https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.168



井震结合表征曲流型河道储层叠置样式:以准噶尔 盆地东部阜东5井区侏罗系头屯河组为例

印森林1,章 彤2,唐文军2,夏 平2,岳大力3,于枫林2,黄 凡2,陈 旭4

1. 长江大学录井技术与工程研究院,湖北荆州 434023

2. 中国石油新疆油田公司,新疆克拉玛依 834000

3. 中国石油大学地球科学学院,北京 100018

4. 长江大学地球科学学院,湖北武汉 430100

摘 要:针对阜东5井区大井距下曲流型河道储层叠置样式认识不清的问题,应用岩心、地震、测井、试油试采等资料, 采用井震联合、层次结构和地震正演等研究方法,确立了沉积微相类型,分层次开展了河道储层叠置样式和地震正演 河道砂体叠置地震响应特征研究,提出了曲流型河道储层叠置分布样式.研究表明:(1)目的层自下而上呈曲流河三 角洲→曲流型分流河道体系→曲流河.头一段时期发育曲流河三角洲沉积,多个朵叶状砂体连片叠置.头二段演变为 曲流型分流河道体系,砂体呈条带状叠置;头三段为曲流河,砂体呈宽条带交错叠置状.(2)在合理地震正演参数设置 后,对曲流型河道分4类开展正演模拟.不同期次的单河道相互叠置使得复合河道的地震反射表现出单斜状、阶梯状、 下凹状的特征,同时伴随振幅的横向强弱变化,结合单井测井标定可判断单河道的发育期次和叠置关系.(3)曲流型 河道储层叠置样式主要分为单河道型、多河道叠置型和稳定迁移型3种样式.单河道型地震反射振幅短轴强振幅特 征,呈窄连续条带状分布(约250 m);多河道叠置型地震反射振幅强弱变化大,呈连续性较差宽条带状分布(约 500 m);稳定迁移型地震响应波形振幅强度变化弱且连续,呈大范围连片状分布(约1500 m).研究不仅对曲流型河道 油气储层提高采收率具有重要的指导意义,也对井震结合大井距河道砂体储层构型表征方法的拓展意义重大. 关键词:曲流型河道;储层构型;井震结合;地震正演模拟;阜东5井区;油气地质.

中图分类号: P618 **文章编号:** 1000-2383(2022)11-4060-15 **收稿日期:** 2022-03-07

Reservoir Superposed Pattern Characterization of Well-Logging and Seismic Data Calibration with Meandering Channels: A Case Study of Jurassic Toutunhe Formation in Fudong No.5 Well Area, Eastern Junggar Basin

Yin Senlin¹, Zhang Tong², Tang Wenjun², Xia Ping², Yue Dali³, Yu Fenglin², Huang Fan², Chen Xu⁴

- 1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China
- 2. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China
- 3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 100018, China
- 4. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

基金项目:国家科技重大专项(No. 2017ZX05008-006-004-002);长江大学地质资源与地质工程一流学科开放基金项目(No.2019KFJJ0818022). 作者简介:印森林(1983-),男,副教授,博士生导师,从事储层表征与建模相关教学工作,主要从事油气田开发地质与三维建模研究. ORCID:0000-0003-4951-2659. E-mail:yinxiang_love@qq.com

引用格式:印森林,章彤,唐文军,夏平,岳大力,于枫林,黄凡,陈旭,2022.井震结合表征曲流型河道储层叠置样式:以准噶尔盆地东部阜东5井 区侏罗系头屯河组为例.地球科学,47(11):4060-4074.

Citation: Yin Senlin, Zhang Tong, Tang Wenjun, Xia Ping, Yue Dali, Yu Fenglin, Huang Fan, Chen Xu, 2022.5 Well Area, Eastern Junggar Basin. *Earth Science*, 47(11): 4060-4074.

Abstract: Characterization of meandering channel reservoir superposed pattern is difficult to Fudong No.5 well area with large well spacing. Using the data of core, seismic, logging, and production test, and the methods of well-logging seismic data calibration, hierarchical architecture, and seismic forward modeling, in this study it established the microfacies, hierarchical meandering channel sand bodies, and the response characteristics of the waveform in the seismic forward modeling of superimposed channel sand body. The results show follows: (1) It is a complete cycle from bottom to top, with meandering river delta, distributary channel system to meandering river. At the first member, it is the development of meandering river delta depositional system, superposition of multiple lobes sand body. At the second member, it has evolved into meandering distribution channel system, and the sand body is stacked with banded shape. At the third member, it is the meandering river depositional system, and the sand body is wide banded shape overlapped. (2) There are four classes of the meandering channel to be launched in seismic forward modeling, after setting up the reasonable parameters of the work area. The relationship between developmental stages of single channel can be comprehensively determined by the well-logging calibration and the monoclinal, stepped, concave characteristics that overlapping of single channels at different periods shows in the seismic reflection, along with the transverse strength change of the amplitude. (3) The meandering channel sand bodies in the study area can be divided into three types: single channel, multi-channel superposition and stable migration channels. The single channel type seismic reflection amplitude is strong in the middle and weak on both sides, presenting a continuous banded distribution, with a width about 250 m, while the multi-channel superimposed type seismic reflection amplitude is greatly varied in strength and the distribution of superimposed banded poorly continued, with a width about 500 m. The stable migration channel type seismic response waveform changes weakly and continuously, presenting a large range of continuous distribution, and a width about 1 500 m. The research is not only of great practical significance for improving oil recovery of meandering channel reservoirs by using horizontal wells, but also of great significance for enriching characterization method of large well spacing meandering channel architecture combined with well-logging and seismic.

