



地学前缘  
Earth Science Frontiers  
ISSN 1005-2321, CN 11-3370/P

## 《地学前缘》网络首发论文

题目: 曲流河沉积构型研究现状与展望  
作者: 岳大力, 李伟, 王武荣, 吴胜和, 李洪辉, 刘警阳, 刘磊, 徐梓墨, 林津, 吴光圳  
DOI: 10.13745/j.esf.sf.2025.8.57  
收稿日期: 2025-08-15  
网络首发日期: 2025-08-20  
引用格式: 岳大力, 李伟, 王武荣, 吴胜和, 李洪辉, 刘警阳, 刘磊, 徐梓墨, 林津, 吴光圳. 曲流河沉积构型研究现状与展望[J/OL]. 地学前缘. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.8.57>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2025.8.57

# 曲流河沉积构型研究现状与展望

岳大力<sup>1,2,3</sup>, 李伟<sup>1,2,\*</sup>, 王武荣<sup>1,2</sup>, 吴胜和<sup>1,2,3</sup>, 李洪辉<sup>1,2</sup>, 刘警阳<sup>1,2</sup>, 刘磊<sup>1,2,3</sup>, 徐梓墨<sup>1,2</sup>, 林津<sup>1,2</sup>, 吴光圳<sup>1,2</sup>

1 中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学（北京）地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油大学（北京）人工智能学院, 北京 102249

YUE Dali<sup>1,2,3</sup>, LI Wei<sup>1,2,\*</sup>, WANG Wurong<sup>1,2</sup>, WU Shenghe<sup>1,2,3</sup>, LI Honghui<sup>1,2</sup>, LIU Jingyang<sup>1,2</sup>, LIU Lei<sup>1,2,3</sup>, XU Zimo<sup>1,2</sup>, LIN Jin<sup>1,2</sup>, WU Guangzhen<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. College of Artificial Intelligence, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

YUE Dali, LI Wei, WANG Wurong, et al. Advances and Prospects of Meandering River Depositional Architecture Research. *Earth Science Frontiers*, 2025

**Abstract:** Fluvial facies constitute one of the major reservoir types globally, accounting for 42.6% of the proven and developed reserves in terrestrial clastic reservoirs in China, with meandering rivers representing important components. Multi-scale sedimentary architecture characterization plays a critical role in unlocking hydrocarbon potential in high water-cut oilfields and facilitating the large-scale, efficient development of unconventional reservoirs. Over the past three decades, significant progress has been made in understanding meandering river sedimentary architecture models, improving characterization and modelling techniques, and elucidating the role of reservoir architecture in oilfield development. (1) Based on prototype model studies of outcrop successions and modern sediments, the depositional evolution mechanisms of channels and their internal architectural elements have been further elucidated, including establishing qualitative and quantitative architectural models for channel belts, point bars, and lateral accretion sandbodies. (2) Various architectural characterization methods have been developed, including multi-well correlation and intelligent well-to-seismic integration. Additionally, reservoir architecture modelling approaches have been explored using multiple-point statistics, bounding surfaces of single sandbody architecture, and artificial intelligence (AI). (3) The multi-scale architectures of meandering river successions provide important guidance for development of offshore oilfields with large well spacing, enhancing remaining hydrocarbon recovery in high water-cut oilfields, and optimizing horizontal well placement and trajectory design in unconventional reservoirs. Future research should deepen the mechanistic understanding of architectural models across different meandering river types and advance intelligent characterization and modelling techniques for meandering river sedimentary architectures, integrating geological knowledge with well-seismic data. This will offer theoretical and technical support for the efficient development of oil and gas fields.

**Keywords:** meandering river; sedimentary architecture; well-seismic integration; geological modelling; artificial intelligence

**摘要:** 河流相是世界范围内十分重要的储层类型之一, 占我国已探明和投入开发的陆源碎屑岩储层储量的 42.6%, 曲流河是已开发的河流相储层的主体, 多级次沉积构型表征是高含水油气田剩余油气挖潜和非常规油气藏规模效益开发的关键。近

收稿日期: 2025-08-15; 修回日期: 2025-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42272186, 41872107, 42472179, 42302128, 42202109) .

作者简介: 岳大力 (1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油气田开发地质相关教学与科研工作。E-mail: yuedali@cup.edu.cn

\*通信作者简介: 李伟 (1990—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事油气田开发地质相关教学与科研工作。E-mail: wei\_li@cup.edu.cn

30 多年来,在曲流河沉积构型模式、构型表征与建模方法、构型在油气田开发中的应用等方面取得了重要进展:(1)基于野外露头、现代沉积等原型模型研究,深化了河道及内部构型单元沉积演化机理,建立了河道带、点坝及侧积体分布样式及定量构型模式;(2)形成了多井模式拟合、智能化井震融合等构型表征方法,探索了多点地质统计、基于单砂体构型界面和人工智能等构型建模方法;(3)分析了曲流河多级次构型对海上大井距油田开发选区、高含水油气田剩余油气挖潜、非常规油气藏水平井部署及轨迹优化等方面的重要指导意义。未来有必要对不同类型的曲流河构型模式与形成机理、地质知识与井震数据双驱动的曲流河沉积构型智能表征与建模技术等进行更为深入研究,为油气田高效开发提供理论指导与技术支持。

**关键词:** 曲流河; 沉积构型; 井震结合; 地质建模; 人工智能

**中图分类号:** P618.13 **文献标志码:** A

## 0 引言

河流相储层在全球各大油气田广泛发育,如加拿大 Alberta 盆地、苏丹 Melut 盆地、马来西亚盆地<sup>[1]</sup>、尼日利亚盆地<sup>[2]</sup>、美国德克萨斯州<sup>[3]</sup>等地区均钻遇河流相储层。相较于全球,我国以陆相碎屑岩储层为主,河流相储层占比高,是我国石油资源的主要载体,占总开发储量的 42.6%<sup>[4-5]</sup>。曲流河是已开发的河流相储层的主体,由于河流的持续性迁移与频繁改道,多级次储层内部结构复杂、多样<sup>[6-8]</sup>,是控制剩余油分布的关键因素<sup>[9-11]</sup>。

曲流河的构型研究由来已久<sup>[12]</sup>,Allen 等<sup>[13]</sup>学者率先提出了分级次描述河流沉积内部结构的理念,继而 Miall<sup>[8,14]</sup>继承了并发展了该学术理念,系统阐述了河流相储层构型的概念、理论与研究方法。此后,众多学者针对露头剖面、现代沉积探槽及探地雷达对多级次曲流河沉积构型样式进行了系统描述与研究<sup>[15-18]</sup>。国内学者借助老油田密井网资料和高品质三维地震资料对地下曲流河储层进行精细解剖,进一步推动了曲流河三维构型模式的发展,特别是针对不同实例建立了曲流带及内部点坝的三维构型模型<sup>[11,19-22]</sup>。随探地雷达技术在沉积学领域应用,曲流河构型原型模型研究取得快速发展,逐步建立了更精细、更可靠的三维沉积构型模式<sup>[18,23-24]</sup>。

在河流相储层构型理论指导下,针对地下油气藏的曲流河储层构型表征取得丰硕成果<sup>[20-21,25-27]</sup>。针对老油田密井网区域形成了“层次约束、多井模式拟合”的曲流河构型表征方法<sup>[11,21,25-26,28-29]</sup>;针对三维地震覆盖区域形成了地震沉积学与地貌学相结合沉积相分析方法<sup>[28,30-33]</sup>,在三维地震与钻井资料均比较齐全的地区形成了地震构型分析、智能化井震结合的构型精细表征方法<sup>[5,7,34-38]</sup>。

在曲流河三维构型建模方面,基于像元和基于目标的建模方法作为早期提出的建模思路,目前已发展得较为成熟<sup>[39-40]</sup>。其中,多点统计学方法在河道带级次建模中的应用已趋于成熟<sup>[41-42]</sup>,在点坝及其内部构型级次建模方面也取得了显著进展<sup>[19,43]</sup>。虽然基于沉积过程的建模理念提出时间较早,但由于条件数据拟合存在较大困难,目前仍处于探索阶段<sup>[44-46]</sup>。近年来,随着人工智能技术的发展,基于深度学习的建模方法逐渐成为研究热点,目前已成为河流相构型建模领域的重要探索方向<sup>[47-50]</sup>。

