

高位体系域海相三角洲源—汇特征及沉积模式 ——以琼东南盆地宝岛凹陷北部渐新统 陵水组三段为例

林璐, 李珊珊, 夏磊, 罗威, 李科亮, 李凤霞, 吴仕玖, 芮诗阳

(中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南海口 570312)

摘要:以琼东南盆地宝岛凹陷北部渐新统陵水组三段为例,恢复沉积期古地貌格局,划分流域单元,分析构造转换带断裂陡坡和转换斜坡特点,识别物源注入位置,进行沟谷量化分析,综合地震相、测井相、岩心相和单井相数据,研究沉积相类型及砂体时空分布规律,明确宝岛 21 区陵水组三段高位体系域三角洲沉积特征及源—汇耦合模式。结果表明:流域单元 B—⑤沟谷—三角洲朵叶体⑤具有长距离搬运的特点,入海后储集体成分和结构成熟度高、粒度细、砂泥岩互层发育;流域单元 A—②沟谷—三角洲朵叶体②具有冲积扇直接入水,三角洲朵叶体表现为横向变化小、纵向叠置好、粒度粗和单层厚度大的特点,源—汇配置关系好,为宝岛 21 区最优储集体相类型。该结果为研究区储集体预测、气田开发和井位部署提供依据。

关键词:高位体系域;海相;三角洲;源—汇特征;沉积模式;琼东南盆地;宝岛凹陷;渐新统;陵水组

中图分类号:TE121 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)02-0071-13

0 引言

“源—汇”研究的核心是将剥蚀地貌和沉积地貌通过沉积物搬运路径联系在一起,构成“源—渠—汇”耦合分析。源—汇系统研究以海相盆地为主要对象,探讨构造、气候两大因素对洋陆边缘源—汇系统的控制作用,以及源—汇系统汇水区沉积体系、储集体发育及有利砂体展布预测^[1-4]。伊拉克哈法亚油田古近系 Upper Kirkuk 油藏发育大型海相三角洲沉积,其中对应海平面先上升后下降的高位体系域三角洲具有发育连片分流河道的特征,分流河道宽度为 5~15 km,以纯砂岩为主,为油藏优质储层类型,具有典型的高孔超高渗储层特征^[5]。三角洲对南海海相油气田分布有控制作用,其中南海油气主要富集于渐新世以来的海相三角洲沉积体系^[6]。基于源—汇系统耦合分析,唐武等^[7]、裴健翔等^[8]研究琼东南盆地松南低凸起、永乐 10 凸起高位体系域三角洲扇体分布规律与富砂性,为琼东南盆地深水、深层源—汇系统分析提供依据。

琼东南盆地是中国南海重要的含油气盆地,具有巨大的油气资源潜力和广阔的勘探前景。随琼东南盆地深水区陵水 17-2 深水大中型气田的发现^[9-10],以及三维地震资料逐步覆盖盆地深水区(现今水深大于 300 m),天然气勘探逐渐走向勘探程度较低的深水、深层,发现宝岛凹陷宝岛 21-1 大型气田^[11-12]。海相三角洲作为宝岛 21-1 气田的重要储集体类型,储层具有非均质性强和内部结构复杂的特点。宝岛 21-1 气田发育于高位体系域三角洲,源—汇系统及沉积模式控制有利砂体的展布,研究高位体系域海相三角洲源—汇系统及沉积模式对指导勘探和开发井部署具有重要意义。

对于珠江口盆地及渤海海域古近系三角洲,根据汇水区测录井和岩心资料区分辨状河三角洲和扇三角洲^[13-16],地貌形态、构造运动和入海前河流类型影响重力流或牵引流^[17-19]。根据三维叠前深度偏移地震资料(解释密度为 20 km×20 km)、7 口钻井及岩心资料,在精细层序格架划分基础上,分析宝岛 21 区陵水组三段高位体系域三角洲源—汇系统、沉积类型划分,以及主河道发育区的地震相精细刻画和源—汇要素耦合关系,建立研究区三角洲储集体的沉积模式,为规模储集体预测、气田开发和井位部署提供参考。

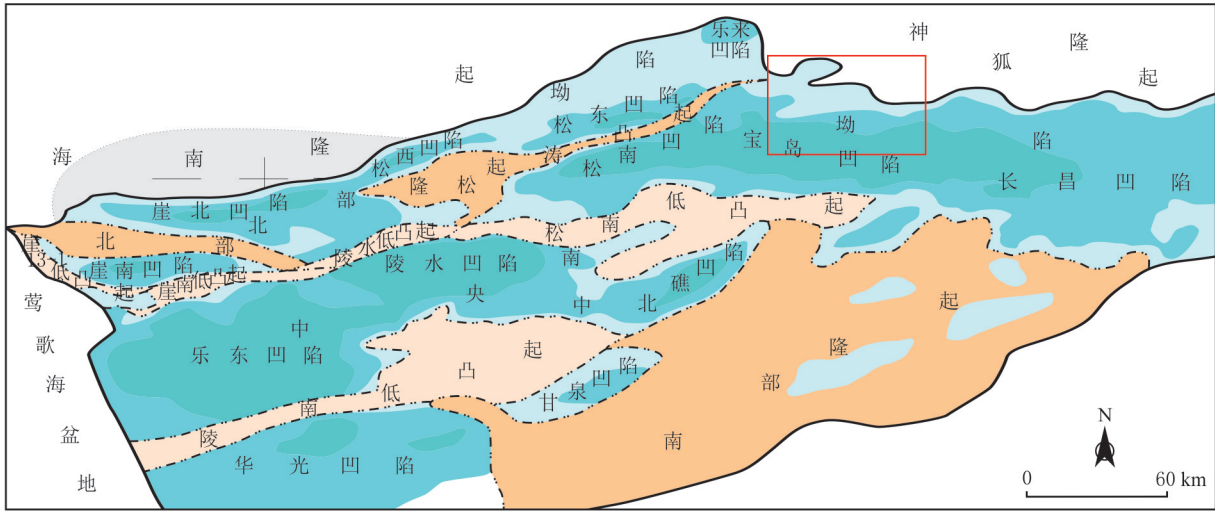
收稿日期:2024-10-25;编辑:陆雅玲

基金项目:中海石油(中国)有限公司科技攻关项目(KJGG2022-0102)

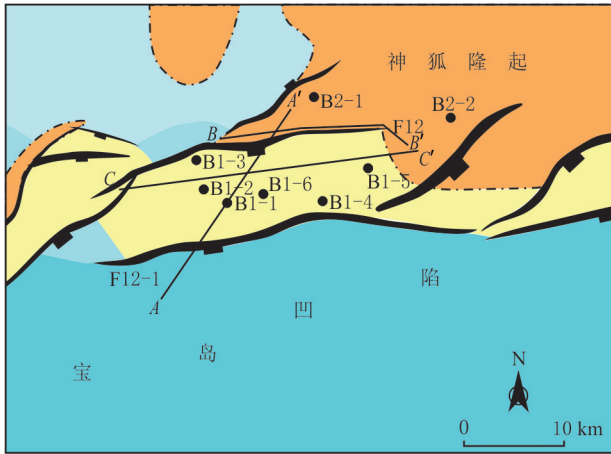
作者简介:林璐(1987—),女,硕士,工程师,主要从事石油地质及沉积学方面的研究。

