

基于沉积底形分析的东海X凹陷古水系研究

鞠 颢,程 超,余逸凡,陈 波
(中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335)

摘要:通过沉积动力学,层序地层学和地震沉积学理论及相关研究综合分析,将微观尺度沉积现象与宏观尺度古地貌恢复有效结合形成沉积底形研究方法,以三维地震资料重点解释了顶平底凹和底平顶凸型的沉积底形,并分析了古水系展布规律和砂体形成机制。在东海X凹陷花港组H5层古水系研究中运用了此改进后的方法,分析了同一层位由于地理位置的不同,沉积体系、古水系分布、砂体富集规律的差异。验证了基于沉积底形分析方法古水系研究的准确性和有效性。

关键词:古地貌;古水系;沉积底形;层序地层学;地震沉积学

中图分类号:TE122 **文献标志码:**A

Palehydrological study of the X Sag of East China Sea based on sedimentary bottom shape analysis

JU Hao, CHENG Chao, YU Yifan, CHEN Bo
(CNOOC (China) Limited, Shanghai Branch, Shanghai 200335, China)

Abstract: Through comprehensive analysis of sedimentary dynamics, sequence stratigraphy, seismic sedimentology theories, and related studies, a method of sedimentary baseform research was formed by effectively combining the micro-scale sedimentary phenomena and macro-scale paleomorphological restoration. Three-dimensional seismic data mainly explained the sedimentary bottom shapes of the top-flat-bottom-concave and the bottom-flat-top-convex, and the paleo-water distribution law and the formation mechanism of sand body were analyzed. The improved method was applied in the study of the H5 paleowater system of the Huagang Formation in the X Sag of the East China Sea, and the differences in the sedimentary system, paleowater system distribution, and sand body enrichment pattern of the same layer were analyzed due to the differences in geographical location. The accuracy and validity of the method of palehydrological study based on sedimentary bottom shape analysis are verified.

Key words: palaeogeomorphology; paleowater system; sedimentary bottom shape; sequence stratigraphy; seismic sedimentology.

引用格式:鞠颢,程超,余逸凡,等.基于沉积底形分析的东海X凹陷古水系研究[J].复杂油气藏,2023,16(4):380-386,483.

JU Hao, CHENG Chao, YU Yifan, et al. Palehydrological study of the X Sag of East China Sea based on sedimentary bottom shape analysis [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4): 380-386, 483.

东海X凹陷花港组是东海陆架盆地主要含油气层系,有良好的油气勘探开发前景。前人对花港组沉积体系的主流观点为河流—三角洲沉积体系^[1]。对古水系的研究以开展小区域的层序—地震沉积学研究和在大区域的源—汇分析研究为主,古地貌是影响盆地沉积体系分布和发育的重要因素,古地貌不仅再现了原始构造格局,还构建了古物源供给系统并揭示了物源区、沉积区、搬运方向和方式等。多种类的古地貌恢复技术为宏观古地貌研究提供重要手段。但目前古地貌恢复技术多注重于在厚度方面还原真实沉积厚度,缺乏在古地貌形态上的研究方法。

沉积动力学主要研究沉积过程中的沉积物侵蚀、搬运、堆积过程和机制,以水槽实验或者沉积数值模拟实验研究初始沉积底形在遵循流体力学规律的条件下随时间推移发生的形态变化。沉积底形的研究成果多应用于现代地貌河道治理^[2]、深水浊流沉积^[3]等相关研究中。

通过沉积底形研究可以更好地理解因沉积动

收稿日期:2023-04-09;改回日期:2023-07-27。

第一作者简介:鞠颢(1988—),中级职称,地质工程师,从事开发地质和开发地震方面的研究。E-mail:juhao@cnooc.com.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司科技项目(CNOOC-KJ135ZDXM39SH03)。

力和沉积环境类型的不同而形成不同形态的沉积物。本文介绍了一种古地貌形态的研究方法,在已有的高精度层序格架控制下运用三维地震资料开展解释和分析。通过将微观尺度沉积现象与宏观尺度古地貌恢复有效结合形成沉积底形研究的方法,最终将层序古地貌研究的精度从三级提高至四级,四级层序古地貌能更好地反映古水系发育和沉积特征。

1 研究区概况

东海X凹陷位于东海陆架盆地中段的浙东坳陷东部,凹陷整体呈NNE向展布,长约500 km,宽约130 km,面积约59 000 km²。是一个新生代断—拗复合型盆地,自北向南依次与虎皮礁隆起、长江

坳陷、海礁隆起、钱塘凹陷及渔山东隆起5个构造单元相接,东邻钓鱼岛褶皱带。经历了古新世裂陷期、始新世裂陷—断陷期、渐新世—中新世中晚期拗陷期和上新世晚期—第四纪区域沉降期4个构造演化阶段。

研究区自下而上发育新生界古近系、新近系及第四系,其中古近系渐新统花港组是主要的储集层和产层。

花港组目的层厚度约500~3 000 m。储层岩性以埋深3 000~5 000 m的细砂岩为主,自北向南发育辫状河—三角洲—湖泊沉积体系^[4]。花港组沉积时期物源供给充足,以北部虎皮礁隆起为主要物源区,西部海礁凸起和东部钓鱼岛隆起为次要物源区,古水流方向为近南北向^[5]。

