

姚天星, 屈红军, 黄苏卫, 等. 北部湾盆地海中凹陷流二段沉积体系及沉积模式[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(11): 50-62.

YAO Tianxing, QU Hongjun, HUANG Suwei, et al. Sedimentary system and depositional model of the Second Member of the Liushagang Formation in Haizhong Sag in Beibuwan Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(11): 50-62.

北部湾盆地海中凹陷流二段沉积体系及沉积模式

姚天星¹, 屈红军^{1*}, 黄苏卫², 封从军¹, 武龙发¹, 姚兴宗¹

(1 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

2 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海 200120)

摘 要:北部湾盆地北部涠西南凹陷多口钻井已获得高产油气流系列突破,其主力烃源岩层系为始新统流沙港组二段(流二段),但紧邻南侧的海中凹陷目前暂无商业油气发现。流二段既发育有深湖—半深湖相的烃源岩,同时在主力烃源岩段也发育有湖底扇储层,因此,研究海中凹陷潜在生烃层系(烃源岩、湖底扇储层)沉积体系发育规律对今后勘探开发具有指导意义。以高精度三维地震资料及测井资料为基础,通过岩芯相、测井相、地震相、地震属性的综合分析,探讨流二段沉积体系发育规律,建立沉积模式。研究表明:流二段主要发育滨浅湖、深湖—半深湖、湖底扇及辫状河三角洲 4 种沉积体系类型;在北陡南缓的半地堑构造样式控制下,北部陡坡带及洼槽带发育深湖—半深湖相,同时接受北部、东部 2 个物源方向的供源,分别西洼、东洼发育湖底扇相,南部缓坡带发育滨浅湖及辫状河三角洲相。海中凹陷流二段好烃源岩主要发育在初始湖泛面层序位置(ts),湖底扇主要发育在湖泊扩张体系域内(TST),反映了在断陷湖盆背景下,构造沉降因素控制烃源岩发育程度强于湖平面变化因素。研究可为半地堑型断陷湖盆深湖—半深湖相烃源岩与湖底扇储层发育层序位置及共生模式的建立提供参考。

关键词:北部湾盆地;海中凹陷;流沙港组二段;沉积体系;沉积模式

中图分类号:P736;P618.13

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.236

0 引言

北部湾盆地是中国近海重要的含油气盆地,油气发现主要富集在涠西南凹陷、乌石凹陷和福山凹陷,且均已被证实为富烃凹陷,但海中凹陷至今尚无商业油气发现^[1-3]。涠西南凹陷与海中凹陷同处于北部湾盆地北部拗陷,两者被 3 号断裂分隔,具备相似的构造和沉积演化特征。涠西南凹陷已发现的油气主要来源于流沙港组二段(流二段)烃源

岩^[4-6],局部主力烃源岩段也同时发育有湖底扇储层。流二段目前面临的主要生产问题是研究区北部的涠西南凹陷勘探已经确认流二段发育深湖—半深湖相烃源岩及湖底扇沉积,而研究区南部海中凹陷目前尚无突破。为了进一步推动勘探进展,亟需解决是否存在深湖—半深湖相的烃源岩和湖底扇储层,以及若存在该沉积其展布规律如何的问题,因此,研究海中凹陷生烃层系沉积体系发育规律,对研究区进一步勘探开发具有指导意义。同时,流二段也存在值得关注的科学问题,如半地堑型断陷湖盆深湖—半深湖相烃源岩与湖底扇储层发育的层序位置及共生模式。

近年来,众多学者针对海中凹陷流二段进行了大量研究。在构造演化方面,认为流二段沉积期处于主干断裂形成期,主要发育 NE—NEE、NEE 和近 EW 向多组断裂体系,此时海中凹陷主控断裂为 NEE 向的三号断裂西段,断层活动强烈^[7-9];在沉积

收稿日期: 2022-08-30

资助项目:中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司科研项目“北部湾盆地海中凹陷沉积体系展布分析及储层精细刻画”(2021-2593)

作者简介:姚天星(1998—),女,在读博士,主要从事储层沉积学方面的研究工作。E-mail: 1135104605@qq.com

* 通讯作者:屈红军(1967—),男,博士,教授,主要从事储层沉积学方面的研究工作。E-mail: hongjun@nww.edu.cn

充填特征方面,流二段表现为“广盆、深水”环境,沉降中心开始向东迁移,发育大面积深湖—半深湖亚相,沿陡坡处发育近岸水下扇,缓坡则为辫状河三角洲,洼陷内发育少量湖底扇^[10-14];在烃源岩评价方面,海中凹陷流二段烃源岩现今处于生油窗,仅深凹区域达到过成熟阶段,有机质类型主要为Ⅱ₂型,烃源岩质量虽整体不如涠西南凹陷,但烃源岩发育程度较好,有机质丰度高,具备较强的生排烃能力,资源潜力巨大^[15-17];油气成藏组合包括2种类型,分别为下部高压自源半封闭成藏模式(“上生下储”型油气藏)和上部常压自源开放成藏模式(“下生上储”型油气藏);前者以流二段为生烃层,流三段、长流组为储层;后者以流二段为生烃层,涠洲组为储层^[18-21]。

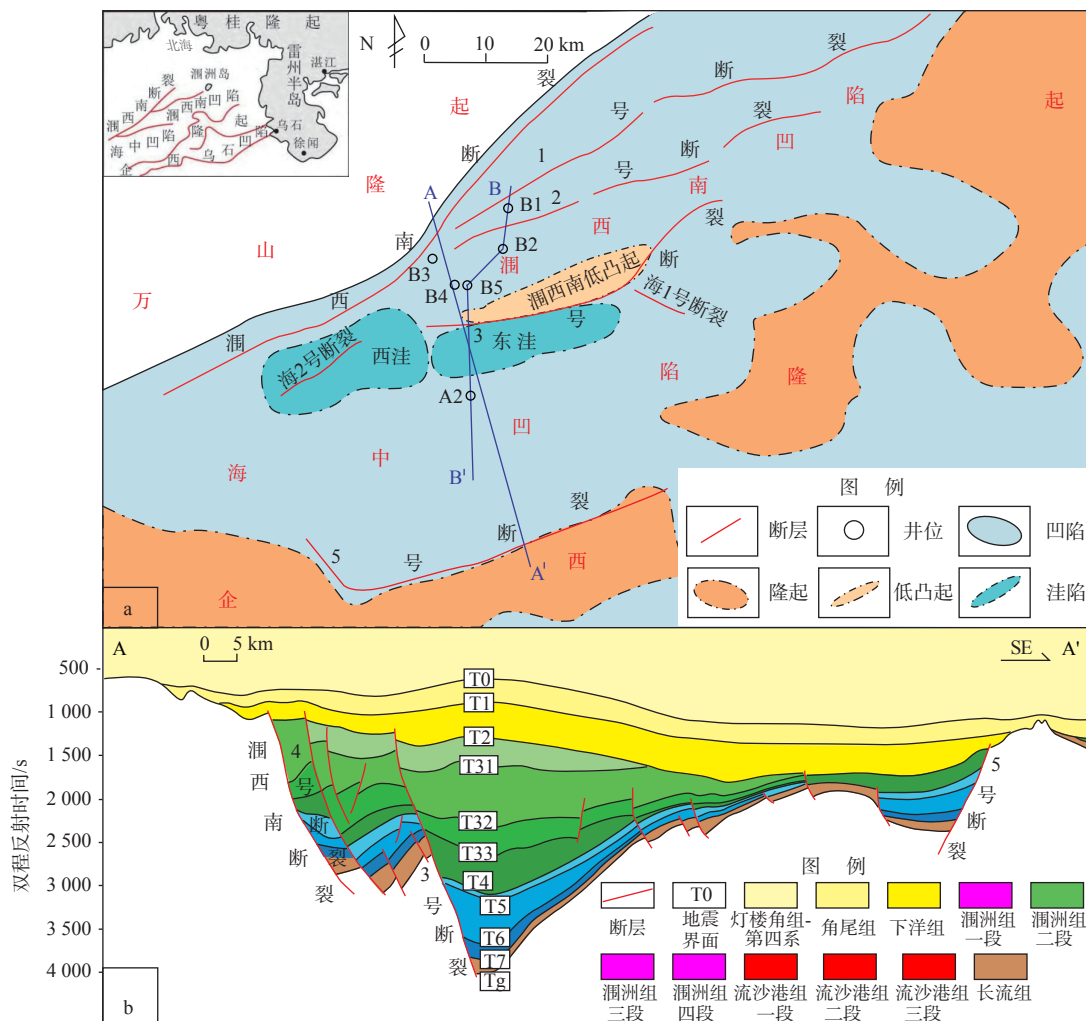
本文以沉积学理论为指导,以高精度三维地震资料及6口钻测井、2口取芯井资料为基础,通过对目的层段岩芯相、测井相、地震相及地震属性精