## 1 曲流河沉积构型模式

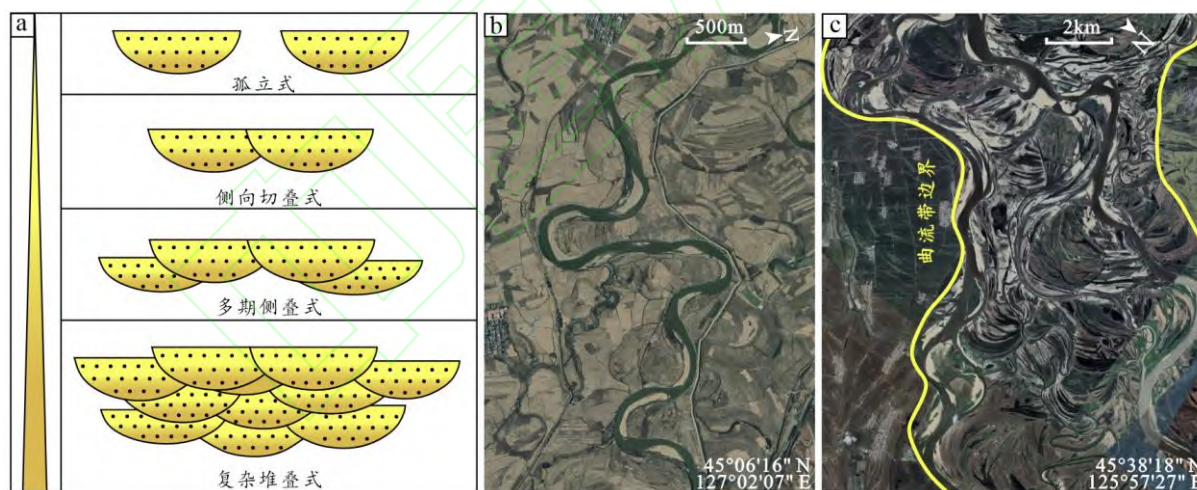
构型这一概念主要从层次结构的角度对地质体进行研究。层序地层的层次结构称为层序构型,对应于经典层序地层学的 1~6 级层序单元;沉积体层次结构本质上为相构型(也称为沉积构型),对应于 Miall (1988) 的 5~3 级构型要素(architectural elements);反映沉积底形的层次结构为层理构型,为 Miall (1988, 1996) 分级系统中的 2~0 级构型界面限定的单元。沉积构型研究隶属于小尺度古地理与沉积学研究范畴,当成岩作用和天然裂缝形成作用影响较小时沉积构型主要为储层构型。储层构型(reservoir architecture),也称为储层建筑结构,是指不同级次储集单元及隔夹层的形态、规模、方向及其叠置关

系。针对曲流河而言，一般分为两大类构型单元，即河道（channel）与溢岸（overbank）。曲流河的河道构型实质为曲流带，相当于河床亚相，内部由多个点坝组成；溢岸构型单元包括天然堤、决口水道、决口扇、河漫滩、河漫湖泊、河漫沼泽以及废弃河道等<sup>[51]</sup>。下面重点从河道带、点坝及侧积体三个级次阐述曲流河河道沉积构型模式。

## 1.1 河道带

曲流河的河道带指由活动河道迁移、摆动、拼叠形成的河道复合体，相当于吴胜和等<sup>[51]</sup>的 7 级构型单元，即 Miall<sup>[8,14]</sup>的 5 级构型单元，根据河道的拼叠关系与复杂程度可分为简单曲流带和复杂曲流带<sup>[35]</sup>（图 1）。简单曲流带通常由一条主河道（活动河道）摆动形成，河道仅在局部发生截弯取直或改道现象<sup>[21,52]</sup>（图 1b）；复杂曲流带是河道多次迁移、频繁改道的产物，活动河道的迁移与改道导致河道彼此切割、拼叠，形成多条河道带叠合的复杂河道带<sup>[16,18]</sup>（图 1c）。

大量研究实例表明，河道砂体的叠置关系（河道带复杂程度）受多种沉积因素控制，如可容空间与物源供给（简称 A/S，指示基准面变升降）、古气候、古地貌及构造运动、物源区特征等<sup>[53-58]</sup>。其中，构造运动与古地貌对河流的影响主要体现在河床坡度方面<sup>[59]</sup>，气候的影响主要体现在流量、植被与输沙量等方面，物源区的影响主要体现在携沙与河床滞留沉积等方面<sup>[60-61]</sup>。河床坡度、流量（水深）、植被与输沙量均是影响基准面升降（A/S）的重要因素，即 A/S 是多种因素综合作用的结果，在一定程度上反映了构造、气候与物源区特征等因素<sup>[53,55]</sup>，因此大量学者深入探讨并总结了不同 A/S 条件下的河道叠置关系<sup>[53,55,57,62]</sup>。低 A/S 时，基准面处于低位，可容空间小且物源供给相对充足，河道摆动幅度大、改道频率高，易形成复杂堆叠式河道，河道在卫星图片上相互交错，呈宽带状（局部连片状）分布；随着 A/S 增大、基准面上升，可容空间变大，河道摆动与改道程度降低，河道间的叠置关系趋于简单，河道由复杂堆叠式逐渐过渡为多层侧叠式、单层侧向切叠式、孤立式（图 1a），河道带在卫星图片上清晰可见（图 1）。



a—河道砂体剖面叠合模式；b—简单曲流带卫星照片；c—复杂曲流带卫星照片。

图 1 曲流河河道砂体叠合模式与不同类型的曲流带卫星照片

Fig. 1 channel sandbody stacking patterns and satellite images of different meander belt types in meandering rivers

## 1.2 点坝与废弃河道

### 1.2.1 点坝形成演化与组合样式

点坝是曲流河河道砂体的主要组成部分，成因与横向环流（二次流）密切相关，即水流携带的泥沙受横向环流控制在河道凸岸一侧加积形成点坝<sup>[15,18,63-64]</sup>。点坝是多次、持续性洪水事件的结果：洪水期，水位上升，主流在凹岸形成雍水现象，横向环流作用增强，河流两岸的输沙平衡被打破，导致水流在凹岸侵蚀、粗

粒泥沙在凸岸沉积；枯水期，曲流深泓紧靠凹岸，水位低、水流作用弱，几乎不发生明显的凹岸侵蚀与凸岸沉积现象<sup>[15,18]</sup>。随着曲流河道弯曲度逐渐增大，河道最终截弯取直或局部改道，单一点坝沉积结束；同时，被废弃的活动河道逐渐被细粒充填，形成废弃河道<sup>[9,17,29]</sup>。

点坝的迁移方式反映了其沉积演化机制与内部构型结构，是区分点坝类型的重要特征<sup>[65-66]</sup>。根据迁移方式，将点坝细分为横向扩张型、顺流迁移型、“扩张+顺流迁移型”、“顺流+扩张型”4类<sup>[62,66-67]</sup>。横向扩张型点坝主要受控于点坝的侧向迁移，平面上呈现河流弯曲度逐渐增大的态势，点坝两侧对称分布（图 2a）；顺流迁移型点坝主要受控于河道的顺流迁移，该类型点坝一般是曲流河横向迁移受限的结果（图 2b）；当点坝同时受控于侧向迁移与顺流迁移时，则形成平面上呈现一定“旋转”形态点坝（图 2c, d），即以侧向迁移为主的“扩张+顺流迁移型”与以顺流型为主的“顺流+扩张型”点坝<sup>[18,53,62,66-67]</sup>。实际上，多数点坝是侧向迁移与顺流迁移共同作用的产物。