1 区域地质概况

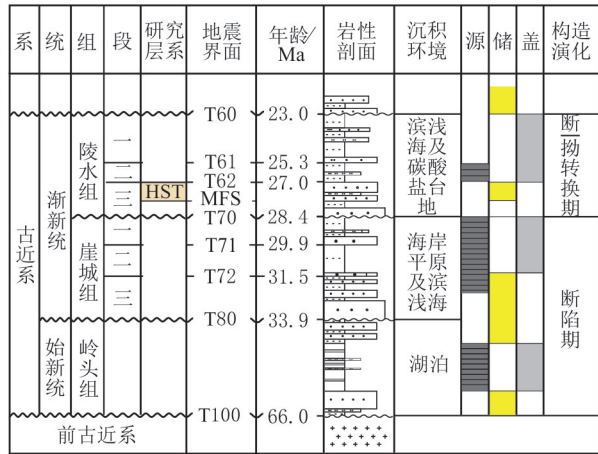
宝岛凹陷位于琼东南盆地中央坳陷,西邻松南凹陷,东接长昌凹陷,北与神狐隆起和松涛凸起相连,南临松南低凸起,具有下断上坳的双层结构,面积为 $5.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ (见图 1(a))。宝岛凹陷主要受近东西向断层控制,呈南北双断式、复式半地堑,其中 NE、NEE、近 EW 向的主干断裂控制凹陷形态和构造带划分,包括凸起(隆起)带、断阶带和凹陷带三大构造带。构造演化经历古近纪裂陷沉积充填、新近纪拗陷及新构造运动阶段,其中古近系自下而上发育始新统岭头组、渐新统崖城组 and 陵水组^[20-21]。



(a) 构造区划分



(b) 构造位置



(c) 地层综合柱状图

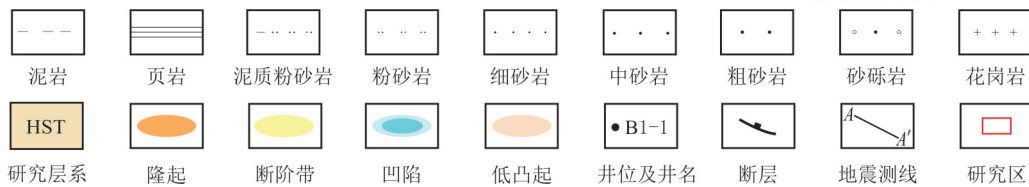


图 1 研究区构造区划分、构造位置与古近系综合柱状图(据文献[8]修改)

Fig. 1 Tectonic division and tectonic location of the study area and the comprehensive histogram of the Paleogene strata(modified by reference[8])

陵水组沉积期,琼东南盆地为开阔海,以滨、浅海相沉积为主,盆地逐渐进入断—拗转换期,断裂持续活动,在凹陷边缘形成断阶带。研究区位于宝岛凹陷北部断阶带,12号断层与12-1号断层控制的宝岛21断阶带具有掀斜构造的特征(见图1(b))。陵水组三段(陵三段)位于陵水组下部,水体在沉积区域上逐渐加深,凹陷中心形成较大的可容纳空间,盆地边缘物源可沿凹陷边缘分布的沟谷输送至断阶带和凹陷低洼处,尤其是陵三段高位体系域有利于形成大型海相三角洲^[8,11];陵水组二段(陵二段)沉积期,区域海平面

持续性上升,全区海侵特征明显^[22],宝岛凹陷以发育浅海相为主,有利于发育区域性厚层泥岩盖层(见图 1(c)),形成宝岛凹陷古近系陵水组优质储盖组合。研究层系及沉积相为宝岛 21 区陵三段高位体系域海相三角洲沉积。

2 三角洲沉积特征

2.1 三角洲识别特征

三角洲为河流入海或入湖(稳定的蓄水体)在河口地区形成部分出露水面(部分在水下)的沉积体,通常沉积区在岩石类型、粒度特征、沉积构造及地震反射特征等方面发育典型相标志。辫状河三角洲沉积具有粒度粗、辫状河入水和近物源的特征,分选一般,磨圆为中等—差,槽状交错层理较为发育;扇三角洲沉积为冲积扇直接入水,汇水区具有在近物源重力流作用下发育粗碎屑、远物源转变为牵引流粒度变细^[23]的特征。高位体系域三角洲沉积在琼东南盆地宝岛 21-1 气田较为发育,是位于陵三段三级层序界面 S_{62} 与 MFS 界面之间发育的进积型三角洲。宝岛 19-2、永乐 10-6 油气藏储层为同层系高位体系域三角洲^[8]。

2.1.1 地震特征

帚状前积反射以向下倾方向发散为特征,指示沉积物沿某一沉积斜坡向下倾方向逐期推进,与断层活动后可容空间的快速增长有关,可判断水流方向和水动力大小,进而识别沉积环境^[13]。研究区陵三段高位体系域三角洲沉积具有帚状前积反射构型(见图 2),结构以中频、中—强振幅、中连续性反射特征为主,揭示物源主要来自北东向,沉积物供应较为充足。

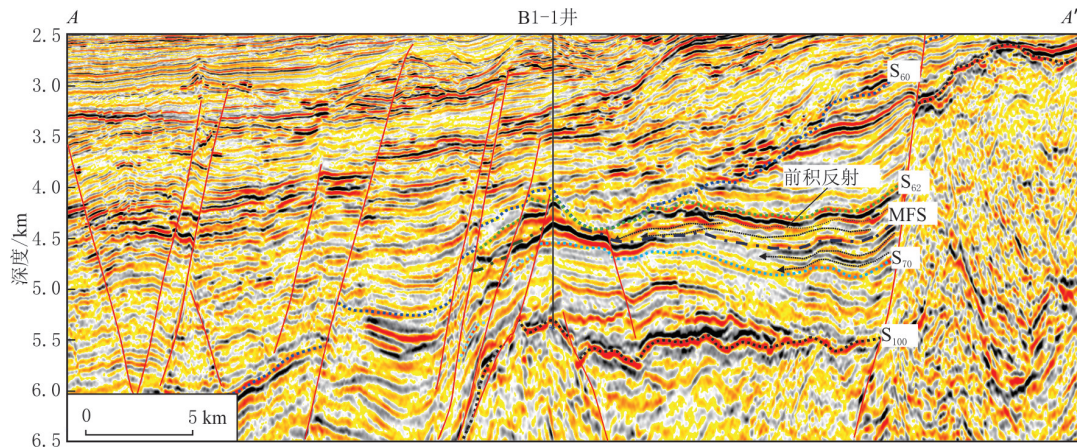


图 2 过宝岛 21 断阶带顺物源方向三角洲朵叶体剖面(剖面位置见图 1(b))

Fig. 2 The section of delta lobe along the source direction across Baodao 21 fault terrace zone(the section position is shown in fig. 1(b))

宝岛 21 区主要物源来源于北东向神狐隆起,物源流向宝岛 21 断阶带西南向洼陷,通过拉平沉积顶界面 S_{62} ,垂直物源方向识别双向上超的充填相,其中主河道发育区以中频、中—强振幅、中连续为主,反向断层形成水下断槽,三角洲河道向西南向摆动。近物源可见沟谷内明显侵蚀下切特征,自西向东可识别 5 支三角洲朵叶体,在地震剖面上表现为多个并排发育的底凹顶平结构(见图 3)。随河道推进,地层厚度明显减薄,表现为强振幅同相轴有一定程度的横向延展,远物源侵蚀下切或充填特征不明显,远物源局部发育河口坝与席状砂微相沉积。

