

# 河控—潮控三角洲体系地球物理

## 识别表征及其油气地质意义

——以东海陆架盆地西湖凹陷平北地区为例

杨彩虹,周兴海,金璨,李昆,周锋

中国石化上海海洋油气分公司,上海 200120

**摘要:**沉积环境研究是石油勘探和油气田开发的基础,前人利用岩心、测井、地震资料进行单一沉积相类型的特征、判别研究,而对于河—潮联控区域,河流作用与潮汐作用主体不明确的情况下,判别、区分河控—潮控三角洲的研究相对较少。基于潮汐与河流水体摆动频次的差异,结合自然伽马曲线与泥质含量的关系和河控—潮控三角洲前缘砂体形态、规模差异及水动力强弱对地震相的影响,提出了利用自然伽马测井曲线差值法( $\Delta GR$ )和地震相波长/波高比值法的地球物理方法,来综合判别、区分河控—潮控三角洲沉积体系,并以东海陆架盆地西湖凹陷平北地区平湖组沉积体系为例,指明该方法可有效判别河控—潮控三角洲沉积体系。针对该区水下低隆—宝云亭低凸起侧缘,可有效拾取相关参数,判识河控—潮控三角洲体系,落实沟道充填的潮道发育带及潜力目标,明确河控—潮控体系判别对岩性圈闭及有利油藏单元预测的指示意义。

**关键词:**地球物理表征;自然伽马测井曲线差值法;波长/波高比值;河控—潮控三角洲;西湖凹陷;东海陆架盆地

**中图分类号:**TE121.3

**文献标识码:**A

## Geophysical identification of river-tide controlled deltaic sedimentation and its implication for petroleum geology:

a case study of Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

YANG Caihong, ZHOU Xinghai, JIN Can, LI Kun, ZHOU Feng

SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China

**Abstract:** Understanding of sedimentary environment is the basis of oil exploration and development. Previous research on the characteristics and distinguishing of single sedimentary system by using logging curves and seismic data was mostly carried out on the determined sedimentary system. However, for the river-tide controlled cases, when the main bodies of fluvial and tidal actions are unclear, sedimentary systems are rarely studied. Based on the difference of the oscillation frequency of tide and river water bodies, combined with the correlation between the logging curves of gamma ray and the mud content as well as the influence on seismic facies by hydrodynamic strength and the difference of the size and scale of river-tide controlled delta, a geophysical method on the basis of natural gamma log difference ( $\Delta GR$ ) and seismic facies wave length/height ratio is proposed to distinguish river-tide controlled delta sedimentary systems. A case study was carried out with the sedimentary system of the Pinghu Formation in Pingbei area of the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin, and it was concluded that this method can effectively distinguish river-tide controlled delta system. At the side edge of the underwater low uplift, Baoyunting low uplift, relevant parameters have been effectively picked up to distinguish the river-tide controlled delta system, and to identify the tidal channel development zone and potential targets for channel filling. It is clear that the identification of river-tide controlled system has an indicative significance for the prediction of lithologic traps and favorable reservoir units.

**Key words:** geophysical characterization; natural gamma log difference; wave length/height ratio; river-tide controlled delta; Xihu Sag; East China Sea Shelf Basin

全球含油气盆地储集层主要为碎屑岩、碳酸盐岩,其次为火山岩和变质岩<sup>[1]</sup>。沉积环境对碎屑

岩的分布,特别是砂体平面分布规模、形态和走向等起着最基本的控制作用,从而控制原始储层质量

(孔隙度和渗透率)的分布,它是石油勘探和油气田开发的基础<sup>[2]</sup>。河控—潮控三角洲识别和刻画一直是石油地质学领域研究和探讨的热点议题,近年来孙尚哲<sup>[3]</sup>尝试利用测井曲线信息在辫状河、曲流河三角洲和湖泊相中进行沉积微相的识别;吴嘉鹏<sup>[4]</sup>利用地震振幅属性、测井曲线及岩心对潮汐砂脊进行识别和刻画,力求为储层多维度表征提供有利证据;李顺利等<sup>[5]</sup>通过岩相特征、沉积序列对西湖凹陷渐新世潮控三角洲沉积体系进行研究,以尝试对潮控三角洲的发育背景、过程和主控因素进行系统化分析;贾进华<sup>[6]</sup>通过岩心观察和钻井分析对塔中地区志留纪古海岸带碎屑潮汐环境进行了大量研究。然而,这些研究都是在沉积环境背景已知的情况下,利用岩心、测井和地震资料进行沉积体系的研究,而在海陆过渡区带,钻井资料较少,河流作用与潮汐作用主体不明确的情况下(如障壁岛内部区域),识别或区分三角洲沉积体系的研究相对较少,难度较大,还未有一套可借鉴的方法。因此,本文提出利用地球物理方法来识别表征河控—潮控三角洲沉积体系,归纳总结其原理、方法及流程,并以东海陆架盆地西湖凹陷平北地区为例进行了验证。

## 1 河控—潮控三角洲体系识别原理

### 1.1 地球物理判别原理

地球物理信息识别河控—潮控三角洲沉积体系,主要通过相敏感曲线(自然伽马曲线)以及地震相等关键信息进行实现。

自然伽马测井反映的是岩石中含天然放射性核素的含量。在沉积岩中,岩石的放射性强度随泥质含量的增加而增强(含放射性矿物的岩石除外)<sup>[3,5]</sup>。因此,通过自然伽马值来判断泥质含量被广泛应用于工业生产中。在以河流作用为主的三角洲沉积体系中,水体环境相对稳定,变换频次低,GR测井曲线上表现出低齿化程度;而以潮汐作用为主的三角洲沉积体系,水体环境频繁摆动变化,GR测井曲线上表现出高齿化程度。齿化程度与相邻GR值的差异大小有关,在此提出齿化度的概念。齿化度是GR曲线中相邻GR值的差值的表现形式,齿化度与 $\Delta GR$ 值的大小具有一一对应关系( $\Delta GR$ 为相邻GR值的标准差)。因此,将 $\Delta GR$ 值作为在河—潮交互区域量化表征河控与潮控三角洲沉积体系的参数值,能较好地反映沉积时期潮汐与河流作用的变化规律。

地震相是沉积区沉积过程和沉积体在地震上

的综合响应,能解释物源搬运强度和水体能量<sup>[7-10]</sup>。通过地震相可反映当时的沉积环境,典型的潮汐作用背景下的水动力作用通常较强,在这种高能且不稳定的背景下,三角洲沉积体尤其是潮汐砂脊等的连续性普遍较差<sup>[11]</sup>;而在河流作用占主体的情况下,潮汐水动力较弱,三角洲沉积体系连续性普遍较好,尤其是典型河控三角洲沉积中发育的席状砂等,具有很好的延展性<sup>[12]</sup>。古代和现代潮控三角洲和河控三角洲的研究已经证实,无论是潮汐三角洲发育的典型脊状不连续沉积体,或者是河控三角洲体系发育下的连续沉积体系,在纵向上都具有明确且典型的岩相组合特征,这种明确的岩相组合可被地震数据体所记录,具有明确的地震反射特征<sup>[13-16]</sup>。

