

琼东南盆地断阶带地貌控制下的 辫状河三角洲发育特征 ——以宝岛凹陷北坡渐新统陵水组三段为例

邓孝亮¹, 汪紫菱¹, 尤丽¹, 詹冶萍², 周晨¹

1 中海石油(中国)有限公司海南分公司; 2 中海石油(中国)有限公司湛江分公司

摘要 琼东南盆地深层渐新统陵水组是南海海域下一步勘探的重点。基于岩心、测录井和三维地震资料,系统解剖了琼东南盆地宝岛凹陷北部陵水组沉积特征,明确陵水组可细分为2个三级层序,其中陵三段沉积为一个完整的三级层序,发育低位、海侵和高位体系域。控凹的F12断层差异活动形成的断层同向转换带以及转换斜坡控制着神狐隆起和海南隆起物源的注入,并控制了陵三段规模各异的西、东多支大型辫状河三角洲群的发育。断阶带在低位晚期和高位期主要发育辫状河三角洲前缘水下分流河道沉积,砂体厚度大,粒度较粗,分选较好,物性较好,为优质储层发育层段。由此建立宝岛凹陷北部断阶带陵三段深水盆地多级断裂控物源,转换断阶控砂体展布的发育模式。陵三段大型三角洲前缘水下分流河道优质储集体直接覆盖于崖城组烃源岩之上,与沟通烃源岩的断裂形成有利输导体系,又被后期拗陷期沉积的厚层海侵浅海泥岩覆盖,形成的优质储盖组合和输导体系是形成宝岛凹陷大型气田的关键。

关键词 辫状河三角洲;断阶带;陵水组三段;古近系;宝岛凹陷;琼东南盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

引用: 邓孝亮,汪紫菱,尤丽,等. 琼东南盆地断阶带地貌控制下的辫状河三角洲发育特征:以宝岛凹陷北坡渐新统陵水组三段为例[J]. 海相油气地质, 2025, 30(1): 30-40.

DENG Xiaoliang, WANG Ziling, YOU Li, et al. Development characteristics of braided river delta under geomorphic control of fault step zone in Qiongdongnan Basin: taking the 3rd member of Oligocene Lingshui Formation in the northern slope of Baodao Sag as an example[J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(1): 30-40.

0 前言

琼东南盆地是我国重要的天然气勘探领域^[1-4],在浅层中新统梅山组海底扇、黄流组中央峡谷水道^[5-10]已发现陵水17-2、陵水18-1、陵水25-1等多个大气田,在超浅层乐东组发现陵水36-1大气田^[11-12]。但随着勘探的深入,以海底扇和深水峡谷水道沉积为主的浅层优质大中型目标日益减少,剩余潜力较小,规模勘探突破难度增大,勘探亟须向断陷早期发育大型三角洲沉积体系的中深层古近系迈进^[13-14]。但琼东南盆地西部埋深大、压力高,深层目前勘探难度较大,因此盆地东部宝岛凹陷埋深

适中的古近系陵水组就成为勘探突破的重点。宝岛凹陷整体勘探程度较低,前人对断裂活动、构造演化特征、原型盆地、输导体系与成藏规律以及储层演化等方面进行了一些基础研究。如童亨茂等^[15]在对宝岛变换带的研究中认为宝岛凹陷控凹的同沉积断裂具有强烈的幕式活动特点,并形成多个具有不同特点的转换带;赵海涛等^[16]和廖计华等^[17]对宝岛凹陷南北坡的转换带进行研究,认为其对烃源灶的展布、沉积充填及输导体系的配置具有很强的控制作用;钟佳等^[18]对深水陵水组储层进行分析,明确盆地不同区带储层的演化差异。邓勇等^[19]和尤丽等^[20]分析了琼东南深水成藏特征。

收稿日期:2024-09-02;改回日期:2024-10-14

本文受中海石油(中国)有限公司科技项目“南海大中型天然气田形成条件、勘探潜力与突破方向”(编号:KJZH-2021-0003-00)、中国海洋石油集团有限公司“十四五”重大科技项目“南海北部深水天然气勘探关键技术”(编号:KJGG2021-0100)和海南省“南海新星”科技创新人才平台项目“宝岛凹陷东南缘超深水天然气优质储层识别及成藏机理研究”(编号:NHXXRCXM202367)联合资助

第一作者: 邓孝亮, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质学与储层地质学的工作。通信地址:570312 海南省海口市秀英区长滨三路御府国际;E-mail: dengxl8@cnoc.com.cn

这些研究主要针对宝岛凹陷基础地质条件,没有专门对陵水组进行深入精细探讨。裴健翔等^[13]和唐武等^[14]分别针对宝岛凹陷南部和松南低凸起中段的陵水组三角洲进行分析研究,明确了宝岛凹陷南坡小物源幕式隆升对陵水组辫状河三角洲的控制,并通过搬运通道刻画和地球物理方法对三角洲富砂性进行预测,但没有对宝岛凹陷北部陵水组沉积体系开展研究,尤其是对陵三段沉积体系和沉积特征认识不清,制约了深水深层的勘探。本文在前人研究的基础上,结合新采集的三维地震资料以及钻井资料,对宝岛凹陷北坡古近系陵水组的层序划分、沉积充填的类型、特征及演化进行分析探讨,以期对宝岛凹陷的勘探提供依据和参考。

1 区域地质概况

琼东南盆地位于南海北部,为一呈NE向展布的大型新生代被动陆缘型深水断陷盆地^[21-25]。多期构造运动造就了盆地坳隆相间的格局。宝岛凹陷位于中央坳陷带北侧,是一个二级构造单元,西部和北部紧邻松涛凸起和神狐隆起,南接松南低凸起,面积约6 200 km²,主要位于深水区(图1)。宝岛凹陷受控于早期断裂活动和后期拗陷作用,具有下断上拗的双层结构(图2)。始新世受神狐运动影响,在北西-南东向拉张应力作用下,形成多个北东向展布的断陷湖盆,湖盆范围较小,控制着始新统湖相沉积,形成重要的生油层;之后渐新世受琼琼运动影响,新南海