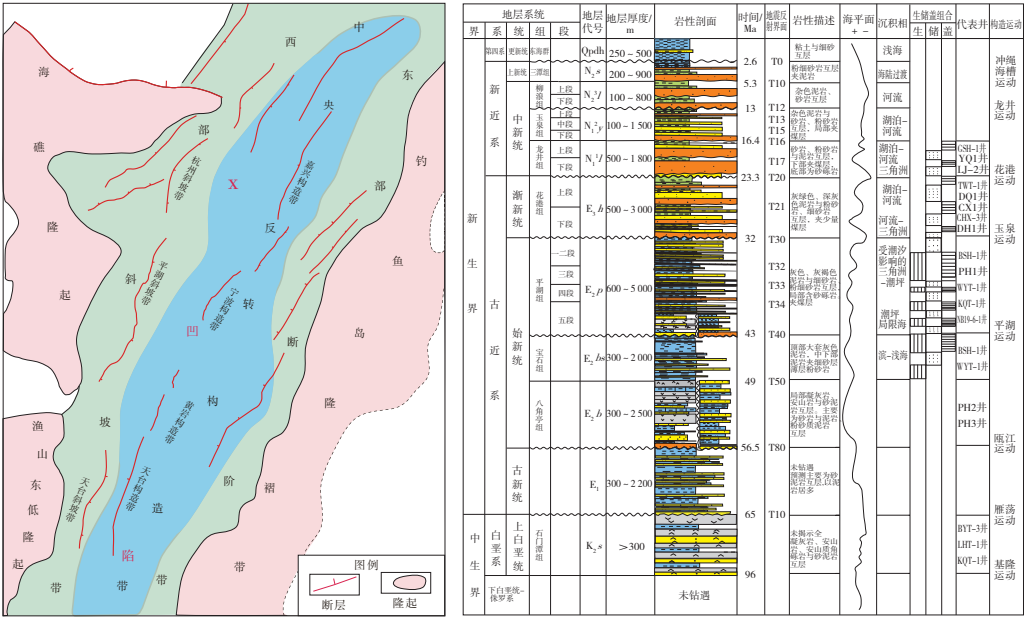


图1 X凹陷构造位置及地层综合柱(据文献[6]修改)

2 沉积底形研究进展

Gilbert^[7]在20世纪初开创了水槽模拟实验的先河,Simon等^[8]1956年通过水槽实验探索了底形和床砂形态的几何学,即类型、大小、形态和水流强度之间的关系。沉积物受水流牵引搬运负载,遵循流态或流动机制^[9]。

在水力学^[10]中,弗洛德数Fr用来判别水流的状态,即流体内惯性力与重力的比值。

Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \tag{1}

式中,v为水流速度,m/s,g为重力加速度,m/s²,

h为水深,m。
Fr<1为静态、缓慢或次临界流。Fr>1为急流、射流或超临界流。Fr=1为临界流。

大量水槽实验证实底形与水流作用有关,Ashly等^[11]认为由于水动力条件的变化,沉积物在水流搬运过程中,底床松散的物质会呈现出不同的形态。当水流强度逐渐增大时,又无沉积物运动的平坦底床依次形成沙纹、沙波、平坦底床、逆行沙丘及其冲槽和冲坑等底形。Alexander等^[12]认为超临界流则会形成如逆行沙丘、冲槽与冲坑等底形。

综上所述,沉积底形是指水流作用下床砂运动的几何形式,是床砂与流水共同作用的产物^[13]。

3 古地貌形态研究方法的改进

古地貌指沉积基底原始地形形态起伏与变化^[14]。目前流行于国内外的古地貌恢复方法概括起来有印模法、残余厚度法、层拉平法和层序地层学法等^[15-18]。大致上为求取层序地层格架下的残留地层厚度并进行真厚度校正,运用盆模技术完成埋藏史模拟^[19]和压实分析^[20],如果遭受剥蚀还需要完成剥蚀厚度恢复^[21],运用平衡剖面方法完成构造变化强烈区域的构造恢复^[22],最后通过综合沉积相、古生物分析得到古水深数据校正^[23]。目前现有古地貌恢复研究在厚度求取上技术方法相对完备,但地貌形态上完全依赖层序格架中的层序选择和层位解释质量,特别是在残余厚度法中须保证顶底两套层位的高质量选取和解释。

古地貌通常对应于层序分级和划分,根据已有的基准面旋回级次划分结果^[24],通常三级层序对应长期旋回,三级层序古地貌对应大型冲刷间断界面,四级层序对应为中期旋回,四级层序古地貌对应较大型冲刷间断界面。通过技术方法的改进恢复至四级层序古地貌将提高古地貌形态分辨率。