细分析,利用地震相-地震属性-沉积体系转换分析等方法,确定海中凹陷流二段沉积体系类型和平面展布特征,探讨沉积主控因素,建立半地堑型断陷湖盆深湖—半深湖相烃源岩与湖底扇储层发育的层序位置及共生模式。

1 区域地质概况

1.1 构造位置与构造单元划分

北部湾盆地位于华南板块的西南边缘,是南海北部裂谷系诸盆地之一。平面上,以古近纪张裂阶段形成的构造格局为划分依据,将北部湾盆地划分为3个一级构造单元:南部坳陷、企西隆起和北部坳陷,构造格局上整体呈现“两坳夹一隆、多凹多凸”相间排列的特点^[22-23](图1a);剖面上,北部湾盆地具有明显断拗双层结构^[24-26](图1b)。海中凹陷位



(a)北部湾盆地构造单元;(b)北部湾盆地剖面结构

图 1 北部湾盆地构造单元及剖面结构^[21]

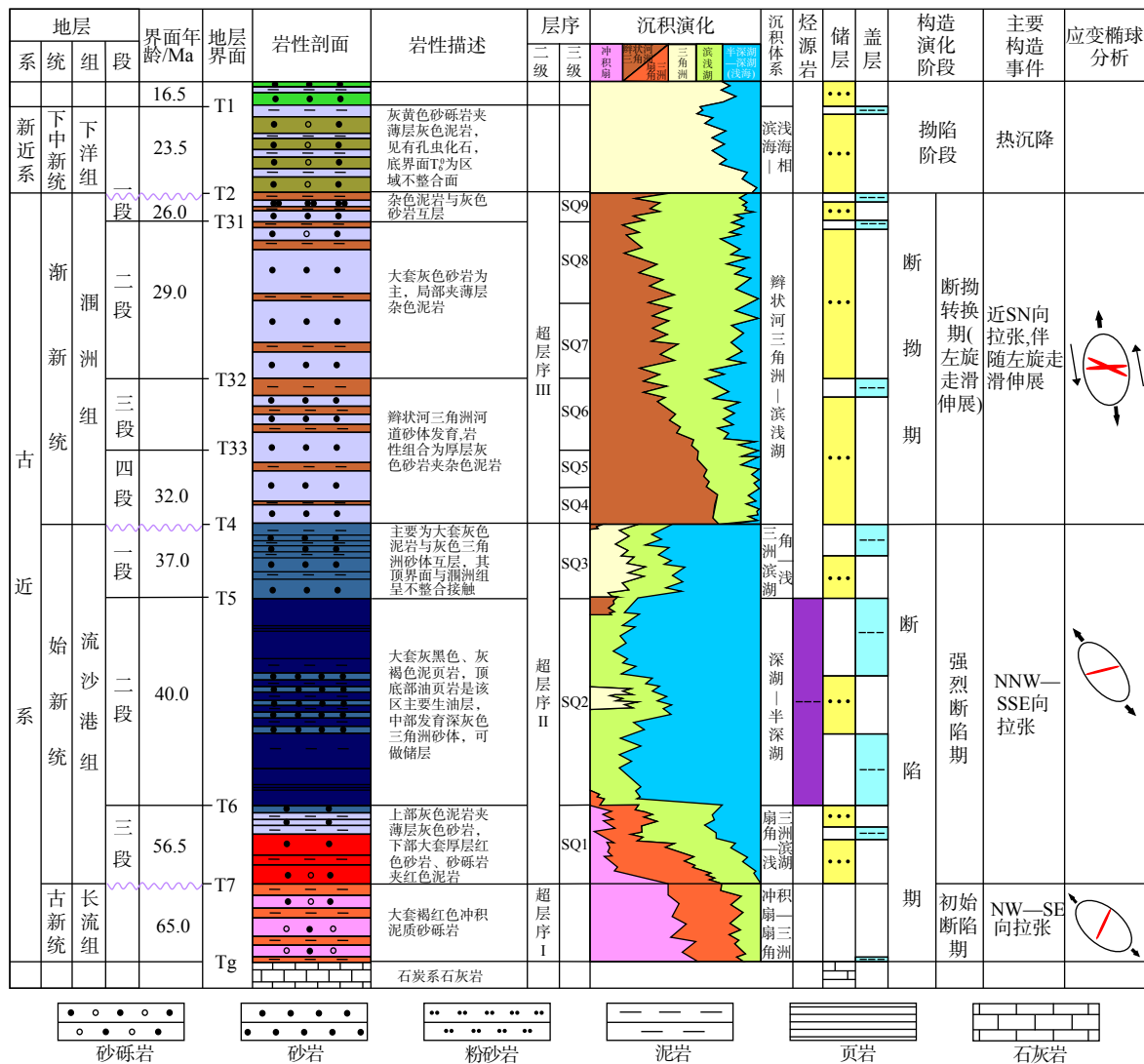
Fig.1 Tectonic units and structural section of the Beibuwan Basin^[21]

于北部湾盆地北部坳陷西南部,面积约为 3 694 km²,为“北断南超”的箕状凹陷,总体表现为近 EW 向展布的简单半地堑构造,自北向南划分为北部陡坡带、洼槽带、南部缓坡带,洼槽带包括西洼、东洼 2 个单元,是北部湾盆地勘探程度较低的凹陷之一。

1.2 地层层序与构造演化阶段

海中凹陷自下而上依次充填了古新统长流组、始新统流沙港组、渐新统涠洲组 3 套地层。流沙港

组(E₂I)自下而上又可细分为流三段(E₂I³)、流二段(E₂I²)、流一段(E₂I¹)^[27]。流三段为湖盆扩张阶段,泥岩由下部红色向上部灰色转变,粒度由粗变细,反映湖盆水体逐渐加深;流二段湖盆扩张至鼎盛阶段,岩性以灰黑色、深灰色页岩及灰色泥岩为主,内部夹细砂岩、粉砂岩及泥质粉砂岩的浊流沉积;流一段为湖盆萎缩阶段,该时期断裂活动逐渐趋缓,沉积大套三角洲—滨浅湖相砂泥岩互层,物源体系复杂使得岩性、岩相横向变化明显(图 2)^[28]。



据文献 [28] 修改

图 2 海中凹陷综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the Haizhong Sag

北部湾盆地演化共经历断陷和拗陷 2 个阶段, 4 个期次^[29-31]。断陷 I 幕(晚白垩世—古新世)时期盆地内 7 个凹陷此时已初具雏形, 充填物类型包括洪积扇、冲积扇、辫状河及滨浅湖沉积; 断陷 II 幕(始新世早—中期)为强烈断陷期, 凹陷内为明显的

湖相沉积环境; 断陷 III 幕(始新世末—渐新世)盆地裂陷进入活动晚期, 水体范围扩大, 沉积了一套河流冲积相、三角洲、扇三角洲、滨浅湖等沉积体系; 断拗转换期(新近纪)主要沉积一套滨浅海碎屑岩, 覆盖于断陷沉积之上。

2 资料来源及相标志

2.1 资料来源

本文研究工作基于如下资料:研究区三维地震资料 1 560 km²; 钻井 6 口, 包括 B1、B2、B3、B4、B5、A2 井; 取芯井 2 口, 分别为 B1 与 B3 井, B1 井取芯段为流二段 1 711.91~1 717.84 m, 长 5.93 m, 主要为灰黑色、深灰色页岩及泥岩, B3 井取芯段为流二段 3 361.00~3 368.40 m, 长 7.4 m, 主要为深灰色、灰色泥岩, 中部夹薄层沥青质。