对地震数据体相位特征的研究已经证实,对于砂脊和沙席等特殊岩性体,利用 $90^\circ$ 相位化的三维地震数据更能直观明确这些特殊岩性体的空间分布;而典型单一潮汐砂脊和席状砂的厚度大都小于4 m,多个砂脊和席状砂的组合厚度最大能达到约40 m,在深度3 000~5 000 m的古代沉积体系中(地震波速率接近4 000 m/s),地震主频介于5~50 Hz,能取得最好的识别效果<sup>[16-17]</sup>。基于此,在 $90^\circ$ 相位转换的前提下,利用地震主频域为31 Hz的高精度三维地震资料,结合测井沉积体系划分和拾取的钻井地震相标准,能很好地建立量化识别沉积体系的波长/波高指标,明确沉积体系在平面上的分布规律。在地震剖面上,波长( $L$ )/波高( $H$ )比值可反映潮汐作用还是河流作用占主体; $L/H$ 值越小,沉积体横截面规模越小,反映潮汐改造作用越强,属于潮汐控制作用背景,易形成脊状砂;而 $L/H$ 值越大,沉积体横截面规模越大,反映潮汐作用越小,属于河流控制作用背景,易形成席状砂(图1)。

### 1.2 地球物理判别方法

#### 1.2.1 关键参数拾取

(1)  $\Delta GR$ 值的获取。根据测井数据,去除无效

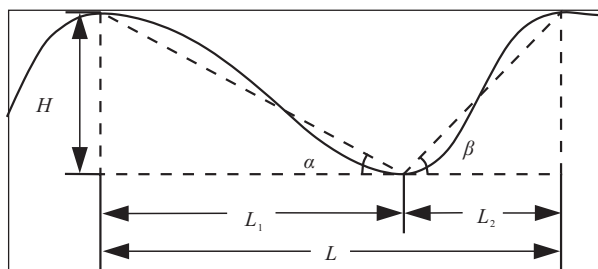


图1 典型潮汐砂脊体剖面<sup>[18-19]</sup>

图中 $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为砂脊右侧和左侧波瓣倾角; $L_1$ 、 $L_2$ 分别为砂脊右侧和左侧波瓣波长; $L$ 为砂脊波长; $H$ 为砂脊波高

Fig.1 Profile of typical tidal sand ridge

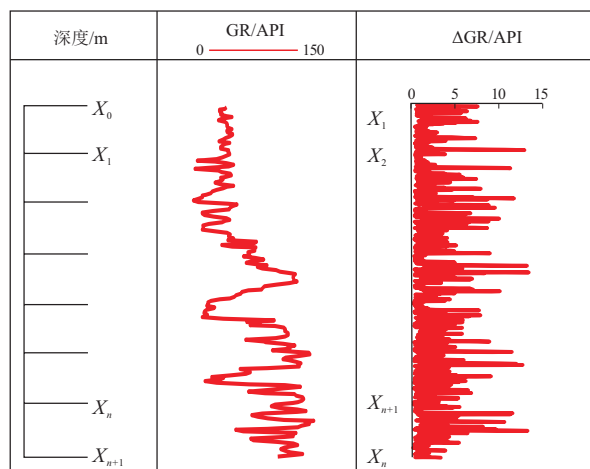


图2 ΔGR值参数获取流程

Fig.2 Workflow of acquisition of ΔGR value parameter

数据后得到目的层内各深度的GR值。ΔGR值为相邻的2个GR值的标准差。每口井进行处理时,选择上覆地层或下伏地层时须一致(相邻地层的深度差为0.125 m,为GR曲线提取的最小间距)。得到各深度后,对各层段ΔGR值的最大范围进行拾取。如图2所示, $X_0-X_{n+1}$ 深度段地层对应GR值分别为 $GR_1, GR_2 \dots GR_n$ ;深度段 $X_1-X_n$ 对应的ΔGR值为: $\Delta GR_1 = |GR_1 - GR_0|, \Delta GR_2 = |GR_2 - GR_1|, \dots, \Delta GR_n = |GR_n - GR_{n-1}|$ (或者 $\Delta GR_1 = |GR_1 - GR_2|, \Delta GR_2 = |GR_2 - GR_3|, \dots, \Delta GR_n = |GR_n - GR_{n+1}|$ )。

(2)波长/波高比值的获取。通过对典型地震相进行拾取,地震剖面上的 $H_0$ 和 $L_0$ 值可通过手工或软件进行拾取,由于比例尺不同,需进行相应转换。 $H_0$ 值通过纵向比例尺可转换为 $H_1$ ,根据该区域的时深关系可进行转化, $L_0$ 可通过横向比例尺关系转化为实际的波长 $L_1$ ,此时即可得到单一典型地震相的波长/波高值( $H/L_1$ )(图3)。通过统计单一区域、单一时期内不同典型地震相的波长/波高比值,取其平均值,即为该区域在这一时期内的波长/波高比值。

1.2.2 关键参数拟合及判别

基于拾取的ΔGR值,结合该钻井已有的岩性照片、砂泥岩组合等,对该目的层段沉积构造判断

沉积环境,分析、拟合河控—潮控三角洲沉积体系最大GR值范围,建立河控—潮控三角洲沉积体系ΔGR判别指标。

基于测井三角洲沉积体系划分和拾取的钻井地震相标准,拟合河控—潮控三角洲沉积体系波长/波高值范围,建立河控—潮控三角洲沉积体系波长/波高判别指标。

2 西湖凹陷平北地区表征刻画实例

2.1 区域地质概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地西北部(图4a),是目前东海陆架盆地中发现的主要含油气凹陷。西湖凹陷主要发育古近系始新统平湖组、渐新统花港组等含油气层段<sup>[20-23]</sup>。受太平洋板块俯冲影响以及菲律宾板块的挤入,导致东海陆架盆地发生多幕反转并发生弧后挤压,盆地整体上处于局限海沉积背景。平湖组沉积时期属于断拗转换时期,海水涌入导致盆地内以潮汐作用为主的三角洲较为发育,早期的局限海背景逐渐演变为晚期的开阔海背景,河流为主的河控三角洲也在盆地内大量发育。西湖凹陷平北地区处在这种海陆过渡区斜坡背景下,平湖组沉积时期整体处于海陆过渡、河潮联控的沉积背景,发育潮汐—河流三角洲沉积体系<sup>[24]</sup>。

西湖凹陷平北地区平湖组由老到新发育SQ1、SQ2、SQ3三套三级层序<sup>[25]</sup>,研究区由南向北可划分为A区、B区和C区,同时由陆向盆可划分为单斜带、第一坡折带和第二坡折带<sup>[26]</sup>(图4b-c)。如何在平北地区少井甚至无井区有效判别平湖组沉积时期该区沉积环境的演化过程,以及河控、潮控和河—潮联控沉积体系的演化规律,一直是一个难以解答的问题。基于此,本文综合利用钻井和地震资料,识别和刻画该区河控—潮控沉积体系。