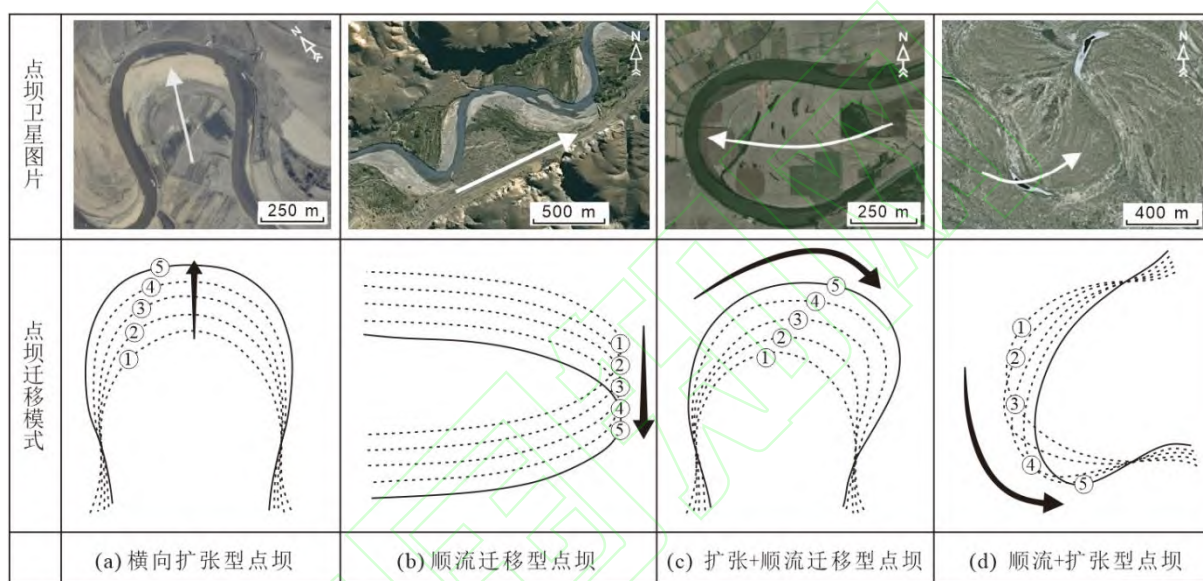


图 2 曲流河点坝四种迁移方式及典型卫星照片

（据文献[62,66]修改）

Fig. 2 four types of point bar migration in meandering rivers and typical satellite images. Modified after [62,66].

由于河道的摆动与改道，前期沉积的点坝可被后期河道冲刷、切割，导致多期点坝相互拼叠形成复合点坝（图 3）。曲流河点坝的分布与拼叠样式复杂、多样，直接受控于河道的迁移方式、摆动速度与改道频率等因素<sup>[67]</sup>。影响河道迁移与摆动的因素众多，如古构造、古气候、母岩区物源特征、基准面升降等<sup>[68]</sup>。如前文所述，A/S 在为多种沉积因素综合作用的结果，一定程度上体现了古气候、古构造与物源区特征等因素，因此有学者将 A/S 作为控制点坝组合样式主要因素<sup>[68]</sup>。综合河流相储层与现代河流实例研究表明，随着基准面上升，可容空间增大，点坝逐渐由鳞片状分布向点状演变；在基准面较低时，可容纳空间小，物源供给充足，曲流河道迁移摆动频率高，这使得点坝砂体分布广泛且叠置关系复杂；基准面较高时，可容空间大，物源供给不充足，曲流河摆动幅度减弱，平面上表现为点状<sup>[69]</sup>（图 3）。

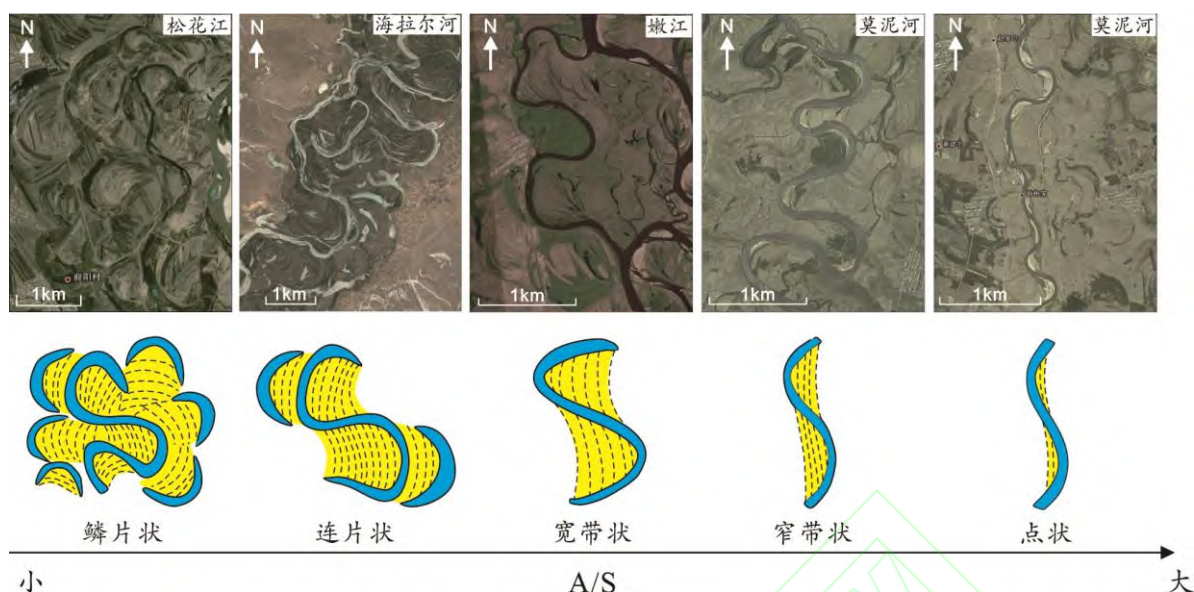


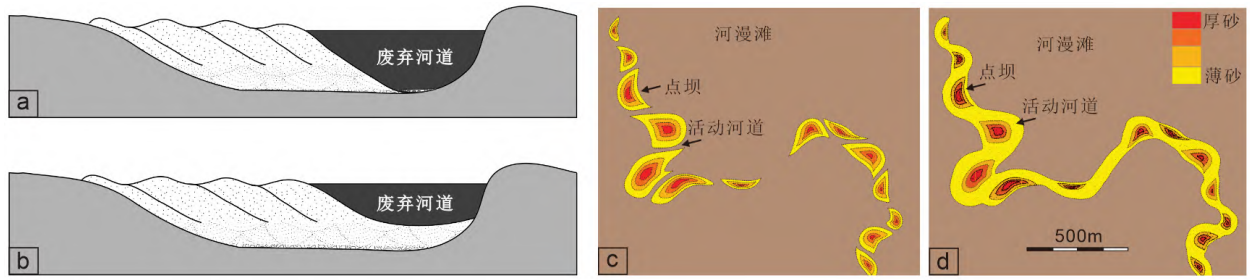
图 3 曲流河点坝组合样式卫星照片及模式图  
(据文献[69]修改)

Fig. 3 satellite images and schematic diagrams of point bar architectural styles in meandering rivers. Modified after [69].

### 1.2.2 废弃河道及其充填样式

当河道改道或发生截弯取直时，新河道形成、旧河道废弃，旧河道充填细粒沉积物从而形成废弃河道。依据废弃河道泥质充填深度，可分为两种：泥质全充填（图 4a）与泥质半充填（图 4b）<sup>[16]</sup>。废弃河道的充填深度与沉积物的沉积与搬运方式密切相关。部分活动河道内部二次流（特别是横向环流）作用显著、以侧向加积为主，仅在活动河道底部发育少量河床滞留沉积或相对粗粒沉积；此时活动河道废弃后，整个活动河道全部被细粒沉积充填形成全充填型废弃河道（图 4a）<sup>[16-17]</sup>。也有部分活动河道，横向缓流作用较弱，侧向加积与顺流加积并存，即在活动河道下部沉积一定厚度的粗粒沉积，如砂质沉积；此类活动河道废弃时仅在河道中上部充填细粒沉积（图 4b）<sup>[18]</sup>。两种充填类型的点坝砂体连通性具有显著差异，全充填型废弃河道形成的点坝孤立分布（图 4c），半充填型废弃河道形成的点坝底部连通，形成“半连通”体（图 4d）。

依据河道的废弃过程，又可分为突弃型与渐弃型废弃河道<sup>[18]</sup>。曲流环的截弯取直现象可分颈项取直和串沟截直，颈项取直是曲流环弯曲度极大时，颈口处变窄，水流在颈口处冲刷形成一条新河道<sup>[70]</sup>，即原有活动河道被突然废弃，形成突弃型废弃河道。此类型废弃河道内部以泥质充填为主，测井曲线靠近泥岩基线。串沟截直是曲流河弯曲度中等、曲流环尚未形成颈口时，洪水期水流自凸岸冲出一条新河道。串沟截直根据取直位置和水流特征可分为溯源切滩模式（head-cut incision）、主流顶冲模式（embayment incision）、中部河道坝模式（mid-channel bar）和串沟冲刷模式（scroll-slough）<sup>[67]</sup>。其中，串沟冲刷模式在串沟截直中十分常见，是当某一次洪水漫过曲流环后，水流在曲流环内侧冲刷形成串沟；但一次洪水不足以形成新河道，因此第二次洪水来临时，第一次的串沟复活，如此往复，经过多期洪水作用最终形成新河道实现取直，此时形成渐弃型废弃河道。该废弃河道的充填物常见泥砂（或粉砂）互层，测井曲线为塔松形<sup>[17-18,25]</sup>。此外，河道改道导致某段河道被完全废弃，形成突弃型废弃河道；河道分叉导致某段河道逐渐废弃，形成渐弃型废弃河道<sup>[17]</sup>。



a—泥质全充填型废弃河道剖面图；b—泥质半充填型废弃河道剖面图；  
c—泥质全充填型废弃河道所在曲流带砂体厚度平面图；d—泥质半充填型废弃河道所在曲流带砂体厚度平面图。

