



· 地球科学 ·

高频层序划分揭示断陷深湖层系源储共生发育规律 ——以北部湾盆地海中凹陷始新统流沙港组二段为例

江东辉

(中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司,上海 200120)

摘要 以北部湾盆地海中凹陷始新统流沙港组二段断陷湖盆深湖沉积体系为例,以高分辨率层序地层学理论为指导,利用最大熵谱分析与小波变换分析技术对流二段进行高频层序划分,在对沉积体系发育规律分析的基础上,通过流二段各五级层序深湖相烃源岩及湖底扇重力流相砂岩发育规律的分析,探讨断陷湖盆深湖层系源储共生的发育规律。研究认为:INPEFA 频谱分析与小波变换分析技术可有效地运用于断陷湖盆深湖层系高频层序划分;北部湾盆地海中凹陷深湖层系流沙港组二段可划分为1个三级层序、2个四级层序、5个五级层序,其中2个四级层序以最大湖泛面为界分为湖泊扩张体系域(TST)与湖泊收缩体系域(HST);断陷湖盆优质厚层烃源岩往往发育于湖泊扩张体系域四级层序下部初始湖泛面(T_s)的五级层序内,虽然湖泊扩张体系域四级层序顶部最大湖泛面(Mfs)上下紧邻的五级层序发育的烃源岩面积大,但厚度小,为次要烃源岩及良好的盖层;湖泊扩张体系域四级层序中部的五级层序往往发育湖底扇重力流相储层,其夹持发育于初始湖泛面及最大湖泛面附近的两套烃源岩之间,可共同组成良好的“三明治”式生储盖组合,该套“三明治”式生储盖组合应是下一步非常规油气勘探的重要区域。

关键词 高频层序;深湖层系;源储共生规律;北部湾盆地;海中凹陷;流沙港组二段

中图分类号:TE121 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbr.2024-03-016

High-frequency sequence division reveals the intergrowth development regularity between source rocks and reservoirs of deep lake facies strata in the faulted depression: Taking the Eocene Liushagang 2 interval in Haizhong Depression, Beibuwan Basin as an example

JIANG Donghui

(Sinopec Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract Taking the deep lake sedimentary system of the Eocene Liushagang 2 interval in the Haizhong Depression, Beibuwan faulted lacustrine basin as an example, guided by the theory of high-resolution sequence stratigraphy, the high-frequency sequence division of the Liushagang 2 interval was carried out by means of the utilization of the maximum entropy spectrum analysis and wavelet transform analysis techniques; further, the source-reservoir intergrowth regularity of the deep lake strata in the faulted lacustrine basin was discussed, on

收稿日期:2024-02-26

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41390451)

第一作者:江东辉,男,博士,高级工程师,从事海洋石油地质和区域地质研究,jiangdonghui.shhy@sinopec.com。

basis of the analysis of the development rules of sedimentary system, and also the analysis of the development regularity of deep lake facies source rocks and sublacustrine fan gravity flow sandstones in the high-frequency grade-5 sequence of the Liu 2 interval. The research suggests: INPEFA spectrum analysis and wavelet transform analysis technology can be effectively applied to the high-frequency sequence division in deep lake facies strata in the faulted lake basin; the Liu 2 interval in Haizhong depression of Beibuwan Basin can be divided into one grade-3 sequence, two grade-4 sequences and five grade-5 sequences, with the grade-4 sequence being divided into two system tracts of the lake expansional system tract (TST) and the lake contraction system tract (HST), which are interfaced by the maximum flooding lake surfurce (Mfs); High-quality thick source rocks in faulted lacustrine basins were often developed in the initial grade-5 sequence at the first lake flooding surface in the lower part of the lake expansional system tract of grade-4 sequence. Although the source rocks developed in the two grade-5 sequences closely under or over the maximum lake flooding surface at the top of the lake expansional system tract of grade-4 sequence are large in areal extent, but thin in thickness, which can thus be served as the secondary source rocks and most well cap rocks. The grade-5 sequence at the middle part of the grade-4 sequence in the lake expansion system tract often developed sublacustrine fan gravity flow facies reservoirs, which are sandwiched between the two sets of source rocks nearing the initial lake flooding surface and the maximum lake flooding surface, while all these together could form a good sandwich type source-reservoir-cap assemblage, which should be a follow-up field of unconventional oil and gas prospection.

Keywords high-frequency sequence; deep lake sedimentary system; source-reservoir intergrowth regularity; Beibuwan Basin; Haizhong Depression; Liu 2 Interval

断陷湖盆的演化往往经历断陷期、断坳期、坳陷期 3 个构造阶段^[1],断陷期又可以分为初始断陷期和强烈断陷期。在强烈断陷期,湖盆往往发育有深湖沉积层系,包括深湖一半深湖相泥页岩及湖底扇重力流砂岩,深湖一半深湖相泥页岩往往可以成为良好的烃源岩,湖底扇重力流砂岩往往可以成为良好的储集层;学者们对二者的发育规律已分别做过大量研究^[2-5],但针对二者源储共生的发育规律却鲜有研究或者认识不清。北部湾盆地海中凹陷始新统流沙港组二段发育有典型的断陷湖盆深湖沉积体系,深湖一半深湖相泥页岩及湖底扇重力流砂岩发育良好^[6],是研究断陷湖盆深湖层系源储共生发育规律的良好载体。

利用高分辨率层序地层学进行高频层序划分,解剖分析烃源岩及湖底扇储层在高频层序中的发育位置和规律,可提供断陷深湖层系源储共生规律分析的钥匙。Cross 等在经典层序地层学的基础上提出高分辨率层序地层学后^[7],被广泛运用于陆相湖盆高频层序划分;学者们通过基准面升降变化与沉积动力学,将旋回划分为 6 个旋回级次,能够更好地满足源储共生规律的精细分析^[8-9];而小波变换、INPEFA 技术及频谱分析等技术方法被广泛运用于高频层序定量分析

中^[10-12]。前人对北部湾盆地的构造、沉积、成藏做了大量的研究;在沉积方面研究认为,流沙港组二段为强烈断陷期的沉积充填,主要发育深湖一半深湖、湖底扇及滨浅湖沉积体系^[13];在层序地层划分方面,前人也有不少研究^[14-16],但层序地层划分多是针对渐新统涠洲组^[17-18],针对始新世流沙港组层序划分研究比较少,只将始新世流沙港组划分为 3 个三级层序和 6 个四级层序^[19],而缺乏五级、六级高频层序划分,也缺乏高频层序内源储共生规律的深化研究。

本研究以高分辨率层序地层学为指导,利用最大熵谱分析与小波变换分析技术对北部湾盆地海中凹陷流沙港组二段进行高频层序划分,在对流二段沉积体系发育规律分析的基础上,通过对流二段各五级层序深湖一半深湖相烃源岩及湖底扇重力流砂岩发育规律的分析,探讨断陷湖盆深湖层系源储共生的发育规律。