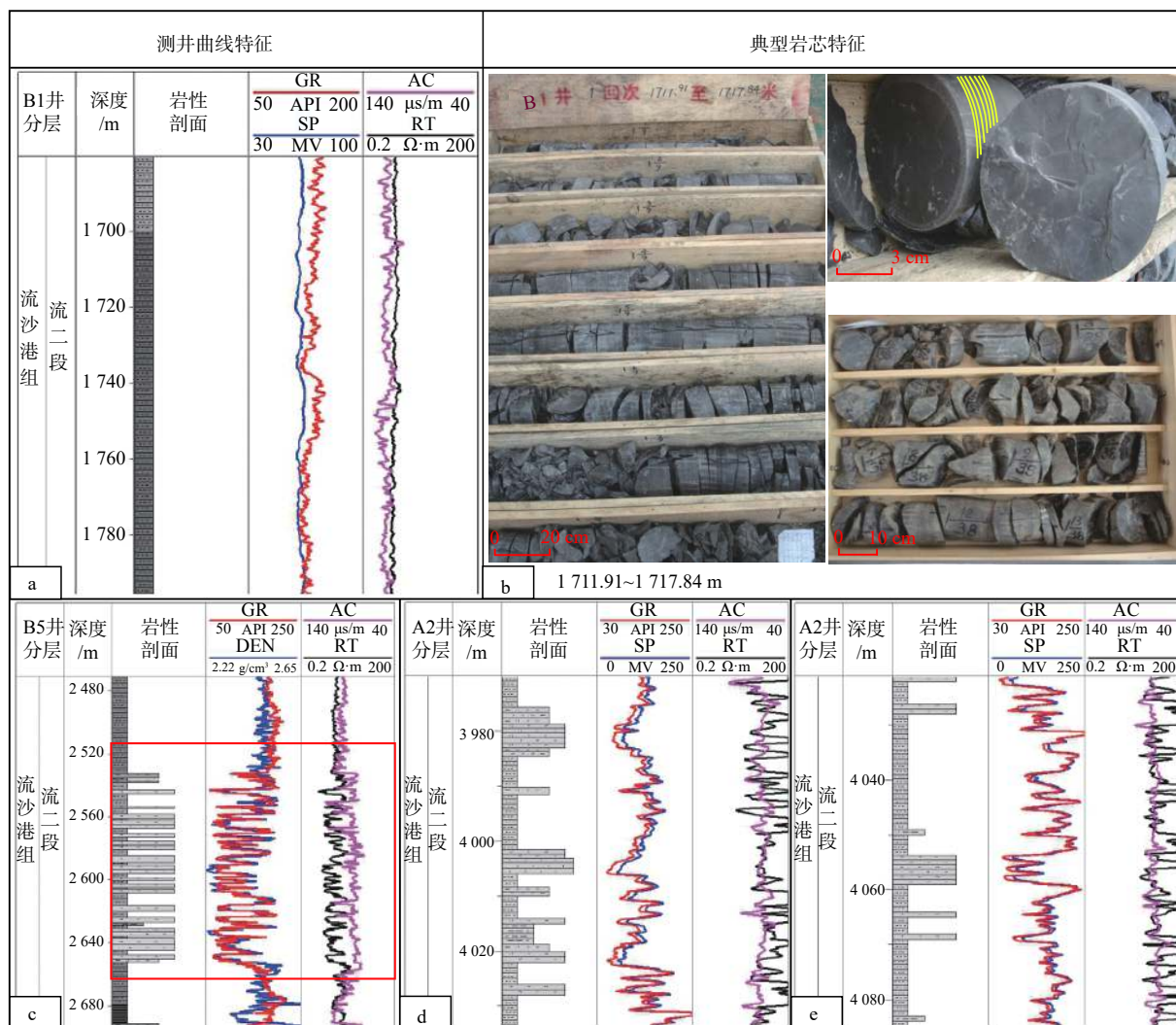
2.2 岩芯相标志

岩芯相标志的研究对岩石成因类型及沉积环

境的判别具有一定程度的指示意义。通过观察研究区取芯井岩芯可知,流二段岩芯相标志为:①灰黑色、深灰色页岩及深灰色、灰色泥岩充分发育,指示还原环境;②水平层理发育,反映水体较深,水动力较弱的静水悬浮沉积环境。在 B1 井取芯段下部可见灰黑色页岩,水平层理发育,页岩厚度较大且发育稳定;中部为深灰色页岩,内部发育大量水平层理;取芯段上部以深灰色厚层泥岩为主,发育块状层理,反映深湖一半深湖相沉积特点(图 3b)。

2.3 测井相标志

通过识别测井曲线的幅度、光滑度、旋回幅度、形态及顶底接触关系等特征,可以有效反映地层岩性及其组合特点,精确建立起岩性与电性之间的对应关系,本区主要采用自然伽马曲线,并结合自然



(a)平直高伽马形;(b)B1 井流二段,灰黑色、深灰色页岩及泥岩,1 711.91~1 717.84 m;(c)高韵律指形;(d)钟形;(e)指形或低矮漏斗形

图3 流二段岩芯相及典型测井相特征

Fig.3 Characteristics of core facies and typical logging facies of the Second Member of Liushagang Formation

电位、声波时差及电阻率曲线等进行测井相分析,最终识别出 4 种测井相类型:

(1) 平直高伽马形 自然伽马曲线多高值,形态平直,呈微齿型起伏,声波时差曲线、自然电位曲线均较平直,可见微齿状,为大套泥岩响应,通常反映深湖—半深湖相沉积环境(图 3a);

(2) 高韵律指形 在高伽马、曲线形态平直背景下,所夹具有韵律状的高幅密集指形组合曲线,自然电位、电阻率和声波时差曲线幅度差异明显,顶底呈突变接触,在稳定沉积背景下,反映水体动荡、高频韵律重力流沉积形成的砂泥互层富砂岩性组合,为湖底扇沉积体系特征(图 3c);

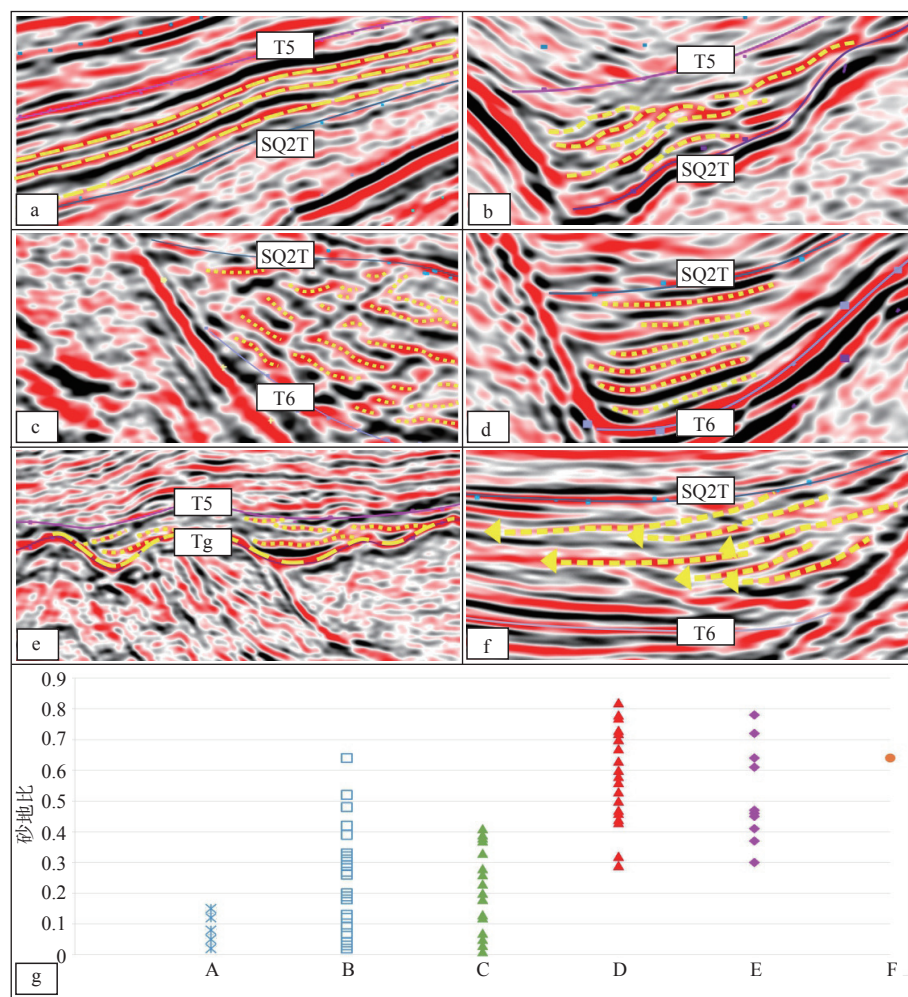
(3) 钟形 自然伽马曲线呈现正旋回钟形形态,且该形态常在某一段曲线中连续出现,反映水流能量向上逐渐减弱,代表水下分流河道的沉积特征(图 3d);