沉积底形是由基准面和底形共同组成,即底形和底形对应的流体界面。根据沉积底形的定义并且结合高分辨率层序地层学的相关解释。底形是因沉积动力而形成的形态,因此底形对应主要沉积动力的基准面。在一个简单模式(图2)中,可以理解为底形是由主要沉积动力水流作用形成,底形之上覆盖着水体。基准面与底形之间为可容纳空间(A),基准面短期旋回不断升降变化,沉积动力强弱,沉积物供给(S)高低共同作用改变底形。

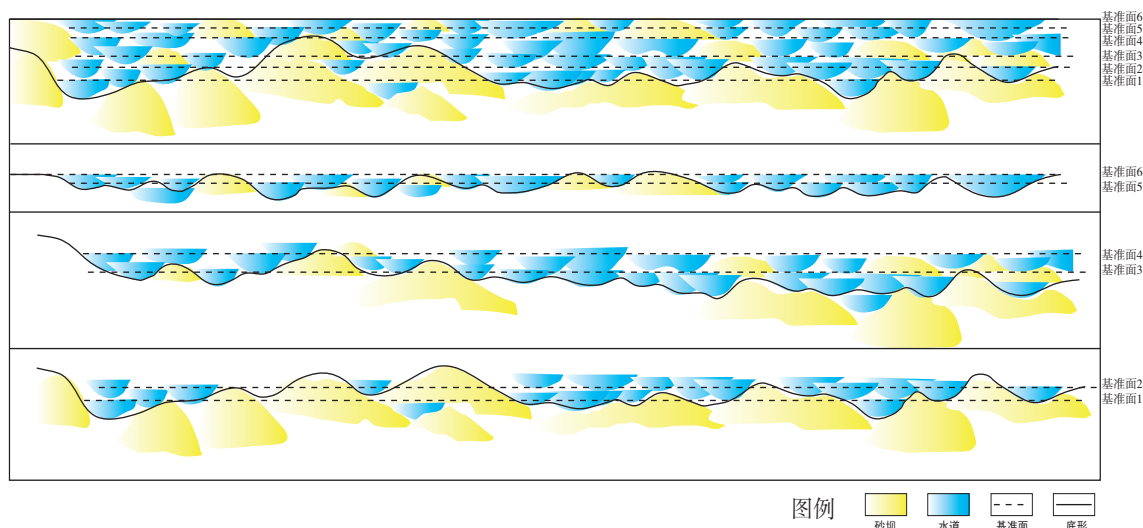


图2 基准面与底形关系模式

稳定的基准面一般选取的是最大湖泛面,湖平面相对较高的时期,也是一个湖平面变化周期中最高湖平面。界面以下是三角洲覆水沼泽相,界面以上是具有一定水深的前三角洲或者湖相泥岩沉积^[25]。所处层位的地震响应特征为同相轴连续性较好,在区域上稳定发育且容易追踪。

沉积底形是一种微观古地貌形态。超临界流冲槽和冲坑底形对应四级层序古地貌中沟谷、河谷形态,沙丘底形可对应点坝、心滩、分流砂坝的形态,临界流则对应静水沉积形态。可以通过地震资料识别出多个小河道连片形成的大型顶平底凹的沟和多个砂坝叠置形成的大型坝组成的底平顶凸的丘体,河道或者砂坝的大型叠加组合几何形态反

映四级层序古地貌。

在完成高分辨率层序地层格架精细划分和对应沉积底形的基准面选择和最大湖泛面层位解释后,运用地震资料识别沉积底形,其关键在于描述顶平底凹的沟谷及底平顶凸的丘状边界。

以曲流河相储层的下粗上细二元结构特征为例,河谷冲刷界面上下岩性具有明显的差异:界面以下为河漫滩沉积;界面以上自下而上依次为点坝、心滩沉积的细砂岩,以及河漫滩细粒泥质沉积物。在地震反射特征上,由于冲刷作用底形界面上下岩性的差异,其波阻抗也存在明显差异。如图3所示,借助于波阻抗差异可以识别顶平底凹的底形界面。