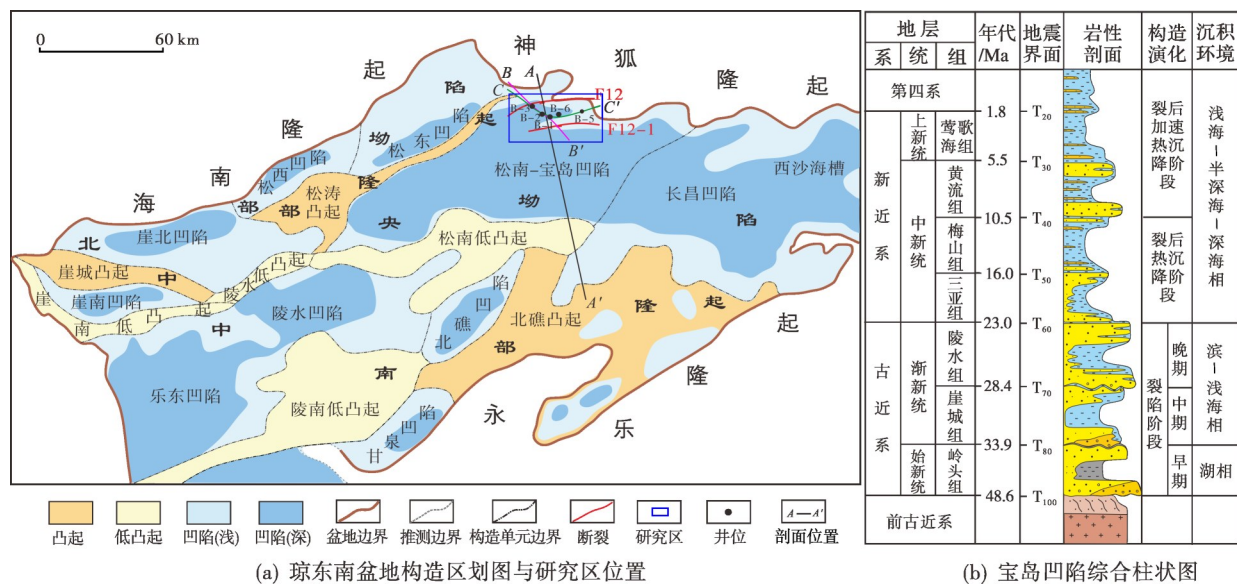


图1 研究区位置及地层综合柱状图

Fig. 1 The location and comprehensive stratigraphic column of the study area in Qiongdongnan Basin

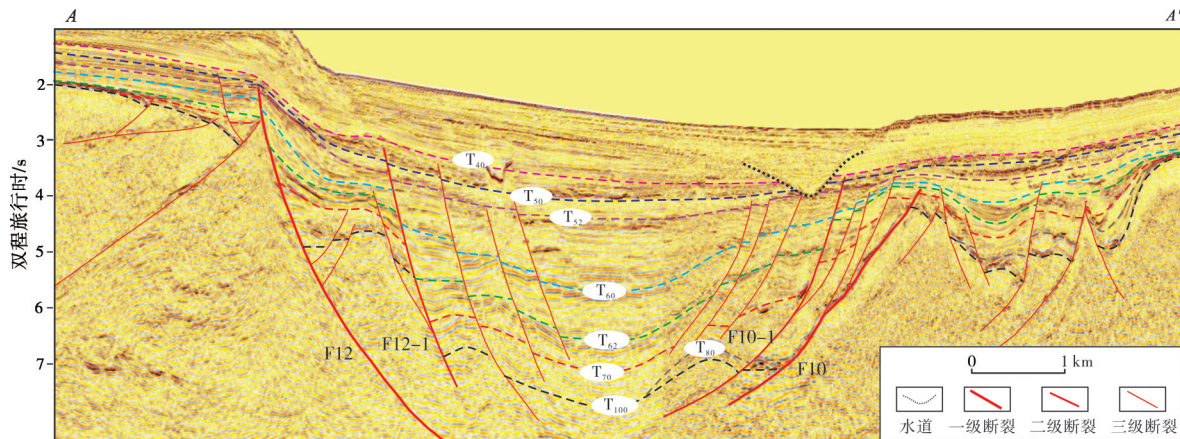


Fig. 2 Typical seismic profile showing lower fault structure and upper depression structure of Baodao Sag (location is shown in Fig. 1a)

扩张,应力旋转为近南北向,盆地开始大规模南北拉开,海水沿西北次海槽进入宝岛凹陷,控制了古近系崖城组和陵水组海相沉积,形成宝岛凹陷主要的气源岩层和储层;南海运动之后断裂活动减弱,进入拗陷期,神狐隆起逐渐没于水下,控制了新近系和第四系浅海-半深海-深海沉积,陆源碎屑减少,以发育厚层泥岩和海底扇沉积体系为主^[19-22]。

陵水组沉积于渐新世晚期,此时宝岛凹陷处于裂陷阶段,受到南北拉张应力作用,控凹断层活动剧烈,在北侧控凹的F12等断层的拆离作用以及南侧F10等断层的共同作用下,形成南断北拆离的双断地堑结构,在宝岛凹陷南北两侧形成多级断阶,来自隆起区的碎屑物质搬运到断阶带形成整体富砂的层系。陵水组自上而下依次划分为陵一段、陵二段和陵三段等3段。陵水组为一完整的二级层序,陵一段和陵二段为区域海侵之后沉积地层,整体含砂率较低,且陵二段受到陵一段沉积晚期普遍发育的泥质水道侵蚀改造,地层分布较为局限;陵三段发育于陵水组沉积早期,此时隆起区范围较大,且与凹陷区具有较大的落差,在多级断裂控制

下,北部神狐隆起和海南隆起以及南部隆起大量陆源碎屑输入盆地,在盆地形成大型(扇)三角洲-海底扇-浅海沉积体系^[22-23]。

2 陵三段层序地层划分

等时层序地层格架的建立是沉积研究的基础,其划分依据一般应用钻井的岩性组合和变化、测井曲线的旋回变化以及地震波组和接触关系等特征^[26]。本文以研究区钻穿古近系的B1井来进行层序地层划分。结合区域背景,研究区古近系可划分为两个二级构造层序,对应于崖城组和陵水组,对应的层序界面为 S_{100} 、 S_{70} 和 S_{60} ,其中 S_{100} 为基底面, S_{70} 和 S_{60} 为区域不整合面,界面上下岩性组合具有明显的变化,在地震上,界面下可见削截特征,界面上可见上超和下超反射特征(图3a,3b)。在二级层序内,根据旋回特征及地震波组特征划分三级层序,崖城组可划分为3个三级层序:SQ1、SQ2和SQ3,陵水组可划分成2个三级层序:SQ4和SQ5。