(4) 指形或低矮漏斗形 自然伽马曲线呈指状或逆旋回漏斗状形态,低矮漏斗形通常反映远砂坝或席状砂的存在,代表浅水水下环境。自然伽马多中低值,粒序特征整体不明显,为砂泥互层富泥岩性组合,反映滨浅湖沉积环境(图 3e)。

2.4 地震相类型及含砂性标定

2.4.1 地震相类型

地震相可以反映地层岩性、岩相变化等特征,并间接推断出沉积环境,物源方向及地质演变等信息,其几何参数包括外部反射形态与内部反射结构,物理参数包括连续性、振幅及频率等。研究区地震相类型丰富,根据典型地震相单元的参数标志在研究区目的层段内识别出 6 种地震相类型,不同地震相类型代表不同的沉积环境及水动力条件(图 4)。



(a) 平行—亚平行反射; (b) 波状反射; (c) 杂乱反射; (d) 碟状—席状反射; (e) 水道充填; (f) 前积反射; (g) 地震相类型与砂地比交汇图
(图中 A—F 分别为 a—f 的砂地比)

图 4 海中凹陷流二段地震相类型及砂地比交汇图

Fig.4 Cross-plot of seismic facies types and the sand-stratum ratio of the Second Member of Liushagang Formation in Haizhong Sag

(1) 平行—亚平行反射地震相 下层同相轴彼此平行或略微起伏,连续性好,通常反映稳定的水体沉积环境,沉积速率趋于匀速,为深湖—半深湖沉积相带的响应特征,该类型地震相主要发育于研究区洼槽带内(图 4a)。

(2) 波状反射地震相 同相轴波状起伏但总体上大致平行,振幅及频率在不同情况下有所差异,反映沉积速率横向不稳定,水体能量相对较强的滨浅湖沉积环境,研究区南部缓坡带内常见该类型地震相(图 4b)。

(3) 杂乱反射地震相 同相轴短小且不规则,连续性极差,缺乏有序的波阻抗界面,往往发育于能量高且不稳定、邻近物源区的沉积环境中,受断裂控制明显,在扇三角洲沉积中最为常见,研究区仅在 3 号断裂西侧末端可见小范围杂乱反射(图 4c)。

(4) 碟状-席状反射地震相 同相轴上下平行,向两侧逐渐尖灭,中强振幅,中高频,在垂向上呈饼状叠加,与周围地震相形态差异明显,主要反映相对高能沉积环境,代表沉积体系类型包括三角洲前缘、湖底扇等这一类砂体富集相带,研究区内该类型地震相镶嵌发育于平行—亚平行反射或波状反射的背景中(图 4d)。

(5) 水道充填地震相 在剖面上表现为“顶平底凹”的下凹形特征,地层局部加厚,反映河道下切下伏地层并充填其中,可揭示物源供给通道,通常指示水下或水上分流河道。研究区南部缓坡带及盆地东部内可见分支水道,有利于沉积物向凹陷中心推进(图 4e)。

(6) 前积反射地震相 相对于上下平行同相轴之间的一系列倾斜并以低角度下超于底界的同相轴,相互间存在重叠的部分,是沉积物强顺流进积的产物,在前三角洲或坡折带处易发育。研究区内前积反射发育范围极小,仅见于 B5 井附近和洼槽带东部(图 4f)。

2.4.2 地震相类型的含砂性标定

基于凹陷内已识别的 6 种地震相类型,采取井-震结合的研究方法,将各层段砂地比与其对应地震相类型做出拟合分析,发现上述 6 种地震相类型对应沉积环境的砂体富集程度可分为 3 类(图 4g):

(1) 富泥型地震相 为平行—亚平行反射地震,与其相对应的砂地比值较低,均 $<20\%$,通常反映半深湖—深湖相的深水还原环境,该区域泥岩充分发育,砂岩含量较低,是烃源岩层系的标志地震相类型;

(2) 砂-泥混合型地震相 包括波状反射与杂乱反射地震相,其所对应的砂地比区间范围较大,为 $0\sim 50\%$,但主要集中在 $20\%\sim 40\%$,常在滨浅湖、扇三角洲等水体能量较强的富砂区中发育;

(3) 富砂型地震相 包括席状-碟状反射、水道充填反射及前积反射地震相,该类型地震相对应的砂地比值较高,区间范围 $30\%\sim 80\%$,所对应沉积环境通常为三角洲前缘、分流河道、湖底扇等富砂地区,属优质储层的标志地震相类型。

3 沉积体系类型及特征

在综合分析研究区流二段岩芯相、测井相、地震相等相标志的基础上,以岩相沉积学为理论指导,在海中凹陷流二段共识别出深湖—半深湖、湖底扇、滨浅湖和辫状河三角洲 4 种沉积体系类型。

3.1 深湖—半深湖

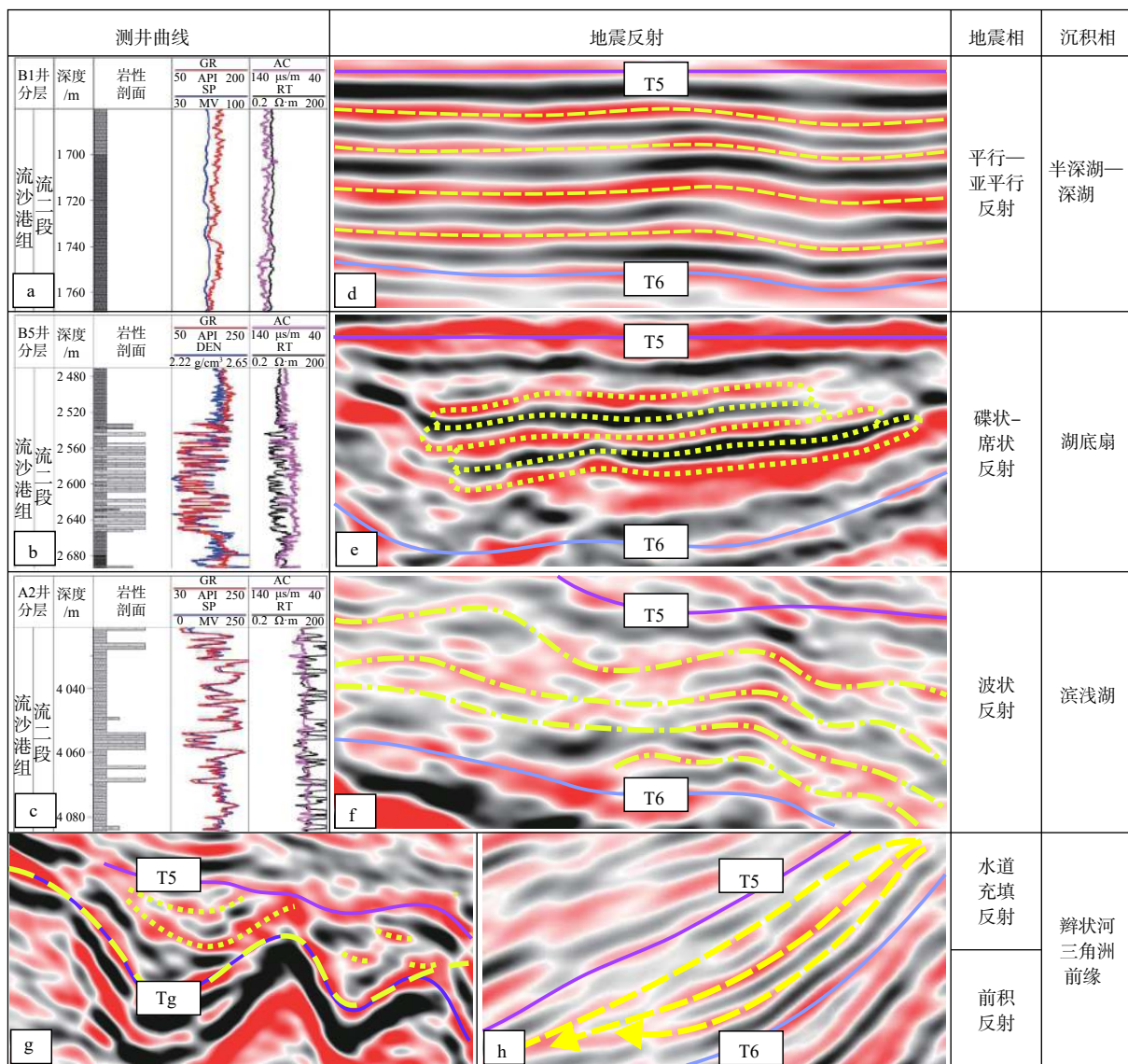
深湖—半深湖相的岩芯相特征表现以灰黑色、深灰色页岩及深灰色、灰色泥岩为主,可见大量清晰的水平层理(图 3b);测井相特征主要表现为高伽马,形态平直,呈微齿型起伏,声波时差曲线、自然电位曲线均为靠近基线的平直线,连续性厚度可达 $100\sim 300\text{ m}$,为大套泥岩响应(图 5a);地震相类型多为强振幅的平行—亚平行反射,同相轴连续性好,振幅、频率较强,顶底接触关系整齐(图 5d)。