图4 不同充填类型的废弃河道模式图

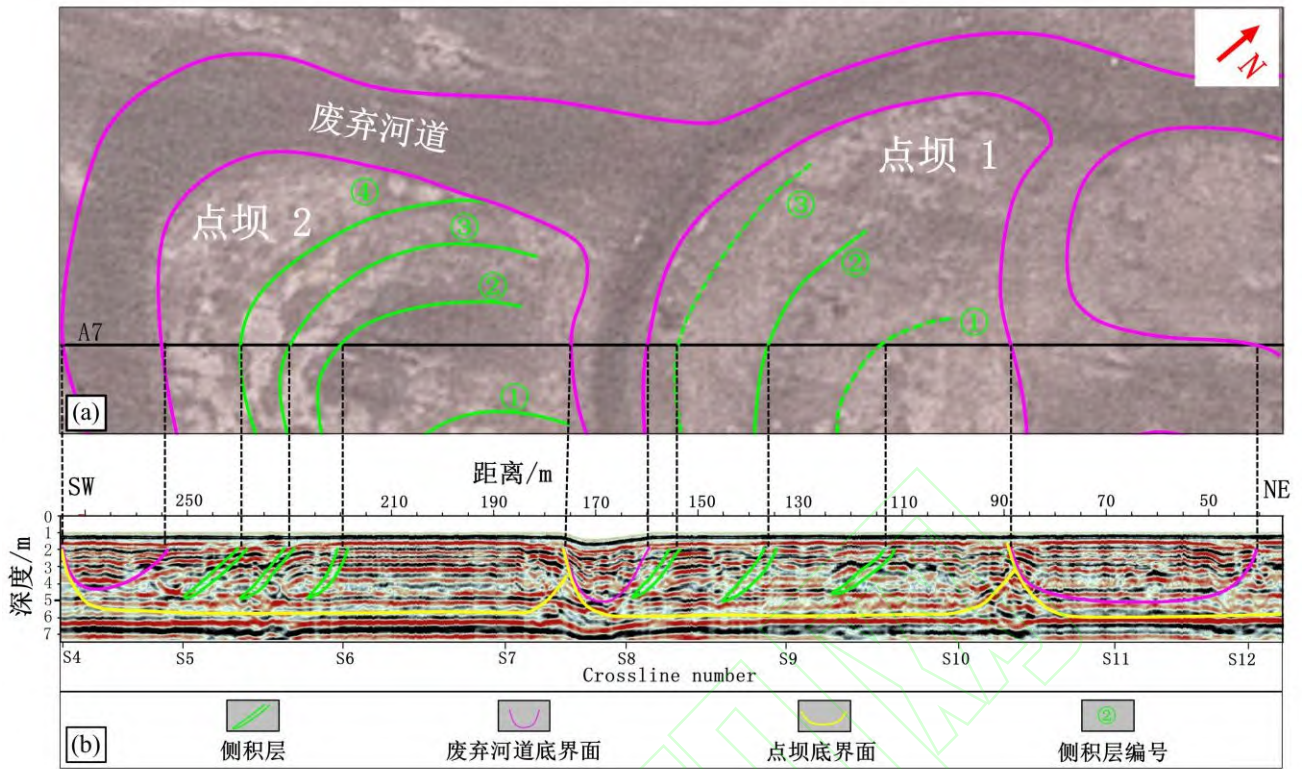
(据文献[17]修改)

Fig. 4 schematic diagrams of abandoned channels with different fill types. Modified after [17].

### 1.3 点坝内部侧积体与侧积层

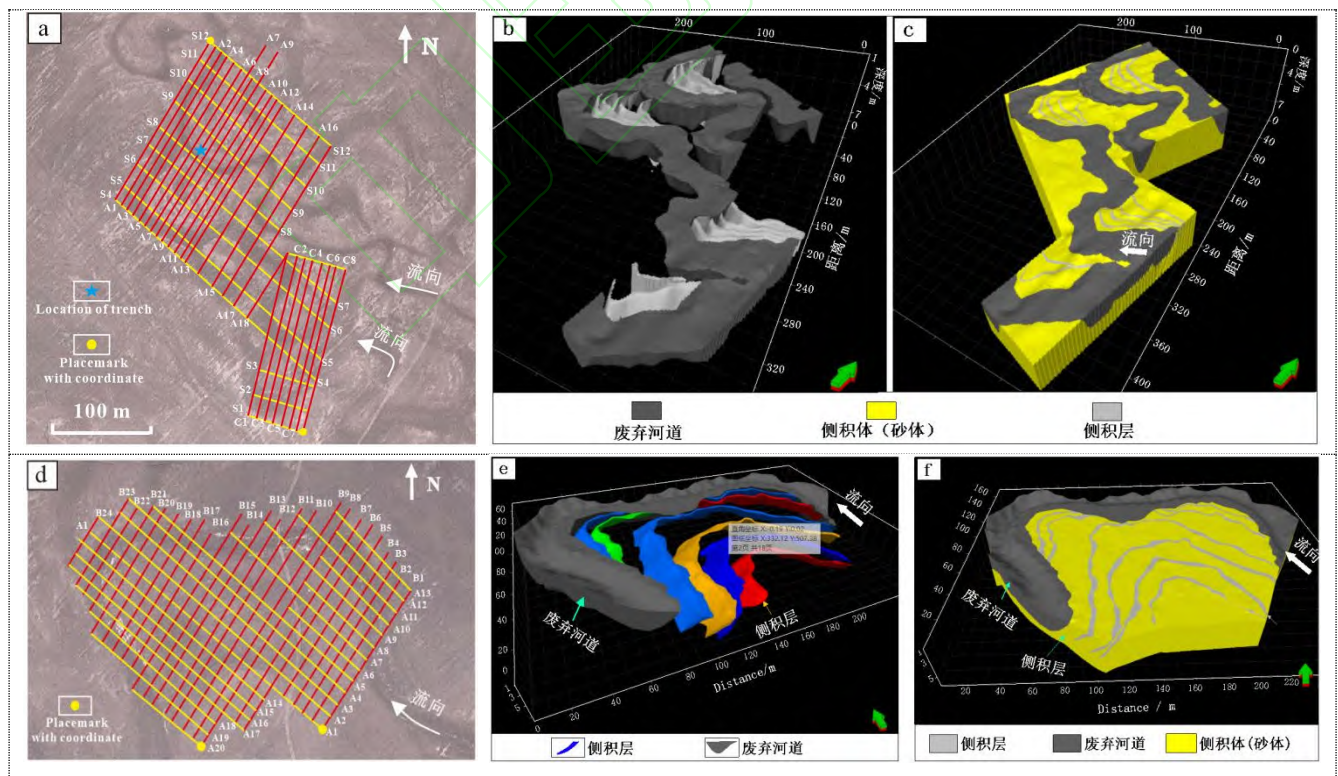
曲流河点坝内部由一系列定向排列的侧积体与侧积层（侧积泥岩）组成（图5），属于 Maill（1985）提出的3级构型单元。笔者综合探槽、高精度探地雷达、卫星照片对海拉尔盆地呼伦湖北岸海拉尔河支流不同类型的点坝内部构型进行精细表征与建模<sup>[18]</sup>。相对于侧积体而言，废弃河道及侧积层多以细粒沉积为主，颜色较暗，卫星照片能够准确识别废弃河道及部分侧积层的地表出露位置（图5a）。根据雷达波形响应特征（同相轴倾斜、变形、错断等），结合卫星照片识别的废弃河道及侧积层位置，识别点坝、废弃河道与内部侧积层（图5b）。分别基于38条和44条探地雷达剖面解析，建立了该研究区鳞片状点坝（图6a）与牛角状复合点坝的三维高精度构型模型（图6b）。构型模型结果表明，对于同一个侧积层，靠近点坝中轴线的侧积层倾角大于两侧；平行于河道侧向迁移的方向，侧积层倾角呈现先减小后增大的特点；在同一个曲流带内部，侧积层的倾角随着点坝规模的增大而减小<sup>[18]</sup>。