Key words: meandering channel; reservoir architecture; well-logging and seismic data calibration; seismic forward modeling; Fudong No.5 well area; petroleum geology.

河流-三角洲相是我国油气田勘探开发主力含 油储层之一,占储量规模约70%(于兴河,2012).随 着河道的频繁横向迁移,形成平面河道形态多样化, 且纵向复杂叠置状的发育特点,导致油气储层在空 间上呈现多尺度的非均质性(马世忠和杨清彦, 2000; 岳大力等, 2008; 于兴河, 2012; 吴胜和等, 2021).针对曲流河及曲流河三角洲等相的储层构型 及沉积学研究取得了较大的进展(Miall, 1985, 1996; Bridge and Tye, 2000; Bridge, 2003; 郑荣才 等, 2008; 纪友亮等, 2012; Miall, 2013; 印森林 等, 2015; 张昌民等, 2017; 朱筱敏等, 2017; Patricia et al., 2018; 李冰娥等, 2022; 李胜利等, 2022), 主要包括:构型要素类型、构型级次划分及构型样式 分布等(Miall, 1985, 1996; Bridge and Tye, 2000; Bridge, 2003; 岳大力等, 2008; 吴胜和等, 2021), 特别是对应油田开发中后期的精细非均质性研究的 需求,利用密井网、水平井、野外露头、数值模拟和现 代沉积开展了内部点坝和河口坝构型成因机制及隔 夹层样式等研究(马世忠和杨清彦, 2000; 何文祥 等,2005;岳大力等,2008;郑荣才等,2008;纪友 亮等, 2012; 于兴河, 2012; Miall, 2013; 胡光义 等, 2014; 印森林等, 2015; 朱筱敏等, 2017; Patricia et al., 2018; 刘雪萍等, 2021; 孟玉净等, 2021; He et al., 2021;李冰娥等, 2022), 另一方面, 采用地震沉积学方法和手段开展了较大尺度的沉积相及砂体构型的展布特征分析(Posamentier and Kolla, 2003; 林承焰等, 2008; Zeng et al., 2012, 2017, 2021; 梁宏伟等, 2013; Zhang et al., 2015; 李伟等, 2017; 岳大力等, 2018; 王文枫等, 2020).

受异旋回与自旋回因素变化的综合影响,曲 流河三角洲相内部分流河道、曲流河相以及两者 间过渡的河道沉积类型等系列组合构成的曲流 型河道体系叠置关系十分复杂.其形成的油藏连 通性差异大,往往呈现出"一砂一藏"的特征(岳 大力等,2008;于兴河,2012),严重影响了后期 开发阶段井位的部署以及有效储层的钻遇率.另 外,在勘探评价阶段井距较大(一般大于1~ 2 km),利用"井震结合"方法刻画曲流型河道储 层叠置关系的研究缺乏水平井的验证.因此,研 究曲流型河道砂体储层内部沉积微相空间分布 特征及组合关系,建立其内部沉积微相单元的分 布模型,深化对曲流型河道储层叠置分布样式的 认识对于油气田的评价开发具有指导意义.

据近期勘探成果表明,新疆准噶尔盆地东部阜



东 5 井区块侏罗系头屯河组上报控制地质储量 为4 171×10⁴t,预测地质储量为4 071×10⁴t,研 究区勘探开发潜力巨大.然而,因曲流型河道 叠置分布样式与规模不明确,严重影响下步水 平井的部署与产能建设方案的制定,亟待开展 井震结合精细河道叠置样式表征.

1 区域地质概况

1.1 工区概况

阜康凹陷阜东5井区位于准噶尔盆地东部,属新 疆阜康市,距阜康市滋泥泉子镇西北约5~14 km.工区 钻遇了第四系、白垩系、侏罗系、三叠系、二叠系和石炭 系.受二叠世博格达山推覆隆升构造运动影响,工区呈 自西向东的单斜构造(图1a),东北部构造抬升剧烈,地 层厚度剥蚀较多(于景维等, 2015; 靳军等, 2016).研 究目的层侏罗系头屯河组,自下而上分一段、二段和三 段,头一段细分为 $J_2t_1^2$ 、 $J_2t_1^1$ 砂组;头二段细分为 $J_2t_2^3$ 、 $J_2t_2^2$ 、 $J_2t_2^1$ 砂组,头三段细分为 $J_2t_3^3$ 、 $J_2t_3^2$ 、 $J_2t_3^1$ 砂组(图 1b). 研究区头一段为分流河道与河口坝叠置的曲流河三 角洲,头二段为多曲流型分流河道叠置,河口坝不 发育,头三段主要为曲流河河道沉积.工区目的层 整体以曲流型河道砂体占据绝对优势,是本文研究 重点.岩性主要为灰绿色泥岩与灰绿色粉砂岩、细 砂岩互层.头屯河组储层岩性主要为细粒岩屑砂 岩,石英平均含量为18.6%;长石平均含量为 21.5%;岩屑平均含量为52%,岩屑组分以凝灰岩为 主;碎屑颗粒磨圆以次棱角状-次圆状为主,分选 性中等-好.研究区孔隙度平均值为14.4%、渗透 率平均值为26.55×10⁻³µm²,整体孔隙结构较差.