由连井沉积体系剖面可知,断陷湖盆流二段自北向南水体逐渐变浅,深湖—半深湖相大规模发育,横向展布稳定,综合反映稳定的深水还原沉积环境(图 6)。

3.2 湖底扇

自然伽马曲线在湖底扇发育段异常突出,具体表现为在高伽马、曲线形态平直的背景下,所夹的具韵律状的高幅密集指形组合曲线,顶、底与泥岩呈突变式接触,反映了水体动荡、高能沉积环境,高频韵律重力流沉积形成的砂泥互层富砂岩性组合(图 5b);地震相特征表现为以席状-碟状地震相反射类型为主,物性条件良好时可作为储层存在(图 5e)。

流二段内以最大湖泛面(mfs)为界,划分为湖泊扩张域(TST)和湖泊收缩域(HST),在连井沉积体系剖面上湖底扇主要发育于流二段下亚段中部,



(a) 半深湖—深湖典型测井相; (b) 湖底扇典型测井相; (c) 滨浅湖典型测井相; (d) 平行—亚平行反射地震相; (e) 碟状—席状反射地震相; (f) 波状反射地震相; (g) 水道充填反射地震相; (h) 前积反射地震相

图 5 海中凹陷流二段井震联合分析

Fig.5 Conjoint analysis of seismic-logging of the Second Member of Liushagang Formation in the Haizhong Sag

规模中等, 连通性较好(图 6); 研究区湖底扇沉积体系确定的主要依据包括测井相和地震相, 区内没有取芯井并取到湖底扇沉积。

3.3 滨浅湖

滨浅湖的测井相特征: 低幅齿化或指状的较平直曲线, 自然伽马曲线多为中—低值, 岩性组合表现为泥岩中夹薄层砂岩, 粒序特征不明显(图 5c); 滨浅湖相地震相类型: 常为波状反射特征, 内部反射结构具有中振幅、中低频、连续性中等的特点(图 5f)。反映了水体较浅, 水动力强度适中的沉积环境。

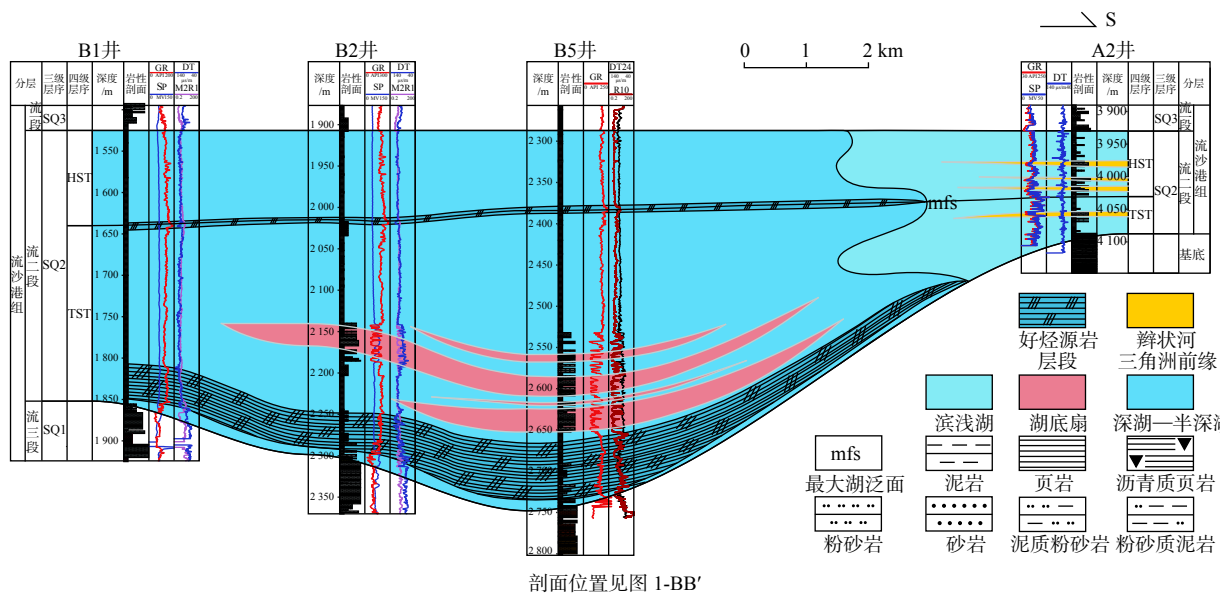
研究区滨浅湖沉积体系主要依据测井相及地

震相识别, 研究区内没有取芯井并取到滨浅湖相沉积。

3.4 辫状河三角洲

辫状河三角洲包括辫状河三角洲平原亚相与前缘亚相, 研究区内发育辫状河三角洲前缘亚相, 主要依据地震相及测井相识别, 凹陷内无取芯井并取到辫状河三角洲前缘沉积。辫状河三角洲前缘亚相可进一步细分为水下分流河道与水下分流间湾微相。

(1) 水下分流河道微相 自然伽马曲线呈正旋回钟形, 且该形态常在某一段曲线中连续出现, 反映水流能量向上逐渐减弱(图 3d)。在垂直物源方



剖面位置见图 1-BB'

图 6 流沙港组连井对比沉积体系剖面图

Fig.6 Multi-well correlation in sedimentary facies of the Liushagang Formation

向上,地震相类型表现为水道充填反射,地震剖面上可追踪出连续且清晰的水道形态(图 5g);在平行物源方向上,地震剖面上可见前积反射,揭示了碎屑沉积物由源区不断向盆地中心推进的过程(图 5h)。

(2)水下分流间湾微相 自然伽马曲线呈连续微齿形,异常幅度较低,整体形态光滑似直线。地震相类型常以波状反射为代表,内部反射结构具有中—低振幅、连续性中等的特点。

研究区内辫状河三角洲沉积体系主要依据测井相及地震相识别,研究区内没有取芯井取到辫状河三角洲沉积。

4 沉积体系发育规律及沉积模式

4.1 地震相发育规律

通过分析不同地震相类型的展布范围,有利于推断凹陷内不同构造区带的沉积体系、沉积环境与物源方向,实现地震相-沉积体系的紧密结合。在 6 种地震相类型识别及确定的基础上,采用“人工相面法”对海中凹陷流二段地震相类型进行精细刻画,圈定各类型地震相的平面分布范围,绘制出流二段地震相平面分布图(图 7a)。

在凹陷中心洼槽带内,平行—亚平行反射地震相大面积分布,其内部镶嵌发育一定规模的碟状-席状反射;凹陷边缘的南部斜坡内带主要发育波状反射,南部斜坡外带则以碟状-席状反射为主。受到断

层活动影响,断裂带西段可见紧贴断层的小规模杂乱反射。水道充填地震相在北部陡坡带、南部缓坡带及凹陷东部均发育,连续的水道形态揭示了企西隆起和涠西南低凸起两大物源区,前积反射地震相在凹陷东部可见,揭示了来自东部企西隆起的沉积物沿轴向水道向湖盆中心不断推进的过程。