基于上述点坝构型解剖与建模实例分析了点坝的形成过程，建立了点坝内部构型模式（图7）。在洪水泛滥过程中，随着洪峰的跌落，使大量搬运来的泥沙急剧堆积，形成侧积体，随后在悬移质供给充足的条件下“落淤”形成侧积层；此过程循环往复直到河道废弃，形成完整的点坝（图7a）<sup>[15,18]</sup>。一般认为，随着点坝发育，侧积层的倾角逐渐变缓<sup>[15]</sup>；但基于探地雷达建立的侧积层三维原型模型表明，对于发育成熟的点坝，侧积层倾角先减小后略有增大（图7b）<sup>[18]</sup>。其成因解释如下，对于顺直的河段，活动河道较窄且横截面呈对称状，河道凸岸的坡度较大，故形成的侧积层倾角亦较大；随着河流不断向凹岸侵蚀凸岸堆积，使得原本对称的河道变成凹岸陡而凸岸缓不对状，故此时形成的侧积层倾角变缓；当点坝发育到后期时，河道弯曲度大、阻力大，导致水流能量减弱，河道凹岸一侧的速度降低、河道的不对称性减小，侧积层倾角随之增大<sup>[18]</sup>，该侧积层倾角变化规律及解释机理与现代河流的观察结果一致<sup>[71]</sup>。



a一点坝与废弃河道卫星照片；b一点坝及废弃河道探地雷达响应剖面。  
图5 海拉尔盆地呼伦湖北岸海拉尔河支流点坝、废弃河道及侧积层  
(据文献[18]修改)

Fig. 5 Point bar, abandoned channel, and lateral accretion shale drapes along a tributary of the Hailar River, northern shore of Hulun Lake, Hailar Basin. Modified after [18].



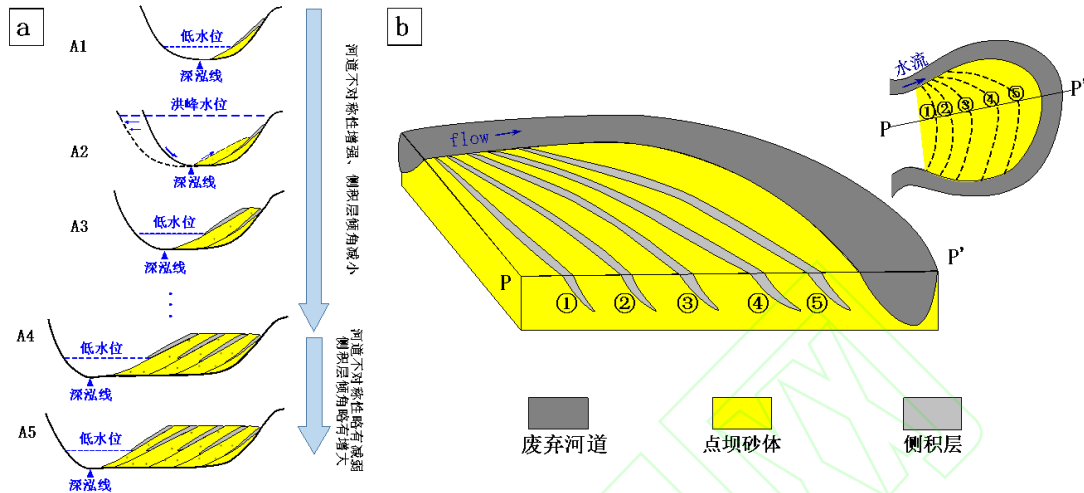
a—鳞片状点坝卫星照片与雷达测网；b—鳞片状点坝的废弃河道与侧积层空间分布；c—鳞片状点坝内部三维模型；

d—牛角状复合点坝卫星照片与雷达测网；e—牛角状复合点坝的废弃河道与侧积层空间分布；f—牛角状复合点坝内部三维模型。

图 6 基于探地雷达的点坝内部三维构型原型模型

(据文献 [18] 修改)

Fig. 6 Prototype model of the three-dimensional internal architecture of a point bar based on ground-penetrating radar. Modified after [18].



a—侧积层与侧积体形成演化过程；b—侧积层与侧积体三维构型模式

图 7 曲流河点坝形成过程及其内部构型模式

(据文献 [18] 修改)

Fig. 7 Formation process of the point bar in the meandering belt and inner architectural model. Modified after [18].

#### 1.4 曲流河定量构型模式

针对曲流河的定量沉积模式研究由来已久(表 1)。早在 20 世纪 60 年代, Leopold 和 Wolman 等人通过对现代曲流测量, 初步建立了曲流河平面几何参数之间的关系, 包括河道宽度与曲流波长、曲率半径、振幅以及流量之间的关系<sup>[72]</sup>。曲流弯曲度对河道带与点坝几何形态具有重要的控制作用, 故针对不同弯曲度建立了点坝定量构型模式<sup>[73-74]</sup>, 特别是基于露头剖面与现代沉积勘测数据建立了活动河道深度与宽度、活动河道宽度与简单曲流带宽度之间的经验公式<sup>[74-75]</sup>。2000 年以来, 卫星影像越来越受到地质工作者的青睐, 对于平面几何参数的研究也不限于曲流带的级次, 而是向着更精细化方向发展, 建立点坝不同几何参数之间的定量关系<sup>[21,35,76]</sup>, 例如点坝长度(跨度)与河道满岸宽度的关系<sup>[35]</sup>。之后, 有学者<sup>[6]</sup>对前人研究进行系统梳理, 总结了曲流河点坝、活动河道、曲流带之间的定量关系。此外, 也有学者<sup>[77-78]</sup>研究单一交错层系、沙丘高度与古水深的关系, 认为河流的古水深与沙丘高度、单一交错层系的厚度密切相关, 并建立了三者之间的定量关系(表 1), 可为古水深或活动河道深度的估算提供指导。

对于深埋地下的曲流河储层构型研究而言, 表征地质体的几何参数可以分类两类, 厚度参数与平面几何参数, 其中厚度参数可以通过井数据获取, 是定量构型模式应用的基础<sup>[21]</sup>。早期针对露头剖面和现代沉积探槽的研究, 获取了较为丰富的厚度参数<sup>[72,74-75]</sup>; 随着卫星照片或航拍技术的发展, 曲流河及内部点坝的平面几何参数定量关系已得到极大发展<sup>[73,76]</sup>。厚度参数与平面几何参数间的定量关系为地下储层构型解剖提供了丰富的经验公式(表 1)。需注意, 沉积过程中压实作用是不可忽略的, 针对河道深度, 通常要经过去压实校正才能建立起古今砂体的关系, 才能进一步建立河道及点坝定量构型模式<sup>[21,79-80]</sup>。

表 1 常见曲流河定量构型模式

Table1 Common quantitative architecture models of meandering rivers

| 经验公式                                                                         | 符号含义                                                     | 相关系数 (R) | 文献来源 |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------|------|
| $W = 6.8h^{1.54}$                                                            | $W$ : 满岸宽度, $h$ : 满岸厚度                                   |          | [74] |
| $W^* = 2/3W$                                                                 | $W$ : 满岸宽度, $W^*$ : 单一测积体宽度                              |          | [13] |
| $D = D^* \times 0.585/0.9$                                                   | $D$ : 河道满岸深度, $D^*$ : 砂体平均厚度                             |          | [80] |
| $\lambda_m = 10.9W^{1.01}$<br>$\lambda_m = 4.7rm^{0.98}$<br>$A = 2.7W^{1.1}$ | $W$ : 满岸宽度, $\lambda_m$ : 曲流波长, $rm$ : 曲率半径,<br>$A$ : 振幅 |          | [72] |
| $W_m = 7.44W^{1.01}$                                                         | $W$ : 活动河道宽度, $W_m$ 单一曲流带宽度                              | 0.93     | [75] |
| $L = 0.8531 \times \ln W + 2.4531$                                           | $W$ : 满岸宽度, $L$ : 点坝长度                                   | 0.93     | [21] |
| $W_d = 3.6319W + 40.612$                                                     | $W_d$ : 点坝跨度, $W$ : 满岸宽度                                 | 0.98     | [34] |
| $W_p = 2.42L + 622.41$                                                       | $W_p$ : 点坝宽度, $L$ : 点坝长度                                 | 0.94     | [76] |
| $h_m = 2.9S_m$<br>$d/h_m = 6 \sim 10$                                        | $h_m$ : 沙丘高度, $S_m$ : 交错层组厚度, $d$ : 水深                   |          | [78] |
| $W_{PB} = 1.33W_m^{0.90}$                                                    | $W_m$ : 曲流带宽度, $W_{PB}$ : 点坝宽度                           | 0.84     | [6]  |