2.2 基于ΔGR测井识别河控—潮控三角洲沉积体系

在西湖凹陷平北地区实例研究中,选取了该区钻遇平湖组的20口钻井(图4b)。其中6口为取心井,A-1、B-1和C-2井的取心层段用于获取河控—潮控三角洲沉积体系ΔGR判别指标参数,

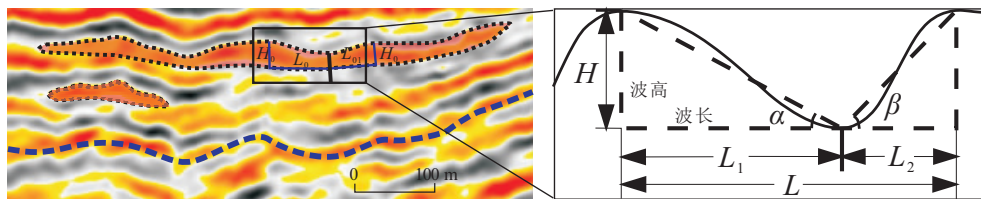


图3 典型孤立地震相波长/波高值获取

Fig.3 Acquisition of typical isolated wave length/height value of seismic facies



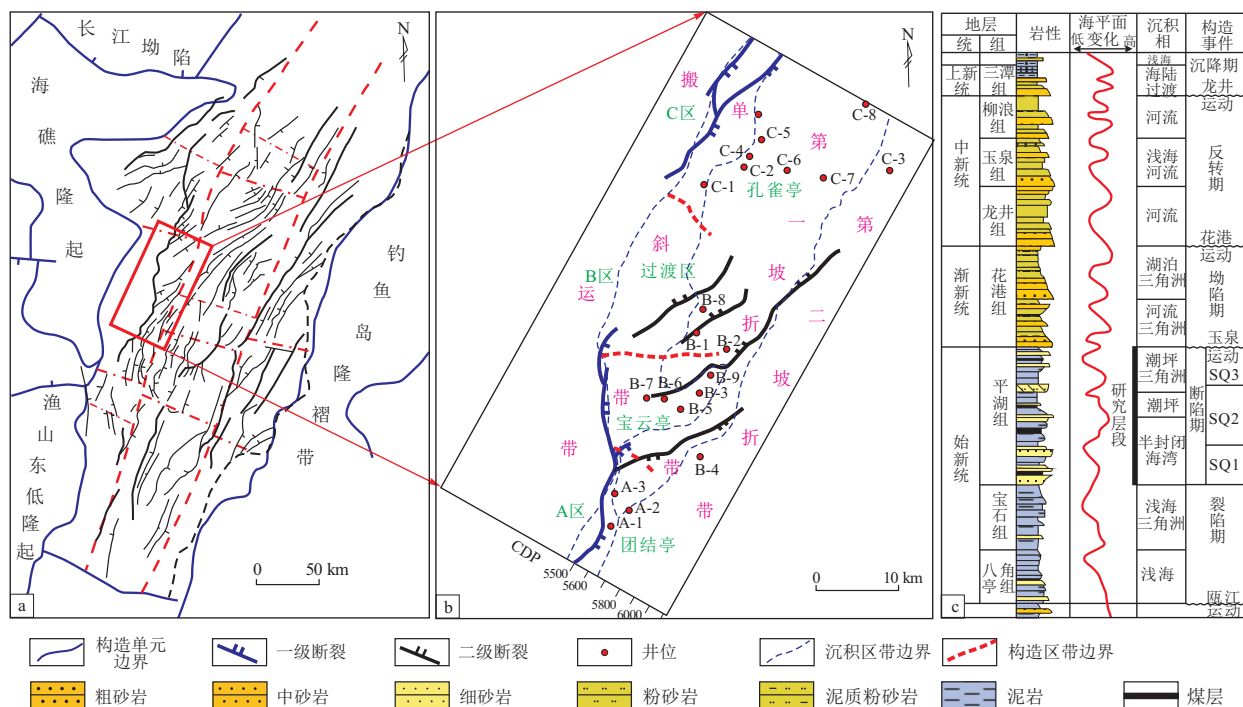


图 4 东海陆架盆地区域构造特征(a)、西湖凹陷平北地区断裂与井位分布(b)及新生代地层综合柱状图(c) 据文献[27]修改。

Fig.4 Features of regional tectonics of East China Sea Shelf Basin (a), fracture and well location in Pingbei area of Xihu Sag (b), and comprehensive histogram of Cenozoic strata (c)

B-2、B-3 和 C-1 井的取心层段用于  $\Delta GR$  判别指标参数验证;其他钻井的无取心层段进行范围拓展的判别应用。

2.2.1  $\Delta GR$  判别参数的获取

根据已有的钻井测井资料,通过测井曲线组合形态以及钻井岩心资料,在潮汐作用占主体的区域,拟合出潮控三角洲沉积体系的最大 GR 值范围;在河流作用占主体的区域,拟合出河控三角洲

沉积体系的最大 GR 值范围;而在判定的河流与潮汐作用共同影响的区域,拟合出过渡型沉积体系的最大 GR 值范围。

根据 A-1 井单井综合柱状图(图 5a)显示, SQ2 层序 GR 曲线形态以钟型为主,齿化程度高,岩性组合以厚层泥岩夹砂岩为主;GR 曲线的齿化程度高,表明了韵律型沉积,水动力条件呈间歇性变化。而根据 SQ2 层序岩心显示,主要发育脉状层

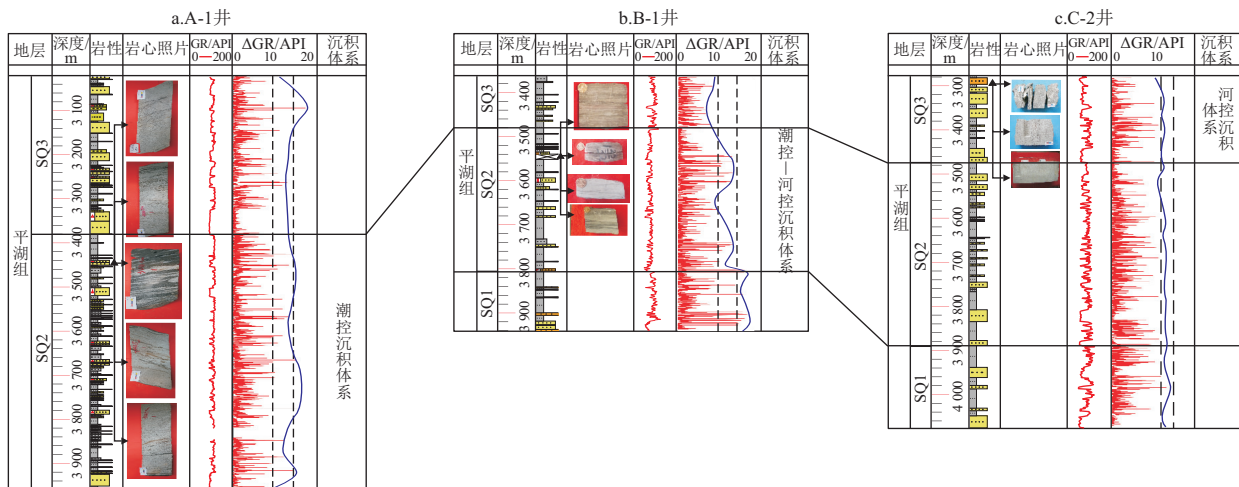


图 5 东海西湖凹陷平北地区取心层段河控—潮控三角洲沉积体系齿化程度连井对比 井位见图 4。

Fig.5 Correlation diagram of dentation degree of river-tide controlled delta system in coring section of Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