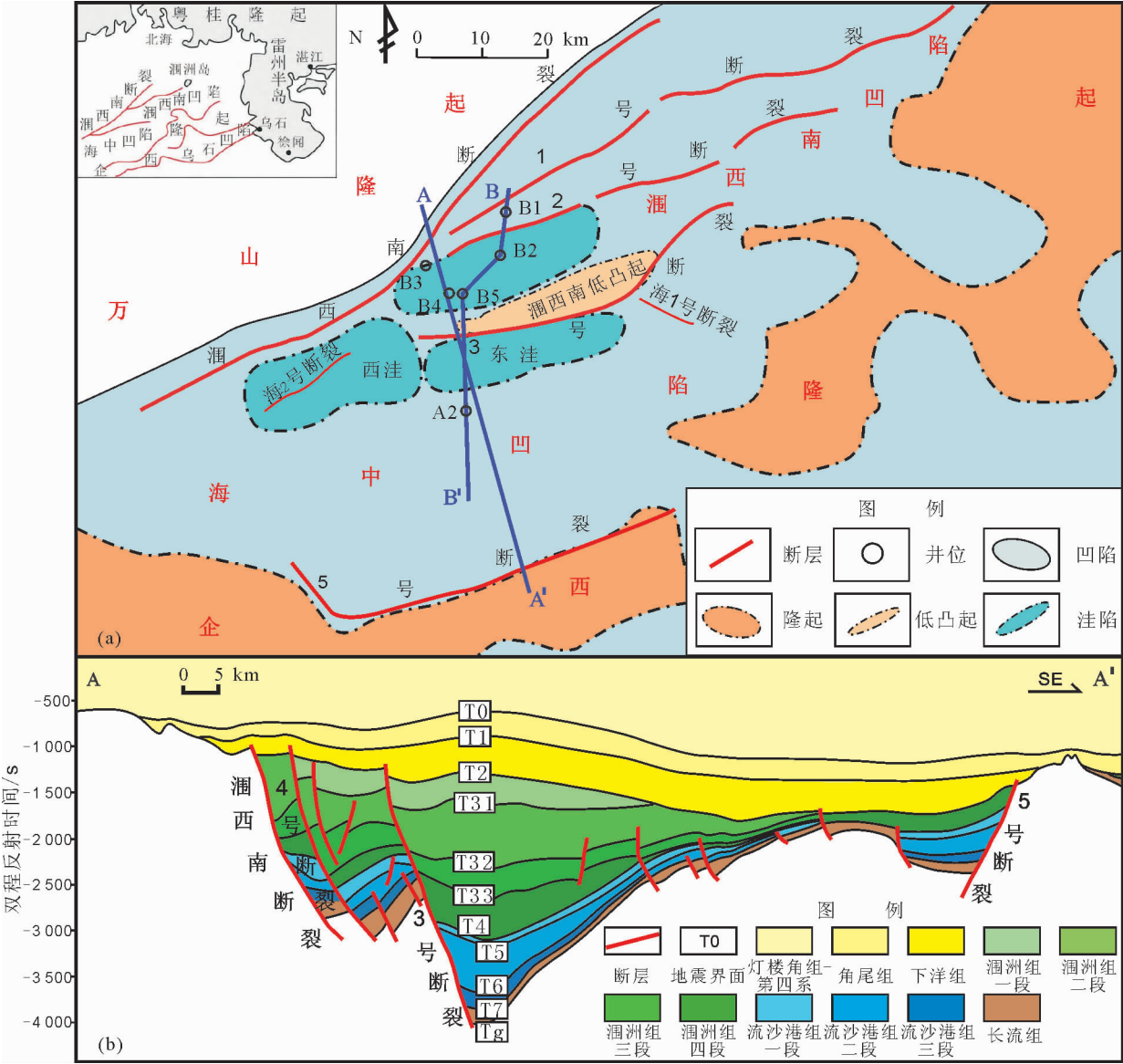
1 区域地质概况

1.1 构造位置及构造单元划分

北部湾盆地是南海最北部的一个古近纪 NEE 向展布的陆内裂谷盆地^[20],平面上,北部湾

盆地可划分为北部坳陷、企西隆起和南部坳陷 3 个二级构造单元^[21-22];北部坳陷位于北部湾盆地西北部,自北向南进一步划分为涠西南凹陷、涠西

南低凸起、海中凹陷等三级构造单元〔见图 1 (a)〕,形成“凹-凸-凹”的构造格局^[23]。



(a) 北部湾盆地北部坳陷构造单元划分;(b) 北部湾盆地北部坳陷剖面结构
图 1 北部湾盆地北部坳陷构造单元划分及剖面结构(据文献[24]修改)

Fig. 1 Tectonic units division and structural section of the Northern subsidence of the Beibuwan Basin

海中凹陷是北部湾盆地勘探程度较低的凹陷之一,其位于北部湾盆地北部坳陷西南部,为一北断南超的箕状凹陷,总体上表现为一个近东西向展布的简单半地堑盆地;从南北向剖面看,海中凹陷整体呈双层结构〔见图 1(b)〕,下部古近系呈半地堑结构,上部新近系呈坳陷结构^[25]。本次研究区包括传统认为属于涠西南凹陷的 D 次洼。

1.2 地层、沉积及构造演化特征

海中凹陷古近系自下而上发育古新统长流组、始新统流沙港组、渐新统涠洲组,其下覆地层

为前寒武系基底或者为古生界碳酸盐岩,上伏新近系中新统下洋组。古新统长流组为初始断陷期沉积,始新统流沙港组为强烈断陷期沉积,渐新统涠洲组为断坳期沉积(见图 2)。

古新统长流组主要为一套陆相冲积扇棕色砂砾岩沉积,始新统流沙港组主要为一套深湖-半深湖-三角洲碎屑沉积,渐新统涠洲组主要为一套滨浅湖-辫状河三角洲-河流碎屑沉积,中新统下洋组为一套滨浅海相砂砾岩沉积^[26]。始新统流沙港组可分为 3 段,流沙港组三段主要发育扇三

角洲-滨浅湖碎屑沉积,流沙港组二段主要发育深湖—半深湖泥页岩及湖底扇碎屑沉积,流沙港组一段主要发育滨浅湖-三角洲碎屑沉积;始新统流沙港组二段发育有良好的优质泥页岩烃源岩,渐

新统涇洲组发育有良好的优质砂岩储层,同时,始新统流沙港组二段也发育有潜在的湖底扇砂岩储层^[27]。

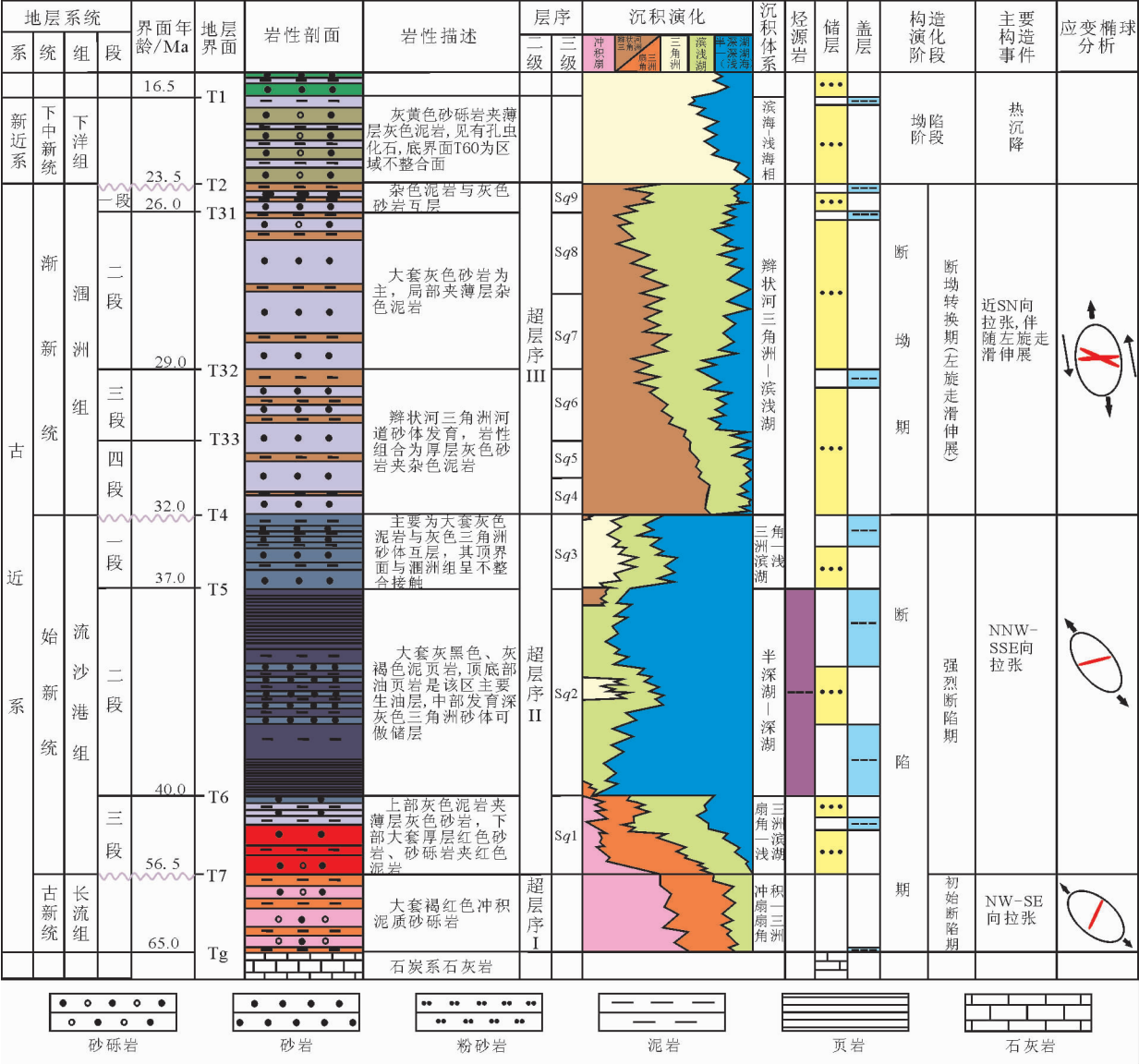


图 2 北部湾盆地海中凹陷综合柱状图(据文献[28]修改)