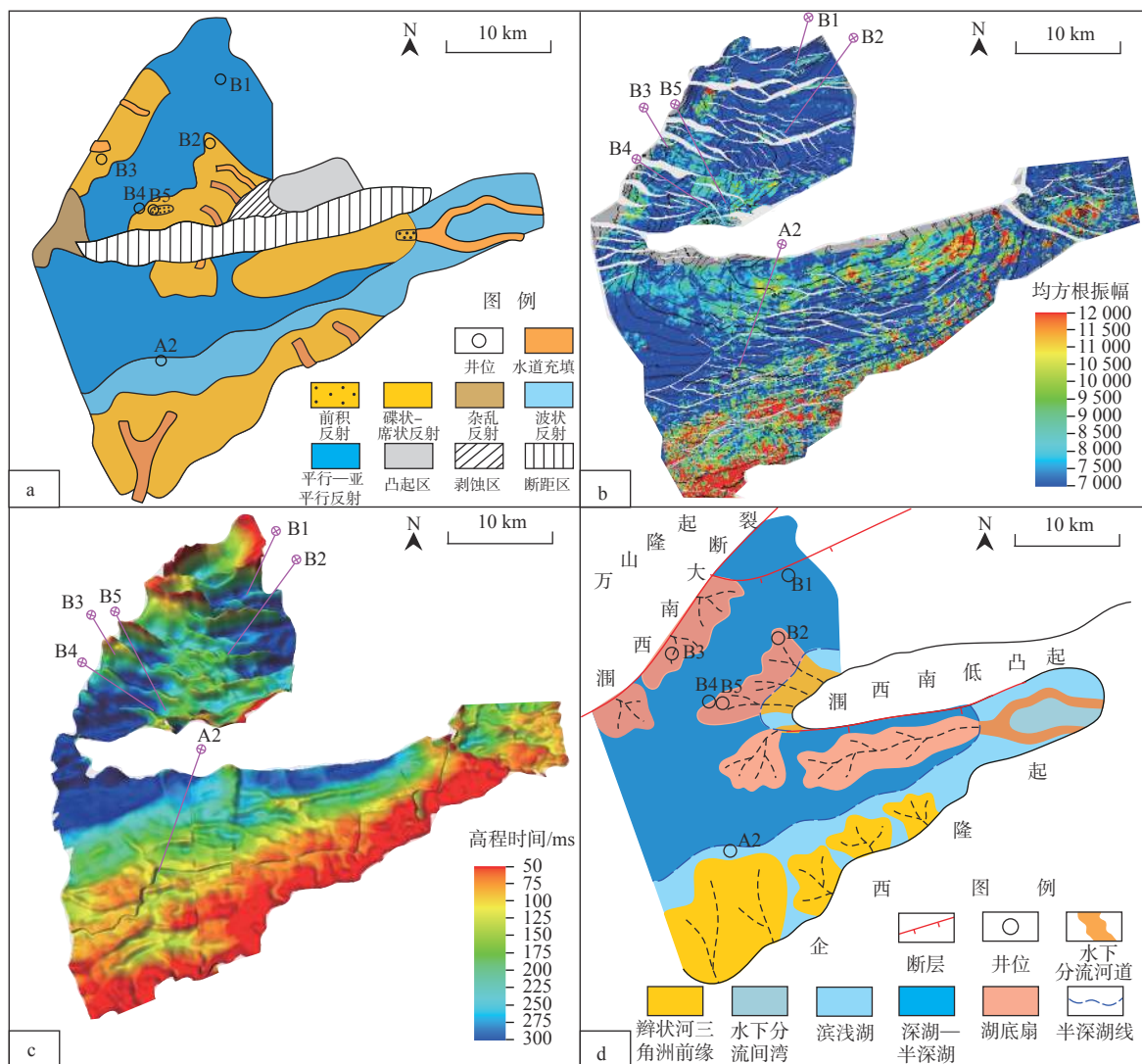
4.2 地震属性发育特征

地震属性可以刻画和描述地层结构、岩性及物性等地质信息,在研究区内,提取了弧长、最大振幅、高于门槛值、低于门槛值、平均强度、平均波峰、平均波谷、平均瞬时频率、瞬时带宽、平均瞬时相位、均方根振幅等十余种常用的地震属性,优选分析认为均方根振幅属性能够较好地与地震相的平面展布相耦合,线性指数高达 0.85。

均方根振幅属性通过放大振幅异常区追踪砂体的变化特征,流二段 RMS 均方根振幅数值范围为 7 000~12 000。研究区以均方根低值区为背景,呈深蓝色反射代表厚层泥岩发育区;均方根高值区大面积分布在洼槽带内及南部缓坡带内,呈亮红色反射代表砂体富集区。低值区与高值区的分布面积与地震相类型发育范围具有良好的匹配关系(图 7b)。

4.3 沉积体系发育规律

以构造演化为背景,以地震相、地震属性平面展布特征为基础,参考古地貌进行修正,绘制流二段沉积体系平面展布图。首先,将地震相平面图中



(a)地震相平面分布图; (b)均方根振幅地震属性图; (c)古地貌图; (d)沉积体系图

图 7 流二段地震相、地震属性、古地貌与沉积体系

Fig.7 Seismic facies, seismic attributes, paleomorphology, and sedimentary facies of the Second Member of Liushagang Formation

波状反射地震相及平行-亚平行反射地震相的分布范围与属性图中代表泥岩发育的深蓝色区域相拟合,并以标定后的古地貌趋势进行约束,确定流二段时期湖岸线及深湖-半深湖线发育位置;其次,在深湖-半深湖沉积背景下,识别席状-碟状反射地震相边界,结合物源方向,以均方根振幅属性正态分布约束砂体边界,从而确定湖底扇发育范围;在滨浅湖沉积背景中,运用相同的技术方法,圈定辫状河三角洲前缘的砂体展布范围,最终实现地震相与沉积体系之间的转换关系(图 7d)。

海中凹陷流二段沉积体系在平面上表现出北部深湖-南部缓坡滨浅湖的带状分异。北部洼槽带发育深湖-半深湖相沉积,向南部缓坡带方向逐渐演变为滨浅湖相。在深湖-半深湖相的沉积背景下,来自湖西南低凸起的沉积物在西洼堆积形成湖底

扇沉积,来自企西隆起的沉积物沿东部轴向水道搬运至东洼形成 EW 向展布的湖底扇沉积。在南部缓坡带发育来自企西隆起物源区供给的辫状河三角洲前缘沉积。

海中凹陷流二段沉积体系发育规律在剖面上表现为:靠近三号断层的洼槽带部位发育深湖-半深湖相沉积,该时期湖盆扩张至鼎盛时期,与上、下地层相比深湖-半深湖相分布规模最广泛,缓坡带由于水体变浅以滨浅湖相为主,凹陷边缘发育辫状河三角洲前缘沉积;湖底扇沉积主要发育在流二段下亚段,位于洼槽带内(图 8)。