理和透镜状层理等沉积构造,含生物扰动构造,是典型的潮汐作用特征。对 A-1 井 SQ2 层序 GR 曲线进行处理得到  $\Delta GR$  曲线,其最大  $\Delta GR$  值为 15~20 API。

根据 B-1 井岩心综合柱状图(图 5b)显示, SQ2 层序 GR 曲线以微齿状为主,齿化程度中等,岩性为厚层泥岩夹薄层砂岩和煤层。B-1 井岩心所取层段属于 SQ2 层序,岩心内显示有青鱼骨刺层理构造、双黏土层和潮汐层理构造,表明此时的沉积环境受到潮汐水流的影响;岩心还显示发育板状和楔状交错层理及定向泥砾,表明此时的沉积环境受到河流的影响。因此, SQ2 层序时期该区处于河流和潮汐作用共同控制三角洲沉积的背景。对 B-1 井 SQ2 层序的 GR 曲线进行处理得到  $\Delta GR$  曲线,其最大  $\Delta GR$  值为 10~15 API。

根据 C-2 井岩心综合柱状图(图 5c)显示, SQ3 层序 GR 曲线形态以箱型为主,岩性组合底部为厚层砂岩,上部为厚层泥岩夹薄层砂岩, GR 曲线齿化程度整体较低,局部较高。C-2 井取心段处于 SQ3 层序,岩心显示发育槽状交错层理和攀升层理,含变形构造,是典型的河流作用特征。对 C-2 井 SQ3 层序的 GR 曲线进行处理得到  $\Delta GR$  曲线,其最大  $\Delta GR$  值为 5~10 PAI。

根据 A-1、B-1 和 C-2 钻井 GR 曲线形态、岩心表征,进行河控、潮控、河控—潮控联合控制三角洲沉积体系判别,通过对 GR 曲线进行处理得到  $\Delta GR$  曲线,即可对潮控、河控、河控—潮控三角洲沉积体系的边界进行量化识别。研究区平湖组三角洲沉积体系的判别指标参数为:潮控三角洲沉积体系最大  $\Delta GR$  值为  $\Delta GR > 15$  API;河控—潮控

联合控制型沉积体系最大  $\Delta GR$  值为  $10 \text{ API} < \Delta GR < 15 \text{ API}$ ;河控型三角洲沉积体系最大  $\Delta GR$  值为  $\Delta GR < 10 \text{ API}$ 。

### 2.2.2 $\Delta GR$ 判别标准验证

通过对其他井的 GR 曲线进行处理,应用量化识别标准(最大  $\Delta GR$  值范围)判断三角洲沉积体系类型,再通过该井的岩心测井分析得到的三角洲沉积体系类型进行检验。

对 B-3 井 SQ2 层序的 GR 曲线进行处理得到  $\Delta GR$  曲线, SQ2 层序最大  $\Delta GR$  值为 10~15 API,表明 SQ2 层序属于潮控—河控过渡型三角洲沉积体系。据 B-3 井单井综合柱状图显示(图 6a), SQ2 层序的 GR 曲线形态组合为箱型加齿形,齿化程度中等,岩性组合由早期的厚层泥岩夹砂岩、夹有少量煤层,过渡为晚期的砂岩与泥岩互层。根据 B-3 井 SQ2 层序岩心显示,具有板、楔状交错层理和双黏土层构造,弱冲刷面,潮汐层理构造,表明此时期河流和潮汐作用共同控制三角洲沉积的背景,这与测井曲线量化值( $\Delta GR$ )所识别的三角洲沉积体系类型一致。

对 B-2 井 SQ2 层序段内的 GR 曲线进行处理得到  $\Delta GR$  曲线, SQ2 层序的最大  $\Delta GR$  值为 15~25 API,表明该层段属于潮控三角洲沉积体系。据 B-2 井单井综合柱状图(图 6b)显示, SQ2 层序 GR 曲线组合形态底部以箱型为主,上部以微齿状为主,齿化程度较高, GR 曲线的齿化程度高,表明了韵律型沉积,水动力条件呈间歇性变化。根据 B-2 井 SQ2 层序岩心显示,具有透镜状层理,含生物扰动构造,是典型的潮汐作用特征,表明 B-2 井在 SQ2 层序时期属于潮控三角洲沉积体系。这与

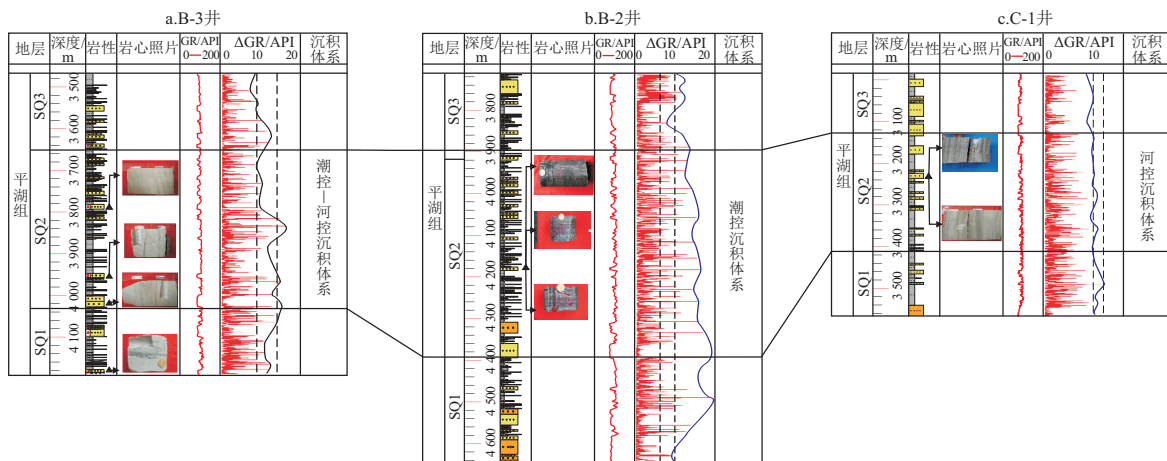


图 6 东海西湖凹陷平北地区取心段河控—潮控三角洲沉积体系齿化程度判别指标井位见图 4。

Fig.6 Identification index of dentation degree of river-tide controlled delta system in coring section of Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