1.2 研究资料与方法

本次研究资料包括了 50 口探井、评价井资料,7 口取心井约 500 m 岩心资料和 33 口井分析化验资 料,8 口水平井资料,面元 12.5 m×12.5 m的高精度 三维地震资料(1/4λ分辨率约为 8~10 m,范围为 234 km²)和 28 口井试油试采资料.① 岩心标志、测 井曲线岩电标定和沉积特征结合,综合开展典型沉 积微相特征识别;② 地震资料波阻抗与岩电关系研 究,确定研究区地震波阻抗属性与岩性、电性的对 应关系.同时,开展多组地震正演确定河道边界与 地震反射特征的关系.井震标定,提取均方根振幅 属性,建立地震属性与成因砂体关系,确定不同层 沉积微相展布;③ 综合测井资料、地震均方根属性 和沉积微相特点,井震结合开展复合河道单元 平面展布特征研究.④ 在地震边界识别基础上, 基于地震剖面开展单一河道叠置样式分析,确 定了3类曲流型河道的叠置特征与分布样式.

2 沉积微相分类特征与地震剖面 特征

2.1 沉积微相特征

针对岩心详细观察发现,泥岩以灰黑色(图 2a) 到灰绿色为主(图 2b),纯度较高,反映了较强的还 原环境.工区主要发育平行层理、块状层理中-细砂 岩(图 2c~2d),河道下切现象明显(图 2e),泥砾非 常发育(图 2f),并可见泥砾呈叠瓦状排列,体现了 非常强的水动力特征.在灰色砂砾岩中,砂岩分布 区域有很好的油气荧光显示,而泥砾发育处少有 油气荧光显示(图 2h),在颗粒较粗的细砂岩中, 油气荧光显示明显,在中-细砂岩泥质条带分布区 油气荧光显示弱(图 2g).岩心荧光扫描表明砂岩 含油气级别高、泥质含量高则含油气级别低.

依据区域沉积背景结合上述岩心标志,研究区 既发育了相对安静的水下环境沉积的高纯度灰绿色 泥岩,同时也发育了粒度较粗的中-细砂岩和富含泥 砾的砂砾岩,体现了较强的水动力特征.其包括了水 平层理、平行层理、交错层理、块状层理、砾石叠瓦状 排列、冲刷面等典型沉积构造类型,反映了多样化的 沉积特征,水道、坝和溢岸沉积特征明显.物性和含 油气特征通过荧光显示和测井相可以发现中-细砂 岩物性与含油气性较好,泥质含量较高(包括泥砾) 的岩性含油气性和物性较差,单砂体厚度变化较大, 厚砂体可达6~12 m,薄层砂体为1~3 m不等,测井 响应正反韵律共存(表1).综上,确定了工区自下而 上主要发育了曲流河三角洲-曲流河沉积体系.从储 集层沉积微相角度来说,其骨架砂体主要为曲流型 分流河道为主,其中含三角洲的河口坝、天然堤、决 口扇等溢岸沉积和点坝组合为骨架砂体.为了方便 开展研究,目的层主要微相类型、岩性、韵律、沉积构 造、单砂体厚度、几何形态、测井曲线形态及响应特 征如下(表1).曲流河三角洲主要发育分流河道和河 口坝,目的层自下而上河口坝发育程度降低,分 流河道发育程度越来越高,非储层主要为分流 间湾泥岩.曲流河发育了点坝、废弃河道和溢 岸沉积(决口扇、天然堤)等沉积微相类型.

2.2 地震剖面特征

研究区砂体是依据三维地震剖面追踪、三



Fig.2 Characteristics of well cores

a. 灰绿色泥岩,块状层理发育,2972.82 m,阜东052井;b. 灰色泥岩,2827.72 m,阜东7井;c. 灰色细砂岩,交错层理发育,2367.33 m,阜29井; d. 灰色细砂岩,2751.73 m,阜东7井;e. 灰色粉细砂岩,含油性较好,底部冲刷构造发育,2972.59 m,阜东052井;f. 灰色砂砾岩,分选磨圆较差, 2370.0 m,阜29井;g. 灰色细砂岩,交错层理发育,荧光显示一般,3105.26 m,阜009井;h. 灰色砂砾岩,荧光显示弱,2369.79 m,阜29井;i. 灰 色中细砂岩,荧光显示强,3370.78 m,阜28井

维地震属性分析、三维可视化精细雕刻来综合 确定含油砂体范围和展布形态.精细标定和精 细构造解释发现目的层存在强振幅断续反射特 征,是典型的河道形态反射.在地震属性研究 中,发现平均反射强度、最大波峰振幅等多种地 震属性及相干体显示出类似的外形特征.地震 振幅属性上表现为典型的河道砂体特征,即在 顺河道走向上表现为长轴状强振幅,在垂直河 道走向的剖面上,表现为短轴状的强振幅(图 3).以过阜东5井剖面J₂与例,河道呈自北西向 南东方向展布,尽管地震反射上具有较好的连 续性,但并非单一河道,而是多个河道呈复杂 叠置样式所组成.从北西到南东方向显示从河 道①到④(图 3a)侧向叠置,平剖互动发现为 河道向南东迁移形成复杂叠置样式(图 3b).

3 井震结合复合河道单元表征

河道频繁迁移变化导致预测难度很大,受油藏 评价阶段井的数量与井距限制,难以控制河道边界 范围.高精度地震资料的应用是解决问题的关键手段,利用工区的波阻抗与测井资料交会分析了其相应储层的特点,砂岩储层、致密层及泥岩等研究区3 类岩性的波阻抗差异明显,利用密度曲线(DEN)可 以较好地区分,而自然伽马(GR)、自然电位(△SP) 和电阻率(RT)区分效果不好;从密度来看其3类岩 性边界分别为2.45~2.53 g/cm³,波阻抗的临界值分 别位于9500~10500 MPa/s(图4).利用这个特点, 开展了地震属性提取工作(均方根振幅效果最好). 已有资料较好地表达了这种差异性特征,在研究区 开展了两个尺度的河道叠置样式分布研究,即复 合河道单元和基于地震正演的单一河道边界的 刻画.在地震正演模拟工作下,地震剖面确定河 道砂体边界,开展单一河道解剖与分布研究.