2.1.2 粒度特征

砂岩的粒度特征是判断沉积环境和水动力条件的良好标志之一。研究区陵三段高位体系域三角洲沉积以含砾粗砂岩、细砂岩为主,含粉砂岩和少量的中砂岩。砂岩样品粒度概率累积曲线表现为三段式特征(见图 4(a)),以跳跃组分为主,表明水动力作用较强,分选中等,反映水下分流河道微相的特征。砂岩样品点在 C—M 图上从左至右平行于 SR 段、RQ 段和 PQ 段分布,且样品点重合并集中平行于 PQ 段(见图 4(b),C 为 1% 的砂岩粒径,M 为粒度中值),反映以跳跃和悬浮组分为主,表明三角洲水下分流河道、河口

坝微相等沉积环境的稳定牵引流沉积特征。

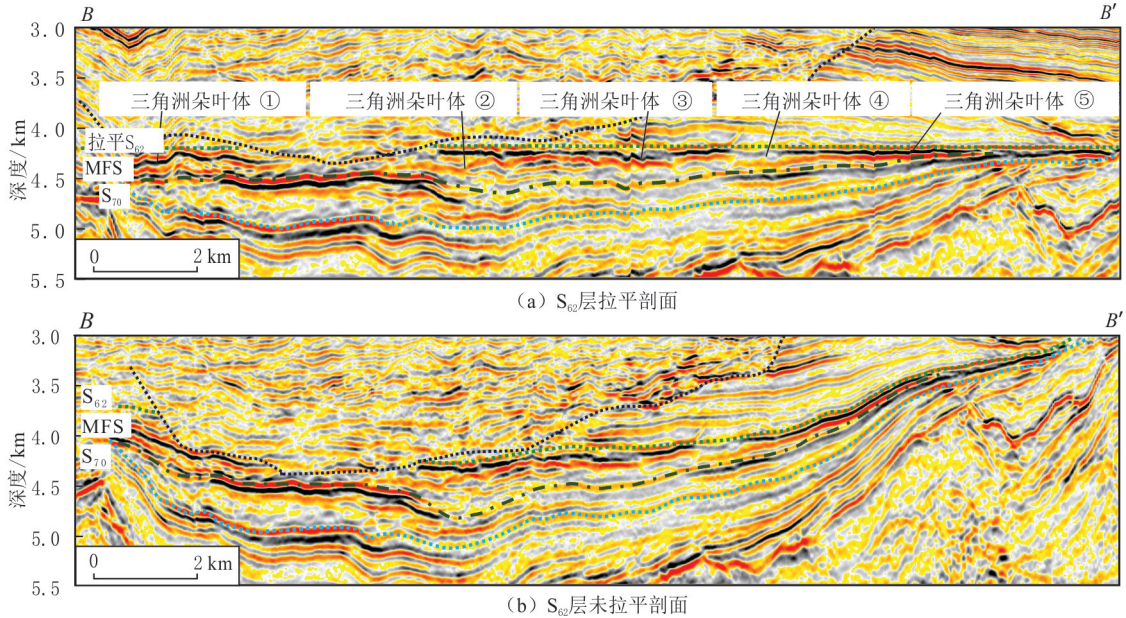


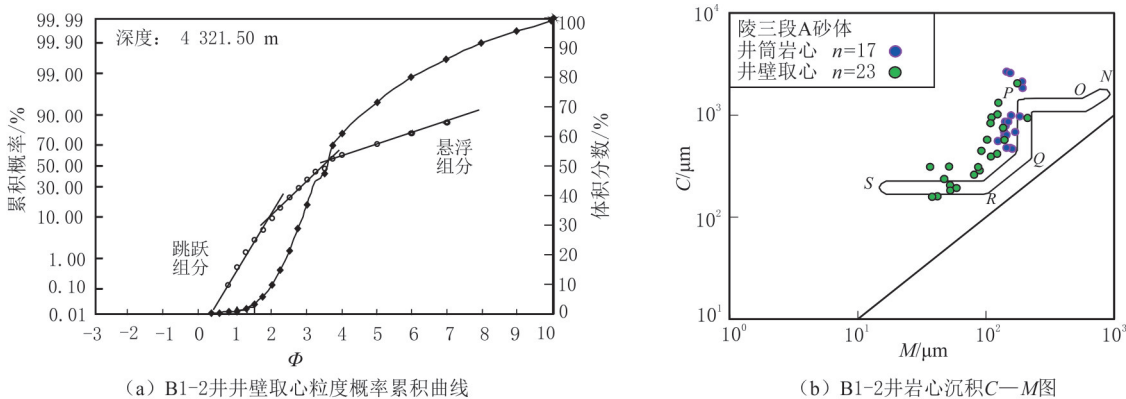
图 3 沉积区垂直物源方向三角洲朵叶体剖面(剖面位置见图 1(b))

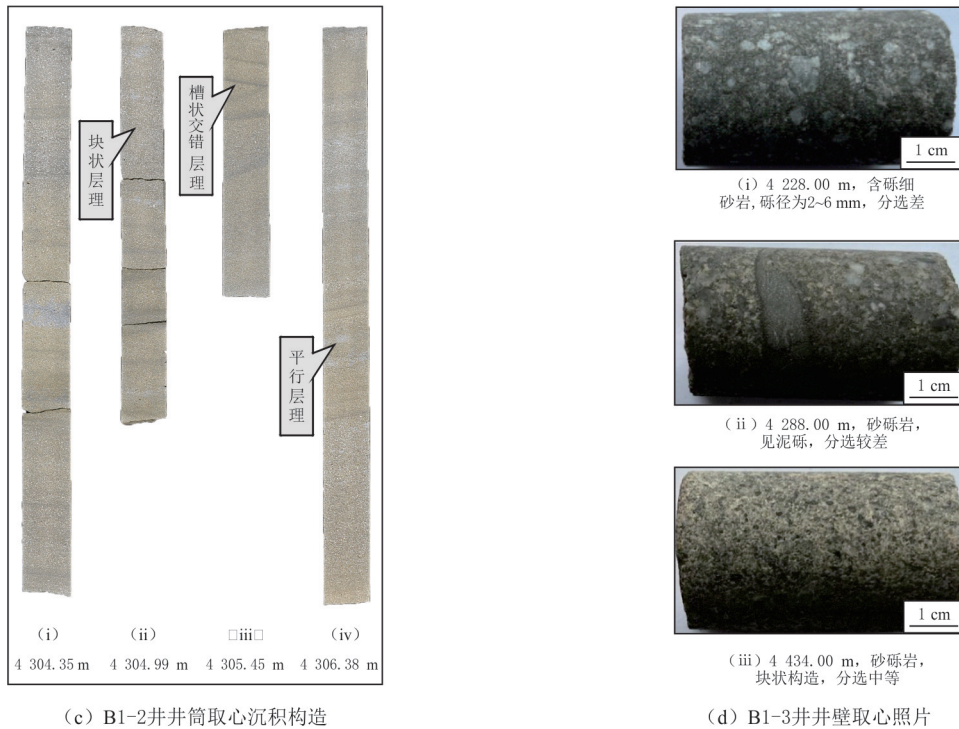
Fig. 3 Sections of delta lobes in vertical direction of provenance in sedimentary area(the section position is shown in fig. 1(b))