测井曲线定量化值判断所得到的三角洲沉积体系类型一致。

对 C-1 井 SQ2 层序的 GR 曲线进行处理得到 ΔGR 曲线,其最大 ΔGR 值为 5~10 API,表明 C-1 井的 SQ2 层序属于河控三角洲沉积体系。根据 C-1 井单井综合柱状图显示(图 6c),SQ2 层序的 GR 曲线形态为下部漏斗型,上部钟型,齿化程度整体较低,局部较高,岩性为厚层泥岩夹砂岩,在 SQ2 层序内岩性下部多为薄层砂岩,而上部含有厚层砂岩。根据 C-1 井 SQ2 层序的岩心显示,具有平行层理、砂纹交错层理及爬升层理,表明 SQ2 层序时期该地区的沉积受到了河流作用的控制。这与测井曲线定量化值判断所得到的三角洲沉积体系类型一致。

通过与建立的河流、潮汐和河—潮联控背景下的沉积体系齿化度对比(表 1),指示定量化的 ΔGR 的最大值范围与河控、河控—潮控、潮控沉积体系具有一一对应关系,即 ΔGR<10 API 反映河控三角洲沉积体系,10 API<ΔGR<15 API 反映过渡型沉积体系,ΔGR>15 API 反映潮控三角洲沉积体系。因此可通过定量的 ΔGR 最大值范围来识别河控—潮控沉积体系。

2.2.3 无取心段沉积体系判别范围扩展

通过对研究区不同单井各层段 ΔGR 值最大值拾取(表 2),得到了相同区域从 SQ1 到 SQ3 时期潮汐作用逐渐减弱的分布规律,以及同一时期内从第二坡折带到斜坡带(由海到陆)潮汐作用逐渐减弱的分布规律。在此基础上,对研究区河控—潮控标志地震相进行拾取并统计相关参数,通过对相关参数分析,得到该区河控—潮控三角洲沉积体

系的分布规律。

2.3 基于地震相识别河控—潮控三角洲沉积体系

2.3.1 河控—潮控标志地震相拾取

根据钻井信息,得到研究区内从 SQ1 到 SQ3 时期潮控作用逐渐减弱的分布规律;地震相指示研究区由 SQ1 时期的潮控三角洲沉积体系转换为 SQ3 时期的河控三角洲沉积体系。通过 NE 向地震剖面(图 7)显示,SQ1 层序中同相轴呈底平顶凸样式的地震相分布较多,为潮控三角洲沉积体系下脊状砂对应的地震相显示;而 SQ3 层序中同相轴呈长轴连续反射席状样式的地震相分布较多,为河控三角洲沉积体系下席状砂对应的地震相显示。

2.3.2 河控—潮控标志地震相分布

第二坡折带主要发育孤立型砂体,因此在潮控作用占主体时以发育脊状砂为主,而在河控作用占主体时以发育席状砂为主。因此在地震剖面上通过地震相差异,可较好体现出潮控作用与河控作用的强弱关系。

通过第二坡折带部位 NE 向(垂向潮汐作用方向)剖面(图 8)显示,SQ1—SQ2—TST 时期的沉积体中,A 区发育较多地震同相轴为底平顶凸的孤立型脊状的地震相;B 区发育较多地震同相轴为底平顶凸的串珠型脊状的地震相;C 区发育较多地震同相轴为底平顶凸的连续型脊状的地震相。各区在此时期以发育脊状砂为主,表明均以潮汐作用控制占主体;但从 A 区到 C 区,孤立反射地震相连续性逐渐变好,表明从 A 区到 C 区的潮汐作用逐渐减弱。

SQ2—HST—SQ3 时期的沉积体中,A 区发育较多地震同相轴为底平顶凸的连续型脊状的地震

表 1 东海西湖凹陷平北地区取心井不同层段内的 ΔGR 最大值范围

Table 1 Maximum range of ΔGR in different intervals of each coring well in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

Table with 7 columns: 层序, A-1 井, B-1 井, B-2 井, B-3 井, C-1 井, C-2 井. Rows for SQ3, SQ2, SQ1.

表 2 东海西湖凹陷平北地区各井不同层段内的 ΔGR 最大值范围

Table 2 Maximum range of ΔGR in different intervals of each well in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

Table with 17 columns: 层序, 第二坡折带 (B-4井, C-3井), 第一坡折带 (A-1井 to B-9井), 单斜带 (C-1井, C-2井). Rows for SQ3, SQ2, SQ3.

API



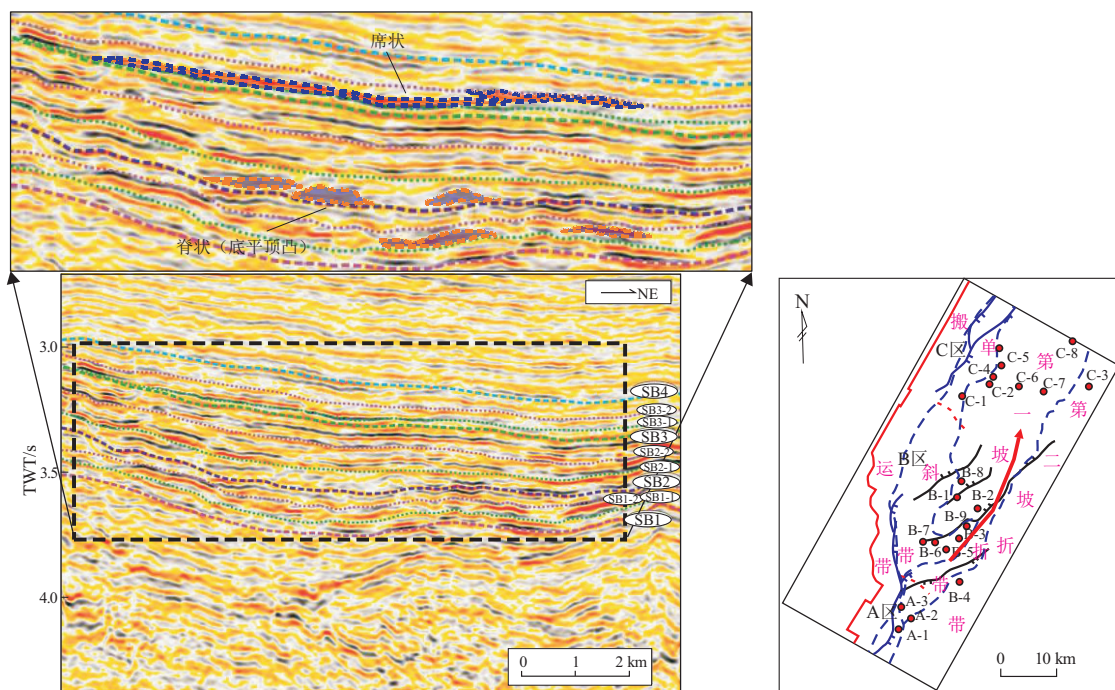


图 7 东海西湖凹陷平北地区河控—潮控沉积体系标志地震相

Fig.7 Seismic facies of river-tide controlled system in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