在单井砂体厚度提取基础上,利用不同沉积 微相的砂体厚度差异性开展砂体厚度等值线制 图.另外,把地震均方根振幅属性与单井的沉积 微相类型结合起来,开展井震结合沉积微相平面 展布特征研究.通过对属性的认识发现强振幅曲 线是偏砂岩类,弱振幅曲线是偏泥岩类(图4),

			Table 1 Classification of sedimentary microfacies						
相		微相	岩性	韵律	沉积构造	单砂体厚度 (m)	几何形态	测井曲线	测井响应
		分流 河道	砂砾岩、 中细砂岩	正韵律	交错层理、 块状构造	3~6	顶平底凸	中-高幅钟 形或箱型	SP RT
曲流型河道沉积体系	储集层单元	点坝	中细砂岩、 粉细砂岩	正韵律	交错层理、 平行层理	3~10	顶平底凸	中 – 高幅钟 形底部突变	SP RT
		决口扇	细砂岩、 粉砂岩	反韵律	小型交错 层理	1~3	透镜体、 底凸顶平	齿化漏斗形	SP RT
		天然堤	粉砂岩、 泥岩	正韵律	小型交错 层理	1~3	楔状	高幅指形	SP RT
		河口坝	细砂岩	反韵律	大型交错 层理	4~12	底平顶凸	漏斗形、 箱形	SP RT
	隔夹层	废弃 河道	泥质粉砂 岩、泥岩	正韵律	水平层理	1~4	尖灭楔状	指形或 尖峰形	SP RT

表1 沉积微相分类特征

结合砂体厚度等值线图,通过单井的标定,勾画 出不同层沉积微相展布特征.最后,针对3个典 型曲流型河道发育层位进行了详细解剖.

在 J_{2t} ¹砂组, 地震均方根振幅 (RMS) 属性 发现高低值分区较为明显,且高值区整体连 片性较好(图 5a),基于单井砂体厚度分析,工 区共发育了6个砂体厚度高值区(图5b),西 南方向呈连片透镜状厚度高值区,最大厚度 为 24 m; 位于西 部 高 值 区 由 东 南 向 西 北 延 伸 连片展布,最大厚度为28m;位于东部面积较 小的厚度高值区,厚度最大为20m;北部厚度 高值区呈宽条带状分布,最大厚度为24 m.该 砂组砂体连片性较好,发育了北部、中部和南 部3个主要的三角洲朵体,骨架砂体为河口坝 和分流河道.为曲流河三角洲发育阶段,整体 为基准面下降旋回的特征(图 5c).

在 J₂t²砂组, RMS 属性发现高低值区分更加 明显,条带状属性分布十分普遍(图 5d).基于井砂 体厚度分析(图 5e), J₂t²砂体厚度高值主要分布在 北部,位于中部最高值为28m,由东北向西南呈 条带状展布;位于西部最大砂体厚度为26m,厚 度分布变化均匀;位于北部砂体厚度最高为 24 m, 面积较大. 骨架砂体仍为分流河道和溢岸砂 体,分流河道弯曲度不大,砂体厚度由北向南逐 渐减薄,分布面积逐渐减小.J₂t²为典型曲流型分 流河道沉积体系,为基准面持续下降阶段,分流 河道占主体地位,河口坝发育程度不高,分流河 道呈复杂交错叠置状,窄条带状分布(图5f).

在 $J_{z_{a}}$ 砂组, RMS 属性发现高低值区分也 十分明显,弯条带状高值区属性分布十分普遍 (图 5g). 砂体厚度等值线显示, 砂体厚度高值 主要分布在北部最高值为10m,由东北向西南 呈弯条带状展布(图 5h),中部砂体发育程度较 低,南部砂体发育程度一般,河流弯曲较为明 显.J₄²为典型曲流河沉积体系,砂体呈窄条带 状分布,弯曲度十分明显,且比J₂t₂²更加大,骨



Fig.3 Relationship between seismic reflection characteristics and complex superposition of meandering channel in Fudong No.5 well area

架砂体为曲流河道和溢岸砂体,砂体呈平 面交错叠置状.在工区东部溢岸沉积比较 发育,决口扇发育程度较高(图 5i).

4 地震正演模拟叠置河道边界

研究区岩性主要为泥岩和砂岩.位于河道底 部含砾砂岩的河床滞留沉积,速度比河道主体砂 岩高,声波测井曲线表现为高速尖峰.由于以泥岩 充填为主的废弃河道与泥岩在岩石物理参数上难 于区分,采用了相同的参数设置.通过对研究区各 井声波时差测井曲线、密度测井曲线的数据统计 和波阻抗特征分析,给定地质模型中不同岩性的 速度和密度值(表2).研究用地震数据在目的层主 频近40 Hz,据此给定雷克子波主频,采样率为 0.1 ms,采用褶积模型进行正演分析.根据研究区 内识别出的4种单河道叠加模式建立地质模型, 对其进行地震正演模拟,建立了4种河道地震响 应模型,将模拟结果与实际情况对比,地震反射结构差异识别单河道期次和切割方法.

有高程差单向迁移式.单河道发育过程中 单一方向迁移形成了复合河道,受沉积过程间 歇影响,各期河道砂体顶面高程差明显.复合河 道的地震正演响应呈连续的强反射,并呈单斜 状趋势,在各期单河道顶面边界位置波形变化 明显,而底界面地震反射连续性则较好,各期单 河道间的高程差异越大,地震反射差异性越明 显,波形结构变化处可以指示出单河道侧向边 界(图 6a),是识别不同期次河道的关键特征.