## 2 曲流河沉积构型表征与建模方法

### 2.1 多井模式拟合构型解剖

在地震资料分辨率不足的情况下,主要通过多井资料进行地下储层构型分析。在油田开发中后期,井网密集、井距小于构型单元规模的条件下,已形成了层次约束、模式拟合与多维互动的构型表征思路与方法[11,26,28-29,81]。所谓层次约束是指小级次构型分布受控于大级次构型,对于曲流河沉积而言,需要先开展河道带级次构型解剖,进而在河道带内部开展点坝和废弃河道级次构型解剖,最后在点坝内部进行侧积体和侧积层级次构型分析。构型井间预测的关键是模式拟合,即将地下井信息(包括单井构型解释、动态监测资料)与不同级次的定量构型模式进行拟合,在沉积构型模式指导下进行井间构型预测,使预测结果符合构型模式[26]。

多井模式拟合构型解剖的关键在于:一是井资料的丰富性与完整性,决定了构型界面识别精度;二是构型模式的合理性与适用性,不同沉积背景下的构型展布规律差异显著,必须以可靠的模式作为拟合依据。为此,前人更多关注于寻找与研究区沉积特征相似的构型模式进行拟合,即通过相似野外露头、现代沉积、物理模拟实验、沉积数值模拟或开发成熟油田的密井网区等建立定性识别标志与定量参数关系(表1),进而指导地下储层构型解剖。尽管多井模式拟合方法在密井网地区的构型表征中取得了较好效果,但依赖沉积模式与地下构型进行拟合,仍存在一定局限性。一方面,不同研究区的沉积体系在流量、物源供给、沉积速率及构造背景等方面存在显著差异,仅依赖宏观沉积环境相似性直接套用现代沉积或露头构型模式可能导致拟合失真;另一方面,在井网覆盖不均、井距过大时,构型边界识别存在较大不确定性,制约构型单元分布预测精度。

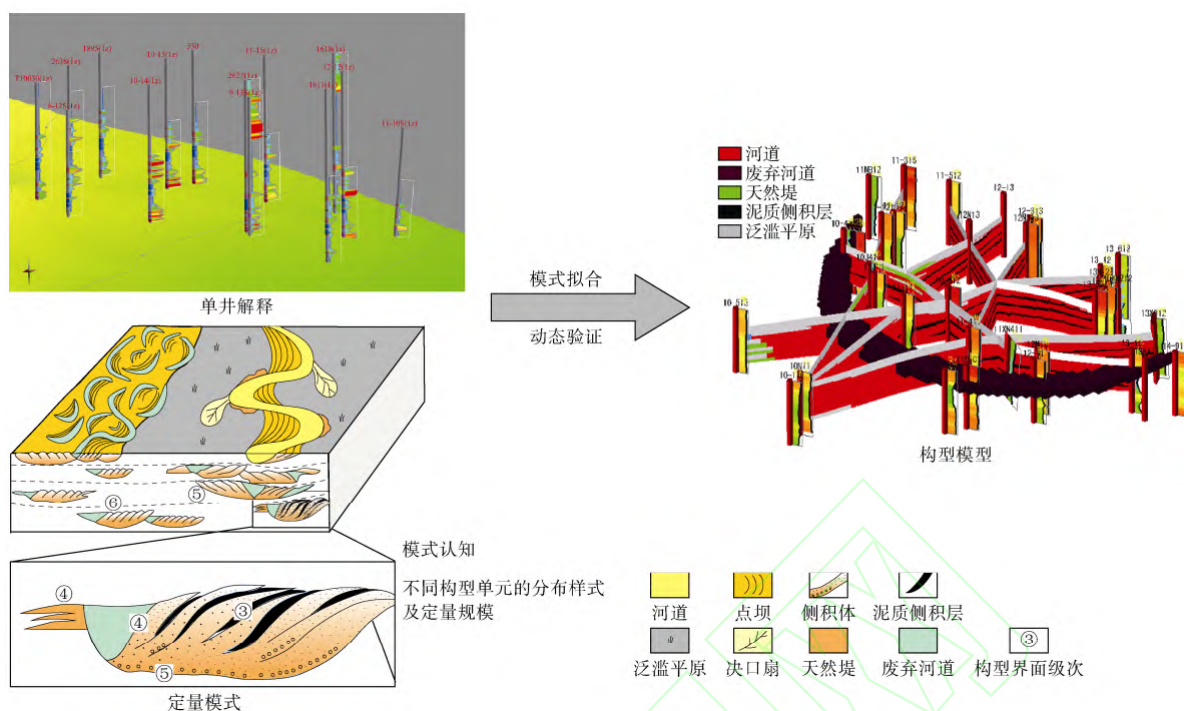


图 8 多井模式拟合地下储层构型表征方法

(引自文献[18])

Fig. 8 Multi-well pattern Fitting method for subsurface reservoir architecture characterization. Adapted from [18].

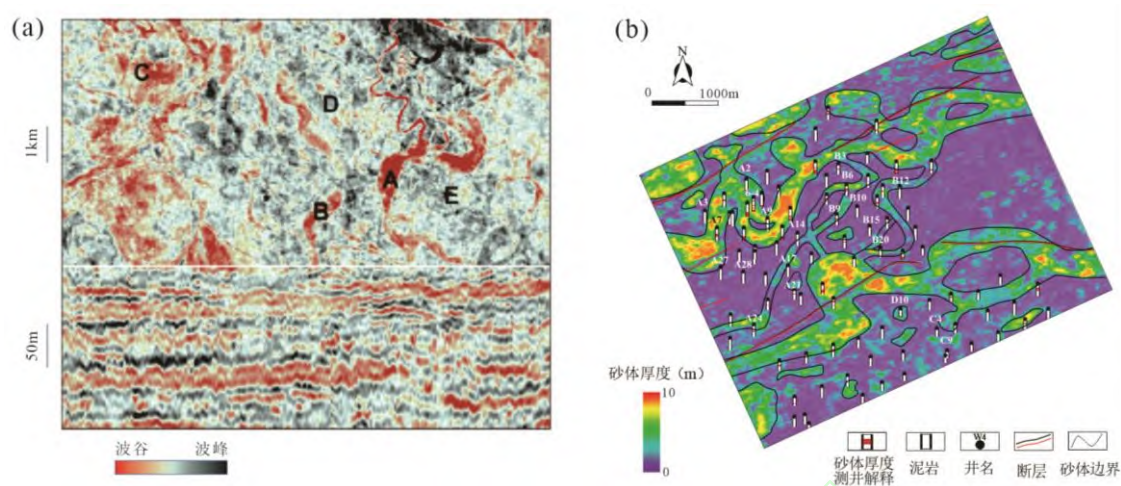
## 2.2 井震结合的曲流河沉积构型表征

井数据纵向分辨率高、确定性强，三维地震数据空间连续采样，故采用井震结合的方法综合测井与地震数据的优势已成为当下河流相储层表征的重要方法与未来发展趋势<sup>[7,35,37]</sup>。考虑河流相储层构型的级次性，应采用合适的方法、按照由大到小的级次开展河流相储层预测，即依次对河道带（包括复合河道与单河道）、点坝进行解剖<sup>[7,34,38,82-83]</sup>。点坝内部侧积体与侧积层规模较小，地震很难识别。

### 2.2.1 河道（带）砂体预测

井震结合的河道储层预测方法已广泛应用于各大油田<sup>[34-35,37,84]</sup>。考虑河道的横向规模远大于纵向规模，充分利用地震数据的平面信息，最常用、最有效的方法即采用顶底界面或地层切片的方式，从三维地震数据体（或三维地震反演数据体）中提取地震平面信息，刻画河道砂体的展布。

在分辨率满足识别精度的条件下，原始振幅信息即可较为准确地反映河道砂体分布特征，如某沉积盆地河流相储层的地震地层切片（反映原始振幅信息）清晰地呈现了河道带的平面展布（图 9a）<sup>[32]</sup>。但对于多数油田而言，尤其是开发中后期的油田，原始振幅值通常难以满足储层精细预测的需求，因此通过地震属性分析技术充分挖掘地震信息是提高地震解释分辨率、开展河道砂体精细表征的关键<sup>[31,34,37]</sup>。针对地震属性分析技术，众多学者始终致力于三方面的研究以提高地震属性的解释精度：一是从现有属性中优选出一种适合研究区储层预测的地震属性，即单一属性优选<sup>[85-86]</sup>，二是研发更加有效的新型地震属性<sup>[87-88]</sup>；三是探索多种地震属性的融合方法<sup>[32,89-91]</sup>。近年来在探索多属性融合技术或方法方面，取得一系列新进展<sup>[5,38,90,92-93]</sup>。因此，多属性融合与综合运用，是河流相储层精细表征的关键。例如，笔者探索了分频属性智能融合方法，精确、定量刻画了秦皇岛 32-6 油田曲流河砂体的分布（图 9b）。



a-某沉积盆地地震地层切片与地震剖面，图中A、B、C区域均指示河道砂体；b-秦皇岛32-6油田频地震智能融合结果。

图9 地震属性分布与砂体预测

(a 据文献[32]修改；b 引自文献[35])

Fig. 9 Seismic attribute distribution and sand body prediction. a modified after [32]; b adapted from [35].