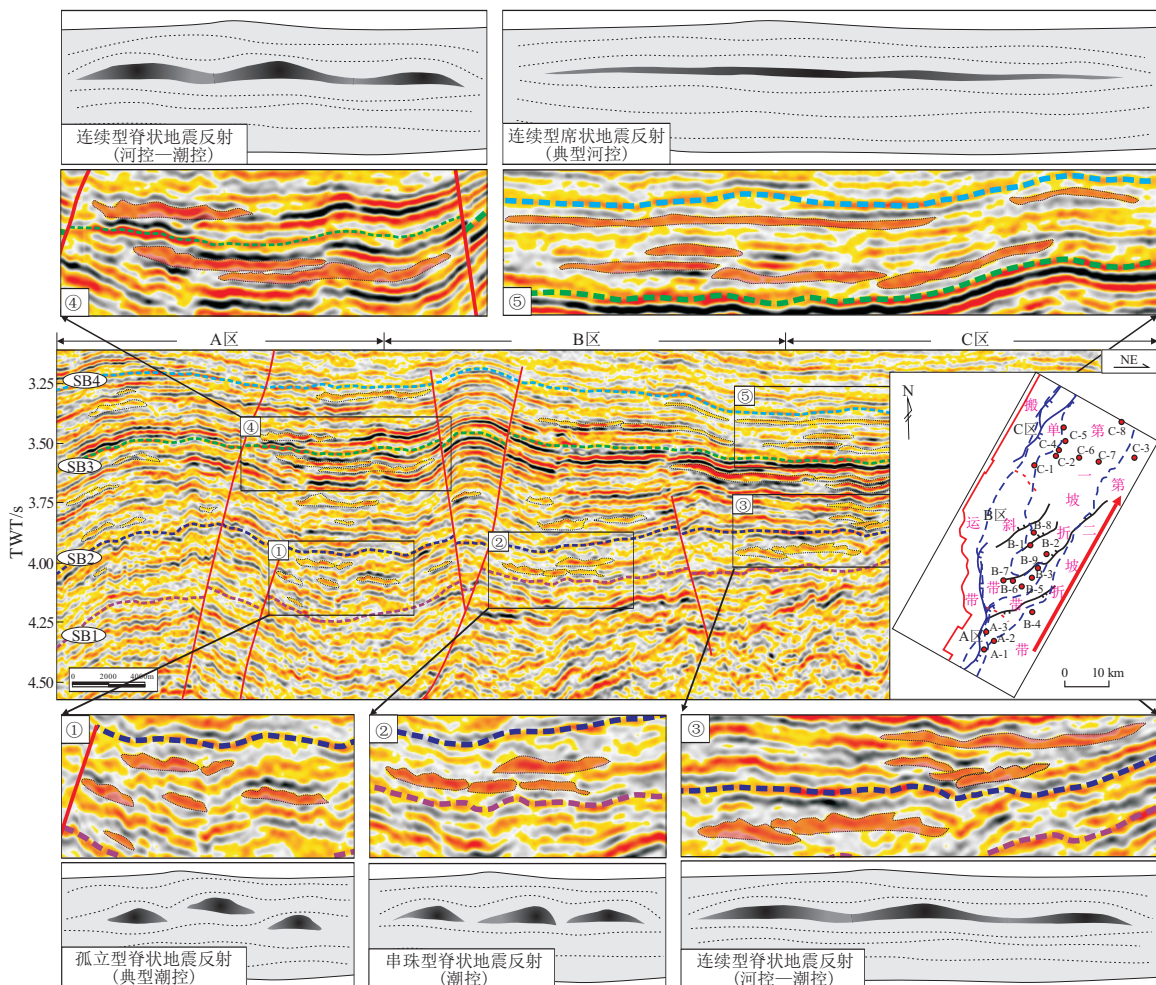


图 8 东海西湖凹陷平北地区第二坡折带孤立沉积体地震形态

Fig.8 Seismic morphology of isolated sediments in second slope fracture zone of Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

相, B 区和 C 区则发育较多地震同相轴为连续席状分布的地震相, 表明 B 区和 C 区已转变为河控三角洲沉积体系。A 区虽仍为潮控三角洲沉积体系, 但潮汐作用影响已明显减弱, 标志地震相由早期的孤立型转换为连续型。

### 2.3.3 沉积环境地震相定量标准

以 40 为间隔, 通过对 CDP 范围 5500~6060 的地震剖面不同时期典型地震相的波长、波高参数进行拾取, 得到不同区域不同时期的波长/波高平均值, 以此来重现潮汐和河流作用在平北地区的演化规律。A 区在早期为典型的潮控三角洲沉积体系, 典型地震相波长/波高值范围为 5~15; 晚期为河控—潮控过渡型沉积体系, 典型地震相波长/波高值范围为 15~20。B 区在早期为潮控三角洲沉积体系, 典型地震相波长/波高值范围为 10~20; 晚期为河控三角洲沉积体系, 典型地震相波长/波高值范围为 15~25。C 区在早期属于河控—潮控过渡型沉积体系, 典型地震相波长/波高值范围为 10~20; 晚期属于河控三角洲沉积体系, 典型地震相波长/波高值范围为 20~30(图 9)。

通过对系列剖面不同的典型地震相的波长/波高参数进行统计, 潮控三角洲沉积体系的标志地震相地震同相轴波长/波高比值小于 15; 河控—潮控

过渡型沉积体的标志地震相地震同相轴波长/波高比值为 15~20; 潮控三角洲沉积体系的标志地震相地震同相轴波长/波高比值大于 20。

## 3 油气地质启示及意义

近年平北斜坡带油气勘探主要围绕构造油气藏展开, 已发现的构造油气藏包括大断层下降盘滚动背斜型油气藏、古隆起背景上的断鼻油气藏、复杂断裂体系下的断块油气藏等类型<sup>[26]</sup>, 而岩性油气藏的勘探相对薄弱。

基于河控—潮控三角洲体系判别, 针对西湖凹陷西斜坡宝云亭隆起阻挡的隆洼相间的地貌格局解构可知, 早期(SQ1—SQ2)断裂为叠覆型改造转换样式, 沉积体呈 NEE 向条带状分布, 顺凸起侧缘发育顺凹槽物源方向的潮控三角洲沉积, 外缘发育系列指状改造的潮滩砂; 晚期(SQ3)宝云亭低隆地貌限定作用持续减弱, 发育中型河控三角洲和潮控三角洲体系, 垂向上河控三角洲体系范围逐渐增大, 靠近盆地中央侧潮控体系范围持续缩小。整体上, 宝云亭低凸起侧缘陆源碎屑供给充足, 砂质来源于西侧潮控三角洲前缘水下分流水道砂体, 受到潮汐等水流作用改造; 低凸起之上及其侧缘发育潮汐砂坝沉积微相, 其单层厚度较大, 粒度适中, 物性