2.1.3 岩—电响应特征及沉积构造

平行层理由纹层彼此平行的砂质沉积物组成,反映砂体是在水浅流急的水动力条件下沉积的;槽状交错层理常出现于三角洲水下分流河道微相沉积,指示较强的水动力冲刷作用。研究区 B1-2 井井筒取心段岩性以大套灰色中—细砂岩为主,质纯且分选好,底部为中—粗砂岩,顶部为灰色含砾粗砂岩、砂砾岩;同时可见平行层理、槽状交错层理和块状层理等(见图 4(c))。B1-3 井井壁取心段岩性以大套灰色砂砾岩为主,分选差,呈棱角一次棱角状,最大砾石粒径为 4 mm,偶见泥砾,发育块状层理(见图 4(d)),反映水流冲刷作用强、堆积快速的特点,通常出现在扇三角洲中扇的水下分流河道微相中,较辫状河三角洲前缘水下分流河道微相粒度粗、结构成熟度低、水动力强。

根据岩—电响应特征、沉积构造和地震反射特征综合标定沉积体系(见图 4(e)),厚层岩性为细—中砂岩、含砾细砂岩,测井曲线 GR 呈箱型叠置,砂地比大于 80%,地震反射特征为低频、中—弱振幅、低连续性的组合类型,指示厚层砂体纵向叠置,为近物源的水下分流河道微相;中厚层岩性为细—中砂岩,GR 呈箱形与钟形互层,砂地比介于 60%~80%,低频、强振幅、中—高连续性对应纵向迁移特征的多期远端水下分流河道微相叠置;薄层岩性为细—粉砂岩与泥岩互层,GR 呈漏斗形、指状和钟形叠置,砂地比小于 40%,中频、强振幅、高连续性对应三角洲外前缘远端河口坝、远砂坝与席状砂微相沉积的复合体。





沉积相	典型井	测井相 (GR曲线)	岩性	微相	砂地比/%	砂体堆砌样式	井旁地震道	地震反射特征
三角洲	B1-3	箱形叠置	中砂岩、含砾细砂岩、细砂岩	水下分流河道 (近端)	80~98			低频、中—弱振幅、低连续性
	B1-1	箱形、钟形	细砂岩、中砂岩	水下分流河道 (远端)	59~75			低频、强振幅、中—高连续性
	B1-5	漏斗形、指状、钟形	细砂岩、泥质细砂岩	河口坝、远砂坝、席状砂、河道侧翼	29~33			中频、强振幅、高连续性

(e) 典型井井震沉积体系标定

图 4 岩—电响应特征及井震沉积体系综合解释图版

Fig. 4 Rock-electric characteristics and well-seismic calibration of sedimentary system comprehensive interpretation chart

2.1.4 单井沉积相特征

以研究区陵三段高位体系域三角洲 B1-1 井为例,整体呈厚层砂岩下部为正旋回、上部为反旋回特征 (见图 5),反映水下分流河道微相的迁移,岩性以砂砾岩、含砾粗砂岩、中砂岩夹薄层泥岩为主,厚度为 99.3 m,薄层泥岩测井曲线主要表现为高自然伽马、低电阻率、高密度的特征,自然伽马曲线以低幅齿形为主。其中砂岩主要表现为低自然伽马、低密度的特征,自然伽马曲线组合形态主要表现为箱形、钟形、指状及漏斗形特征,解释为三角洲前缘水下分流河道、河口坝、席状砂、远砂坝及水下分流间湾微相等沉积,陵三段高位体系域三角洲前缘水下分流河道微相沉积表现为箱形、齿化箱形曲线较为发育,底部常见明显的突变现象,揭示单期河道或多期叠置河道对下伏地层具有冲刷侵蚀作用。

2.2 三角洲展布特征

连井沉积相分析可以反映研究区砂体的沉积相带横向展布和纵向演化。综合单井沉积构造、粒度和单井相分析,研究区钻井揭示宝岛 21 区发育神狐隆起物体系控制的三角洲沉积体系,其中陵三段高位体系域三角洲整体发育三角洲内前缘—三角洲外前缘—前三角洲微相沉积。三级层序格架内高位体系域延伸范围相对较广,整体含砂率较高,晚期砂体受上覆地层的冲蚀而不完整。

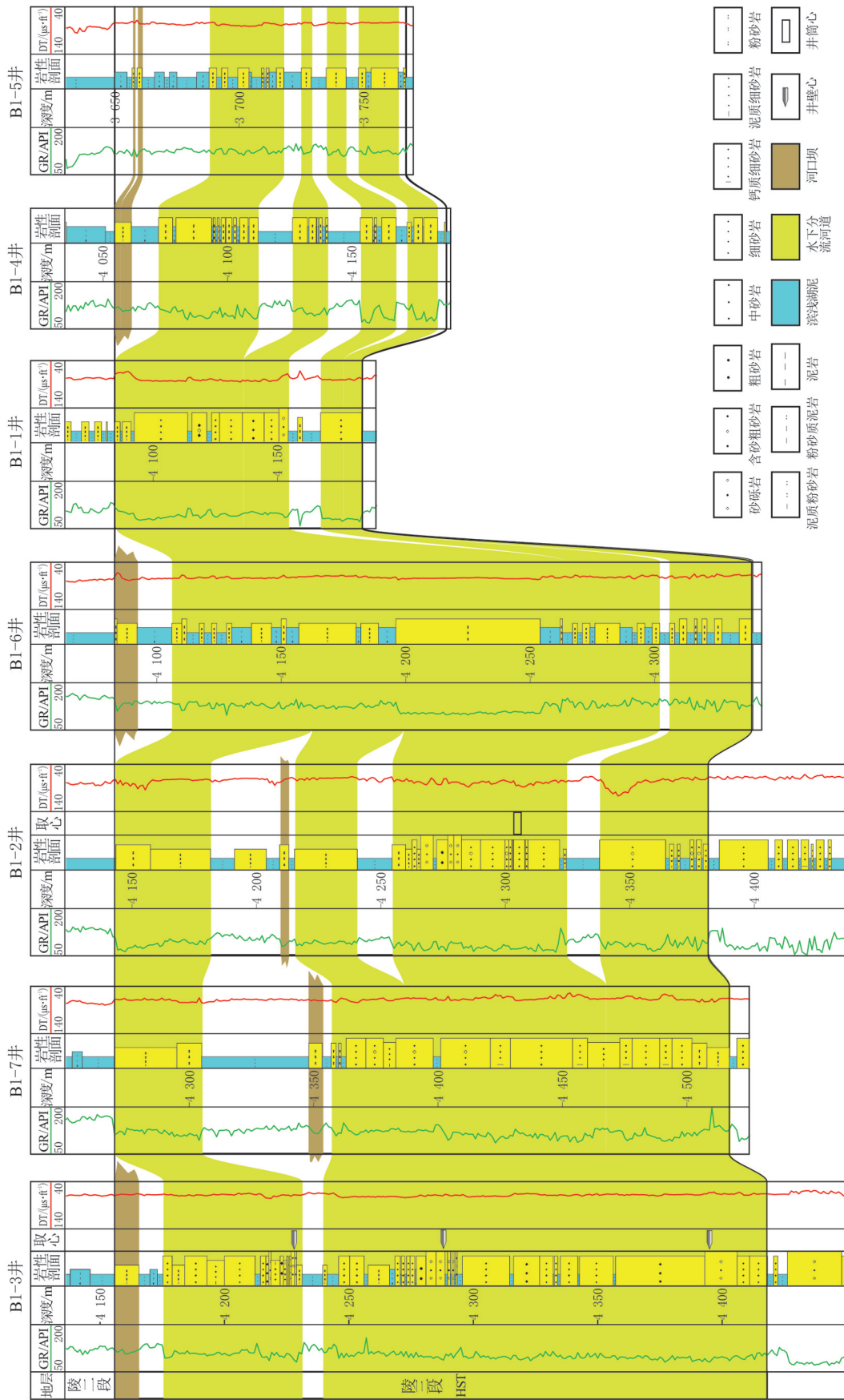


图 6 宝岛 21 断阶带钻井陵三段高位体系域测井剖面
Fig. 6 Logging profile of the highstand system tract of the third member of the Lingshui Formation in Baodao 21 fault terrace zone