Fig. 2 Comprehensive column map of the Haizhong Depression, the Beibuwan Basin

2 海中凹陷始新统流二段高频层序划分

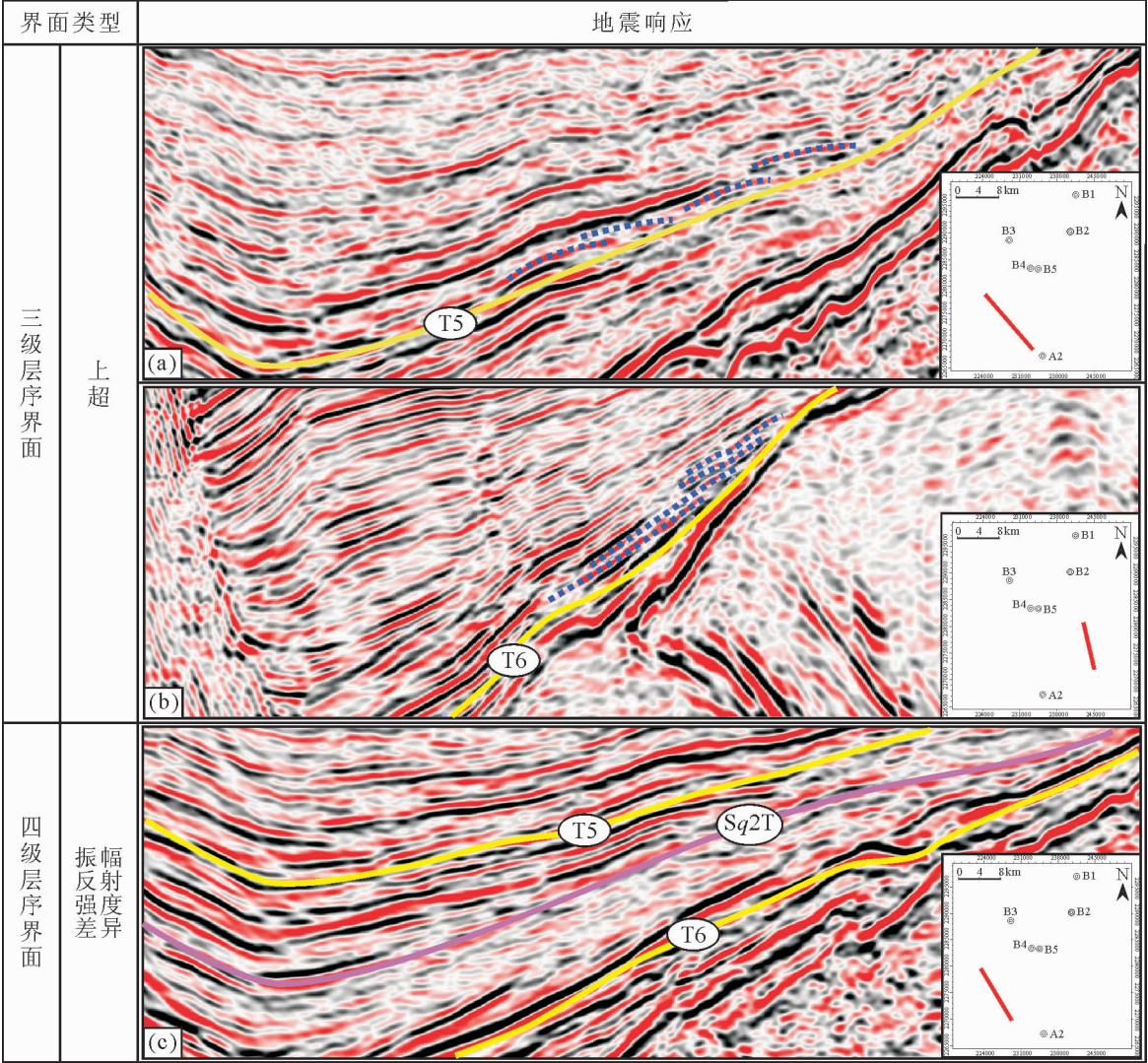
海中凹陷始新统流沙港组顶底为构造活动造成的不整合接触界面,因此为一个二级层序界面,其自下而上被划分为 3 个三级层序,分别是流三段(Sq1)、流二段(Sq2)和流一段(Sq3)^[19]。本次研究针对流二段三级层序进行高频层序划分。

2.1 流二段三级、四级地震层序界面特征

流二段三级层序界面和四级层序界面上下存在明显的岩性转变特征,在地震上有明显的响应特征。在流二段顶底界面,上下地层为整合接触,界面之上存在典型的连续上超地震反射特征。流二段上界面 T5 上下的地震同相轴的振幅存在明显的差异,界面下上的地震反射由弱振幅反射特征转变为强振幅反射特征〔见图 3(a)〕;流二段下界面 T6 界面上下的振幅强度相似,均为中—强振幅反射特征〔见图 3(b)〕。流二段四级层序界

面上下的地震反射特征存在明显的差异性,流二段中部最大湖泛面 $Sq2T$ 界面之下,地层呈现出弱振幅反射特征,界面之上地层呈现出强振幅的反

射特征〔见图 3(c)〕。综上分析,在流二段识别出了 1 个三级层序和 2 个四级层序。



(a) 流二段顶界面 T5; (b) 流二段底界面 T6; (c) 流二段中部最大湖泛面 $Sq2T$ 。

图 3 海中凹陷流沙港组流二段三级、四级层序界面地震特征

Fig. 3 The seismic boundary characteristics of the grade 3 and grade 4 sequences of the Liushagang 2 Interval at the Haizhong Depression

2.2 流二段四、五、六级高频层序划分

2.2.1 最大熵谱分析

Nio 等人提出 INPEFA 测井旋回技术方法,通过 INPEFA 曲线的趋势识别地层的旋回,利用 INPEFA 曲线的拐点识别地层的界面^[11]。当海(湖)平面上升时,地层的泥质含量逐渐增加,地层呈现出正旋回,INPEFA 曲线呈现正趋势;当海(湖)平面下降时,地层泥质含量逐渐降低,地层呈现出反旋回,INPEFA 曲线呈现负趋势;负拐点代表潜在的洪泛面,正拐点可能代表层序界面^[11, 29]。研究区流二段 INPEFA 曲线呈现出明

显的趋势变化和拐点,INPEFA 曲线的最大负拐点,对应最大湖泛面,将流二段划分出两个四级层序;再根据 INPEFA 曲线次一级的拐点特征,在流二段识别出了 5 个五级层序(见图 4)。

2.2.2 小波变换分析

小波变换的概念是由地球物理学家 Morlet 提出的,是通过对一维数据进行伸缩、平移将其分解成不同尺度的子信号,将数据中蕴含的旋回和突变信息直观化^[30]。GR 曲线记录了地层的泥质含量变化,能够反映出沉积环境的变化,记录了较为完整的沉积旋回和沉积界面的信息^[31-32]。通过

将连续小波 (CWT-Dmey) 和离散小波 (DWT) 的组合运用,能够揭示 GR 曲线蕴含的不同周期和频率的地层旋回及基准面变化^[12]。

INPEFA 分析的优点是能够直观地反映地层旋回转化界面,尤其是四、五级的界面特征,而小波变换对高级别旋回性识别能力强,对地层旋回界面的级别识别能力相对弱;但 INPEFA 曲线容易受到数据长度的影响,数据越长,INPEFA 识别能力就会越低,小波变换则相对稳定,因此进行高

分辨率层序地层划分时,最好将两者对比使用。小波变化的 d7、d8、d9 曲线为高阶细节信号曲线,曲线波动反映出高频-低频的沉积周期;其中 d7 反映高频的旋回性,d9 反映中低频的旋回性,d8 反映的旋回性介于二者之间。