由于陵水组晚期遭受强烈的侵蚀,因此研究区在陵水组识别出一个完整的三级层序(SQ4)和一个

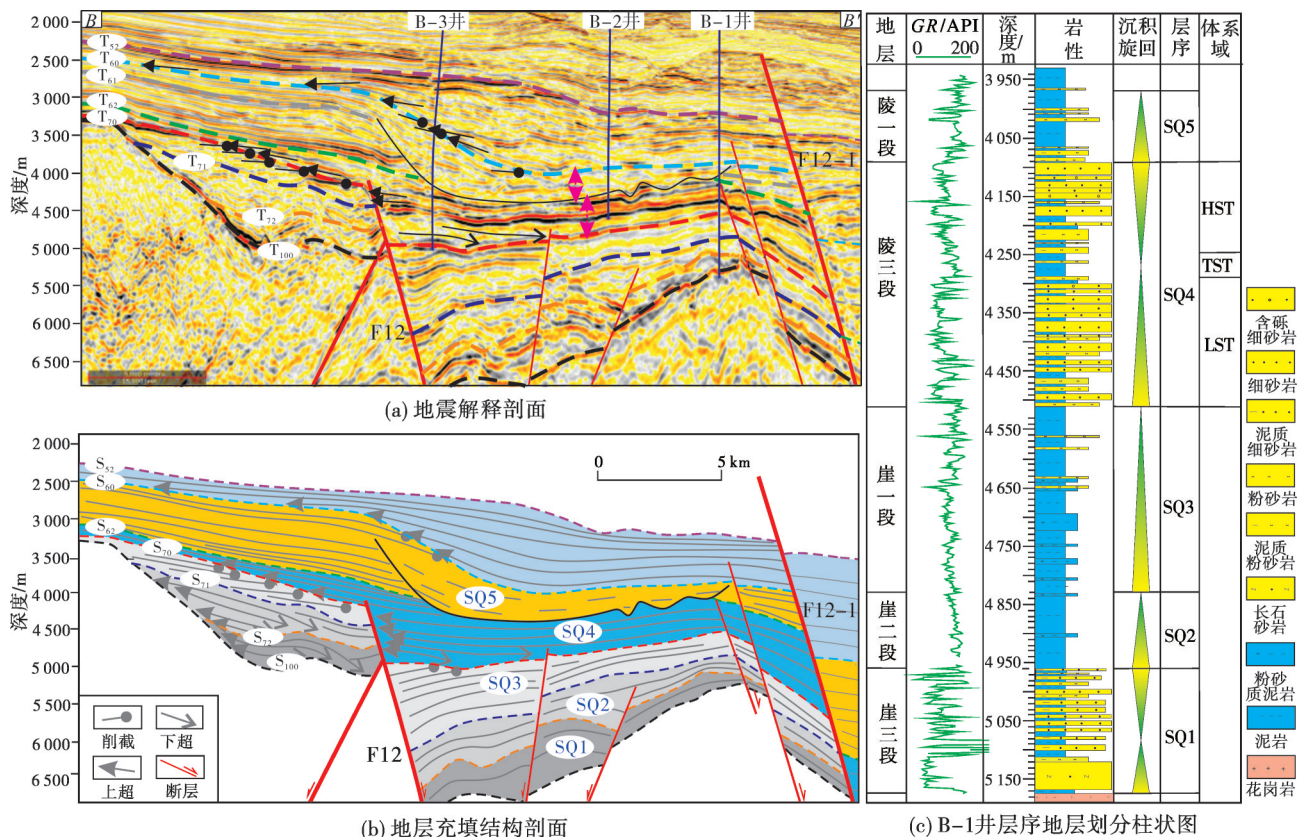


图3 宝岛北坡层序划分与地层充填结构(剖面位置见图1a)

Fig. 3 Sequence division and stratigraphic filling structure in the north slope of Baodao Sag (location is shown in Fig. 1a)

不完整的三级层序(SQ5),分别对应于陵水组三段和被侵蚀后残留的陵水组一段和陵水组二段。SQ4底界面为 S_{70} ,也是二级层序界面,界面上下岩性组合发生突变,之下为崖城组厚层泥岩,之上为厚层中细砂岩,在地震上,凹陷边部见下削上超的特征;顶界面为 S_{62} ,上下岩性组合发生变化,其下为厚层中细砂岩,其上为厚层泥岩夹薄层的粉砂岩,反映晚渐新世中期开始裂陷后期的海侵(图3)。

陵三段为研究区主要的储层发育段,将其进行体系域划分。以B-1井为例(图3c),陵三段下部以厚层的中、细砂岩为主,夹薄层泥岩,伽马曲线整体呈齿化的钟形和箱形,之上岩性发生突变,为厚层的泥岩夹薄层粉砂岩,伽马曲线为高幅平直状,与下部具有明显的突变界面,将突变界面以下划分为低位体系域(LST);陵三段上部同样沉积了厚层的中细砂岩,但与厚层泥岩之间存在粉砂岩渐变过渡,伽马曲线整体呈漏斗形,因此,确定在厚层砂岩开始出现处为最大海泛面,其上为高位体系域(HST),反映高位三角洲进积的过程,中部的厚层泥岩为海侵体系域(TST)。在地震剖面上(图3a),陵三段下部振幅整体相对较弱,连续性中等, T_{70} 之上见下超反射特征,地层呈明显楔状;之上为高连续性强振幅反射特征,为海侵沉积泥岩与上下厚层三角洲砂岩阻抗差异较大所形成,岩性差异较大;上部地震振幅整体较强,连续性好,向隆起一侧呈层层上超于 T_{70} 界面之上的特征。

3 陵三段辫状河三角洲识别标志

根据岩心、测录井以及地震等资料的综合分析,结合区域背景地质和钻井岩电特征对研究区陵三段沉积亚相和微相进行划分。陵三段主要发育辫状河三角洲前缘和前辫状河三角洲等亚相,辫状河三角洲前缘发育水下分流河道、河口坝、席状砂、水下分流河道间等沉积微相。

3.1 岩心相标志

辫状河三角洲具有搬运距离较长、河流作用较强的特点,因此砂岩粒度较粗,分选较好。冲刷面及其之上的含泥砾砂岩是辫状河三角洲的重要标志(图4a,4b),泥砾多具有一定的分选和磨圆,主要是较强的水动力周期性地冲刷下部水下分流河道间湾的泥岩所形成。另外,研究区受控凹边界断层的影响,在地形具有一定落差的影响下,塑性相对

较强的泥质粉砂岩在重力作用下滑动变形,形成部分变形构造(图4c),这也是研究区辫状河三角洲的另一重要识别标志。

研究区辫状河三角洲前缘水下分流河道以中细砂岩为主,也发育较多的粗砂岩和含砾砂岩(图5a,5b),主要为块状层理(图4d),也发育大型交错层理(图4e),局部可见河道冲刷面和滞留沉积的砾岩(图4a),整体为向上变细的正韵律;辫状河三角洲前缘河口坝主要为细砂岩(图5c),砂岩较纯,分选较好,发育块状层理、交错层理和波状爬升层理(图4f),整体为下细上粗的反韵律;辫状河三角洲席状砂为前缘靠近前端沉积,粒度较细,主要为粉砂岩(图5d),泥质含量较高,多为互层沉积,发育平行层理、小型沙纹层理和变形层理(图4g);辫状河三角洲水下分流河道间主要以细粒沉积为主,反映河道间水动力条件相对较弱的环境,多为泥岩沉积,也发育部分泥质粉砂岩,以发育平行层理为主,也见部分波状层理(图4h)。前辫状河三角洲为三角洲最前端沉积,处于浅海过渡区,以暗色泥岩为主(图4i),偶尔也发育薄层泥质粉砂岩和前缘滑塌沉积。

3.2 测井相标志

通过对宝岛凹陷北坡多口钻遇陵三段辫状河三角洲的井资料进行分析,建立辫状河三角洲各沉积微相的测井相识别图版(图6)。水下分流河道微相砂体十分发育,测井上表现为低自然伽马、低电阻率特征,曲线形态多呈箱形或钟形,底部曲线一般以突变为主,整体厚度较大,多在50 m左右。水下分流河道间多为水动力较弱的溢岸细粒沉积,以泥岩为主,伽马曲线表现为微齿化的中高幅,电阻率为高幅平直状,厚度一般较薄,多小于20 m。前缘河口坝具有明显的反韵律特征,下部为粉砂岩,向上逐渐过渡为细砂岩,测井曲线整体呈漏斗状,底部为渐变特征,顶部多呈突变特征。席状砂多发育在三角洲前缘靠近前端部分,水动力逐渐减弱,以细粒沉积为主,测井曲线为多个中高幅的指状,与上下多为渐变接触。前辫状河三角洲以泥岩等细粒沉积为主,伽马曲线为中高幅的微齿状,与下部多呈突变接触,顶部多以渐变过渡到前缘沉积。浅海环境主要为泥岩等极细粒沉积,偶见粉砂质泥岩,伽马曲线表现为高幅平直状,底部一般为突变接触,反映海侵下的沉积环境突变,顶部为渐变,反映海退环境下的三角洲进积作用。