4.4 流二段沉积模式及主控因素

4.4.1 沉积模式

在综合分析岩芯相、测井相、地震相以及地震

属性优选的基础上,根据沉积体系发育规律,结合构造样式,建立了研究区流二段的沉积模式。

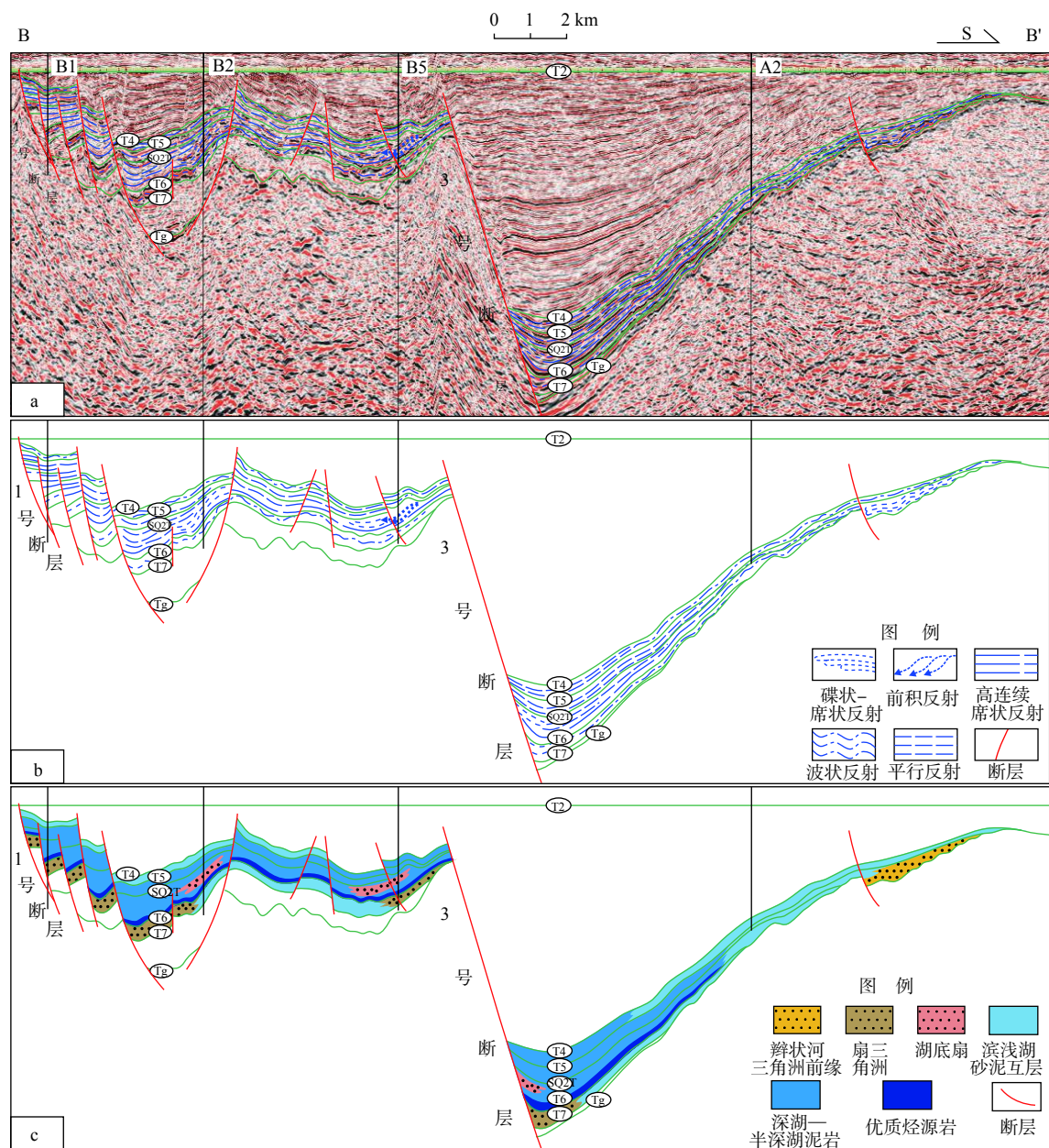
流二段时期,涠西南凹陷和海中凹陷整体连通,海中凹陷处于强烈断陷期,区内构造活动较强,三号断裂带下盘快速沉降,水体不断加深形成沉积中心,是一个深湖—半深湖背景下的半地堑盆地。海中凹陷沉积体系展布具有明显的北部深湖、南部缓坡滨浅湖的带状分异。凹陷中心沉积环境以深湖—半深湖相为主,向南过渡至滨浅湖相。在深湖—半深湖背景中,来自涠西南低凸起的沉积物在洼槽带

西部快速堆积形成湖底扇沉积,同时,来自企西隆起的大量沉积物通过轴向水道搬运在东洼卸载形成 EW 向展布的湖底扇沉积;在南部缓坡带在滨浅湖沉积背景中,发育有辫状河三角洲沉积(图 9)。

4.4.2 沉积主控因素

海中凹陷流二段的沉积模式主要受到构造样式、古地貌及物源供给等因素的共同控制。

(1)构造样式 海中凹陷在流二段时期为一简单半地堑构造样式,北陡南缓,三号断裂为该时期的控盆主断层,即海中凹陷的北部边界,靠近断裂



(a) 地震相剖面; (b) 地震相素描剖面; (c) 沉积体系剖面

剖面位置见图 1-BB'

图 8 过 B1-B2-B5-A2 井井震标定-地震相-沉积体系对比剖面图

Fig.8 Multi-wall comparison in well-seismic calibration, seismic facies, and sedimentary facies of wells B1-B2-B5-A2

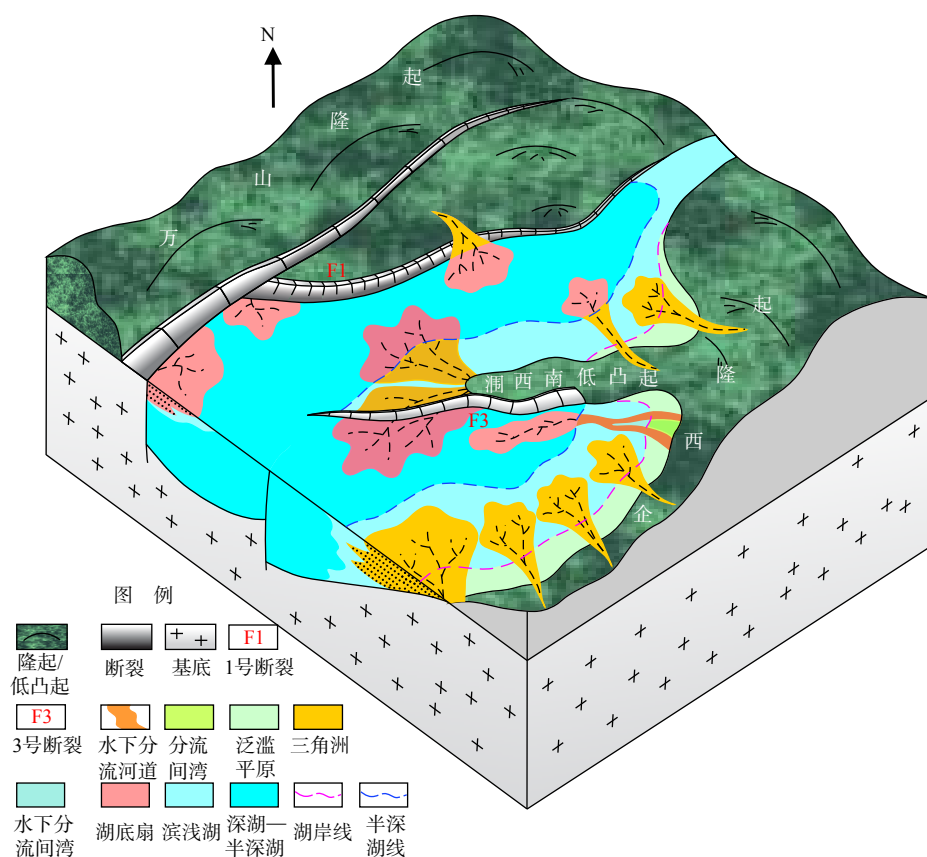


图9 流沙港组二段沉积模式

Fig.9 Depositional model of the Second Member of the Liushagang Formation

带地层快速沉降形成洼槽带,这一区域水体较深且沉积环境稳定,有利于深湖—半深湖相的发育。南部地形逐渐趋于平缓,水体变浅、水动力增强,沉积环境由稳定的深湖—半深湖相过渡至较为动荡的滨浅湖相,最终地层出露至水上环境,沉积体系由滨浅湖相过渡至三角洲前缘亚相。

(2) 古地貌与坡折带 通过对研究区古地貌的恢复,发现研究区南部发育向北倾斜的低角度坡折带,该坡折带控制着深湖—半深湖区与滨浅湖的界限。坡折带处地形由缓变陡,坡折带以南为构造高部位,主要为浅水环境,沉积体系以辫状河三角洲为主;坡折带以北位于构造低部位,往往发育深水环境中的湖底扇沉积(图7c)。

(3) 物源供给 海中凹陷主要潜在物源体系包括凹陷北部湘西南低凸起和企西隆起。该时期湘西南低凸起高构造部位区出露水面,接受较强风化剥蚀,沉积物向凹陷中心搬运,搬运距离短在洼槽带西侧深湖—半深湖环境中快速堆积形成湖底扇沉积;企西隆起在海中凹陷东部及南部均提供物源,在凹陷东部,物源供给较强,沉积物通过长距离搬运在洼槽带东侧形成了EW向展布的湖底扇沉积。在凹陷南部,沉积物在浅水区内形成规模较小的辫

状河三角洲沉积。

4.4.3 烃源岩及湖底扇发育位置探讨

海中凹陷流二段最好烃源岩主要发育在初始湖泛面层序位置(ts),厚度平均约60 m,而最大湖泛面层序位置(mfs)烃源岩发育次之,厚度平均仅10 m。断陷湖盆不同于常规的坳陷湖盆或海盆,好烃源岩往往发育在初始湖泛面层序位置,这是由于断陷湖盆经历了快速构造沉降时期,该时期构造沉降作为主控因素,而湖平面升降带来的影响较小;海中凹陷流二段湖底扇主要发育在湖泊扩张体系域(TST)中部,构造沉降仍作为主控因素,但具体机理问题有待进一步探讨(图6)。