本文选取 d6、d7、d8 细节信号曲线和连续小波 ($\alpha=256$),在流二段识别出 1 个长期旋回、5 个中期旋回及 13 个短期旋回,分别对应三、五、六级层序(见图 4)。

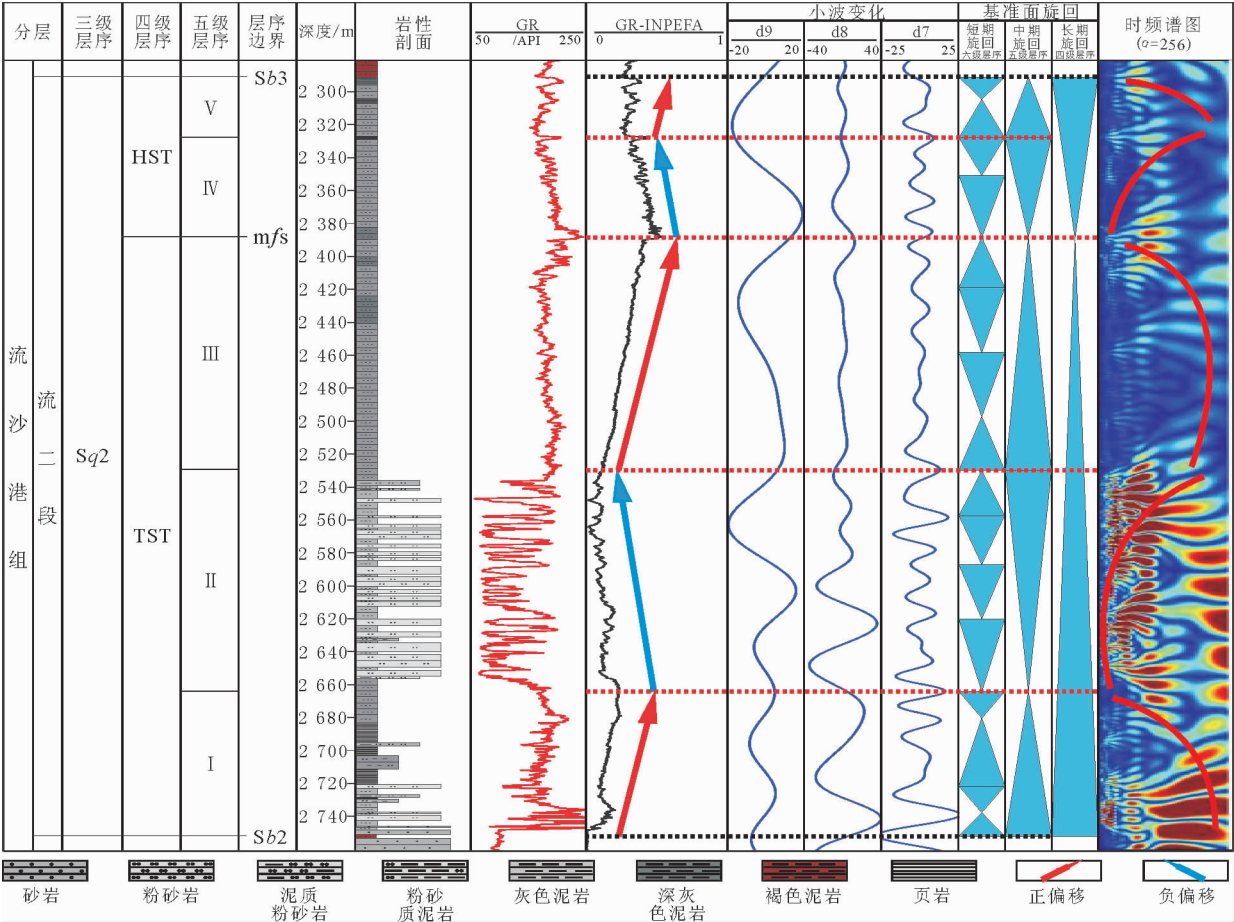


图 4 海中凹陷 B5 井流二段高频层序划分综合柱状图

Fig. 4 The B5 Well logging comprehensive high-frequency sequences column map of the Liushagang 2 Interval at the Haizhong Depression

以五级层序 II 和 III 之间的五级层序边界为例,d7、d8 及 d9 呈现出周期性变化,由高频振幅波形转变为低频振幅波形;在频谱上,由暖色调高能量能量团突变为冷色调低能量能量团;在岩性上,由砂岩过渡为泥岩,这些特征表明界面上下地层沉积相出现了变化。研究中,INPEFA 曲线和小波变换划分结果具有一致性,为划分的四、五及

六级层序提供有力的佐证。

2.3 流二段联井层序地层格架建立

通过地震剖面将流二段划分为 1 个三级层序和 2 个四级层序,在此基础上对测井资料运用小波变换和 INPEFA 分析测井曲线,在流二段划分出了 5 个五级层序及 13 个六级层序,这些识别出的层序特征,在 B1 井、B2 井、B5 井及 A2 井具有

相似性,横向对比性强(见图 5)。

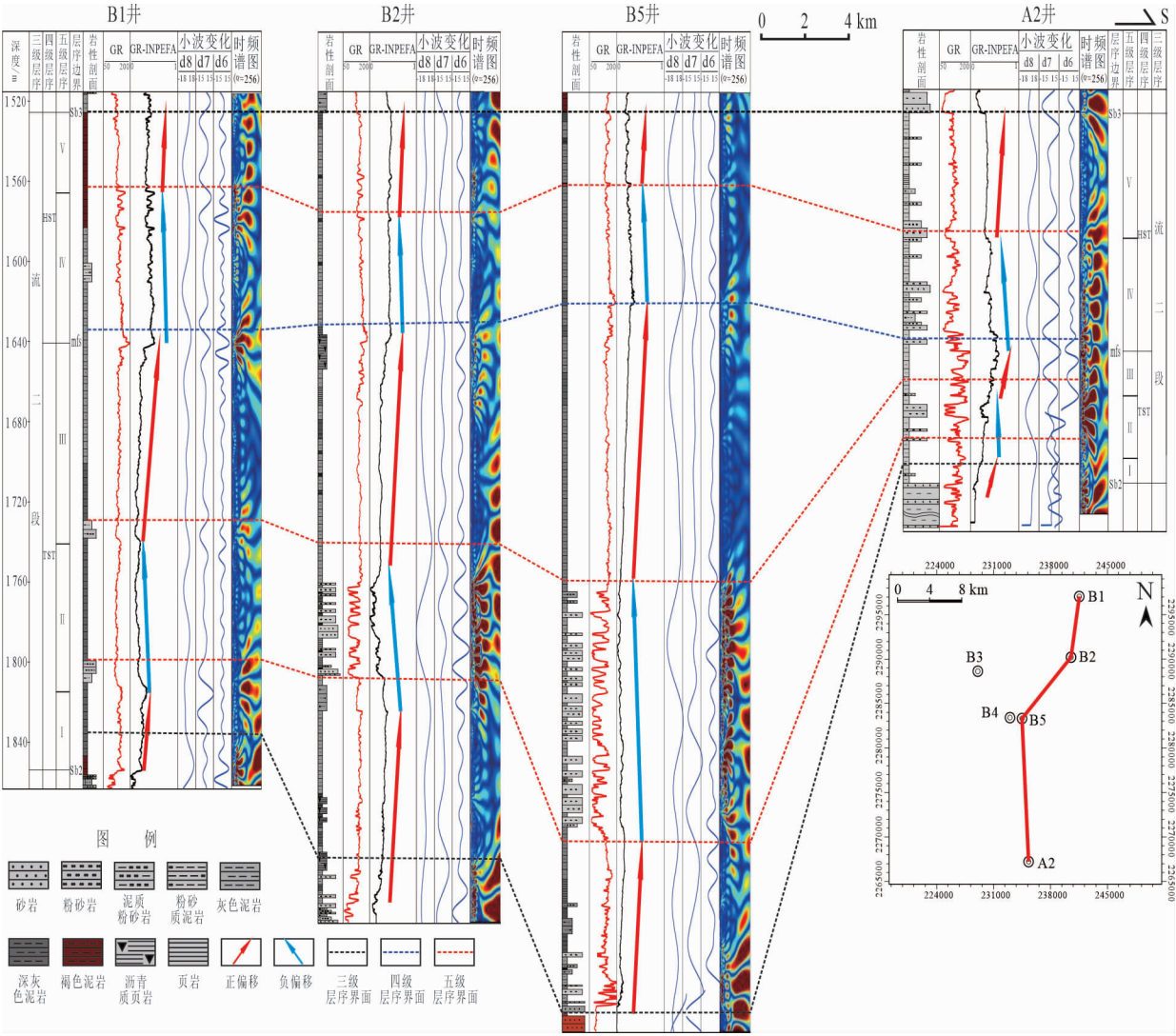


图 5 B1-B2-B5-A2 井流二段高频层序对比剖面图(剖面线位置见图 1 B—B')