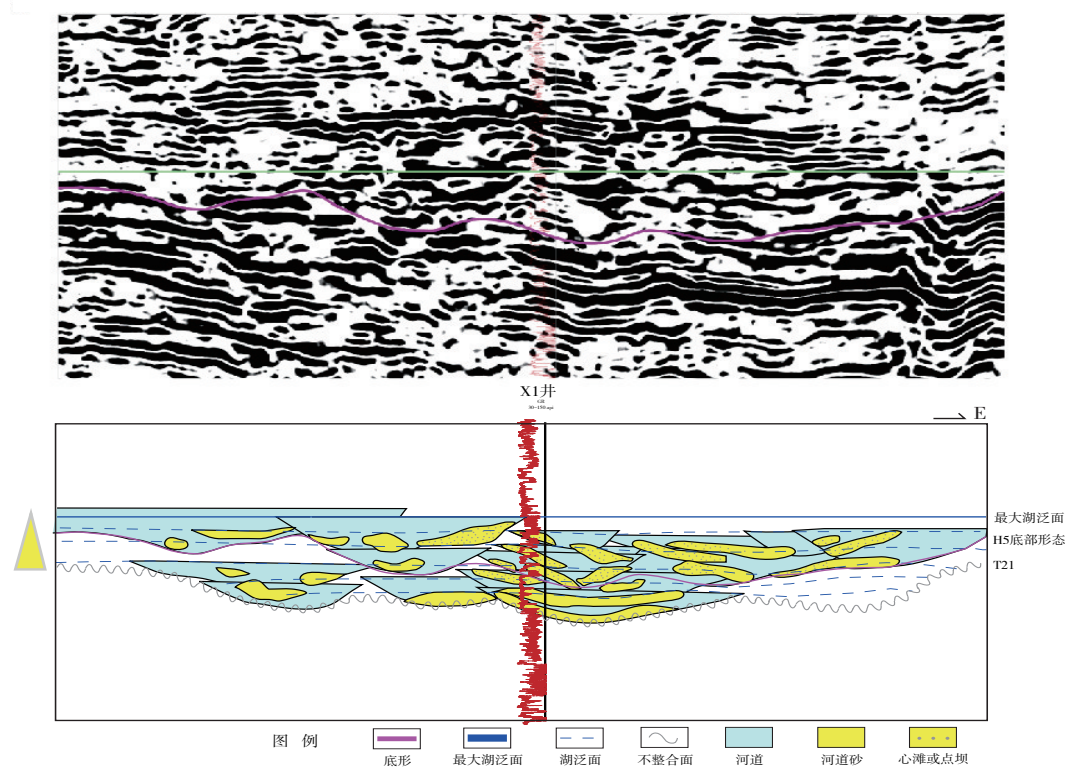


图3 河流相“顶平底凹”型沉积底形地震反射特征及模式

三角洲相沉积多集中于河流入海的河口区,水流展宽和潮流的顶托作用使流速骤减,河流底负载下沉堆积并逐渐形成河口沙坝。水流从沙坝顶端分流并向外扩展并重复这一过程形成了一个喇叭型向海延伸的多岔道河网系统。三角洲河口坝岩

性为细砂岩,分流间湾沉积岩性多见黏土沉积,少量粉砂和细砂。如图4所示,不同相带岩性不同,其波阻抗也存在差异,砂坝多呈底平顶凸的形态,砂坝的两侧及顶部多见顶平底凹的分流水道切割形态。

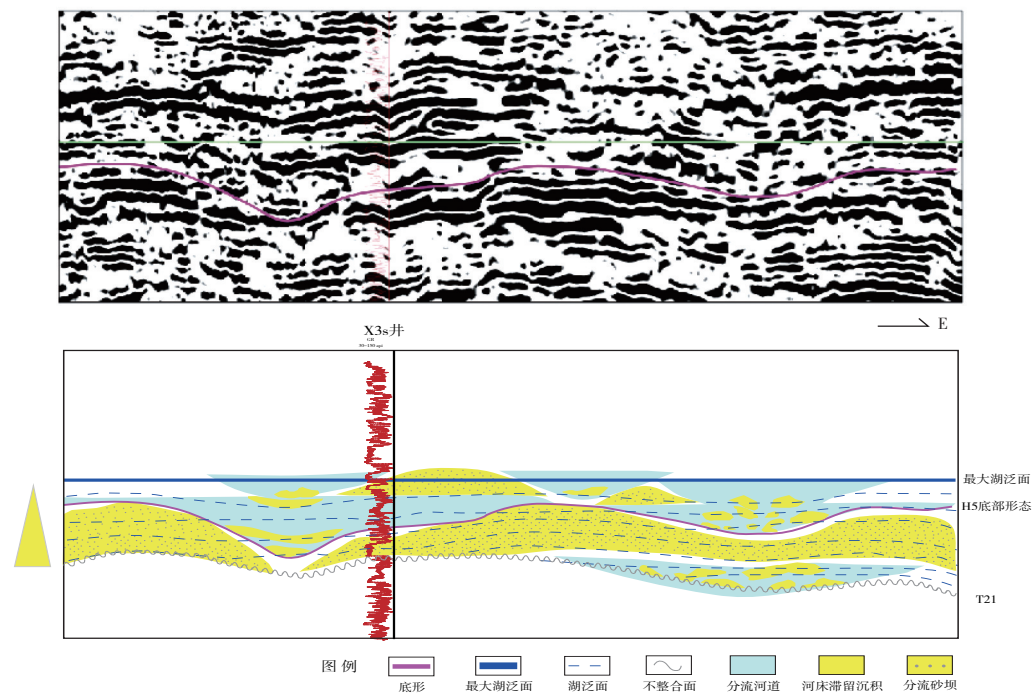


图4 三角洲“底平顶凸”型沉积底形地震反射特征及模式

4 古水系综合分析

以东海X凹陷H5层为例,通过基准面的区域追踪和解释,在剖面上拉平展示可还原沉积底形的基本形态,结合区域地质层序划分,层位划分和沉积动力学理论研究成果共同解释沉积底形形态。如图5所示,最终通过残余厚度的古地貌恢复方法求解出从基准面到沉积底形的时间厚度以表征H5层四级层序古地貌形态特征。