离山区高地经长距离的搬运、发育多支水系汇聚的辫状河沉积体系入水构成的三角洲汇水单元 B(见图 7)。

陵水组沉积期,神狐隆起向西南方向倾末,锆石 U-Pb 测年指示主要由燕山运动期岩浆活动形成。B2-1 井钻井揭示基底岩性以花岗岩为主,母岩成砂率高,输砂能力强^[24],其中,汇水单元 A 紧邻边界断层(见图 7),沉积区 B1-1 井碎屑锆石 U-Pb 年龄为 145 Ma,燕山运动期花岗岩为母岩,流域面积为 151.00 km²,最大高程为 450 m,坡度为 2.55°;汇水单元 B 流域面积约为 718.00 km²,汇水面积大,最大搬运距离为 61.78 km,流经的母岩区岩性较为复杂,包括花岗岩、流纹岩、凝灰岩、变质岩和崖城组沉积物(见表 1),成砂率低,溶解物质多,推测汇水区碎屑物质结构成熟度高而成分成熟度低。B2-2 井钻井揭示基底岩性为白垩系流纹岩,汇水单元 C 母岩以流纹岩为主,发育印支运动期(215 Ma)与燕山运动期(145 Ma)的流纹岩,具有明显的斑状结构和流纹构造,流域面积为 136.00 km²,坡度较陡,混入部分崖城组沉积物,与汇水单元 B 东南向发生河流袭夺而晚期连片,汇水区近注入口处,粒度较小。

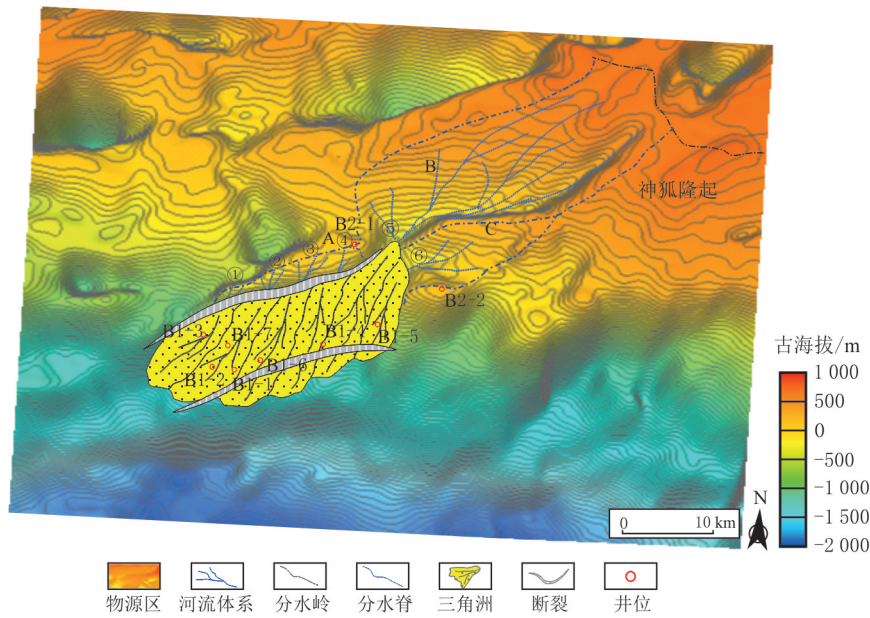


图 7 宝岛 21 断阶带源—汇单元划分
Fig. 7 Source-sink units partition diagram of the Baodao 21 fault zone

表 1 宝岛 21 断阶带源—汇系统源—渠—汇要素

Table 1 Statistics of the source-routing-sink elements of source-sink system in Baodao 21 fault terrace zone

物源体系				沟谷体系							汇聚体系									
汇水单元	搬运距离/km	最大高程/m	坡度/(°)	流经区岩性	流域面积/km ²	编号	长度/m	宽度/m	深度/m	类型	宽深比	井名	钻井地层厚度/m	砂岩厚度/m	砂地比/%	有效储层厚度/m	净毛比	三角洲朵叶体面积/km ²	三角洲砂体体积/km ³	三角洲储集体体积/km ³
A	10.10	450	2.55	花岗岩	151.00	①	5 406	2 410	198	W	12.17	B1-3	270.24	224.70	83	55.96	0.25	93.59	21.03	5.26
						B1-1	212.70	126.50	59	102.07	0.81	16.21	11.68							
						B1-2	316.40	217.40	69	115.09	0.53	128.13	27.86							
						B1-7	389.00	310.00	80	56.50	0.18	39.72	2.98							
B	61.78	1 272	1.18	花岗岩、流纹岩、崖城组沉积物	718.00	②	4 798	3 362	215	V	15.46	B1-6	275.00	161.00	59	58.55	0.36	51.42	8.28	
						④	2 294	1 933	342	W	5.65						44.86	7.22	2.60	
B	61.78	1 272	1.18	花岗岩、流纹岩、崖城组沉积物	718.00	⑤	6 583	4 025	634	U	6.35	B1-4	246.08	81.60	33	50.00	0.61	75.58	6.17	3.76
C	16.31	638	2.24	流纹岩	222.20	⑥	8 506	4 508	377	V	11.96	B1-5	168.00	56.00	33	8.27	0.15	25.82	1.45	0.22

3.2 输砂通道识别

在正地形上发育的母岩受风化剥蚀作用,物源区的碎屑物质顺沟道或槽道向周围负地形(低洼处)搬运、堆积而卸载^[25,28]。沟谷的分布位置及类型限定碎屑物质入水的方向,反映输砂能力的强弱。研究区

自西向东识别 6 个沟谷, 汇水单元 B 对应⑤号沟谷, 侵蚀下切特征较为明显, 宽深比为 6.35, 呈“U”型, 宽度较大, 为 4 025 m, 为长期持续性发育的沟谷; 汇水单元 C 对应⑥号沟谷, 宽深比为 11.96, 输砂能力较强, 受汇水区限制性地貌的影响^[26], 近源堆积而卸载; ①~④号沟谷宽度为 1 933~3 362 m, 长度为 2 294~6 605 m, 发育时间较短, 受 12 号断层影响而不稳定, ①号沟谷下切深度最小, 位于神狐隆起最末处且不稳定, 其次为③号沟谷的(见图 8)。