## 2.2.2 点坝识别与解剖

在河道带内部识别点坝与废弃河道对剩余油挖潜具有重要意义。根据曲流河沉积构型模式（图8），废弃河道围绕点坝发育，是识别点坝的关键（图4）[6,17,21]。因此，综合废弃河道的测井识别标志与井间地震响应特征，形成了“井震结合、平剖互动”的曲流河点坝识别方法。

以渤海湾盆地埕岛油田馆陶组河流相储层为例阐述“井震结合、平剖互动”的曲流河点坝识别方法。首先明确废弃河道的地震响应标志。实例区废弃河道底部或中下部多为砂质河床，上部为泥质充填。在分辨率可以达到的情况下，中下部多表现为反演高值（反映岩性的以自然电位曲线为目标的地震智能反演属性体），上部表现为反演相对低值。鉴于此，分别提取目的层上部、中部、下部的自然电位反演切片；然后，采用RGB融合技术对上部、中部、下部的反演地层切片进行颜色融合（图10a）。最后，根据融合的反演切片，分析废弃河道发育的有利区域。废弃河道发育区常呈现地震属性相对低值RGB反演切片呈青绿色（图10a），呈现一定的月牙形状。在废弃河道的限定下，结合反演剖面废弃河道响应和单井相解释，识别点坝（图10b）。SDC2小层主河道带中共识别了15个点坝，点坝多呈串珠状排列[7,94]。

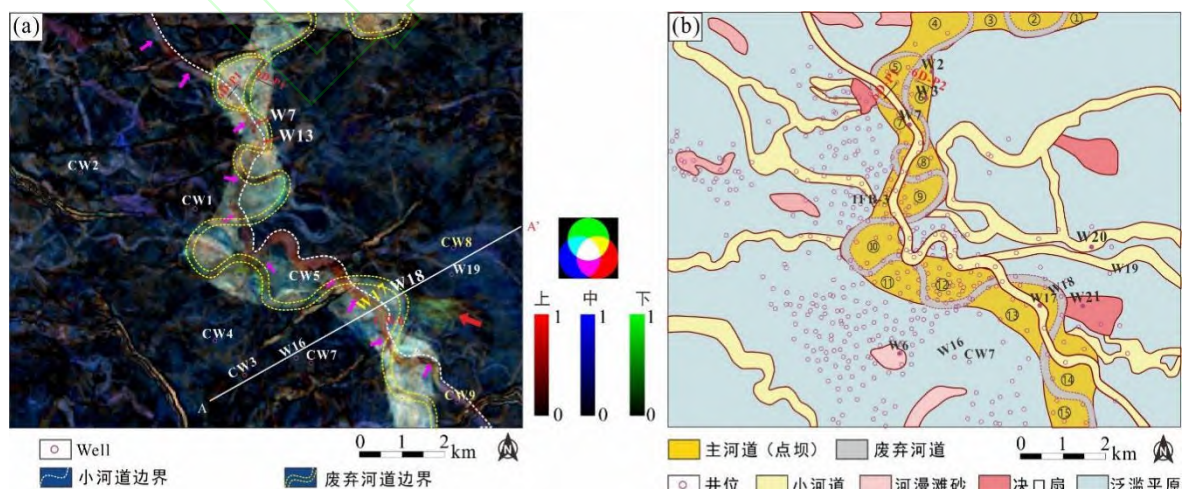


图10 渤海湾盆地埕岛油田SDC2小层上、中、下部反演切片RGB融合图(a)与构型单元分布图(b)

(据文献[7]修改)

Fig. 10 RGB-blending map of the lower, middle, and upper inversion slices (a) and distribution of fluvial architecture elements (b) of SDC2 in Chengdao Oilfield, Bohai Bay Basin. Modified after [7]

## 2.3 三维构型建模

三维构型建模是利用有限的资料对井间储层进行三维定量表征及可视化重建，以恢复地下储层构型分布<sup>[26]</sup>，能够为油藏数值模拟及开发方案优化提供地质依据<sup>[95]</sup>。曲流河构型建模分为确定性建模和随机建模两种途径，包括储层地震学方法、插值方法、基于目标的模拟、序贯指示模拟、截断高斯模拟、多点统计模拟等<sup>[22,26,96]</sup>。近年来，随着曲流河构型建模技术不断发展，多点地质统计学建模、基于单砂体的构型建模、智能构型建模方法取得了显著突破。

### 2.3.1 多点地质统计方法

曲流河沉积体系具有复杂的弯曲、连续的河道形态和空间叠置样式，传统两点地质统计方法难以再现复杂目标的几何形态和空间连续性。多点地质统计方法通过引入训练图像，不仅能够提取并再现复杂地质结构的分布及多元统计特征，还能有效整合研究者的地质认识，更好体现不同构型单元的空间定量分布特征，已成为曲流河储层建模的主流技术<sup>[97-98]</sup>。训练图像的构建至关重要，构建方法日益多样，包括基于目标模拟<sup>[46]</sup>、基于过程模拟<sup>[99-100]</sup>、浅层地震或密井网的沉积相解释结果<sup>[101]</sup>、野外露头或现代沉积等原型模型模拟等。之后，大量学者对训练图像构建与算法设计持续改进，例如在训练图像方面采用过程模拟<sup>[102]</sup>或将河道中线模拟与多点地质统计耦合，在一定程度上解决了河道连续性问题<sup>[99,103]</sup>；在算法设计方面，例如尹艳树等<sup>[42]</sup>设计了随机游走过程与多点统计耦合建模方法，解决了传统建模无法表征高曲率河道流线反转的问题，更好地再现了河道连续性。近年来，有学者<sup>[104-105]</sup>提出构型模式控制下的曲流河多尺度地质建模方法，针对点坝和点坝内部级次构型，分别基于过程模拟和人工交互方式获取训练图像，并建立全区模型和密井网区局部模型分级次进行多点统计模拟，实现了对复杂曲流河道多级构型空间分布的合理预测。

### 2.3.2 基于单砂体的构型建模方法

基于单砂体的构型建模方法主要依托精细构型表征成果，在明确单砂体形态、叠置样式及定量规模的基础上，通过确定性建模实现对构型单元三维分布的精准复现。针对曲流河道带砂体的复杂叠置关系，近年来笔者提出了基于微构造面的单砂体构型建模方法，利用河道砂体的顶部微构造面及厚度分布约束构型形态，利用平面构型分布约束平面范围，进而控制了构型空间展布形态，采用分级嵌入策略依次构建河道带、点坝及侧积体模型，即在河道带模型中嵌入废弃河道三维模型，再在点坝模型中嵌入侧积体模型，最终实现曲流河沉积构型的多尺度空间表征。岳大力等<sup>[22]</sup>以孤岛油田为例，以单井侧积层识别成果为依据，采用三次样条插值方法构建侧积面模型，并将其嵌入基于三维结构化网格体的相模型中，成功再现了点坝砂体内侧积体的空间几何形态。范峥等<sup>[19]</sup>进一步优化算法，引入空间自动模式识别算法拟合生成连续侧积曲面，结合井控厚度插值建了侧积层厚度分布模型，并通过局部网格加密方式将侧积层模型嵌入到点坝模型中，优化了不同级次及规模构型单元的三维网格呈现。随着嵌入式建模方法的提出，该方法在多个油田得到广泛应用<sup>[106-107]</sup>。尽管基于单砂体的构型建模方法在资料丰富、构型表征清晰的区块已取得良好效果，但在砂体空间非均质性强、井控程度低、构型表征多解强的区块仍面临挑战，如侧积体倾角识别误差、点坝迁移模式不确定性等问题。未来需结合人工智能、多源数据融合及动态约束建模等技术，进一步提升曲流河复杂储层构型的建模精度和适用性。