有高程差切叠式.河道发育过程中沉积间歇或 呈侧向反复迁移造成后期河道冲刷侵蚀掉前期河 道顶部沉积,形成相互叠切的复合河道特征.地震 正演显示,虽然复合河道的强地震反射横向连续性 很强,但内部由于不同期河道砂体顶部高程差导致 波形结构具有微弱的阶梯状变化,其代表了不同期



图4 地震波阻抗与岩性、电性关系图版

Fig.4 Relationship between seismic wave impedance and lithology, electrical properties



图5 阜东5井区头屯河组不同层位曲流型河道分布特征

Fig.5 Characteristics of meandering channels in sand groups with Fudong No.5 well area, Toutunhe Formation a.J₂t₁¹地震 RMS 属性分布图; b.J₂t₁¹砂体厚度等值线图; c.J₂t₁¹复合河道单元分布图; d.J₂t₂²地震 RMS 属性分布图; e.J₂t₂²砂体厚度等值线图; f.J₂t₂²复合河道单元分布图; g.J₂t₃²地震 RMS 属性分布图; h.J₂t₃²砂体厚度等值线图; i.J₂t₃²复合河道单元分布图; g.J₂t₃²地震 RMS 属性分布图; h.J₂t₃²砂体厚度等值线图; i.J₂t₃²复合河道单元分布图; d.J₂t₃²地震 RMS 属性分布图; h.J₂t₃²砂体厚度等值线图; i.J₂t₃² 物体厚度等值线图; i.J₂t₃² 物体厚度等值线图; f.

表2 岩性和波阻抗地震正演参数

Table 2 Lithology and wave impedance seismic forward modeling parameters setting

出赴(沼和洪 和)	速度	密度
石住(仉枳阆相)	(m/s)	(g/cm^2)
泥岩(湖相、泛滥平原)	3 800	2.412
砂岩(分流河道、河口坝、溢岸)	3 500	2.375

次河道边界和接触关系(图 6b).

有高程差双向迁移式.多条河道侧向拼接 形成规模较大的复合河道.其地震正演响应体 现为微弱波浪形态的连续反射特征,在河道叠 置位置,由于厚度减薄或增加而伴随其有波形 明显变化.实际由于不同期河道顶部规模和高 程的差异常表现为平缓连续的内部强反射波形 结构,整体呈下切凹状(图 6c).

平行单向迁移式.各期河道砂体并未形成明显顶部高程差,最后一期活动河道发育演化中被充填.复合河道的地震正演响应横向上连续性较好,波形结构变化不明显(图 6d).

由以上不同期次河道叠置的地震正演响应特 征发现,不同期次的单河道相互复杂叠置使得复合 河道的地震反射表现出单斜状、阶梯状、下切凹状 及振幅横向变化等特征,结合单井曲线特征可对各 单河道的发育期次和叠置关系进行识别判断.

5 井震结合曲流型单一河道叠置样式

在前述地震正演模型基础上,结合高精度地震 资料的情况,开展了河道储层叠置样式及其分布规 模的研究,并提出了单河道型、多河道叠置型和稳 定迁移型等3类曲流型河道叠置样式.

(1)单河道型.单河道型表现为两个单一河道砂体之间存在一定的距离,河道表现为孤立型单一河 道.横向地震剖面显示单河道同相轴呈短轴强反射, 顺物源方向地震均方根振幅属性显示窄条带状特征 十分明显.此类是研究区的重要类型,是目前资料识 别的最小规模河道.多个地震剖面显示单河道型顺 源方向连续性较好(图7),是曲流型河道中分流河道 体系的典型类型,为分流河道逐渐发散形成,其中J₂t₂ 发育程度较高(图5g~5i),单一河道厚度约为8m, 宽度约为250~300m,孤立河道中间为分流间湾泥 岩,导致河道间地震反射差异性十分明显(图7c).

(2)多河道叠置型.多河道叠置型表现为多个



图6 曲流型河道储层叠置样式的地震正演响应特征

Fig.6 Seismic forward response characteristics of superimposed meandering channels



Fig.7 Reflection characteristics of multiple seismic profiles with single channel type 剖面位置见图 5g

单一河道之间复杂的叠置关系,包括了地震正演 显示的有高程差单向迁移式、有高程差切叠式和 有高程差双向迁移式,体现了研究区单一河道的 复杂叠置关系.横向地震剖面显示复合河道同相 轴呈长轴连续强反射,但单一河道具有明显的波 形结构变化、波组增减、同相轴高程差异或振幅 强度差异等(图 8a),顺物源方向地震均方根振幅 属性显示宽条带状特征比较明显(图 8b),复合河 道局部砂体发育程度很高且切叠程度较强,单河 道边界不易区分(图 8b).此类是研究区的较为复 杂叠置的曲流型河道类型,主要为多条分流河道 复杂叠置成因,其中J₂4,J₂43发育程度均较高(图 5d~5f),单一河道厚度约为8~10 m,宽度约为 250~300 m,由3个单一河道复合河道宽度约为 600~1 000 m.顺物源方向,复合河道分叉特征 明显,单一河道中间有时可被分流间湾泥岩或 泛滥平原泥岩分开(图8c~8d).