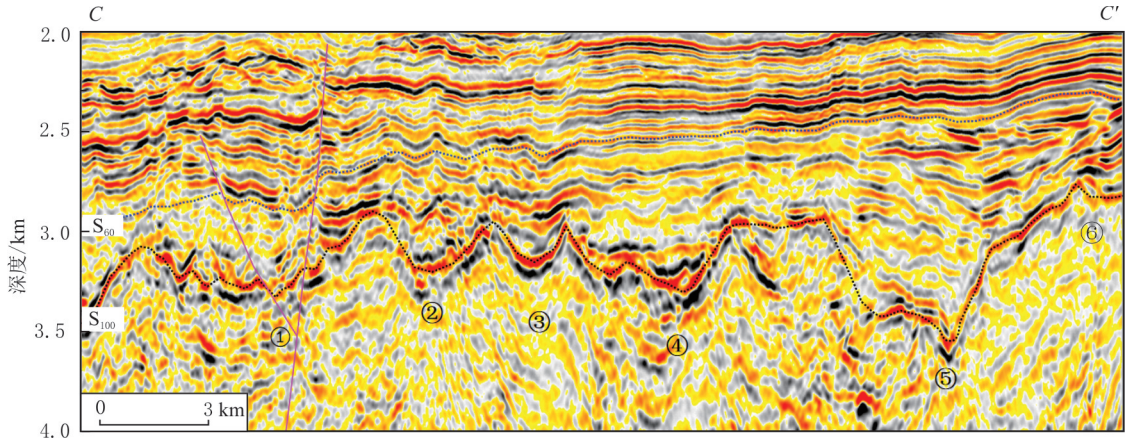


图 8 过研究区沟谷体系典型地震剖面(剖面位置见图 1(b))

Fig. 8 The typical seismic profiles in the valley system of the study area(the section position is shown in fig. 1(b))

3.3 平面展布特征

分期刻画三角洲内幕砂体, 分析各单砂体纵横向测井相、岩心相、厚度和岩性组合的差异性与成因。结合微古地貌恢复和最小地震振幅属性, 高位体系域经历早期 A3 砂体快速堆积、中期 A2 砂体填平补齐和晚期 A1 砂体水系分散沉积的演化过程(见图 9), 其中, 早期砂体受断裂活动影响较大, 以断裂陡坡入注形成小型朵叶体为主; 晚期逐渐转化成以转换斜坡向西南向较远推进的大型朵叶体为主。

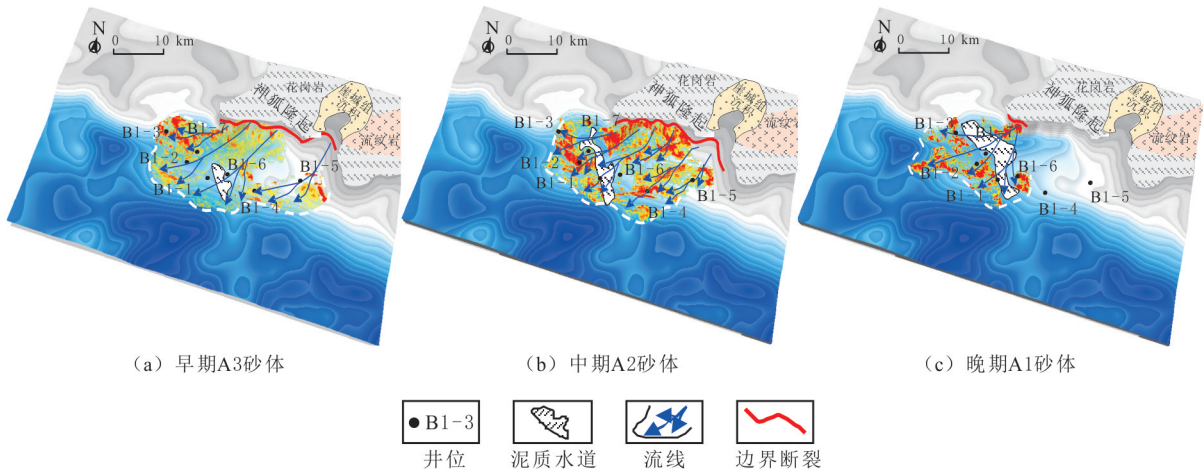


图 9 宝岛 21 断阶带高位体系域古地貌与三期砂体最小地震振幅属性叠合图

Fig. 9 The highstand system tract paleogeomorphology and three sand body minimum amplitude attribute superposition diagram of Baodao 21 fault terrace zone

4 源—汇配置关系及沉积模式

研究物源区地貌、斜坡长度和河道类型等参数, 对确定源—汇系统内部及外部控制因素起关键作用^[27]。形成辫状河三角洲的物源有三种, 分别为远距离山区高地入水前的辫状河、近距离冲积扇前端辫状平原和冰川冲积平原, 扇三角洲往往为冲积扇直接入水^[13]。

4.1 源—汇配置关系

物源区汇水单元 A 具有地形陡、近源堆积、边界断层构造作用强和粗碎屑沉积的特征,流域面积为 151.00 km²,搬运距离较短,为 10.10 km,地形较陡,最大高程为 450 m,源区地形坡度为 2.55°。流经物源区岩石类型以花岗岩为主,水系通过断裂陡坡处发育的①~④号沟谷体系入水,其中②号沟谷延长距离较长,为 6 605 m(见表 1),汇聚水系较集中。汇水区发育的三角洲朵叶体②顺物源方向发育三角洲前积反射,垂直物源方向发育充填相,地层厚度较大,四期砂体在 B1-1 井纵向上叠置,发育粒度粗、地层厚度大、原生孔隙占优势、中孔中低渗储集相,为物源区最优储集相类型。

汇水单元 B 流域面积为 718.00 km²,最大高程为 1 272 m,搬运距离为 61.78 km,沉积区以发育细砂岩等细粒沉积物为主,与转换斜坡⑤号沟谷形成辫状河源—渠体系,呈宽阔纵长型。神狐隆起北东向流域面积较广,流经远距离高地上发育的母岩,受风化作用并经过长距离搬运,入水前形成辫状河,碎屑物磨圆度、成分和结构成熟度较高,是 B1-4 井岩性粒度较细的主要原因;汇水单元 A 与①~④号沟谷构成横向狭长型源—渠体系,地形高陡而发育近距离冲积扇前端的辫状平原,源—渠要素匹配下发育的三角洲粒度粗,磨圆差,未经充分的水下分选而快速卸载、堆积,B1-3 井砂岩粒度较粗,向洼内 B1-2、B1-1 井方向砂岩粒度逐渐变细。

汇水单元 C 对应⑥号沟谷,入水前发育辫状河冲积平原,呈上窄下宽型,研究区具有一定的汇水能力而流域面积有限,B1-5 井砂岩粒度较细,为砂泥岩薄互层沉积,与流纹岩母岩区供源有关。

4.2 沉积模式

类比珠江口盆地和渤海海域古近系三角洲发育模式,研究区具有受断裂陡坡和转换斜坡物源体系影响下的构造转换带三角洲沉积模式的特点^[3,14],以及受盆外物源和盆内物源供给影响下的碎屑物质的储层特征^[36,42-43]。研究区神狐隆起具有北东高、南西低,向西逐渐倾末到宝岛凹陷的特征。陵水组三段沉积期,高位体系域处于断陷期,边界断裂 12 号断层持续活动且活动性较强(见图 10),形成北东向展布的正断层并构成陡坡带,水系流经冲积平原或冲积扇入水,在入海口处发育多个“V”型沟谷,粒度较粗,形成以含砾砂岩、粗砂岩为主的近源扇三角洲。神狐隆起为持续性供源,大量碎屑物质流经花岗岩母岩,多支水系汇聚形成宽缓的辫状河,向洼内搬运卸载砂体,主流水系由北西向南东向推进,转换带沟渠形态以“W”型为主,受汇聚区地貌西低东高的影响,三角洲主要在宝岛 21 断阶带西侧卸载。