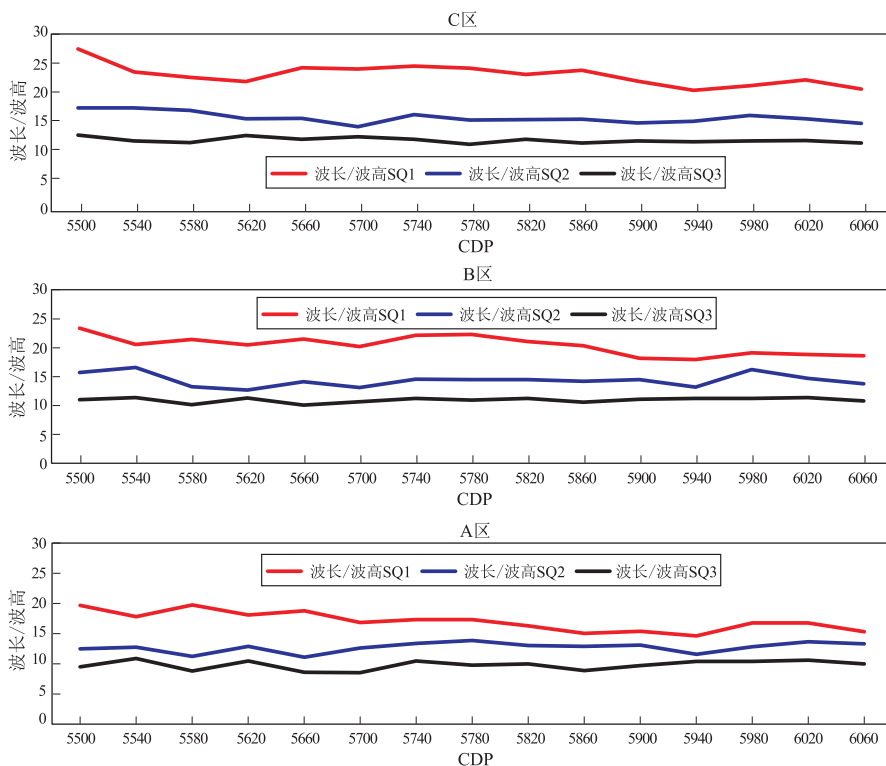


图 9 东海西湖凹陷平北地区第一、二坡折带潮控—河控三角洲沉积体系波长/波高参数拾取

Fig.9 Wave length/height parameters of tide-river controlled delta system in the first and second slope break zones in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin



较好,同时,受水下低隆起影响和潮汐作用改造,易于在古隆起之上及其周边形成岩性圈闭。此外,生烃层序(SQ2)烃源岩已经进入成熟和高成熟(埋深大于3 500 m)<sup>[26]</sup>,向低隆侧油气汇聚条件十分有利,可形成自生自储型油气藏。

在该分布规律指导下,平北斜坡带的岩性油气藏勘探取得了良好效果。其中,宁波19区处于宝云亭低隆与反向断阶调节控制的深洼区,内部地层呈双向超覆终止特征,结合钻探后井位岩性组合与含油气性测试分析,证实格架内岩性油气藏发育模式为典型的潮控至河控三角洲体系前缘改造砂坝或水道砂岩油气藏;所钻井单井油气储量丰度和单层产量均为平北区勘探最佳,储量丰度达到 $500 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。利用基于钻井和地震相结合的地球物理判别和刻画河控—潮控三角洲沉积体系及其空间分布,为有利砂岩油气藏的勘探提供了可靠的证据支撑。该方法也能广泛应用于具有类似沉积背景的陆架边缘三角洲的石油地质勘探之中。

## 4 结论

(1)基于自然伽马测井曲线齿化程度的标定、验证以及范围扩展,为判别河控—潮控三角洲不同主控因素的沉积环境提供了量化判别指标。在实例研究中,最大 $\Delta GR < 10$  API整体上反映了河控作用为主的三角洲沉积环境,而最大 $\Delta GR$ 为10~15 API整体上反映了河控和潮控作用同时共存的过渡型沉积环境,最大 $\Delta GR > 15$  API则整体上反映了潮控作用为主的三角洲沉积环境。

(2)在90°相位标定的基础上,利用典型孤立沉积体在地震相的差异,建立了一套不同沉积环境背景下的地震相判别标准。其中,潮汐作用为主的背景下,主要发育典型的底平顶凸的孤立地震相;河控作用为主的背景下,以连续席状孤立地震相为主;河流作用和潮汐作用都较为显著的背景下,主要以连续脊状等中间形态地震相出现,指示潮汐和河流共存的沉积环境。

(3)东海西湖凹陷平北地区的实例应用显示,在宝云亭低隆起限定下,西侧河流供给的沉积物受到了潮汐作用的改造影响,同时由于低隆起地貌的限定作用,在潮汐—河流共同控制下易发育多套厚层砂泥岩组合,其粒度适中,物性较好,在实际勘探中被充分验证。该方法为河控—潮控沉积体系的有利储层勘探提供了可靠证据支撑,也可为其他类似沉积背景下的油气勘探提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 孙龙德,方朝亮,李峰,等.中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展[J].石油勘探与开发,2010,37(4):385-396. SUN Longde, FANG Chaoliang, LI Feng, et al. Petroleum exploration and development practices of sedimentary basins in China and research progress of sedimentology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 385-396.
- [2] BRENCHLEY P J, WILLIAMS B P J. Sedimentology: recent developments and applied aspects[M]. Oxford: Blackwells Scientific, 1985: 249-280.
- [3] 孙尚哲.测井曲线在木里煤田聚乎更矿区沉积环境分析中的应用[J].西部探矿工程,2014,26(9):129-133. SUN Shangzhe. Application of log curves in studying sedimentary environment of Muli Coal Field's Jyhugeng diggings[J]. West-China Exploration Engineering, 2014, 26(9): 129-133.
- [4] 吴嘉鹏.西湖凹陷平湖组潮汐砂脊的发现及意义[J].沉积学报,2016,34(5):924-929. WU Jiapeng. Discovery of tidal sand ridges and its significance of Pinghu Formation in Xihu Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(5): 924-929.
- [5] 李顺利,许磊,于兴河,等.东海陆架盆地西湖凹陷渐新世海侵作用与潮控体系沉积特征[J].古地理学报,2018,20(6):1023-1032. LI Shunli, XU Lei, YU Xinghe, et al. Marine transgressions and characteristics of tide-dominated sedimentary systems in the Oligocene, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(6): 1023-1032.
- [6] 贾进华.古海岸带碎屑潮汐环境沉积微相与砂体分布:以塔中地区志留系为例[J].中国矿业大学学报,2019,48(1):110-123. JIA Jinhua. Sedimentary microfacies and sandbody distribution in the clastic tidal environment of the ancient coastal zone: a case study of Silurian in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 110-123.
- [7] NANSON R A, VAKARELOV B K, AINSWORTH R B, et al. Evolution of a Holocene, mixed-process, forced regressive shoreline: the Mitchell River delta, Queensland, Australia[J]. Marine Geology, 2013, 339: 22-43.
- [8] 赵谦,周江羽,张莉,等.利用地震波形—振幅响应技术预测海相碎屑岩岩性组合:以北康盆地为例[J].石油地球物理勘探,2017,52(6):1280-1289. ZHAO Qian, ZHOU Jiangyu, ZHANG Li, et al. Prediction of marine clastic rocks assemblage with seismic waveform and amplitude responses: an example in Beikang Basin, South China Sea[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(6): 1280-1289.
- [9] 关旭同,李胜利,马水平,等.湖盆小型细粒浅水三角洲沉积模式[J].特种油气藏,2021,28(1):77-85. GUAN Xutong, LI Shengli, MA Shuiping, et al. Sedimentary model of lacustrine small fine-grained shallow water delta[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 77-85.
- [10] 严皓,李宾,谷志猛,等.渤海J气田湖底扇储层精细刻画[J].断块油气田,2020,27(3):299-303.