(3)稳定迁移型.稳定迁移型表现为多个单一 河道之间稳定迁移型叠置关系,形成了连片性分布 的砂体,以地震正演的平行单向迁移式为主,体现 了研究区单一河道稳定侧向迁移,并发散形成河口 坝.横向地震剖面显示复合河道同相轴呈较长轴连 续强反射,但单一河道波形结构、波组和振幅强度 差异不明显等(图9a),顺物源方向地震均方根振幅





属性显示朵状或席状特征比较明显(图 9a),复合河 道局部砂体发育程度很高且切叠程度较强,单期河 道边界不易区分(图 9a).此类是研究区的较为复杂 叠置的曲流型河道类型,主要为多条分流河道复杂 叠置成因,其中 J₂t₁、J₂t₃发育程度均较高(图 5a~ 5c),单一河道厚度约为8~10 m,宽度约为250~ 300 m,由6个单一河道组成的复合砂体宽度约为 1 000~2 000 m.顺物源方向,复合砂体稳定性也 较强,单一河道中间有时可被地震反射较弱的分 流间湾泥岩或泛滥平原泥岩分开(图 9b).

6 水平井部署的验证

阜 009 井 南 区 块 J_2t_2 油 藏 的 含 油 面 积 为 2.45 km²,有效厚度为 4.9 m,有效孔隙度为 17.8%,

含油饱和度为64%,沿河道方向部署了阜东056_H 水平井(图5b~5d)(图10).对阜东056_H井3次实 钻井轨迹分析发现(图10a),在第一次实施钻井过 程中(井轨迹阜东056_H1)(图10c),目的层井轨迹 主要穿过地震反射较强、连续性较好的部位,为多 个河道砂体的叠置部位,未钻遇隔夹层.第二次实 施钻井的井轨迹与第一次相似,显示出较好的砂体 分布(井轨迹阜东056_H2)(图10c).而在第三次实 施钻井过程中(井轨迹阜东056_H3),目的层段井轨 迹向下偏移,处于两组强地震反射中间的振幅属性 的较弱的区域,多次钻遇隔夹层(图10b).第一次为 3 465.0~3 500.0 m 井段,第二次为 3 535.0~ 3 575.0 m 井段,第三次为3 600.0 m 之后(图10b). 第一次与第二次相似均钻遇侧向迁移的河道间泥 岩,第三次钻遇了垂向叠置两期河道间泥岩.单井



图 9 稳定迁移型地震反射特征 Fig.9 Reflection characteristics of seismic with stable migration channel type 剖面位置见图 5a

资料显示与地震解释具有高度的一致性(图10).多 期河道复合叠置引起地震反射结构差异性,波形结 构与振幅强度差异明显,体现了成因砂体叠置样式 的变化.因此加强水平井钻前地震反射特征分析研 究对于后期产能建设和经济效益提高至关重要.

7 结论

(1)研究区头屯河组自下而上呈完整的曲流 河三角洲→曲流型分流河道体系→曲流河的演 化,整体呈曲流型河道体系,砂体结构差异较大. 头一段时期发育曲流河三角洲沉积,分流河道与 河口坝均发育,呈多个朵叶状砂体连片叠置.头二 段演变为曲流型分流河道体系,分流河道发育程 度非常高,砂体呈条带状叠置;头三段为曲流河, 弯曲状河道砂体发育,呈宽条带交错叠置状.

(2)在设置合理的工区地震正演参数后,分4 种类型对研究区曲流型河道开展正演模拟.不同 期次的单河道相互叠置使得复合河道的连续反射 表现出单斜状、阶梯状、下凹状的特征,同时伴随 振幅的横向强弱变化,结合单井测井标定可对各 单河道的发育期次和切割关系进行综合判断.

(3)研究区曲流型河道叠置样式主要分为稳定 连片型、单一河道型和多河道叠置型3大类.单一河 道型地震反射特征主要为振幅中间强,两边弱,连 续性较好的条带状分布,河道宽度约为250m;多河 道叠置型地震反射特征为振幅强弱变化差异大,连 续性较差的叠置条带状分布,河道宽度约为500m; 稳定型主要地震响应特点为波形、振幅强度变化不 明显,连续性较好,范围较大,河道宽度约为





Fig.10 Verification Fudong 056_H horizontal well trajectory by means of meandering reservoir channel superposed pattern FD056 H井轨迹位置见图 5f

1 500 m,呈连片状分布.通过沿河道部署的水 平井所钻遇地层获得的信息,验证了之前对曲 流型河道叠置样式刻画的准确性.

致谢:感谢审稿专家的宝贵意见!

References

- Bridge, J.S., 2003. Rivers and Floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record. Blackwell Publishing, Oxford, 491.
- Bridge, J.S., Tye, R.S., 2000. Interpreting the Dimensions of Ancient Fluvial Channel Bars, Channels and Channel Belts from Wire-Line Logs and Cores. AAPG Bull., 84: 1205-1228.
- He, W.A., Barzgar, E., Feng, W.P., et al., 2021. Reservoirs Patterns and Key Controlling Factors of the Lenghu Oil & Gas Field in the Qaidam Basin, Northwestern China. *Journal of Earth Science*, 32(4): 1011-1021.

- He, W.X., Wu, S.H., Tang, Y.J., et al., 2005. The Architecture Analysis of the Underground Point Bar-Taking Gudao Oilfield as an Example. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(2): 81-86 (in Chinese with English abstract).
- Hu, G.Y., Chen, F., Fan, T.E., et al., 2014. Analysis of Fluvial Facies Compound Sandbody Architecture of the Neogene Minghuazhen Formation of S Oilfield in the Bohai Bay. Acta Sedimentologica Sinica, 32(3):586-592 (in Chinese with English abstract).
- Ji, Y.L., Zhou, Y., Wu, S.H., et al., 2012. Formation Mechanism and Recognizing Method of High Resolution Strata Architecture Boundary in Fluvial Strata. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(2): 8–15 (in Chinese with English abstract).
- Jin, J., Ye, Y., Wen, H.G., et al., 2016. Reservoir Forming Conditions and Controlling Factors Analysis in the

Second Member of Toutunhe Formation in Fudong Slope. *Xinjiang Geology*, 34(2): 257-262 (in Chinese with English abstract).

