Jie, et al. Exploration prospects of oil and gas in the Northwestern part of the Offshore Indus Basin, Pakistan [J]. China Geology, 2020, 3 (4): 633-642.