在精细等时地层格架约束下完成古水系综合分析,包括物源方向,古水系的路径,分布范围和流向等,采用曾洪流、朱筱敏等^[26]提出的地震沉积学方法,充分运用三维AVO梯度资料^[27]通过地层切片识别水道、朵叶等沉积砂体,如图6所示,AVO低梯度为红色,揭示较高含砂概率,AVO高梯度为蓝色,揭示较低含砂概率,从低梯度向高梯度过渡表示含砂概率的降低。在沉积底形图(图5)中,蓝色根据沉积相的不同可表示为切割深度不同的沟谷或者水深不同的浅湖区域,黄色可表示为含砂区域,结合沉积底形的认识共同确定砂体形成机制及展布范围。

水系中沉积体系总体上物源长轴方向为自北向南,从辫状河沉积过渡为三角洲沉积体系,次物源为自西向东的短轴物源供给的三角洲相沉积体系,均以牵引流为主。沉积底形图中下切能力强的凹陷北部区域(图5中标记为A的区域)发育辫状河沉积体系,古沟谷十分发育且河道砂体厚度大。凹陷中部为三角洲前缘,前三角洲和浅湖区域(图5中标记为B的区域),此区域为相对深度较大的盆状水域,河道进入水域,下切能力明显减弱,多发育静水沉积物如湖相泥岩,河漫滩细粒碎屑岩,泥岩等。泥岩为主的背景下发育散开状的小型三角洲分流河道和点状砂坝沉积,砂体厚度小。凹陷南部为三角洲前缘河口区(图5中标记为C的区域),河道下切能力弱且发育大规模分布的大型三角洲沉积,三角洲内部发育砂体厚度中等的分流砂坝和砂体厚度较小的席状砂。

辫状河河流相地貌在平面上为辫状河网特征,河道分叉分流、再汇聚的现象明显(图5所示1、2、3处),在纵向剖面上切沟、冲沟等侵蚀古沟谷发育。在基准面短期上升半旋回上升初期并不断上升的过程中,基准面位于沉积底形之下, $A/S < 1$,水动力强并以向下切割侵蚀作用为主形成古切沟,沟谷逐

渐变大形成河谷,沉积物供给充足,在水道之间形成心滩或者在河道的凸岸形成点坝。切割、侵蚀、改道、截流等作用,以及砂体重新分布和富集改变了原有底形。因此在低A/S条件下,形成相互叠置,彼此切割的河道砂岩。在图7中,剖面上岩性多为细砂岩,单砂体平均厚度约10~90 m,单砂体最大厚度约160 m,纵向砂岩累计厚度约150~400 m。