- Li, B.E., Yin, T.J., Wang, Y.J., et al., 2022. Characteristics of the Reservoir Architecture of the Meandering River under the Conditions of the Thin Well Network in the Bohai Sea. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 41(2): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.L., Ma, S.P., Zhou, L.W., et al., 2022. Main Influencing Factors of Braided-Meander Transition and Coexistence Characteristics and Implications of Ancient Fluvial Sedimentary Environment Reconstruction. *Earth Science* (in Chinese with English abstract). https: //doi. org/ 10.3799/dqkx.2022. 013
- Li, W., Yue, D.L., Hu, G.Y., et al., 2017. Frequency-Segmented Seismic Attribute Optimization and Sandbody Distribution Prediction: An Example in North Block, Qinhuangdao 32 - 6 Oilfield. Oil Geophysical Prospecting, 52(1): 121-130, 17 (in Chinese with English abstract).
- Liang, H.W., Wu, S.H., Mu, L.X., et al., 2013. Fluvial Reservoir Characterization with Phase - Controlled Forward Modeling in the North Block of the Qinhuangdao 32-6 Oilfield, a Case Study. *Oil Geophysical Prospecting*, 48(6): 978-984 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C.Y., Zhang, X.G., Wang, Y.J., et al., 2008. Seismic Reservoir Geology Research and Its Application in Dagang Offshore Area. *Earth Science Frontiers*, 15(1): 140-145 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.P., Lu, S.F., Tang, M.M., et al., 2021. Numerical Simulation of Sedimentary Dynamics to Estuarine Bar under the Coupled Fluvial-Tidal Control. *Earth Science*, 46(8):2944-2957 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S.Z., Yang, Q.Y., 2000. Sedimentary Model, Three-Dimensional Configuration and Heterogeneity Model of Meandering Point DAMS. Acta Sedimentologica Sinica, 18(2):241-247 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y.J., Zhao, Y.C., Xiong, S., et al., 2021. Study on Reservoir Architecture and Reservoir Units of Fluvial Deposits of Dongying Formation in Yuke Oilfield. *Earth Science*, 46(7): 2481-2493 (in Chinese with English abstract).
- Miall, A D., 1985. Architectural-Element Analysis: A New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits. *Earth Science Reviews*, 22(4):261-308.
- Miall, A.D., 1996. The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology.

Springer-Verlag Inc., Heidelberg, 582.

- Miall, A.D., 2013. Fluvial Depositional Systems. Springer-Verlag Inc., Heidelberg, 316.
- Patricia, C., David, D., María, H. M., et al., 2018. From Conventional Outcrop Datasets and Digital Outcrop Models to Flow Simulation in the Pont de Montanyana Point-Bar Deposits (Ypresian, Southern Pyrenees). *Marine and Petroleum Geology*, 94: 19-42. https://doi. org/10.1016/j.marpetgeo.2018.03.040
- Posamentier, H.W., Kolla, V., 2003. Seismic Geomorphology and Stratigraphy of Depositional Elements in Deep-Water Settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73: 367-388.
- Wang, W.F., Yue, D.L., Zhao, J.Y., et al., 2020. Research on Stratigraphic Structure Based on Seismic Forward Modeling: A Case Study of the Third Member of the Yanchang Formation in Heshui Area, Ordos Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 55(2):411-418, 232 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S.H., Yue, D.L., Feng, W.J., et al., 2021. Research Progress of Depositional Architecture of Clastic Systems. *Journal of Palaeogeography*, 23(2): 245-262 (in Chinese with English abstract).
- Yin, S.L., Chen, G.Y., Dai, C.M., et al., 2015. Reservoir Architecture and Remaining Oil Distribution in Mouth Bar—A Case Study on the Braided Delta of Long-Axis Gentle Slope in Zaonan Fault Block of Dagang Oilfield. *Oil & Gas Geology*, 36(4): 630-639 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J.W., Zheng, R.C., Liu, N., et al., 2015. Characterization of Clay Minerals in Toutunhe Formation of Fudong Slope Area in Eastern Junggar Basin. Oil & Gas Geology, 36(6): 945-954 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X.H., 2012. Existing Problems and Sedimentogenesis-Based Methods of Reservoir Characterization during the Middle and Later Periods of Oilfield Development. *Earth Science Frontiers*, 19(2): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Yue, D.L., Hu, G.Y., Li, W., et al., 2018. Meandering Fluvial Reservoir Architecture Characterization Method and Application by Combining Well Logging and Seismic Data: A Case Study of QHD32-6 Oilfield. *China Offshore Oil and Gas*, 30(1): 99-109 (in Chinese with English abstract).
- Yue, D.L., Wu, S.H., Tan, H.Q., et al., 2008. An Anatomy of Paleochannel Reservoir Architecture of Meandering River Reservoir—A Case Study of Guantao Formation, the West 7th Block of Gudong Oilfield.