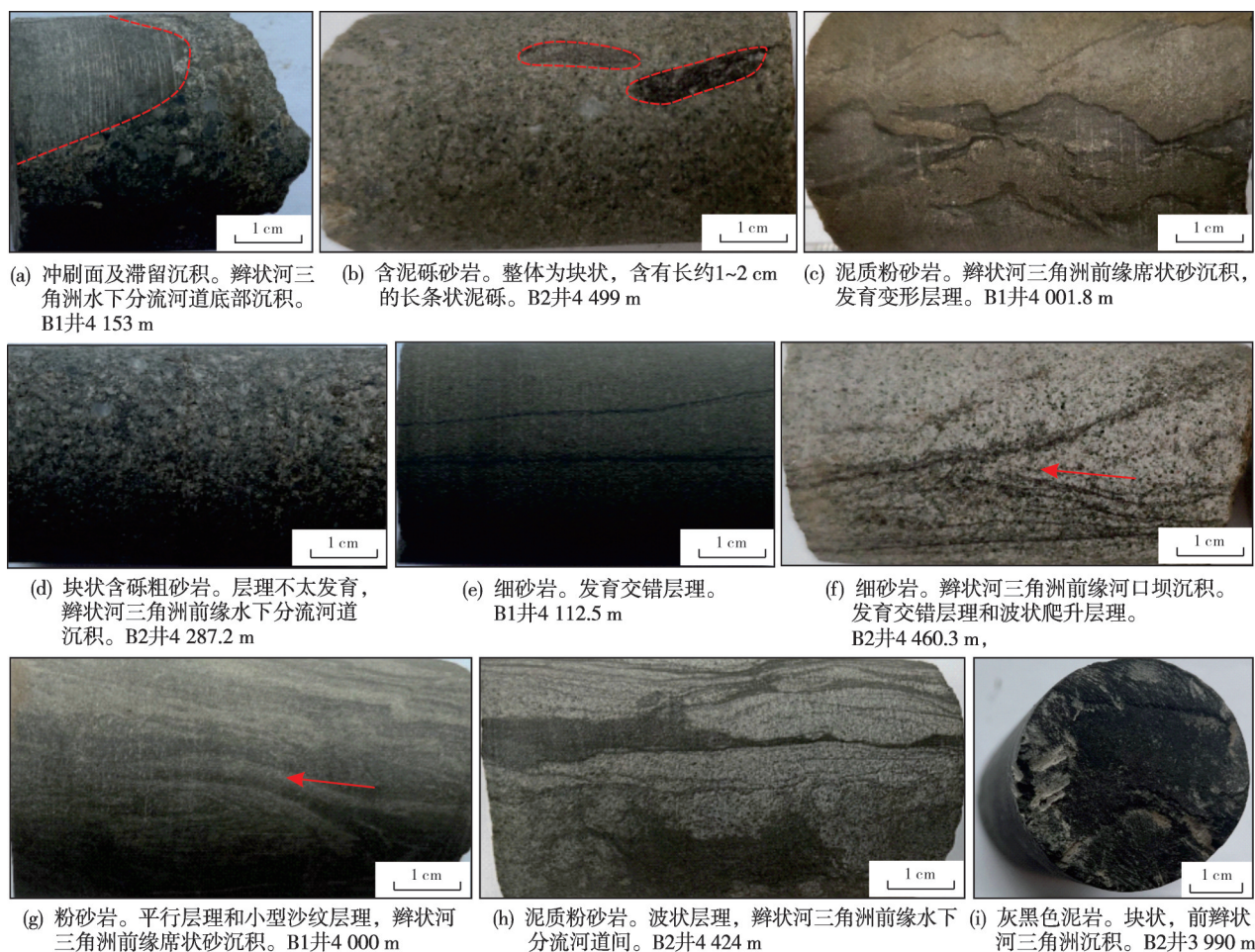


图4 宝岛凹陷北坡古近系陵三段岩心相特征

Fig. 4 Core facies characteristics of the 3rd member of Paleogene Lingshui Formation in the north slope of Baodao Sag

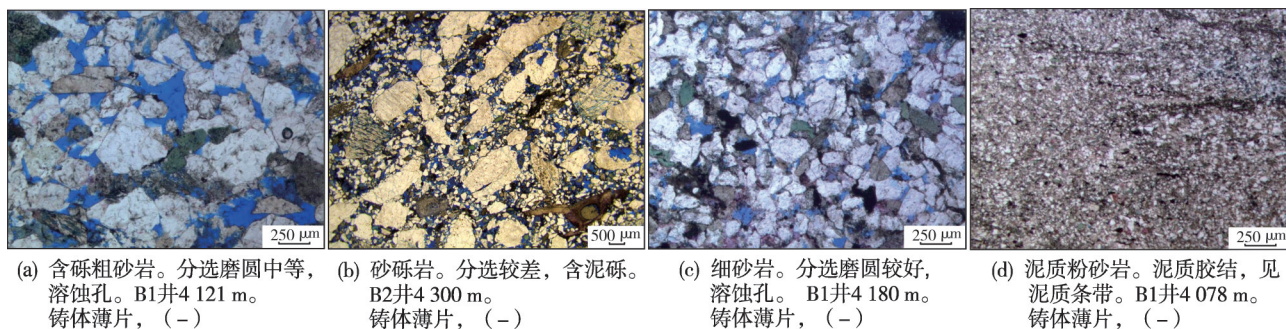


图5 宝岛凹陷北坡古近系陵三段岩石学特征

Fig. 5 Petrographic characteristics of the 3rd member of Paleogene Lingshui Formation in the north slope of Baodao Sag

3.3 地震相特征

从地震反射特征来看(图6),在靠近F12断层附近,陵三段下部地震相为弱振幅、杂乱的反射特征,主要为低位早期形成的近源扇三角洲沉积,反映厚层砂岩杂乱堆积。断阶带主体区的地震相主要为低频、强振幅、高连续性反射特征,反映辫状

河三角洲前缘。其中低位早期振幅偏弱,连续性偏差,主要为前缘的河口坝和席状砂沉积;低位晚期和高位期整体振幅强,连续性好,低频特征明显,且局部地区发育水道下切的充填特征,为前缘水下分流河道和河口坝沉积;在海侵期主要表现为频率较高的弱振幅、中连续的反射特征,反映海平面上升环境下形成的前三三角洲或者浅海泥岩。