Fig. 5 The high-frequency sequences correlation profile of the Liushagang 2 Interval at the Haizhong Depression

3 海中凹陷始新统流二段源储共生规律

3.1 流二段深湖体系沉积特征

本次研究资料为三维地震资料(约 1 200 km²),探井钻测井资料 6 口(B1、B2、B3、B4、B5、A2 井),其中取心井 2 口(B1 井及 B3 井),岩心共计长度 13.33 m[见图 6(a)、(b)、(c)],两口井岩心取心段均取到泥岩段,对应测井曲线为平直高 GR 段,其他岩性段(如测井特征高韵律指状段)没有取心。

3.1.1 流二段深湖相沉积特征

岩心相、测井相及地震相特征是油气勘探区识别沉积相类型的最基本手段。海中凹陷流二段

深湖相沉积表现特征为:①岩心相表现为灰黑色、深灰色页岩及灰色泥岩,发育水平层理、块状层理;②测井相特征表现为平直高 GR[见图 6(d)];③地震相特征表现为平行—亚平行席状反射[见图 6(e)]。

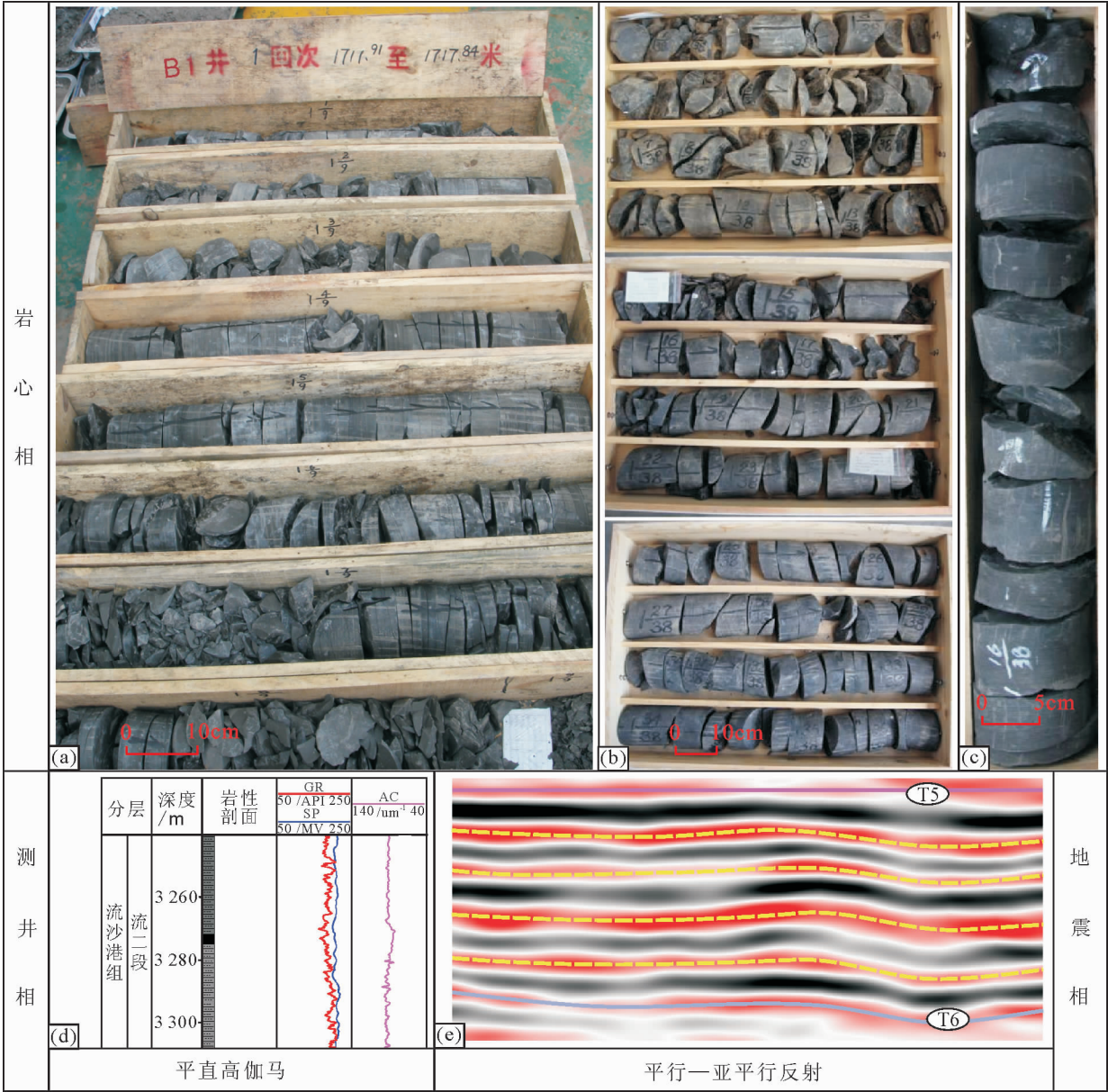
3.1.2 流二段湖底扇重力流相沉积特征

流二段湖底扇沉积表现特征为:①测井相特征表现为平直高 GR 背景下高韵律指状;②地震相特征为碟状-席状反射、前积反射与高连续席状反射组合、碟状-席状反射与高连续席状反射组合(见图 7)。

研究区钻井没有针对湖底扇砂岩进行取心,因此缺乏湖底扇的岩心相分析,但通过测井相特征与湖底扇重力流沉积特征的类比可以确定出这种沉积相类型。湖底扇重力流沉积特征主要有 2

个:①砂泥互层高频韵律;②沉积于深水泥岩的沉积背景中。研究区高韵律指状测井段,刚好对应砂泥互层高频韵律沉积,同时,高韵律指状测井段上下地层为平直高 GR 测井相,对应了厚层深水泥岩沉积背景[见图 8(a)]。因此,高韵律指状

测井段符合了湖底扇沉积这 2 个沉积特征。
流二段湖底扇沉积可分为中扇、外扇亚相,可再分为浊积分支水道微相及浊积叶状体微相[见图 8(b)]。



(a) B1 井,流二段,灰黑色、深灰色页岩及泥岩,1 711. 91 ~ 1 717. 84 m; (b) B3 井,流二段,深灰色、灰色泥岩(中部夹薄层沥青质),3 361 ~ 3 368. 4 m; (c) B3 井,流二段,深灰色泥岩,块状层理,3 364. 1 ~ 3 364. 71 m; (d) 半深湖—深湖典型测井相; (e) 平行—亚平行反射地震相。

图 6 海中凹陷流二段深湖—半深湖沉积岩心相、测井相、地震相特征

Fig. 6 Deep lake facies characteristics of core facies well logging facies, and seismic facies of Liu 2 Interval at the Haizhong Depression

3.2 流二段深湖体系各五级层序平面分布规律

在对研究区流二段各 5 个五级层序的地震相、地震属性、五级层序厚度及古地貌特征分析的基础上,绘制了流二段各 5 个五级层序的沉积相

平面图。其中,流二段五级层序I主要发育深湖—半深湖沉积[见图 8(a)],流二段五级层序II湖底扇最为发育[见图 8(b)],五级层序III、五级层序IV深湖—半深湖沉积范围最大并发育零星湖底扇沉积