Earth Science Frontiers, 15(1): 101-109 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, C.M., Zhu, R., Zhao, K., et al., 2017. From End Member to Continuum: Review of Fluvial Facies Model Research. Acta Sedimentologica Sinica, 35(5): 926-944 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R.C., Fu, Z.G., Zhang, Y.Q., et al., 2008. Distribution Character of the Interior Interlayer in Meander Channel Sandbodies of PU I -2 Oil-Bed in Sabei of Daqing Oil Field, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 35(5): 489-495 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.M., Ge, J.W., Zhao, H.C., et al., 2017. Development of Shelf-Edge Delta Researches and Typical Case Analyses. Acta Sedimentologica Sinica, 35(5): 945– 957 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, H.L., Wang, W., Liang, Q.S., et al., 2017. Seismic Expression of Delta to Deep-Lake Transition and Its Control on Lithology, Total Organic Content, Brittleness, and Shale-Gas Sweet Spots in Triassic Yanchang Formation, Southern Ordos Basin, China. Interpretation—A Journal of Subsurface Characterization, 5(2): 1—14. https://doi.org/10.1190/INT-2016-0095.1
- Zeng, H.L., Zhu, X.M., Zhu, R.K., et al., 2012. Guidelines for Seismic Sedimentologic Study in Non-Marine Postrift Basins. *Petroleum Exploration and Development*, 39(3): 295-304. https://doi.org/10.1016/S1876-3804(12)60045-7
- Zeng, Z.W., Zhu, H.T., Zeng, H.L., et al., 2021. Seismic Sedimentology Analysis of Fluvial-Deltaic Systems in a Complex Strike-Slip Fault Zone, Bohai Bay Basin, China: Implications for Reservoir Prediction. Journal of Petroleum Science and Engineering. https://doi.org/ 10.1016/j.petrol.2021.109290
- Zhang, T., Zhang, X. G., Lin, C. Y., et al., 2015. Seismic Sedimentology Interpretation Method of Meandering Fluvial Reservoir: From Model to Real Data. *Journal of Earth Science*, 26(4): 598-606.

附中文参考文献

- 何文祥, 吴胜和, 唐义疆, 等, 2005. 地下点坝砂体内部构型 分析: 以孤岛油田为例. 矿物岩石, 25(2): 81-86.
- 胡光义,陈飞,范廷恩,等,2014. 渤海海域S油田新近系明
 化镇组河流相复合砂体叠置样式分析. 沉积学报,32
 (3): 586-592.
- 纪友亮,周勇,吴胜和,等,2012.河流相地层高精度地层构 型界面形成机制及识别方法.中国石油大学学报(自然 科学版),36(2):8-15.

- 靳军,叶勇,文华国,等,2016.阜东斜坡带头屯河组二段成 藏条件及控制因素研究.新疆地质,34(2):257-262.
- 李冰娥, 尹太举, 王杨君, 2022. 渤海海域稀井网条件下曲 流河储层构型表征.大庆石油地质与开发, 41(2): 1-10.
- 李胜利,马水平,周练武,等,2022. 辫曲转换与共存的主要影 响因素及对古代河流沉积环境恢复的启示.地球科学.
- 李伟, 岳大力, 胡光义, 等, 2017. 分频段地震属性优选及砂 体预测方法: 秦皇岛 32-6 油田北区实例. 石油地球物理 勘探, 52(1): 121-130, 17.
- 梁宏伟, 吴胜和, 穆龙新, 等, 2013. 应用相控正演模拟方法 精细描述河流相储层: 秦皇岛 32-6 油田北区实例. 石油 地球物理勘探, 48(6): 978-984, 1015.
- 林承焰,张宪国,王友净,等,2008. 地震油藏地质研究及其 在大港滩海地区的应用. 地学前缘,15(1):140-145.
- 刘雪萍, 卢双舫, 唐明明, 等, 2021. 河流-潮汐耦合控制下 河口湾坝体沉积动力学数值模拟. 地球科学, 46(8): 2944-2957.
- 马世忠,杨清彦,2000.曲流点坝沉积模式、三维构形及其非 均质模型.沉积学报,18(2):241-247.
- 孟玉净,赵彦超,熊山,等,2021.榆科油田东营组河流相储 层构型与油藏单元研究.地球科学,46(7):2481-2493.
- 王文枫,岳大力,赵继勇,等,2020.利用地震正演模拟方法 研究地层结构:以鄂尔多斯盆地合水地区延长组三段 为例.石油地球物理勘探,55(2):411-418,232.
- 吴胜和,岳大力,冯文杰,等,2021.碎屑岩沉积构型研究若 干进展.古地理学报,23(2):245-262.
- 印森林,陈恭洋,戴春明,等,2015.河口坝内部储层构型及 剩余油分布特征:以大港油田枣南断块长轴缓坡辫状 河三角洲为例.石油与天然气地质,36(4):630-639.
- 于景维,郑荣才,柳妮,等,2015.准噶尔盆地东部阜东斜坡 带头屯河组粘土矿物特征.石油与天然气地质,36(6): 945-954.
- 于兴河,2012.油田开发中后期储层面临的问题与基于沉积 成因的地质表征方法.地学前缘,19(2):1-14.
- 岳大力, 胡光义, 李伟, 等, 2018. 井震结合的曲流河储层构型表征方法及其应用——以秦皇岛 32-6 油田为例.中国海上油气, 30(1): 99-109.
- 岳大力,吴胜和,谭河清,等,2008.曲流河古河道储层构型 精细解剖:以孤东油田七区西馆陶组为例.地学前缘, 15(1):101-109.
- 张昌民,朱锐,赵康,等,2017.从端点走向连续:河流沉积 模式研究进展述评.沉积学报,35(5):926-944.
- 郑荣才, 付志国, 张永庆, 等, 2008. 大庆萨北开发区下白垩 统青山口组葡I-2油层曲流河边滩砂体内部建筑结 构. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(5):489-495.
- 朱筱敏, 葛家旺, 赵宏超, 等, 2017. 陆架边缘三角洲研究进 展及实例分析. 沉积学报, 35(5): 945-957.