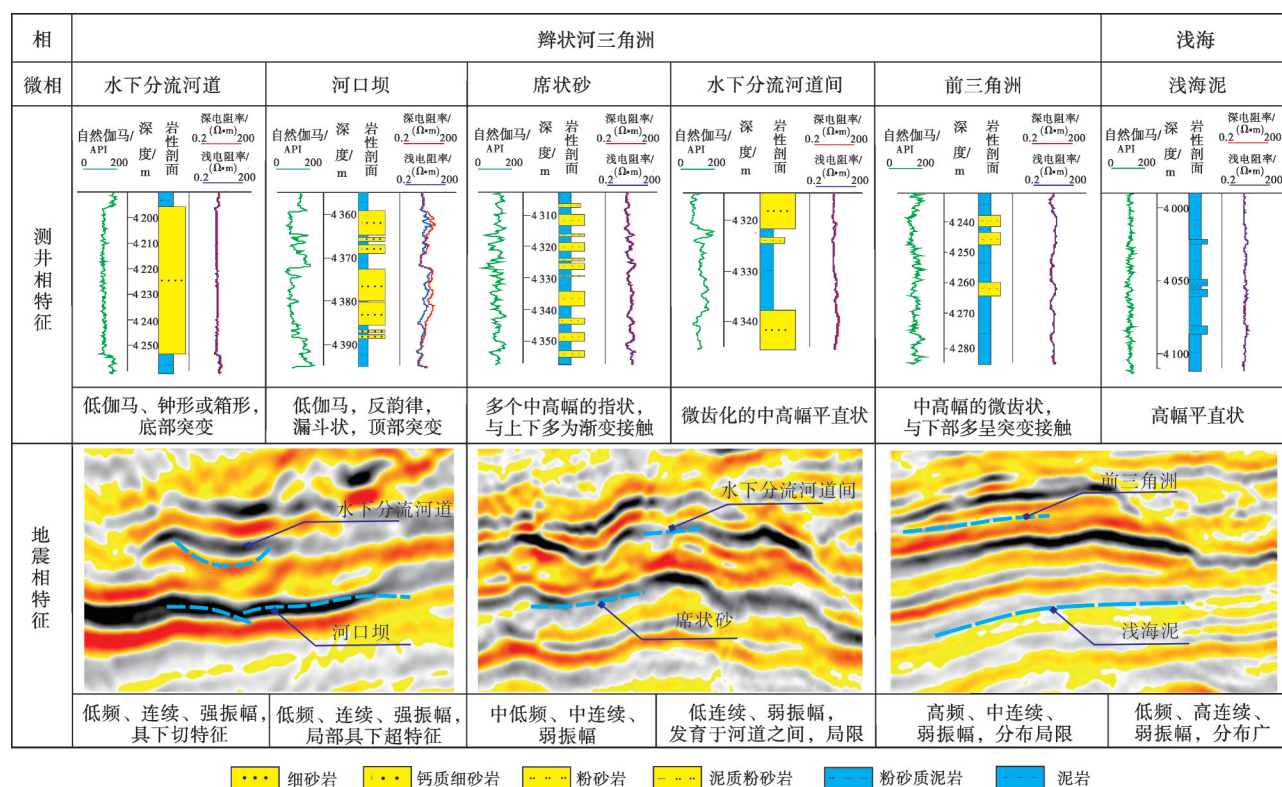


图6 宝岛凹陷北坡古近系陵三段测井相和地震相特征

Fig. 6 Logging and seismic facies characteristics of the 3rd member of Paleogene Lingshui Formation in the north slope of Baodao Sag

4 沉积物源与相分布

4.1 古地貌及物源特征

在本次研究的古地貌恢复时,应用已钻井层对剩余地层的厚度进行刻画和校正,然后在此基础上对剥蚀地层进行恢复。研究区地层的剥蚀主要是三亚组泥质水道的侵蚀作用,首先根据地震相的变化以及地层趋势确定三亚组泥质水道的侵蚀范围以及厚度,恢复出原始沉积地层厚度,然后结合已钻井的岩性组合以及埋深进行压实校正,最后结合区域沉积背景和古生物资料对古水深进行校正。由此得到宝岛凹陷北部陵三段低位体系域(图7a)、海侵和高位体系域的古地貌(图7b)。

在古地貌图中,可以看到控制盆地的F12断层自西向东逐渐消减于神狐隆起之上。并且从F12断层的活动性来看,在晚渐新世陵三段沉积时期,自西向东整体具有“强—弱—强—弱”的活动性特征。在西侧强烈活动,其活动速率最大达400 m/Ma,平均为300 m/Ma;向东侧,在断层走向发生变化处,活动性较弱,平均约为50 m/Ma;再向东侧,断层活动性明显增强,最大活动速率达450 m/Ma,平均为

350 m/Ma;之后断层向东活动性逐渐减弱直至结束于神狐隆起。在断阶带西侧的断裂中段和东段活动性较弱的区域形成海南隆起向盆地延伸的同向转换断坡,以及在东侧由于断层消减,对地形的控制减弱而形成神狐隆起的转换斜坡。因此断阶控制的同向转换断坡处以及转换斜坡处为地貌较低的汇水区,控制着陵三段大型物源的注入(图7)。并且从重矿组合特征分析,宝岛凹陷北部断阶带陵三段物源主要分东、西2支:东侧低位域为白钛矿+锆石+电气石的重矿物组合,还含有较多的金红石和磁铁矿,高位域为白钛矿+锆石+电气石+石榴石的重矿物组合,整体变质岩母岩含量比西侧高,受东北侧BN-2井揭示的变质砂岩影响,为神狐隆起物源控制;西侧低位域、海侵和高位域均为锆石+白钛矿+电气石的重矿物组合,另外还含有少量的锐钛矿和金红石,与西北侧钻遇的BN-1井相似,受海南隆起物源的影响。

4.2 沉积相展布特征

以钻遇陵三段地层较全的B-2井为例分析陵三段沉积相特征,低位体系域主要发育辫状河三角洲

的控制作用减弱,高位期地形较为平缓,不发育近源扇三角洲,西北物源三角洲分布范围变大,整体呈北西—南东向展布(图8b);气田区西侧的多口井均钻遇厚层中细砂岩,分选、物性较好,并且靠近前端的B-4井同样钻遇厚层细砂岩,整体为辫状河三角洲前缘主体沉积。东侧东北物源三角洲分为多个扇体,并且由于神狐隆起比海南隆起的物源规模小,因此东侧三角洲规模小,物性整体比西侧差。

4.3 沉积演化特征

宝岛凹陷北部断阶带陵三段沉积充填特征受控于F12断层以及区域海平面变化特征。渐新世早期,北侧控凹断层剧烈活动,断层断距大,形成了宝岛凹陷北部断阶带,且F12断层的活动性具有明显的分带性,造成了陵水组早期沉积时断阶带地形高低相差较大(图9)。

陵三段低位早期,在紧靠活动性较大的断层下降盘发育一系列短源的扇三角洲沉积,其粒度粗,多含砾,分选较差,厚度大,局部可达数百米,延伸范围较近,整体物性较差;远离断层向盆地方向砂体厚度减薄,粒度变细,多以粉砂岩和泥质粉砂岩为主,分选变好,物性有所改善。