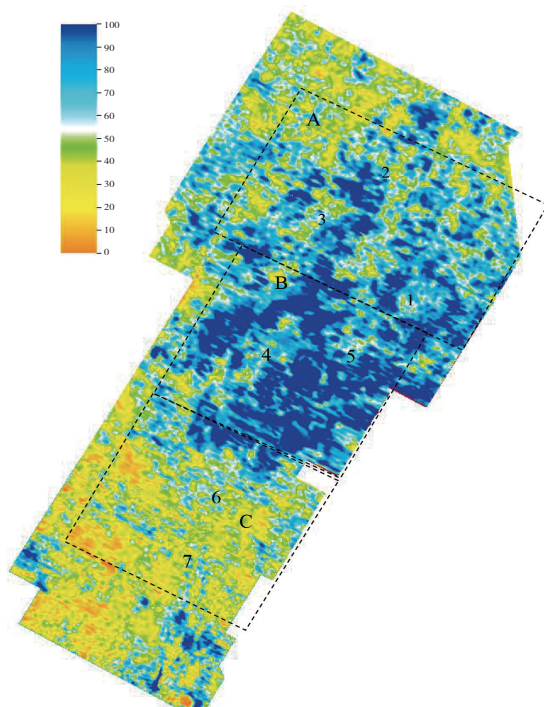


图5 东海X凹陷H5层沉积底形

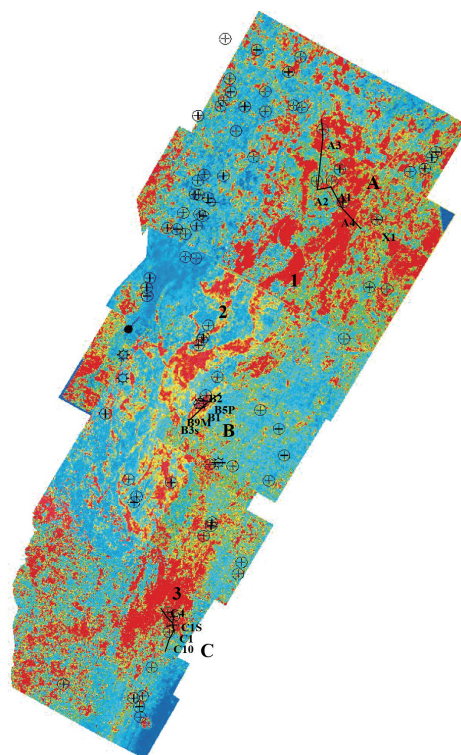


图6 东海X凹陷H5层AVO梯度属性切片

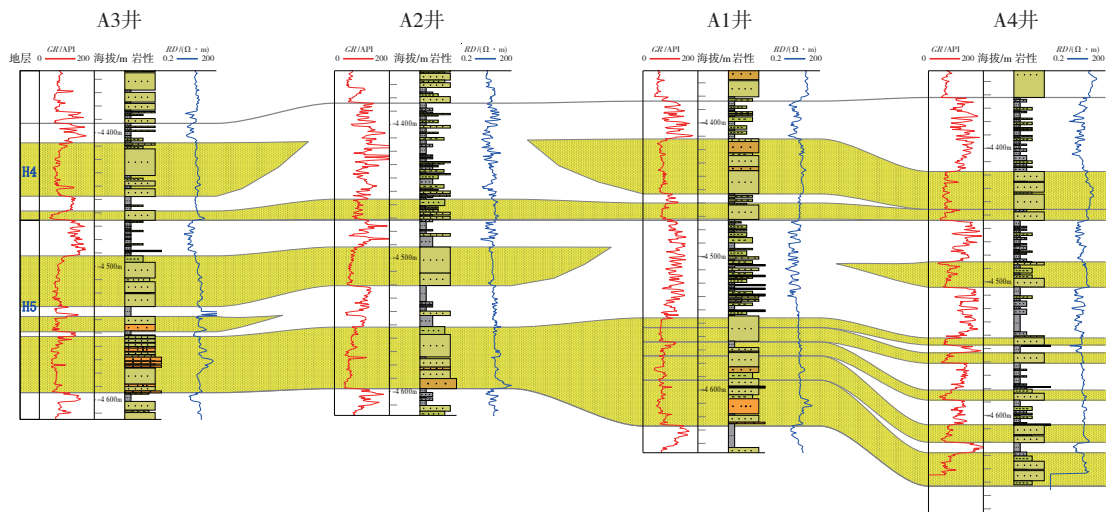


图7 凹陷北部辫状河沉积体系砂体对比剖面

三角洲平原地貌在平面上表现为辫状河沉积逐渐向曲流河、三角洲沉积过渡,河道数目减少,形态上趋向于更加弯曲(曲流化,如图6所示1、2处)或者更像三角形(三角洲化,如图5所示4、5处)。在纵向上发育古沟谷,但由于沉积动力的减弱沟谷下切能力明显下降。较河流相不同在于保留了较完整的河漫滩沉积(图8)。伴随基准面短期旋回的不断上升或者短期下降,基准面以底形之上为主,同时也位于底形之上和底形之下不断变动,在 $A/S > 1$ 和 $A/S < 1$ 之间浮动变化,逐渐由河流相过渡为三角

洲平原相,河水漫溢,水面上升多形成浅湖、沼泽,以三角洲平原洪积作用为主,多见富泥及细粒碎屑,偶见因基准面短期下降河道改道切割而形成的河道砂岩,早期形成的沟谷多被洪积作用形成的细粒沉积物充填。原有底形多被泥岩填充覆盖填平补齐。因此在高 A/S 条件下,形成由下而上的河床一点坝—河漫滩沉积,产生孤立的被冲积平原泥岩包围的河道砂岩,单砂岩厚度约 10~20 m,纵向砂岩累计厚度约 40 m。总体上岩性为泥岩和粉砂质泥岩。

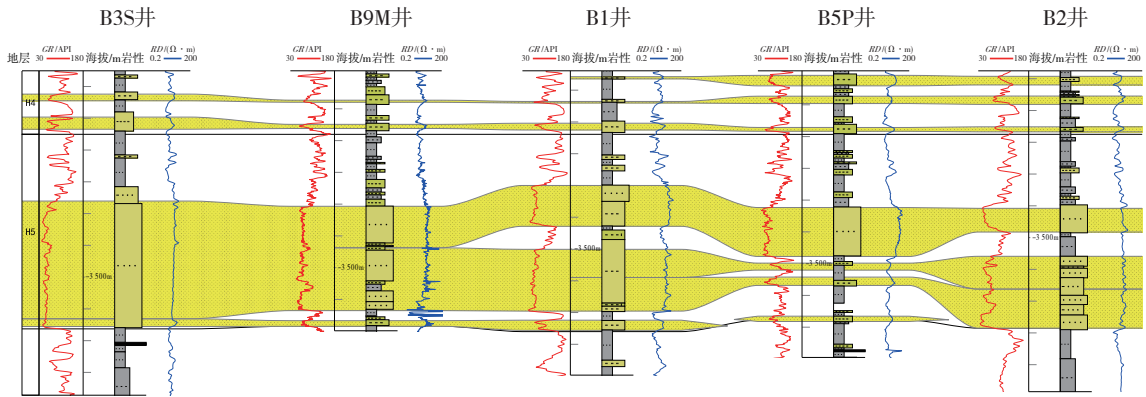


图8 凹陷中部三角洲平原沉积体系砂体对比剖面

三角洲前缘河口地貌在平面上表现为喇叭口散开的三角形特征(图6所示3处),呈现楔状厚度减薄的形态。在平面上展示不同于主物源方向的三角洲分布,呈现三角洲河口位置大面积、大规模砂岩沉积的现象。在纵向上沟谷明显较少且仅在河口坝顶部分布(图5所示6、7处),连续稳定的静水沉积物增多。在基准面短期旋回不断上升的过程中,由于可容纳空间即蓄水体的体积变大,为河