5 结论

(1) 基于岩芯相、测井相与地震相综合分析,在海中凹陷流二段识别出4种沉积体系类型:深湖—半深湖、滨浅湖、湖底扇和辫状河三角洲。研究区沉积体系展布具有北部深湖、南部缓坡滨浅湖的带状分异。深湖—半深湖相、湖底扇发育于北部陡坡带及中部洼槽带,滨浅湖相及辫状河三角洲前缘发育于南部缓坡带。

(2)海中凹陷流二段最好烃源岩主要发育在初始湖泛面层序位置(TS),最大湖泛面层序位置(mfs)次之,湖底扇主要发育在湖泊扩张体系域(TST)中部,反映了在断陷湖盆背景下,构造沉降因素控制烃源岩发育程度强于湖平面变化因素。

(3)海中凹陷流二段的沉积模式受构造样式、古地貌坡折带及物源供给等因素共同控制,北陡南缓的半地堑样式控制了陡坡带及洼槽带发育深湖一半深湖,缓坡带发育滨浅湖,坡折带控制了深湖一半深湖与滨浅湖的界线;来自涠西南低凸起、企西隆起的两大物源供给在深湖一半深湖相背景中形成湖底扇,在南部浅水区形成辫状河三角洲。

参考文献:

- [1] 李凡昇,张厚和,李春荣,等.北部湾盆地海域油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):337-345.
- [2] 谢玉洪,高阳东.中国海油近期国内勘探进展与勘探方向[J].中国石油勘探,2020,25(1):20-30.
- [3] 李友川,王柯,兰蕾.北部湾盆地主要凹陷油气差异性及其控制因素[J].中国海上油气,2020,32(5):1-8.
- [4] 范蕊,李水福,何生,等.涠西南凹陷烃源岩地球化学特征及油源对比[J].石油实验地质,2014,36(2):238-244.
- [5] 杨希冰,金秋月,胡林,等.北部湾盆地涠西南凹陷原油成因类型及分布特征[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(3):51-60.
- [6] 傅宁.论4-甲基C₃₀甾烷丰度与烃源岩质量的关系:基于北部湾盆地勘探实践[J].中国海上油气,2018,30(5):11-20.
- [7] 颜世永,李月,吴智平,等.北部湾盆地海中凹陷与涠西南凹陷构造特征及成因机制[J].石油学报,2020,41(6):711-722.
- [8] 席敏红,张萍,沈传波,等.北部湾盆地北部坳陷古近纪原型结构分析[J].海洋石油,2014,34(2):13-19.
- [9] 李上卿,牛华伟,郑军,等.北部湾盆地涠西南凹陷与海中凹陷古近纪沉积关系探讨[J].海洋石油,2012,32(1):1-6.
- [10] 张强.北部湾盆地北部坳陷古近系构造、沉积特征及其耦合关系研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
- [11] 张强,吴智平,颜世永,等.北部湾盆地北部坳陷古近系构造发育特征及其对沉积的控制作用[J].高校地质学报,2018,24(6):787-799.
- [12] 胡爱玉.北部湾盆地海中凹陷地层特征地震识别研究[J].石油物探,2017,56(2):240-249.
- [13] 郑军,葛翔.北部湾盆地海中凹陷断层活动性及其对沉积的控制[J].海洋石油,2014,34(4):1-6.
- [14] 胡望水,吴婵,梁建设,等.北部湾盆地构造迁移特征及对油气成藏的影响[J].石油与天然气地质,2011,32(6):920-927.
- [15] 李友川,兰蕾,王柯,等.北部湾盆地流沙港组湖相烃源岩的差异[J].石油学报,2019,40(12):1451-1459.
- [16] 谢瑞永,黄保家,李旭红,等.北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组烃源岩生烃潜力评价[J].地质学刊,2014,38(4):670-675.
- [17] 傅宁,林青,王柯.北部湾盆地主要凹陷流沙港组二段主力烃源岩再评价[J].中国海上油气,2017,29(5):12-21.
- [18] 王修平,李倩,陈晶.北部湾盆地海中凹陷流体动力场特征及油气成藏意义[J].海洋石油,2017,37(3):1-6,28.
- [19] 孙建峰,须雪豪,席敏红.北部湾盆地海中凹陷油气成藏条件分析[J].海洋石油,2008,28(2):36-39.
- [20] 张萍,郑军,席敏红,等.北部湾盆地涠西南凹陷西南缘油气成藏条件及模式[J].石油实验地质,2015,37(2):157-163.
- [21] 李春荣,张功成,梁建设,等.北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用[J].石油学报,2012,33(2):195-203.
- [22] 卢林,汪企浩,黄建军.北部湾盆地涠西南和海中凹陷新生代局部构造演化史[J].海洋石油,2007,27(1):25-29,57.
- [23] 李才,杨希冰,范彩伟,等.北部湾盆地演化及局部构造成因机制研究[J].地质学报,2018,92(10):2028-2039.
- [24] 刘一鸣,吴智平,颜世永,等.中国近海裂陷盆地始新世构造变革的厘定及地质意义:以北部湾盆地涠西南凹陷为例[J].地球科学,2021,46(6):2145-2156.
- [25] 朱伟林,吴国瑄,黎明碧.南海北部陆架北部湾盆地古湖泊与烃源条件[J].海洋与湖泊,2004,35(1):8-14.
- [26] 赵志刚,吴景富,李春荣.北部湾盆地洼陷优选与油气分布[J].石油实验地质,2013,35(3):285-290,295.
- [27] 席敏红,余学兵,黄建军.涠西南凹陷(西部)古近系层序地层及沉积特征研究[J].海洋石油,2007,27(3):1-12.
- [28] 杨希冰.南海北部北部湾盆地油气藏形成条件[J].中国石油勘探,2016,21(4):85-92.
- [29] 张佰涛,唐金炎,王文军,等.北部湾盆地北部坳陷构造:沉积特征及其演化[J].海洋石油,2014,34(2):7-12.
- [30] 马云,李三忠,刘鑫,等.华南北部湾盆地的形成机制[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(6):1727-1736.
- [31] 孙晓猛,张旭庆,张功成,等.南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J].中国科学(地球科学),2014,44(6):1312-1323.

Sedimentary system and depositional model of the Second Member of the Liushagang Formation in Haizhong Sag in Beibuwan Basin

YAO Tianxing¹, QU Hongjun^{1*}, HUANG Suwei², FENG Congjun¹, WU Longfa¹, YAO Xingzong¹

(1 State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2 Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: The Weixinan Depression in the northern part of the Beibuwan Basin has achieved serial breakthroughs with high-yield oil and gas flows in many wells; the main source rock series is the Eocene Second Member of Liushagang Formation (the Liu 2 Member for short). However, there is no commercial oil and gas discovery in Haizhong Sag that is adjacent to the south of the Weixinan Depression. Not only deep and semi-deep lacustrine source rocks but also sub-lacustrine fan reservoirs were developed in the main source rock series of the Liu 2 Member. Therefore, it is of guiding significance for future exploration and development to study the development law of the sedimentary system on the potential hydrocarbon generation series (source rocks and sub-lacustrine fan reservoirs) in the Haizhong Depression. Based on the high-precision 3D seismic data and logging data, we discussed the development law of sedimentary system and established sedimentary model in the Liu 2 Member through comprehensive analysis on core facies, logging facies, seismic facies, and seismic attributes, and then established a depositional model. The results show that four types of sedimentary systems were developed in the Liu 2 Member, which are shore-shallow lake, deep and semi-deep lacustrine, sub-lacustrine fan, and braided river delta. Under the control of the half-graben structural pattern, which is steep in the north and gentle in the south, the deep and semi-deep lacustrine facies were developed in the northern steep slope zone and the sag zone, where sub-lacustrine fans were also developed at the western and eastern sub-sags with the provenances in the north and east directions. Also, the shore-shallow lacustrine facies and the braided river delta front facies were developed in the southern gentle slope shallow water zone. The good source rocks of the Liu 2 Member in the Haizhong Ssg were mainly developed at the first transgressive surface (TS), and the sub-lacustrine fan facies was mainly developed in the transgressive systems tract (TST), which reflects that the development degree of source rocks controlled by tectonic subsidence factor is stronger than that of lake-level change factor at the background of faulted lake basin. This study provided research ideas for establishing sequence position and symbiotic model between deep and semi-deep lacustrine source rocks and sub-lacustrine fan reservoirs in half-graben faulted lake basins.

Key words: Beibuwan Basin; Haizhong Sag; Second Member of the Liushagang Formation (Liu 2 Member); sedimentary system; depositional model