到低位晚期,F12断层活动性减弱,加上早期扇体的沉积充填,断阶带的地形有所变缓,物源来自西北侧海南隆起和东北侧神狐隆起的大型辫状河三角洲在断阶带广泛分布,主要为前缘的河口坝和席状砂沉积,岩性为细砂岩,分选较好,整体物性较好,为主要储层发育段,并且差异的地形变化控制着扇体的频繁摆动,多个砂体形成复合体,但东侧扇体规模相对较小。

其后发生大规模海侵,海水漫过北侧F12断层,上升盘开始接受沉积,岩性为厚层泥岩和薄层粉砂岩互层。此过程进一步将地层填平补齐,地形变缓,高位体系域分布更广,覆盖整个断阶带,主要为辫状河三角洲前缘沉积,并且由于进积作用,断阶带逐渐由河口坝沉积演变为以水下分流河道沉积为主,岩性主要为中细砂岩,分选、物性好,厚度大。西侧地形较缓,辫状河三角洲推进远,砂体连通性好,是研究区优质储层发育段;东侧则为多个注入口形成的多个扇体,但物源欠发育,其扇体规模比西侧小。

陵三段沉积晚期,物源供给减弱,三角洲沉积物粒度变细,范围变小,只在西侧局部发育。之后再次发生大规模的海侵,沉积了陵二段厚层的浅海泥岩。

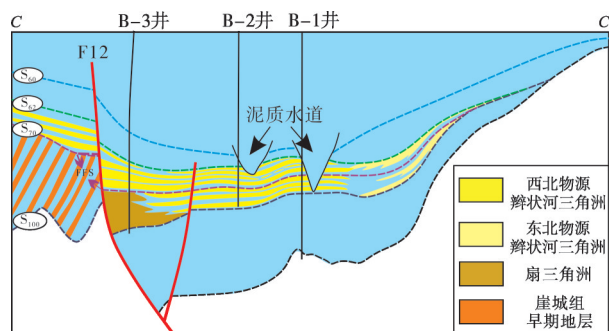


图9 宝岛凹陷北坡古近系陵三段沉积充填剖面
(剖面位置见图1a)

Fig. 9 Section showing sedimentary filling characteristics of the 3rd member of Paleogene Lingshui Formation in the north slope of Baodao Sag (location is shown in Fig. 1a)

5 断阶控砂沉积模式及油气意义

宝岛凹陷北坡断阶带陵三段具有多级断裂控物源,转换断阶控砂体展布的发育模式(图10)。断阶带的地形及断层活动性的差异控制着陵三段辫状河三角洲的物源注入及展布规律。在低位晚期和高位期,北西向海南隆起物源规模大,搬运距离长,在断阶带广泛形成粒度较粗、分选较好、厚度较大的辫状河三角洲前缘水下分流河道和河口坝沉积微相,沉积砂体物性较好,为宝岛凹陷北部断阶带优质规模储层发育层段,其上覆盖陵二段海侵后的厚层浅海泥岩,封盖性好,为区域稳定盖层,组成“黄金”储盖组合。

控制断阶的断裂规模大,横向上具有分段性,形成断面脊,切入凹陷中的崖城组高熟烃源岩,而且与陵三段辫状河三角洲前缘主体区砂体组合形成高效输导体系,控制着油气的优势运移方向;断阶带还控制着陵三段辫状河三角洲前缘砂体的分布,砂体具有较好的物性,是油气优势聚集区。高效的输导体系和“黄金”储盖组合是形成宝岛凹陷首个大气田的基础。

陵三段转换断阶控砂的发育模式构建可为盆地内及其他具相似构造背景区域的大型优质储集体的研究提供借鉴。琼东南盆地宝岛—长昌凹陷发育多条控凹断裂,在其南北侧控制形成了多个断阶带,如宝岛29、宝岛30以及长昌19断阶带,具有相似的构造、沉积背景,基于转换断阶控砂的沉积模式,认为这些断阶带同样发育规模储集体,并且具备高效的输导体系和“黄金”储盖组合,初步落实了多个有利目标。这个领域资源潜力大,勘探前景广阔,是深水深层下一步勘探的有利方向。

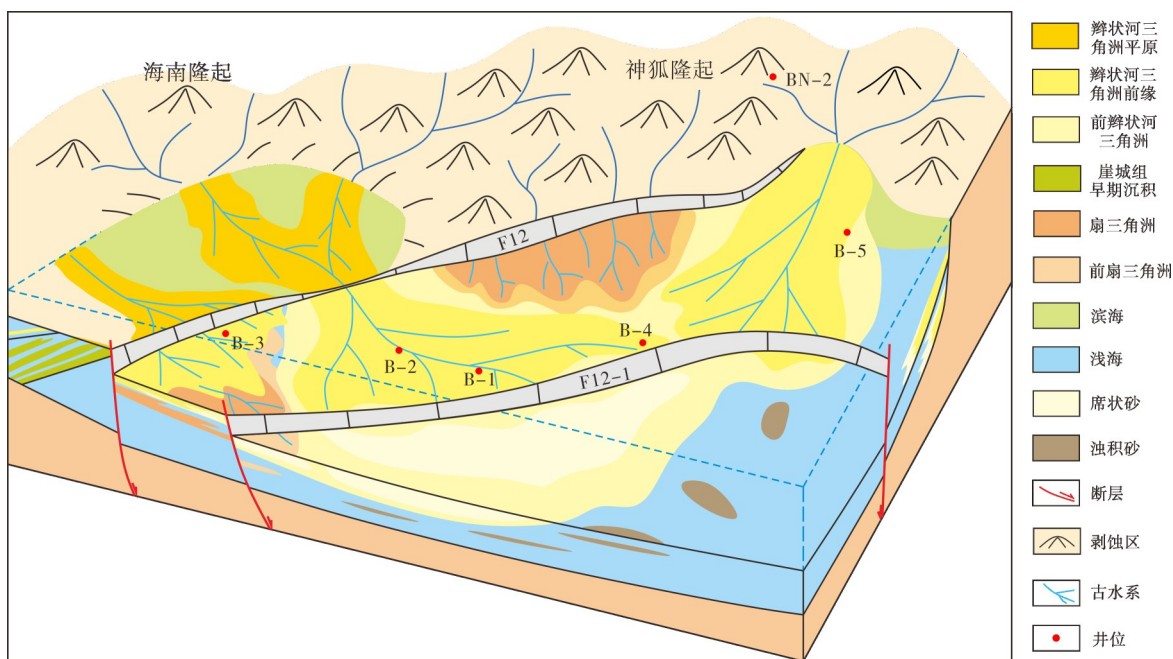


图10 宝岛凹陷北坡古近系陵三段沉积模式

Fig. 10 Sedimentary model of the 3rd member of Paleogene Lingshui Formation in the north slope of Baodao Sag

6 结论

(1) 宝岛凹陷北坡古近系发育两个二级层序, 对应于崖城组和陵水组。在陵水组可识别出一个完整的三级层序(SQ4)和一个不完整的三级层序(SQ5), 分别对应于陵水组三段和被侵蚀后残留的陵水组一段和陵水组二段。陵三段(SQ4)发育低位、海侵和高位体系域。