流泥沙输入的最终沉积卸载地, $A/S \gg 1$ 且基准面完全在底形之上,由于蓄水体的顶托作用以及惯性力,泥岩向更远处运动并最终形成前三三角洲泥。上游携带的砂岩在河口处原地沉积,以顶部的牵引流沉积为主,沉积的砂岩以冲积作用呈现厚度尖灭形式的楔形覆盖于底形之上。如图9所示,岩性以分选较好的细砂岩为主,单砂体厚度约 30~40 m,纵向砂岩累计厚度约 60 m。

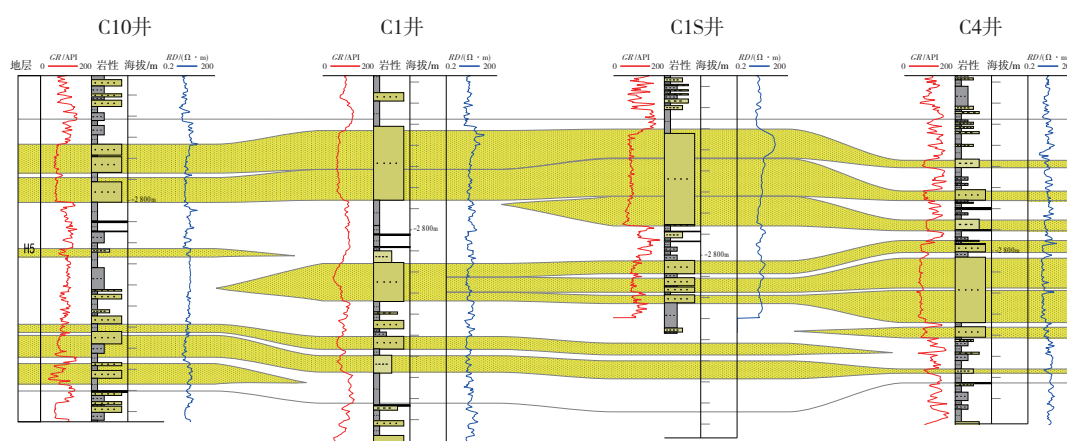


图9 凹陷南部三角洲前缘沉积砂体对比剖面

5 结论

(1) 沉积底形是受限于沉积动力强弱的床砂几何形态,也是一种微观古地貌。在宏观上结合沉积底形思想,运用三维地震数据地震相的变化在区域上解释沉积底形对应基准面和沉积底形,重点解释顶平底凹型的沟和底平顶凸型的坝形态,可获得精度更高的四级层序古地貌形态,可较好地展示古水系发育特征。

(2) 运用沉积动力学、层序地层学、地震沉积学理论结合区域储层预测、底形识别可以更好地解释古地貌控砂机制。

(3) 四级层序古地貌形态的平面特征揭示了H5沉积时期古水系十分发育,总体上物源方向为自北向南。不同沉积体系形成不同砂体类型,主要发育辫状河河流相砂体,三角洲平原分流河道砂体,三角洲前缘河口区的分流砂坝砂体。所处四级层序古地貌和相态,水体的范围、沟谷几何形态以及汇流和改道的程度及样式差异导致三种类型的砂体在成因和厚度上有很明显的区别。河流相砂体最厚,三角洲前缘河口分流砂坝砂体厚度次之,三角洲平原分流河道砂体最小,运用改进的方法最终可总结出三种重要类型的砂体平面展布和纵向富集规律。

参考文献:

- [1] 张国华,刘金水,秦兰芝,等. 西湖凹陷渐新统花港组大型辫状河沉积体系特征[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 10-18.
- [2] HYDRAULICS D. Indus basin river regime study, phase 1-Data collection and preliminary guidelines [R]. Netherlands: Delft, 1995.

- [3] 王大伟,白宏新,吴时国. 浊流及其相关的深水底形研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 52-65.
- [4] 陈波,段冬平,刘英辉,等. 西湖凹陷中深层河流相砂体地震沉积学解释与沉积演化分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 117-126.
- [5] 赵洪,蒋一鸣,沈文超,等. 西湖凹陷花港组物源特征及对储层的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 65-72.
- [6] 余逸凡,张建培,程超,等. 东海陆架盆地西湖凹陷油气成藏主控因素及成藏模式[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(7): 40-47.
- [7] GILBERT G K. The transportation of debris by running water [M]. Washington: Washington Government Printing Office, 1914.
- [8] SIMONS D B, RICHARDSON E V. Forms of bed roughness in alluvial channel [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1961, 87(3): 87-105.
- [9] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [10] 何起祥. 中国海洋沉积地质学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [11] ASHELEY G M. Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem [J]. Journey of Sedimentary Petrology, 1990, 60(1): 160-172.
- [12] ALEXANDER J, BRIDGE J S, CHEEL R J, et al. Bedforms and associated sedimentary structures formed under supercritical water flows over aggrading sand beds [J]. Sedimentology, 2001, 48(1): 133-152.
- [13] 朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 第4版. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [14] 姜在兴. 风场-物源-盆地系统沉积动力学: 沉积体系成因解释与分布预测新概念 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.