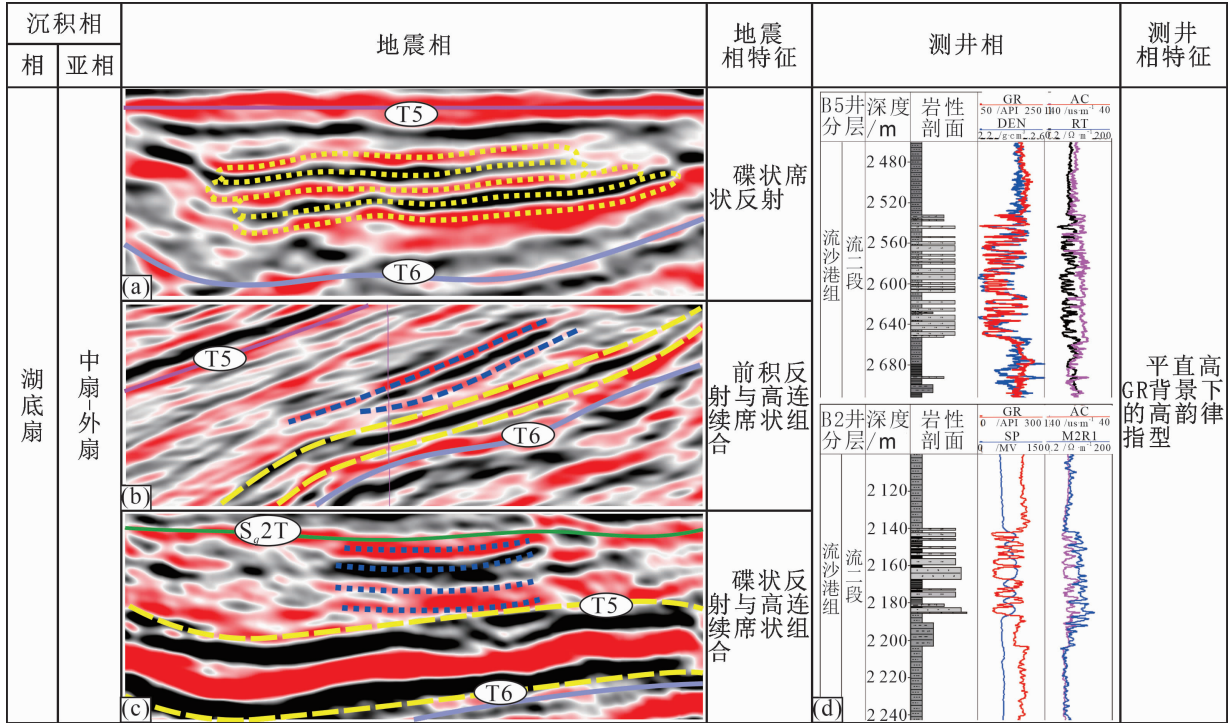
[见图 8(c)、(d)],但暗色泥岩厚度小(见图 9)。

3.3 流二段源储共生发育规律

3.3.1 流二段烃源岩及湖底扇重力流储层发育规律

1)流二段烃源岩发育特征及分布规律。前人对海中凹陷流二段暗色泥岩样品进行过分析测试,确定流二段 TOC 平均 1.58%,机质类型主要为Ⅱ₂型,烃源岩有机质组份主要为镜质组和惰质组,少量腐泥组;流二段暗色泥岩大部分已进入成熟—过成熟生烃阶段,具有较强的生排烃能力^[33-34]。

综合岩心、测井、地震相的岩性标定,确定暗色泥岩具有低频、高连续、席状地震反射特征,由这种地震相的追踪确定了流二段暗色泥岩的分布范围,再根据时深转化确定了海中凹陷流二段暗色泥岩厚度图[见图 8(f)]。对比流二段各 5 个五级层序沉积相平面图[见图 8(a)~(e)]可以看出,第Ⅰ个五级层序主要发育深湖相,虽然五级层序Ⅲ、五级层序Ⅳ深湖相分布范围更大,但其暗色泥岩发育厚度较小。因此说明,海中凹陷主力厚层烃源岩主要发育于流二段湖泊扩张体系域下部初始湖泛面位置的第Ⅰ个五级层序(见图 9)。



(a) 碟状-席状反射地震相;(b) 前积反射与高连续席状反射组合地震相;(c) 碟状-席状反射与高连续席状反射组合地震相;(d) 平直高 GR 背景下高韵律指型测井相。

图 7 海中凹陷流二段湖底扇地震相、测井相特征

Fig.7 Seismic facies and well logging facies of the sublacustrine fan reservoirs facies of Liu 2 Interval at the Haizhong Depression

2)流二段湖底扇重力流发育特征及分布规律。对比流二段各 5 个五级层序沉积相平面图[见图 8(a)~(e)]可以看出,湖底扇重力流主要发育在流二段第Ⅱ个五级层序内,五级层序Ⅲ及五级层序Ⅳ仅有零星湖底扇沉积发育,说明湖底扇重力流沉积主要发育于湖泊扩张体系域中部的五级层序(见图 9)。

3.3.2 流二段源储共生发育规律

海中凹陷主力厚层烃源岩主要发育于流二段湖泊扩张体系域四级层序下部初始湖泛面(Ts)

的五级层序Ⅰ,湖泊扩张体系域四级层序顶部最大湖泛面(Mfs)上下紧邻的五级层序Ⅲ、五级层序Ⅳ发育的烃源岩虽然面积大,但厚度小,为次要烃源岩及良好的盖层;湖泊扩张体系域四级层序中部的五级层序Ⅱ往往发育湖底扇重力流沉积储层,其夹持发育于初始湖泛面及最大湖泛面附近的两套烃源岩之间,二者共同组成良好的“三明治”式生储盖组合(见图 9、图 10),该套“三明治”式生储盖组合应是下一步非常规油气勘探的重要领域。

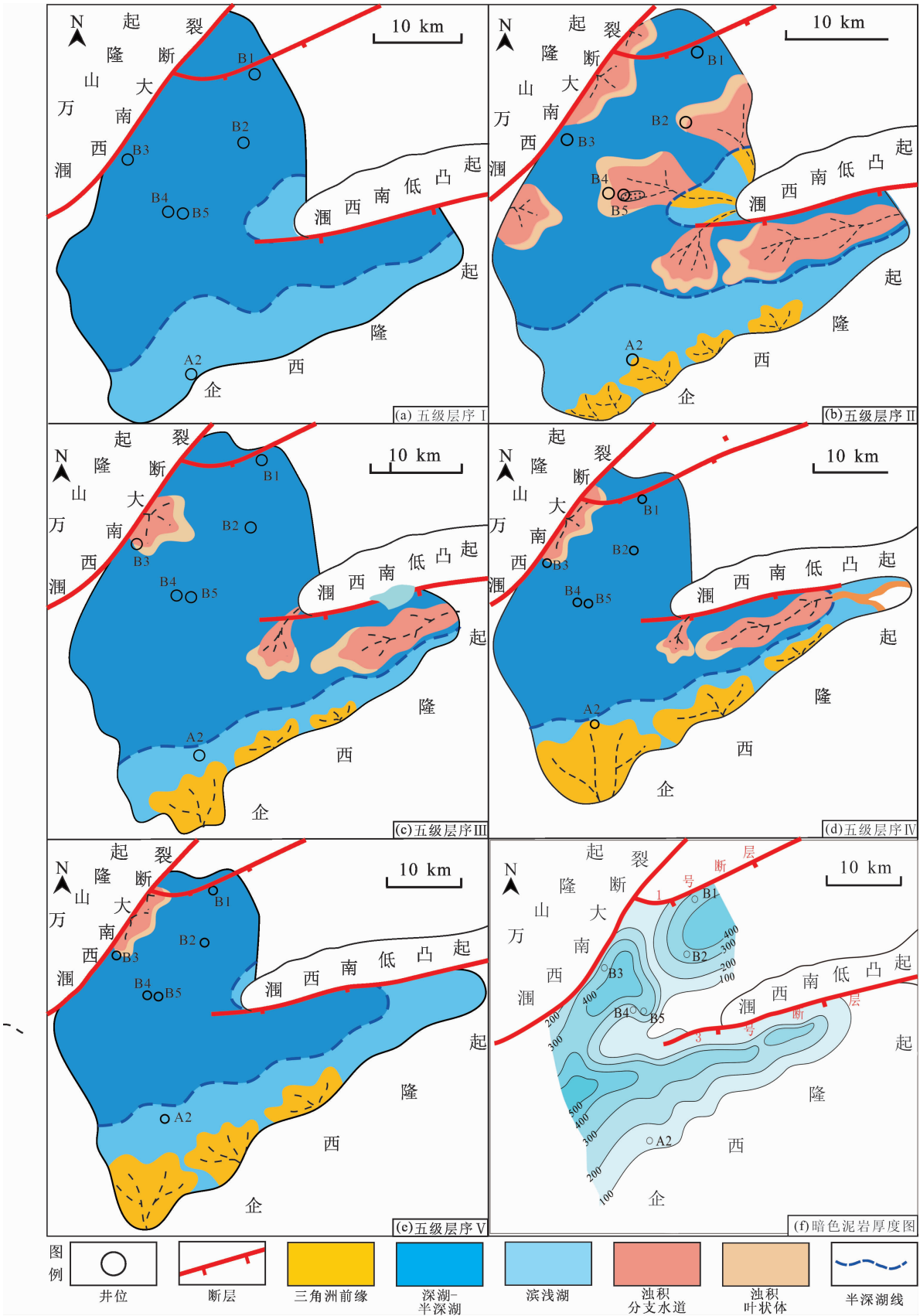


图 8 海中凹陷流二段 5 个五级层序沉积相平面图及暗色泥岩分布平面图

Fig. 8 Sedimentary facies and the dark mudstone thickness distribution map of the 5 grade V sequences of Liushagang 2 Interval at the Haizhong Depression