(2) 宝岛凹陷北部控凹的F12断层差异活动形成的断层同向转换带以及转换斜坡控制着神狐隆起和海南隆起物源的注入, 并在断阶带沉积形成西、东多支大型辫状河三角洲群, 其中, 西北物源三角洲成储条件整体优于东北物源三角洲。断阶带在低位晚期和高位期发育辫状河三角洲前缘主体沉积, 砂体厚度大, 粒度较粗, 分选、物性较好, 是优质的规模储集体。

(3) 建立宝岛凹陷北部断阶带陵三段深水盆地多级断裂控物源, 转换断阶控砂体展布的发育模式。该模式控制的陵三段大型辫状河三角洲优质储集体, 上覆厚层浅海泥岩, 形成优质储盖组合, 且与沟通烃源岩的断裂形成有利输导体系, 共同控制着油气的运聚, 这是形成宝岛凹陷大型气田的关键。琼东南盆地发育多个断阶带, 具相似背景, 勘探前景广阔。

参考文献

- [1] 谢玉洪. 南海北部陆缘盆地深水油气勘探新认识及攻关方向[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 13-25.
XIE Yuhong. New insights and future research focuses on oil and gas exploration in the continental margin deepwater area of the northern South China Sea[J]. Natural gas industry, 2024, 44(1): 13-25.
- [2] 屈红军, 张功成, 孙晓晗, 等. 中国深水盆地油气勘探及成藏研究进展: 以中国南海北部为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(6): 1028-1043.
QU Hongjun, ZHANG Gongcheng, SUN Xiaohan, et al. Research progress on hydrocarbon exploration and accumulation of deep water basins in China: taking the northern South China Sea as an example[J]. Journal of Northwest University(natural science edition), 2022, 52(6): 1028-1043.
- [3] 张功成, 纪沫, 陈莹, 等. 琼东南盆地“气聚集带”的成藏特征与勘探潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 226-240.
ZHANG Gongcheng, JI Mo, CHEN Ying, et al. Accumulation characteristics and exploration potentials of gas accumulation belt in Qiongdongnan Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2024, 45(1): 226-240.
- [4] 吴克强, 解习农, 裴健翔, 等. 超伸展陆缘盆地深部结构及油气勘探意义: 以琼东南盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 651-661.
WU Keqiang, XIE Xinong, PEI Jianxiang, et al. Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: a case study of Qiongdongnan Basin[J]. Oil & gas geology, 2023, 44(3): 651-661.
- [5] 尤丽, 江汝锋, 龚宇, 等. 琼东南盆地深水海底扇岩性圈闭成藏主控因素与勘探突破[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 749-758.

- YOU Li, JIANG Rufeng, GONG Yu, et al. Main controlling factors of accumulation and exploration breakthrough of deep-water submarine fan lithologic trap in the Qiongdongnan Basin[J]. *Earth science*, 2024, 49(2): 749–758.
- [6] 尤丽, 吴仕玖, 代龙, 等. 琼东南盆地乐东—陵水凹陷梅山组海底扇高温超压储层成岩-孔隙演化[J]. *海相油气地质*, 2024, 29(3): 280–290.
- YOU Li, WU Shijiu, DAI Long, et al. Diagenesis and porosity evolution of high temperature and overpressure submarine fan reservoir of Meishan Formation in Ledong-Lingshui sags, Qiongdongnan Basin[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2024, 29(3): 280–290.
- [7] 刘子玉, 贾万丽, 李建平, 等. 浊积扇沉积构成及主要单元储层差异: 以琼东南盆地梅山组为例[J]. *地质科学*, 2024, 59(5): 1268–1279.
- LIU Ziyu, JIA Wanli, LI Jianping, et al. Sedimentary composition of turbidite fan and reservoir difference of main units: a case study of Meishan Formation in Qiongdongnan Basin[J]. *Chinese journal of geology*, 2024, 59(5): 1268–1279.
- [8] 李建平, 熊连桥, 黄琪斐, 等. 琼东南盆地梅山组浊积扇分类及其勘探意义[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(6): 1–12.
- LI Jianping, XIONG Lianqiao, HUANG Qifei, et al. Classification of turbidite fans of Meishan Formation in Qiongdongnan Basin and their exploration significance[J]. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2023, 30(6): 1–12.
- [9] 付超, 谢玉洪, 王晖, 等. 深水峡谷复合浊积砂体内隔夹层发育类型与沉积成因: 以琼东南盆地中央峡谷为例[J]. *天然气工业*, 2023, 43(5): 23–33.
- FU Chao, XIE Yuhong, WANG Hui, et al. Types and sedimentary genesis of barriers and interlayers in the composite turbidite sand bodies of deep-water canyon: a case study of the Central Canyon in the Qiongdongnan Basin[J]. *Natural gas industry*, 2023, 43(5): 23–33.
- [10] 付超, 谢玉洪, 赵雨初, 等. 深水峡谷上游复合浊积砂岩储层类型及其展布规律: 以琼东南盆地中央峡谷陵水气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 516–529.
- FU Chao, XIE Yuhong, ZHAO Yuchu, et al. Types and distribution patterns of complex turbidite sandstone reservoirs in the upper reaches of deep-water canyons: a case study of the Lingshui gas field in the Central Canyon of Qiongdongnan Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2024, 45(02): 516–529.
- [11] 徐长贵, 吴克强, 裴健翔, 等. 超深水超浅层天然气富集机理与成藏模式: 以琼东南盆地陵水36-1气田为例[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(1): 44–56.
- XU Changgui, WU Keqiang, PEI Jianxiang, et al. Enrichment mechanisms and accumulation model of ultra-deep water and ultra-shallow gas: a case study of Lingshui 36-1 gas field in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Petroleum exploration and development*, 2025, 52(1): 44–56.
- [12] 裴健翔, 王宇. 琼东南盆地深水区第四系超浅层大型气藏盖层类型及封盖机理[J]. *地球科学*, 2025, 50(1): 144–157.
- PEI Jianxiang, WANG Yu. Caprock type and sealing mechanism of Quaternary ultra shallow large gas reservoir in deep water area of Qiongdongnan Basin, China[J]. *Earth science*, 2025, 50(1): 144–157.
- [13] 裴健翔, 罗威, 吕诗阳, 等. 琼东南盆地宝岛凹陷南部渐新统陵水组三段三角洲的发现及石油地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 299–310.
- PEI Jianxiang, LUO Wei, GUO Shiyang, et al. Discovery and petroleum geological significance of delta in the third member of Oligocene Lingshui Formation in southern Baodao Sag, Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Petroleum exploration and development*, 2024, 51(2): 299–310.
- [14] 唐武, 谢晓军, 熊连桥, 等. 琼东南盆地深层源汇系统特征及富砂性预测: 以松南低凸起中段陵三段为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(4): 123–133.
- TANG Wu, XIE Xiaojun, XIONG Lianqiao, et al. Characteristics of deep source-to-sink systems and sand prediction in Qiongdongnan Basin: a case study[J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 2024, 44(4): 123–133.
- [15] 童亨茂, 范彩伟, 童传新, 等. 琼东南盆地宝岛变换带的特征、类型及其成因机制[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 897–905.
- TONG Hengmao, FAN Caiwei, TONG Chuanxin, et al. Characteristics, types and genetic mechanism of Baodao transfer zone, Qiongdongnan Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2015, 36(6): 897–905.
- [16] 赵海涛, 童亨茂. 琼东南盆地北部地区变换带构造特征及地质意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(2): 11–20.
- ZHAO Haitao, TONG Hengmao. Characteristics and significance of transfer zone in northern Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Journal of China University of Petroleum (edition of natural science)*, 2021, 45(2): 11–20.
- [17] 廖计华, 王华, 吕明, 等. 琼东南盆地深水区松南—宝岛凹陷同沉积断裂活动及其对沉积充填的控制[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(2): 336–346.
- LIAO Jihua, WANG Hua, LV Ming, et al. Evolution of syndepositional faulting and its controlling effect on sedimentary filling in Songnan-Baodao sag of Qiongdongnan basin, South China Sea[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(2): 336–346.
- [18] 钟佳, 杨希冰, 朱沛苑, 等. 琼东南盆地宝岛—长昌凹陷陵水组储层差异演化特征[J]. *地球科学*, 2019, 44(8): 2665–2676.
- ZHONG Jia, YANG Xibing, ZHU Peiyuan, et al. Porosity evolution differences of the Lingshui Formation reservoir between Baodao and Changchang Sag, Qiongdongnan Basin[J]. *Earth science*, 2019, 44(8): 2665–2676.
- [19] 邓勇, 裴健翔, 胡林, 等. 南海西部海域宝岛21-1气田的发现与成藏模式[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 13–22.
- DENG Yong, PEI Jianxiang, HU Lin, et al. Discovery and hydrocarbon accumulation models of Baodao 21-1 gas field in the western South China Sea[J]. *China offshore oil and gas*, 2022, 34(5): 13–22.
- [20] 尤丽, 权永彬, 唐雷, 等. 琼东南盆地深水区宝岛21-1气田天然气来源及输导体系[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1270–1278.
- YOU Li, QUAN Yongbin, TUO Lei, et al. Natural gas sources and migration pathways of the Baodao 21-1 gas field in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2023, 44(5): 1270–1278.
- [21] 徐长贵. 中国近海油气勘探新进展与勘探突破方向[J]. 中