(下转第483页)

(3)其他因素对测试精度的影响分析:试验数据分析表明,工具运动状态(滑动或复合)对方位伽马测量精度影响微小,在复合钻进工况下,探头数量、测量时长、转速变化对方位伽马测量精度影响微小,表明工具在实际钻进工况下具有良好的适用性。

5 结论与建议

(1)研制的小尺寸方位伽马随钻测量工具设计时考虑了使用环境和现场需求,室内精度测试试验表明该工具能够实时分辨分界面两侧地层岩性特征,方位伽马测量误差低于 $\pm 5\%$,满足钻进过程中进行地质导向的要求。

(2)长庆区域实钻情况表明,和刻度瓦片相比,方位伽马测试平台刻度和测试的方位伽马工具测量精度更高,方位伽马值和地层岩性、测井伽马值的符合度更高。

(3)和常规自然伽马随钻测量仪、自然伽马测井仪相比,方位伽马随钻测量工具/仪器在伽马值计算、工作状况、尺寸大小等方面存在较大差异,目前自然伽马测井仪刻度及校验的相关装置、方法、标

准还不能完全满足方位伽马随钻测量工具刻度及精度测试要求,建议进一步开展相关研究。

参考文献:

- [1] 刘克强,陈财政,李欣,等.方位伽马随钻测量技术现状与发展展望[J].复杂油气藏,2022,15(4):86-90.
- [2] 中国石油天然气集团有限公司,中国石油集团川庆钻探工程有限公司.一种方位伽马测试平台:202010373290X[P].2020-05-06.
- [3] 陈刚,王小龙,汪凯斌,等.煤矿井下随钻方位伽马仪器刻度及顺煤层钻进模拟[J].中国矿业,2015,24(S1):384-388.
- [4] 任晓荣,黄剑雄.自然伽马测井刻度的论述[J].石油仪器,1999(4):25-27.
- [5] 国家能源局.石油核测井仪刻度规范:SY/T 6582-2019[S].北京:石油工业出版社,2019.
- [6] 国家能源局.自然伽马刻度器校准方法:SY/T 7077-2016[S].北京:石油工业出版社,2016.
- [7] 黄隆基.放射性测井原理[M].北京:石油工业出版社,1985.
- [8] 庞巨丰.核测井物理基础[M].北京:石油工业出版社,2005.

(编辑 韩枫)

(上接第386页)

- [15] 夏辉,王龙,张道锋,等.鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组1段层序结构与沉积演化及其控制因素[J].石油与天然气地质,2022,43(6):1397-1412,1488.
- [16] 厚刚福,孙靖,王力宝,等.不同古地貌单元水下分流河道沉积特征及其意义——以准噶尔盆地夏盐地区三工河组二段为例[J].沉积学报,2019,37(4):825-833.
- [17] 刘宗宾,程奇,刘洪洲,等.辽西低凸起JZ油田沙二段古地貌特征及其对沉积的控制作用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2023,38(2):9-15.
- [18] 杨润泽,王宏语,樊太亮,等.银额盆地拐子湖凹陷构造特征及其对古地貌演化的控制[J].大庆石油地质与开发,2020,39(6):39-51.
- [19] 杨升宇,张金川,唐玄.鄂尔多斯盆地张家滩页岩气区三维盆地模拟[J].天然气地球科学,2016,27(5):932-942.
- [20] 赖生华,曹鉴华,张翠萍.声波时差长趋势脱压实校正[J].石油地球物理勘探,2020,55(5):1102-1109.
- [21] 吴景峰,蒙启安,付晓飞.汤原断陷古近系剥蚀量恢复及原型盆地构造格局[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(2):542-552.
- [22] 熊连桥,姚根顺,熊绍云,等.基于平衡剖面对断裂带地层展布恢复的方法——以川西地区中泥盆统观雾山组为例[J].大地构造与成矿学,2019,43(6):1079-1093.
- [23] 舒梁锋,代一丁,朱明,等.基于沉积构型半定量恢复古水深:以珠江口盆地白云凹陷为例[J].海洋地质前沿,2022,38(5):51-59.
- [24] 邓宏文.高分辨率层序地层学[M].北京:地质出版社,2002.
- [25] 金振奎,李燕,高白水,等.现代缓坡三角洲沉积模式——以鄱阳湖赣江三角洲为例[J].沉积学报,2014,32(4):710-723.
- [26] 曾洪流,朱筱敏,朱如凯,等.陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范[J].石油勘探与开发,2012,39(3):275-284.
- [27] 胡伟,俞伟哲,张岩,等.AVO梯度属性90°相移技术及在东海盆地含煤地层储层预测中的应用[J].上海国土资源,2022,43(1):75-79.

(编辑 刘义梅)