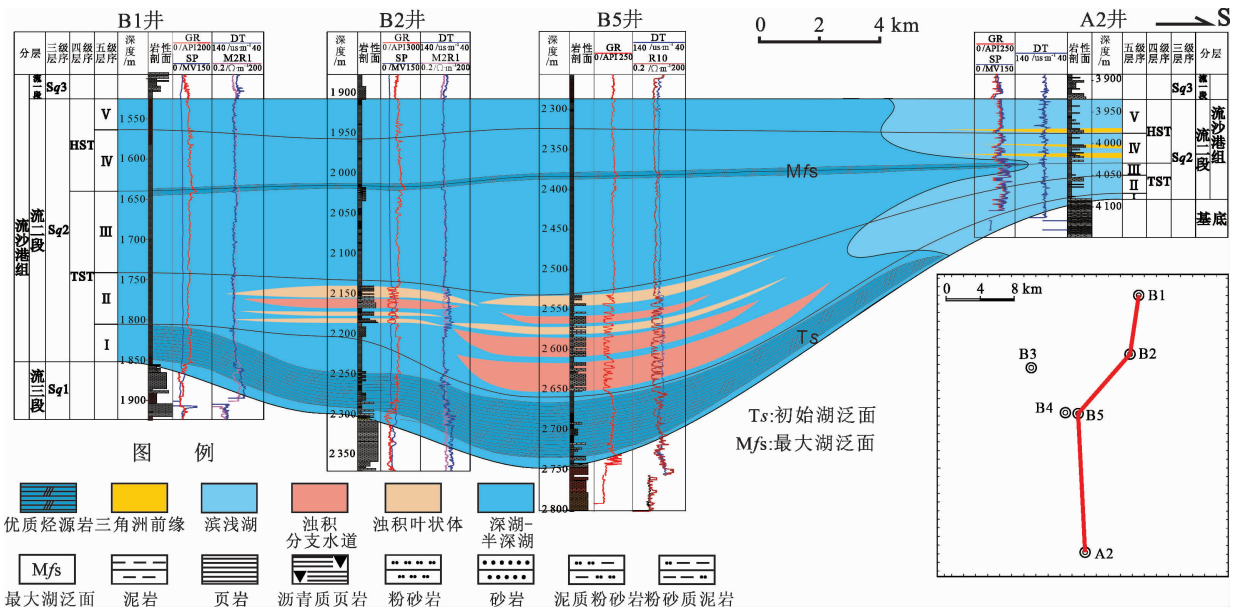


图 9 海中凹陷流二段 B1-B2-B5-A2 井源储共生连井对比沉积相剖面图(剖面线位置见图 1 B-B')

Fig. 9 Sedimentary facies correlation profile map of Liushagang 2 Interval showing source-reservoir intergrowth regularity at the Haizhong Depression

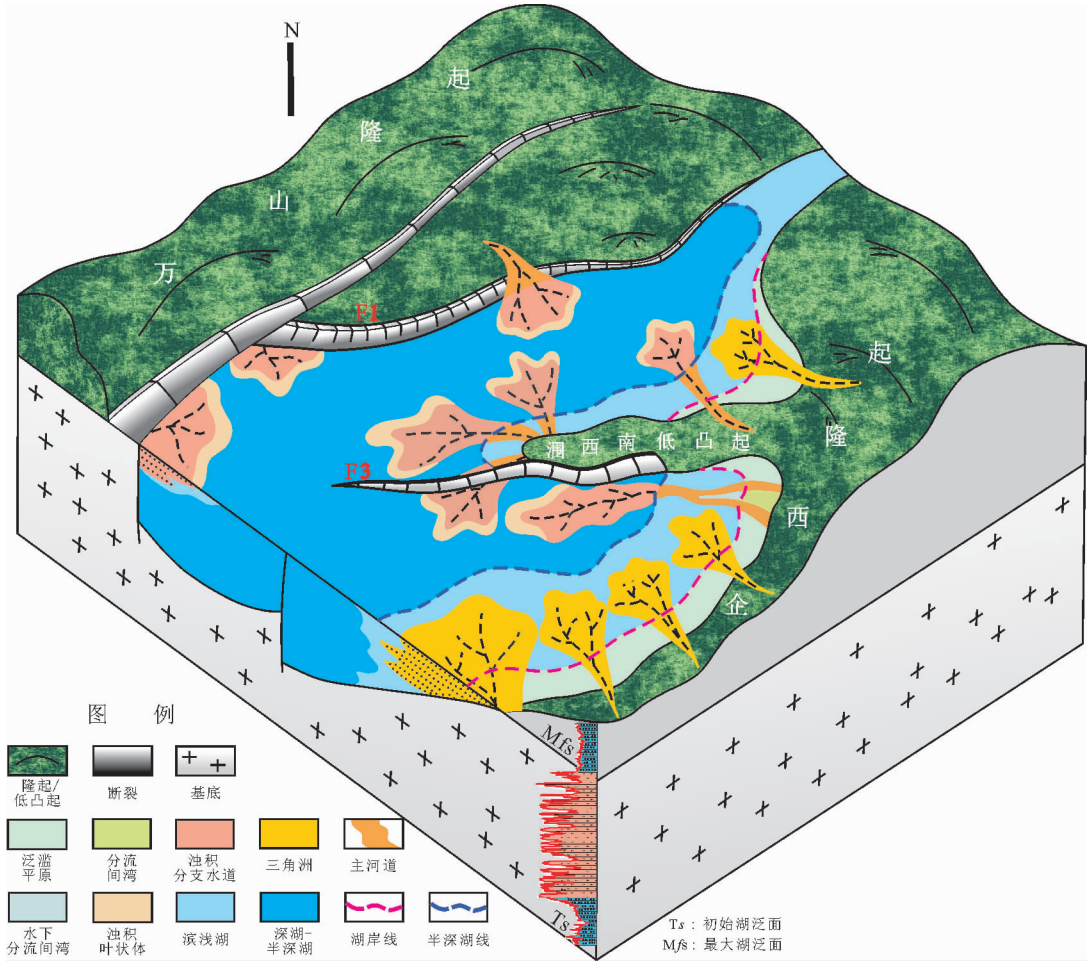


图 10 海中凹陷流二段源储共生发育模式

Fig. 10 Source-reservoir intergrowth regularity model of Liushagang 2 Interval at the Haizhong Depression

4 结论

1) INPEFA 频谱分析与小波变换分析技术可有效地运用于断陷湖盆深湖层系高频层序划分;北部湾盆地海中凹陷深湖层系流二段可划分为1个三级层序、2个四级层序、5个五级层序及13个六级层序,其中2个四级层序以最大湖泛面为界分为湖泊扩张体系域(TST)与湖泊收缩体系域(HST)。

2)断陷湖盆优质厚层烃源岩往往发育于湖泊扩张体系域四级层序下部初始湖泛面(Ts)五级层序内,湖泊扩张体系域四级层序顶部最大湖泛面(Mfs)上下紧邻的五级层序发育的烃源岩虽然面积大,但厚度小,为次要烃源岩及良好的盖层;湖泊扩张体系域四级层序中部的五级层序往往发育湖底扇重力流沉积储层,其夹持发育于初始湖泛面及最大湖泛面附近的两套烃源岩之间,共同组成良好的“三明治”式生储盖组合,该套“三明治”式生储盖组合应是下一步非常规油气勘探的重要领域。