- YAN Hao, LI Bin, GU Zhimeng, et al. Fine reservoir description of sublacustrine fan in Bohai J gas field [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(3): 299-303.
- [11] 张兵, 王绪本, 周刚, 等. 大川中地区须家河组二、四段地震相与沉积相研究 [J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(3): 13-21.  
ZHANG Bing, WANG Xuben, ZHOU Gang, et al. Study of seismic and sedimentary facies of the 2nd and 4th members of the Xujiahe Formation in the Great Central Sichuan [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(3): 13-21.
- [12] 孔令辉, 凌涛, 叶青, 等. 地震相分析在沉积相研究中的应用 [J]. *复杂油气藏*, 2019, 12(2): 36-40.  
KONG Linghui, LING Tao, YE Qing, et al. Application of seismic facies analysis in sedimentary facies research [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2019, 12(2): 36-40.
- [13] 张晶玉, 范廷恩, 王海峰, 等. 海相薄砂岩储层精细描述及地震沉积学认识 [J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(5): 680-687.  
ZHANG Jingyu, FAN Tingen, WANG Haifeng, et al. Marine thin sandstone reservoir prediction method and seismic sedimentology study [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(5): 680-687.
- [14] 李令喜, 苏云, 唐娟, 等. 东濮凹陷西南洼沙二下砂泥岩薄互层地震描述技术 [J]. *断块油气田*, 2021, 28(4): 493-497.  
LI Lingxi, SU Yun, TANG Juan, et al. The technique of seismic description for Es<sup>2</sup>x sand-shale interbedded layers in the Southwest Depression of Dongpu Sag [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(4): 493-497.
- [15] 刘建伟. 济阳坳陷东营凹陷北带砂砾岩扇体沉积相井震联合地震精细描述 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(1): 18-25.  
LIU Jianwei. Accurate description by well-to-seismic integration of glutenite fan sedimentation in the northern Dongying Sag, Jiyang Sub-basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(1): 18-25.
- [16] WOOD L J. Predicting tidal sand reservoir architecture using data from modern and ancient depositional systems [C]// *Integration of outcrop and modern analogs in reservoir modeling: AAPG memoir 80*. Tulsa: AAPG, 2004: 45-66.
- [17] ZHAO Qian, ZHU Hongtao, ZHOU Xinhui, et al. Tidal sand ridges seismic identification and its application in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin: enlightenment to hydrocarbon exploration [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 212: 110246.
- [18] 蒯爱军, 胡毅, 林桂兰, 等. 海底沙波研究进展与展望 [J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(3): 1366-1377.  
LIAN Aijun, HU Yi, LIN Guilun, et al. Progress and perspective of submarine sand waves researches [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(3): 1366-1377.
- [19] ASHLEY G M. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem—SEPM bedforms and bedding structures [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1990, 60(1): 160-172.
- [20] 周荔青, 江东辉, 张尚虎, 等. 东海西湖凹陷大中型油气田形成条件及勘探方向 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 803-812.
- ZHOU Liqing, JIANG Donghui, ZHANG Shanghu, et al. Formation conditions and exploration direction of large and medium oil and gas reservoirs in Xihu Sag, East China Sea [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 803-812.
- [21] 徐陈杰, 叶加仁, 刘金水, 等. 东海西湖凹陷平湖组Ⅲ型干酪根暗色泥岩生排烃模拟 [J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 359-366.  
XU Chenjie, YE Jiaren, LIU Jinshui, et al. Simulation of hydrocarbon generation and expulsion for the dark mudstone with Type-III kerogen in the Pinghu Formation of Xihu Sag in East China Sea Shelf Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 359-366.
- [22] 张武, 蒋一鸣, 肖晓光, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷中北部花港组储层致密化过程分析 [J]. *石油实验地质*, 2021, 43(1): 86-95.  
ZHANG Wu, JIANG Yiming, XIAO Xiaoguang, et al. Densification process of Huagang Formation in northern and central Xihu Sag of East China Sea Shelf Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(1): 86-95.
- [23] 王健伟, 吕鹏, 曾联波, 等. 西湖凹陷 X 气藏花港组 H3 段储层特征及影响因素 [J]. *断块油气田*, 2020, 27(1): 22-27.  
WANG Jianwei, LÜ Peng, ZENG Lianbo, et al. Characteristics and influencing factors of reservoir in H3 section of Huagang Formation, X gas reservoir, Xihu Sag [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(1): 22-27.
- [24] 于兴河, 李顺利, 曹冰, 等. 西湖凹陷渐新世层序地层格架与沉积充填响应 [J]. *沉积学报*, 2017, 35(2): 299-314.  
YU Xinghe, LI Shunli, CAO Bing, et al. Oligocene sequence framework and depositional response in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(2): 299-314.
- [25] 张建培, 徐发, 钟韬, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组层序地层模式及沉积演化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1): 35-41.  
ZHANG Jianpei, XU Fa, ZHONG Tao, et al. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huagang Formations in Xihu Trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(1): 35-41.
- [26] 周心怀, 高顺莉, 高伟中, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(2): 153-164.  
ZHOU Xinhui, GAO Shunli, GAO Weizhong, et al. Formation and distribution of marine-continental transitional lithologic reservoirs in Pingbei Slope Belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(2): 153-164.
- [27] 蔡华, 秦兰芝, 刘英辉. 西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源—汇系统差异性及其耦合模式 [J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 880-897.  
CAI Hua, QIN Lanzhi, LIU Yinghui. Differentiation and coupling model of source-to-sink systems with transitional facies in Pingbei Slope of Xihu Sag [J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 880-897.