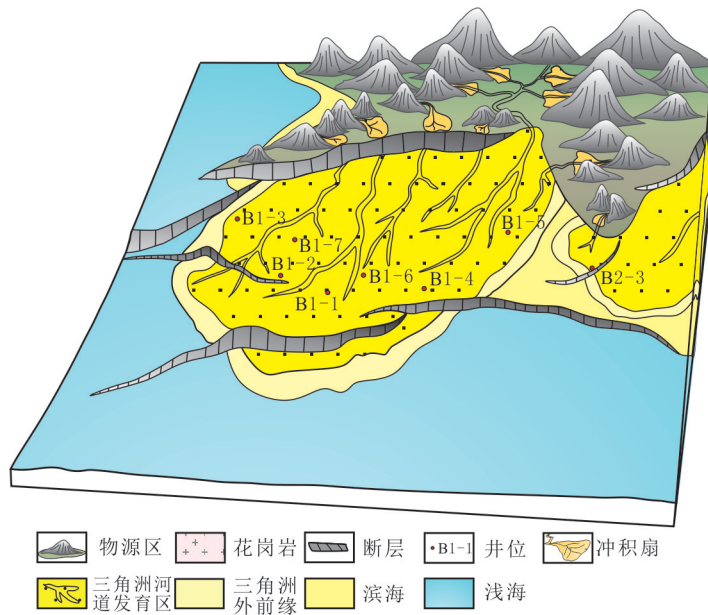


图 10 宝岛 21 断阶带陵三段高位体系域三角洲沉积模式
Fig. 10 Depositional pattern of delta in the third member of the Lingshui HST formation of the Baodao 21 fault terrace zone

宝岛 21 断阶带发育两种类型源—渠—汇体系,包括近物源陡坡、冲积平原、多个“V”型沟谷、粗碎屑扇三角洲和远物源转换斜坡、辫状河、单个“W”型沟谷、细碎屑辫状河三角洲。高位体系域宝岛凹陷北部边界断层活动性增强,在 12 号断层的强烈活动下,下降盘形成较大的可容纳空间,其中断阶带的东侧可容纳空间较大,大量碎屑物质向东汇聚,在 12 号和 12-1 号断层(见图 10)夹持的宝岛 21 断阶带内形成“沉沙池”。神狐隆起物源沿断裂陡坡和转换斜坡向宝岛 21 断阶带输送碎屑物质,形成沿北东向入注的厚层大型海相扇—辫状河三角洲复合体。

5 结论

(1)琼东南盆地宝岛凹陷北坡宝岛 21-1 气田以渐新统陵三段大型高位体系域三角洲为储集体,具备建设性三角洲发育的沉积特征。在断裂期盆地边界断层强烈活动的影响下,由神狐隆起供源的碎屑物质经转换斜坡和断裂陡坡在断阶带卸载而形成,地震反射特征表现为顺物源方向发育强物源供给条件下的帚状前积发射,垂利物源方向为多支朵叶体在不同位置卸载而发育充填相,沉积构造可见槽状交错层理和平行层理。

(2)高位体系域三角洲平面展布特征,表现为岩性以近物源的厚层砂砾岩逐渐转化为远物源的薄层细砂岩,断裂陡坡带近物源的含砂率达 83%,随推进距离的增加,向东向南沉积水动力减弱,由水下分流河道微相逐渐过渡至席状砂和水下分流间湾微相;东部转换斜坡物源供给下的三角洲沉积体系较断裂陡坡带粒度偏细,与物源区流域面积广和搬运距离长有关;高位体系域三角洲纵向上经历早期 A3 砂体快速堆积、中期 A2 砂体填平补齐和晚期 A1 砂体水系分散沉积三期砂体的充填过程。

(3)研究区流域单元 B—⑤沟谷—三角洲朵叶体⑤具有经长距离搬运的特征,母岩岩性较流域单元 A 复杂,转换带沟渠形态以“W”型为主,储集体入海后具有砂泥岩薄互层沉积、成分和结构成熟度高、砂岩粒度细的特征;流域单元 A—②沟谷—三角洲朵叶体②具有冲积扇直接入水,以花岗岩母岩供源为主,三角洲朵叶体表现为横向变化小、纵向叠置好、砂岩粒度粗和单层厚度大的特点,源—渠—汇配置关系好,为研究区最优储集相类型。

参考文献(References):

- [1] ALLEN P A, ALLEN J R. Basin analysis: principles and applications[M]. 2nd ed. The UK Copyright: Blackwell Publishing, 2005: 1-532.
- [2] ALLEN P A. From landscapes into the geological history[J]. Nature, 2008,451:274-276.
- [3] 朱红涛,徐长贵,朱筱敏,等.陆相盆地源—汇系统要素耦合研究进展[J].地球科学,2017,42(11):1851-1870.
ZHU Hongtao, XU Changgui, ZHU Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin[J]. Earth Science, 2017,42(11):1851-1870.
- [4] 谢日欣,张曼莉,王冰洁,等.渤海湾盆地辽中凹陷北部东营组沉积体系发育演化与构造古地貌的控制作用[J].东北石油大学学报,2024,48(2):72-85.
XIE Rixin, ZHANG Manli, WANG Bingjie, et al. Development and evolution of depositional systems and the control of tectonic paleogeomorphology of the Dongying Formation in the Northern Liaozhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(2):72-85.
- [5] 秦国省,王友净,刘辉,等.伊拉克哈法亚油田古近系海相三角洲沉积特征及成藏主控因素[J].油气地质与采收率,2021,5(28):25-34.
QIN Guosheng, WANG Youjing, LIU Hui, et al. Petroleum geology and recovery efficiency, sedimentary characteristics and main controlling factors of Paleogene marine delta reservoir in Halfaya Oilfield, Iraq[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 5(28):25-34.
- [6] 邓运华,兰蕾,李友川,等.论三角洲对南海海相油气田分布的控制作用[J].石油学报,2019,40(增刊2):1-12.
DENG Yunhua, LAN Lei, LI Youchuan, et al. On the control effect of deltas on the distribution of marine oil and gas fields in the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(Supp. 2):1-12.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 姚哲,王振峰,左倩媚,等. 琼东南盆地中央峡谷深水大气田形成关键要素与勘探前景[J]. *石油学报*, 2015,36(11):1358-1366.
YAO Zhe, WANG Zhenfeng, ZUO Qianmei, et al. Critical factors for the formation of large-scale deepwater gas field in Central Canyon System of Southeast Hainan Basin and its exploration potential[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015,36(11):1358-1366.
- [10] 王振峰,孙志鹏,张迎朝,等. 南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律[J]. *中国石油勘探*, 2016,18(4):54-64.
WANG Zhenfeng, SUN Zhipeng, ZHANG Yingzhao, et al. Distribution and hydrocarbon accumulation mechanism of the giant deepwater central canyon gas field in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016,18(4):54-64.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社,2008:305-312.
ZHU Xiaomin. *Sedimentary petrology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008:305-312.
- [14] 林璐,蔡俊杰,刘杰,等. 构造转换带源汇系统控储作用:以珠江口盆地惠州凹陷惠州 26 转换带为例[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2024,39(3):21-33.
LIN Lu, CAI Junjie, LIU Jie, et al. The control of the source-to-sink system of the transfer zone on the reservoir quality: a case study from the Huizhou 26 transfer zone in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2024,39(3):21-33.
- [15] 徐长贵,陆相断陷盆地源—汇时空耦合控砂原理:基本思想、概念体系及控砂模式[J]. *中国海上油气*, 2013,25(4):1-11.
XU Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: basic idea, conceptual systems and controlling sand models[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013,25(4):1-11.
- [16] 徐长贵,杜晓峰,徐伟,等. 沉积盆地“源—汇”系统研究新进展[J]. *石油与天然气地质*, 2017,38(1):1-11.
XU Changgui, DU Xiaofeng, XU Wei, et al. New advances of the “source-to-sink” system research in sedimentary basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017,38(1):1-11.
- [17] 操应长,徐琦松,王健. 沉积盆地“源—汇”系统研究进展[J]. *地学前缘*, 2018,25(4):116-131.
CAO Yingchang, XU Qisong, WANG Jian. Progress in “source-to-sink” system research[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018,25(4):116-131.
- [18] 冯斌,李华,何幼斌,等. 陆相湖盆“源—汇”系统要素定量关系:以渤海湾盆地庙西北地区为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2023,45(3):680-695.
FENG Bin, LI Hua, HE Youbin, et al. Quantitative relationships among source-to-sink system parameters in a lacustrine basin: taking Miaoxibei Area in Bohai Bay Basin, China as an example[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023,45(3):680-695.
- [19] 罗亮,胡晨林,唐雅妮,等. 准噶尔盆地东北部三台凸起烧房沟组沉积模式及其对储层发育的控制作用[J]. *特种油气藏*, 2023,30(3):9-18.
LUO Liang, HU Chenlin, TANG Yani, et al. Sedimentary pattern of the Shaofanggou Formation in the North Santai high area of the Eastern Junggar Basin and its control on reservoir development[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023,30(3):9-18.
- [20] 李绪宣,钟志洪,董伟良,等. 琼东南盆地古近纪裂陷构造特征及其动力学机制[J]. *石油勘探与开发*, 2006,33(6):713-721.
LI Xuxuan, ZHONG Zhihong, DONG Weiliang, et al. Paleogene rift structure and its dynamics of Qiongdongnan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006,33(6):713-721.
- [21] 廖计华,王华,肖军,等. 琼东南盆地古近纪裂陷及构造、层序和沉积的综合响应过程研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012,42(4):970-983.
LIAO Jihua, WANG Hua, XIAO Jun, et al. Episodic rifting and integrated response process of tectonic sequence stratigraphy and sedimentary filling in Paleogene of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2012,42(4):970-983.