参考文献

- [1] 朱伟林,吴景富,张功成,等. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 88-101.
- ZHU W L, WU J F, ZHANG G C, et al. Discrepancy tectonic evolution and petroleum exploration in China offshore Cenozoic basins[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 88-101.
- [2] 鲜本忠,万锦峰,姜在兴,等. 断陷湖盆洼陷带重力流沉积特征与模式:以南堡凹陷东部东营组为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 121-135.
- XIAN B Z, WAN J f, JIANG Z X, et al. Sedimentary characteristics and model of gravity flow deposition in the depressed belt of rift lacustrine basin: A case study from Dongying Formation in Nanpu Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 121-135.
- [3] 李友川. 中国近海湖相优质烃源岩形成的主要控制因素[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 1-9.
- LI Y C. Main controlling factors for the development of high quality lacustrine hydrocarbon source rocks in offshore China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 1-9.
- [4] 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.
- FU N, LIN Q, WANG K. Main source rock reevaluation of Member 2 of Liushagang Formation in the sags of Beibuwan basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(5): 12-21.
- [5] 杨田,操应长,田景春. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 88-111.
- YANG T, CAO Y C, TIAN J C. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 88-111.
- [6] 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.
- LI Y C, LAN L, WANG K, et al. Differences in lacustrine source rocks of Liushagang Formation in the Beibuwan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1451-1459.
- [7] CROSS T A, BALER M R, CHAPIN M A, et al. Application of high resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis: subsurface reservoir characterization from outcrop Observations [J]. Technip, 1992, 51(11): 11-33.
- [8] 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89-97.
- DENG H W. A new school of thought high-resolution sequence stratigraphic studies in US[J]. Oil and Gas Geology, 1995, 16(2): 89-97.
- [9] 郑荣才,彭军,吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249-255.
- ZHENG R C, PENG J, WU C R. Grade division of base level cycles of terrigenous basin and its implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 249-255.
- [10] 王贵文,邓清平,唐为清. 测井曲线谱分析方法及其在沉积旋回研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 93-95.
- WANG G W, DENG Q P, TANG W Q. Spectral analysis method of logging curve and its application in sedimentary cycle research[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(1): 93-95.
- [11] NIO S D, BROUWER J, SMITH D, et al. Spectral trend attribute analysis: Applications in the stratigraphic analysis of wireline logs [J]. First Break, 2005, 23(4): 71-75.

- [12] BAPPA M, SRIVARDHAN P. Identification of formation interfaces by using wavelet and Fourier transforms [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 128: 140-149.
- [13] 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.
ZHANG Q, WU Z P, YAN S Y, et al. Structural development characteristics of the Paleogene in the northern depression of the Beibu Gulf Basin and its control on sedimentation [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(6): 787-799.
- [14] 康西栋, 赵文翠, 潘泊贵, 等. 北部湾盆地层序地层格架及其内部构成[J]. *地球科学*, 1994, 19(4): 493-502.
KANG X D, ZHAO W C, PAN Z G, et al. Study on architecture of sequence stratigraphic framework of Beibuwan Basin [J]. *Earth Science*, 1994, 19(4): 493-502.
- [15] 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.
XI M H, YU X B, HUANG J J. Paleogene stratigraphic sequence and sedimentary feature in the west of Weixinan Depression [J]. *Offshore Oil*, 2007, 27(3): 1-12.
- [16] 李媛, 王华, 刘恩涛, 等. 北部湾盆地福山凹陷层序地层格架下油气藏分布规律与控制因素[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(5): 1542-1554.
LI Y, WANG H, LIU E T, et al. Distribution regularities and control factors for reservoir formation within sequence stratigraphic framework in Fushan Sag, Beibuwan Basin [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(5): 1542-1554.
- [17] 杜振川, 魏魁生. 南海北部湾盆地北部凹陷涠洲组层序地层格架及特征[J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 563-568.
DU Z C, WEI K S. Sequence stratigraphic framework and its characteristics of the Weizhou Formation in North Sag of Beibuwan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(4): 563-568.
- [18] 孙晓晗, 屈红军, 黄苏卫, 等. 高分辨率层序地层学在北部湾盆地重点层系选段中的应用[J]. *古地理学报*, 2024, 26(2): 1-12.
SUN X H, QU H J, HUANG S W, et al. Application of high-resolution sequence stratigraphy in the selection of key strata in the Beibu Gulf Basin [J]. *Journal of Paleogeography*, 2024, 26(2): 1-12.
- [19] 马庆林, 赵淑娥, 廖远涛, 等. 北部湾盆地福山凹陷古近系流沙港组层序地层样式及其研究意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2012, 37(4): 667-678.
MA Q L, ZHAO S E, LIAO Y T, et al. The sequence stratigraphic style of Paleogene Liushagang Formation in Fushan Sag, Beibuwan Basin and its research significance [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2012, 37(4): 667-678.
- [20] 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]. *海洋与湖沼*, 2004, 4(1): 8-14.
ZHU W L, WU G X, LI M B. Palaeolimnology and hydrocarbon potential in Beibu Gulf Basin of South China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 4(1): 8-14.
- [21] 张智武, 刘志峰, 张功成, 等. 北部湾盆地裂陷期构造及演化特征[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(1): 6-10.
ZHANG Z W, LIU Z F, ZHANG G C, et al. Tectonic and evolutionary characteristics of Beibu Gulf Basin during rifting period [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(1): 6-10.
- [22] 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.
ZHANG B T, TANG J Y, WANG W J, et al. Characteristics of tectonic sedimentary evolution in Northern Depression of Beibuwan Basin [J]. *Offshore Oil*, 2014, 34(2): 7-12.
- [23] 徐建永, 张功成, 梁建设, 等. 北部湾盆地古近纪幕式断陷活动规律及其与油气的关系[J]. *中国海上油气*, 2011, 23(6): 362-368.
XU J Y, ZHANG G C, LIANG J S, et al. Paleogene activities of episodic rifting and their relationships with hydrocarbon in Beibuwan Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2011, 23(6): 362-368.
- [24] 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.
LI C R, ZANG G C, LIANG J S, et al. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in Beibuwan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 195-203.
- [25] 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.

ZHAO Z G, WU J F, LI C R. Sub-sag sorting and petroleum distribution in Beibuwan Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2013, 35(3): 285-290.

[26] 武龙发, 屈红军, 黄苏卫, 等. 北部湾盆地海中凹陷涠三段沉积体系与沉积模式[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(2): 312-325.

WU L F, QU H J, HUANG S W, et al. Depositional systems and model of the Member 3 Weizhou Formation in Haizhong Sag, Beibuwan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(2): 312-325.

[27] 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 T X, QU H J, HUANG S W, 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.

[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.

YANG X B. Hydrocarbon accumulation conditions in Beibu Gulf Basin, northern South China Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(4): 85-92.

[29] 刘贤, 葛家旺, 赵晓明, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷渐新统花港组年代标尺及层序界面定量识别[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 990-1004.

LIU X, GE J W, ZHAO X M, et al. Quantitative identification of chronograph and sequence interface of Oligocene Huagang Formation in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2022, 43(4): 990-1004.

[30] DAUBECHIES C I. The wavelets transform, time-frequency localization and signal analysis [J]. *IEEE Trans Information Theory*, 1991, 37(4): 961-1005.

[31] 李庆谋, 刘少华. 地球物理测井序列的小波波谱方法[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(1): 78-83.

LI Q M, LIU S H. Wavelet spectrum method for geophysical logging sequence[J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(1): 78-83.

[32] MULDER T, SYVITSKI J. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans[J]. *Journal of Geology*, 1995, 103(3): 285-299.

[33] 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.

WANG X P, LI Q, CHEN J. Characteristics of fluid dynamic field and its significance to the accumulation of Hydrocarbons in Haizhong Sag of Beibuwan Basin[J]. *Offshore Oil*, 2017, 37(3): 1-6.

[34] 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.

LI Y C, WANG K, LAN L. Oil and gas differences and their controlling factors of the main sags in the Beibuwan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(5): 1-8.

(编辑 雷雁林)