- 国海上油气, 2022, 34(1): 9–16.
- XU Changgui. New progress and breakthrough directions of oil and gas exploration in China offshore area[J]. China offshore oil and gas, 2022, 34(1): 9–16.
- [22] 徐长贵, 尤丽. 琼东南盆地松南—宝岛凹陷北坡转换带特征及其对大中型气田的控制[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1061–1072.
- XU Changgui, YOU Li. North slope transition zone of Songnan–Baodao sag in Qiongdongnan Basin and its control on medium and large gas fields, South China Sea[J]. Petroleum exploration and development, 2022, 49(6): 1061–1072.
- [23] 杨金海, 杨希冰, 周杰, 等. 琼东南盆地深水松南—宝岛凹陷反转构造带发育特征及油气地质意义[J]. 海洋学报, 2019, 41(5): 97–106.
- YANG Jinhai, YANG Xibing, ZHOU Jie, et al. Characteristics of inversion structure belts and their hydrocarbon geological significance in the Songnan–Baodao Sag in deep water area of the Qiongdongnan Basin[J]. Acta oceanologica sinica, 2019, 41(5): 97–106.
- [24] 李增学, 刘莹, 李晓静, 等. 琼东南盆地古近纪泥炭沼泽破坏与重建作用对煤型源岩物质形成的控制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1309–1320.
- LI Zengxue, LIU Ying, LI Xiaojing, et al. The control of Paleogene peat swamp destruction and reconstruction on the formation of coal-type source material in the Qiongdongnan Basin [J]. Oil & gas geology, 2022, 43(6): 1309–1320.
- [25] 张远泽, 漆家福, 吴景富. 南海北部新生代盆地断裂系统及构造动力学影响因素[J]. 地球科学, 2019, 44(2): 603–625.
- ZHANG Yuanze, QI Jiafu, WU Jingfu. Cenozoic faults systems and its geodynamics of the continental margin basins in the northern of South China Sea[J]. Earth science, 2019, 44(2): 603–625.
- [26] 邓孝亮, 张迎朝, 陆江, 等. 文昌B凹陷北坡珠海组潮汐沉积特征及演化[J]. 沉积学报, 2020, 38(6): 1313–1326.
- DENG Xiaoliang, ZHANG Yingzhao, LU Jiang, et al. Tidal sedimentary characteristics and evolution of the Zhuhai Formation, northern slope of the Wenchang B Sag[J]. Acta sedimentologica sinica, 2020, 38(6): 1313–1326.

编辑: 韦东晓

Development characteristics of braided river delta under geomorphic control of fault step zone in Qiongdongnan Basin: taking the 3rd member of Oligocene Lingshui Formation in the northern slope of Baodao Sag as an example

DENG Xiaoliang¹, WANG Ziling¹, YOU Li¹, ZHAN Yeping², ZHOU Chen¹

1. Hainan Branch of CNOOC China Limited; 2. Zhanjiang Branch of CNOOC China Limited

Abstract: Qiongdongnan Basin, a passive continental deep-water basin in the north of the South China Sea, is an important natural gas base in China. The deep Oligocene Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin represent a primary target for forthcoming exploration in the South China Sea, however, due to limited exploration efforts, the sedimentary system of the Lingshui Formation remains inadequately characterized. Based on core, logging and 3D seismic data, the sedimentary characteristics of Lingshui Formation in northern slope of Baodao Sag, Qiongdongnan Basin are systematically dissected. It is clear that Lingshui Formation can be subdivided into two third-order sequences. The sedimentation of the 3rd member of Lingshui Formation is a complete three-order sequence with low, transgressive and high system domains. Under the control of the fault co directional transition zone and transition slope formed by the differential activity of F12 fault, several large differentiated river delta groups of different scales in the west and east are developed in the 3rd member of Lingshui Formation. The fault step zone mainly developed the underwater distributary channel of braided river delta front in the late low and high system tracts, and it is a high-quality reservoir development interval with the thickness of sand body being large, the particle size being coarser, the separation being better, and the physical property being better. Therefore, the development model of multistage fault-controlled material source and transition fault-controlled sand body distribution of the 3rd member of Lingshui Formation in the northern fault step zone of Baodao Sag is established. The high quality reservoir of large-scale delta distributary channel of the 3rd member of Lingshui Formation directly covers the source rock of Yacheng Formation and forms a favorable transport system with source rock-linked fault. And it is covered by thick transgressive shallow-sea mudstone deposited in late depression period. High-quality reservoir-cap combination and transport system are the key to forming large gas fields in Baodao Sag, and are worth of more attention in the future exploration.

Key words: braided river delta; fault step zone; the 3rd member of Lingshui Formation; Paleogene; Baodao Sag; Qiongdongnan Basin

DENG Xiaoliang, First author: Engineer, mainly engaged in petroleum geology and reservoir geology. Add: Yufu International Building, Changbin 3rd Rd., Xiuying District, Haikou, Hainan 570312, China. E-mail: dengxl8@cnooc.com.cn