- [22] 蔡国富,邵磊,乔培军,等. 琼东南盆地古近纪海侵及沉积环境演化[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊2):91-101.
CAI Guofu, SHAO Lei, QIAO Peijun, et al. Marine transgression and evolution of depositional environment in the Paleogene strata of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(Supp. 2):91-101.
- [23] 田立新. 珠江口盆地惠州凹陷转换体控沉—控储特性及其油气地质意义[J]. 地球科学, 2021, 46(11):4043-4056.
TIAN Lixin. Sedimentary-reservoir characteristics under control of transfer model and implications for hydrocarbon exploration in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2021, 46(11):4043-4056.
- [24] 朱红涛,徐长贵,杜晓峰,等. 陆相盆地古源—汇系统定量重建、级次划分及耦合模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3):539-552.
ZHU Hongtao, XU Changgui, DU Xiaofeng, et al. Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment for ancient source-to-sink systems in continental basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3):539-552.
- [25] 刘强虎,朱筱敏,李顺利,等. 沙垒田凸起西部断裂陡坡型源—汇系统[J]. 地球科学, 2017, 42(11):1883-1896.
LIU Qianghu, ZHU Xiaomin, LI Shunli, et al. Source-to-sink system of the steep slope fault in the Western Shaleitian Uplift[J]. Earth Science, 2017, 42(11):1883-1896.
- [26] 朱红涛,朱筱敏,刘强虎,等. 层序地层学与源—汇系统理论内在关联性与差异性[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4):763-776.
ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: connections and distinctions [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4):763-776.
- [27] SOMME T O, HELLAND-HANSEN W, OLE J, et al. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: a basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems[J]. Basin Research, 2009, 21: 361-387.
- [28] 陆威延,朱红涛,徐长贵,等. 古源—汇系统级次划分方法及应用[J]. 地球科学, 2020, 45(4):1327-1336.
LU Weiyang, ZHU Hongtao, XU Changgui, et al. Methods and applications of level subdivision of source-to-sink system[J]. Earth Science, 2020, 45(4):1327-1336.
- [29] 李顺利,朱筱敏,李慧勇,等. 源—汇系统要素定量表征及耦合模式:以沙垒田凸起与沙南凹陷沙河街组为例[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4):39-50.
LI Shunli, ZHU Xiaomin, LI Huiyong, et al. Quantitative characterization of elements and coupling mode in source-to-sink system: a case study of the Shahejie Formation between the Shaleitian Uplift and Shan Sag, Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4):39-50.
- [30] 钟玉婷,董艳蕾,李顺利,等. 珠三坳陷珠海组海陆过渡相沉积特征及储层控制因素[J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(4):39-56.
ZHONG Yuting, DONG Yanlei, LI Shunli, et al. Sedimentary characteristic sand reservoir controlling factors of sea-land transition in Zhuhai Formation, Zhu-3 Depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023, 47(4):39-56.
- [31] 朱秀,朱红涛,曾洪流,等. 云南洱海现代湖盆源—汇系统划分、特征及差异[J]. 地球科学, 2017, 42(11):2010-2024.
ZHU Xiu, ZHU Hongtao, ZENG Hongliu, et al. Subdivision, characteristics, and varieties of the source-to-sink systems of the modern Lake Erhai Basin, Yunnan Province[J]. Earth Science, 2017, 42(11):2010-2024.
- [32] 庞小军,杜晓峰,马正武,等. 石白坳凸起东段沙一、二段沉积时期物源剥蚀量与砂砾岩沉积量关系[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 68-75.
PANG Xiaojun, DU Xiaofeng, MA Zhengwu, et al. Study on the relationship between provenance denudation quantity and sandy conglomerate volume of the Paleogene E₁₋₂ in Eastern Shijutuo Uplift, Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4):68-75.
- [33] FULLER I C, MARDEN M. Rapid channel response to variability in sediment supply: cutting and filling of the Tarndale Fan, Waipaoa catchment, New Zealand[J]. Marine Geology, 2010, 270(1/2/3/4):45-54.
- [34] CARTER L, ORPIN A R, KUEHL S A. From mountain source to ocean sink—the passage of sediment across an active margin, Waipaoa Sedimentary System, New Zealand[J]. Marine Geology, 2010, 270(1/2/3/4):1-10.
- [35] 韦敏,于世娜,佟欢,等. 济阳坳陷桩海地区碎屑岩优质储层特征及成因机制[J]. 特种油气藏, 2024, 31(3):27-36.
WEI Min, YU Shina, TONG Huan, et al. Characteristics and genesis mechanism of high-quality clastic reservoirs in Zhuanghai Area of Jiyang Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(3):27-36.
- [36] 李一超,龚承林,邱欣卫,等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪源汇过程及其控储作用[J]. 地质论评, 2024, 70(4):1403-1417.
LI Yichao, GONG Chenglin, QIU Xinwei, et al. Source-to-sink processes and their controls on the reservoirs of the Paleogene Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. Geological Review, 2024, 70(4):1403-1417.
- [37] 王绪诚,杜家元,张琴,等. 惠西南地区古近系转换带型源—汇系统研究及其勘探意义[J]. 中国海上油气, 2020, 32(5):44-53.
WANG Xucheng, DU Jiayuan, ZHANG Qin, et al. Study of source-sink system of transfer zone type of Palaeogene in southwestern area of the Huizhou Sag and its exploration significance[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(5):44-53.

(下转第96页)