### 2.3.3 智能构型建模方法

由于河道长期摆动迁移，曲流河储层具有叠置关系复杂、强非均质性等特点<sup>[36,47,50,108-109]</sup>，传统曲流河储层构型建模方法在精确拟合条件数据和客观再现储层沉积构型模式方面，仍存在一定不足。近年来，生成式人工智能技术的快速发展为攻关上述关键技术难题提供了新的思路与解决方案<sup>[45,110]</sup>。该技术在河流相储层构型模式的复现与井震数据拟合方面取得了显著进展<sup>[36,47,110]</sup>。其中，基于生成对抗网络（GANs）的储层智能建模方法应用最广泛，其核心理念一是通过利用生成器与判别器的对抗训练机制，促使网络模型学习并有效复现多级次储层构型模式（图 11）；二是智能算法学习地质模式与条件数据之间的复杂映射关系，实现井震等条件数据拟合。经过训练的算法模型（即训练成熟的生成器）仅需输入条件数据即可快速生成相应的储层构型模型。此外，上述智能化储层构型建模方法也具有以下显著优势：（1）模型可重复利用，避免了传统建模中重复的统计分析过程<sup>[48,111-112]</sup>，大幅提升建模效率；（2）网络架构灵活可变，能够通过调整适应多级次特征表征<sup>[45,108,113]</sup>、小样本或单样本学习<sup>[109,111,114]</sup>、以及远程依赖关系挖掘等复杂需求<sup>[49,115]</sup>。尽管人工智能地质建模方法已经取得显著进步，但是建模精度依旧受条件数据质量的影响，在构型细节刻画方面表现出局部概率随机性和不确定性<sup>[113]</sup>。针对这一关键问题，一种有效的解决方案是整合多源异构数据（如生产动态数据、高分辨率岩心数据等）和先验地质知识（如经验公式等），通过这些信息编码为可微分约束条件，可以有效地约束模拟实现的可能空间，从而提升建模精度<sup>[113,116]</sup>。

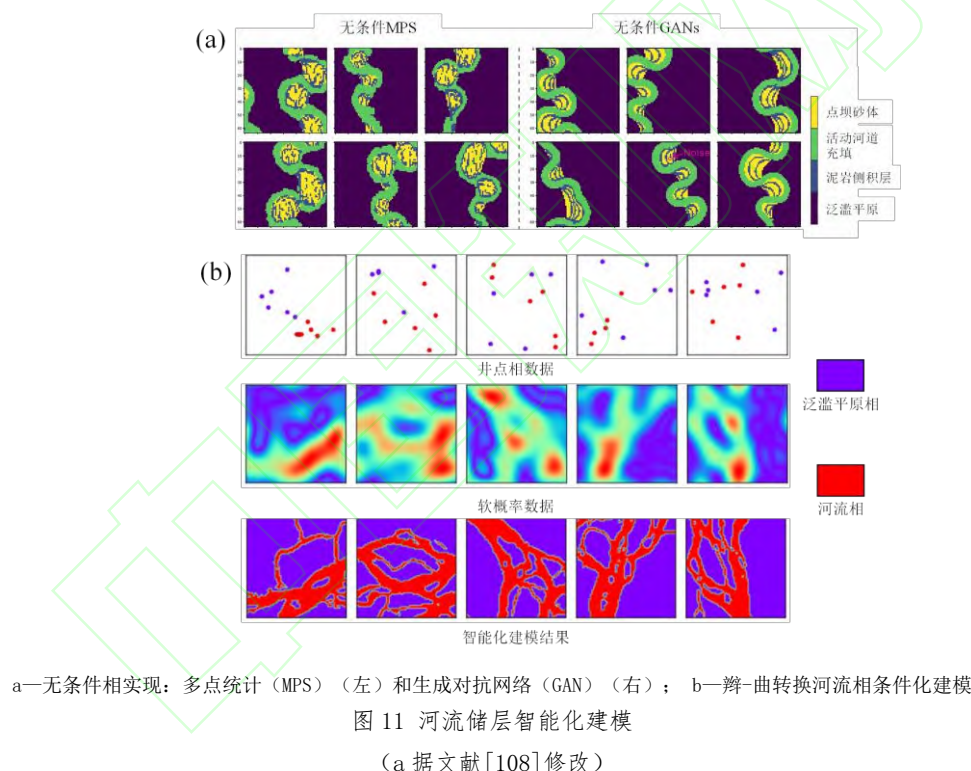


Fig. 11 Intelligent modeling of fluvial reservoirs. a modified after [108].

### 3 曲流河沉积构型在油气田开发中的意义

#### 3.1 曲流河常规油气田开发选区及高含水期剩余油挖潜

针对开发早期的大井距海上油气田，井网稀疏且多源于同一钻井平台，分布位置集中，井震结合开展河道带级次构型解剖，明确河道分布样式，可递推优选无井区有利开发区块，预测优势“甜点”区，并以此指导井位部署<sup>[117]</sup>。开发中后期，井网加密后通过点坝乃至点坝内部构型解析明确砂体构型界面、废弃河

道及侧积层分布，分析储层构型控制的储层质量差异，为井网优化调整、水平井井轨迹设计及进一步高效开发提供地质依据<sup>[35]</sup>。

开发成熟的老油田进入高含水阶段后，精准预测剩余油的空间分布是提高采收率的关键。剩余油分布受多种因素影响，主要包括工程因素与地质因素，其中地质因素发挥着至关重要作用。曲流河河道间泥质隔层、废弃河道充填体以及点坝内部侧积层等渗流屏障在水驱过程中显著影响注入水的波及效率和驱替路径<sup>[21,29,118]</sup>。已有物理模拟与数值模拟研究表明，点坝侧积夹层的倾角、展布位置及其与注采井关系密切相关，侧积夹层对注入水具有较强的遮挡与分流作用（图 12），限制了水体的垂向和横向突破，导致剩余油在砂体中上部富集<sup>[10,95,119-120]</sup>。同时，点坝的复合正韵律特征进一步加剧了剩余油分布的垂向非均质性<sup>[120-121]</sup>。

基于曲流河砂体复杂的沉积构型与剩余油分布规律，可制定多层次的挖潜策略。在平面尺度上，针对水驱阶段因井网稀疏、注采关系不完善而导致的连片型剩余油富集，应优先实施平面井网加密调整，缩短注采井距，提升水驱控制程度。在层内尺度，点坝砂体内部易形成无效水驱循环，可通过注采井组分析，识别注入水偏流通道，结合封堵措施实施层内细分注水，提高水驱效率<sup>[119]</sup>。此外，亦可部署与砂体构型相匹配的水平井，在中上部穿行多个侧积单元，挖潜侧积层遮挡导致注采不均而形成的剩余油，实现储层的高效开发与综合动用<sup>[10,29,118]</sup>。

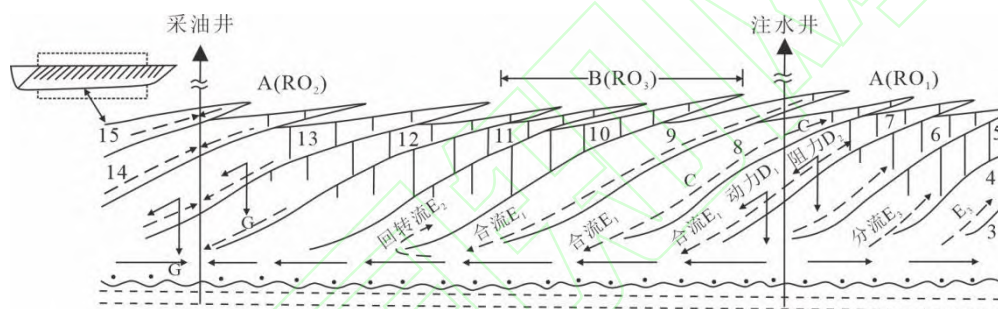


图 12 曲流点坝侧积泥岩薄夹层建筑结构及其对注入剂驱油、剩余油形成与分布的影响

（引自文献[120]）

Fig.12 Architectural features of lateral accretion mudstone interlayers in meandering point bars and their influence on injected fluid displacement and remaining oil distribution. Adapted from [120].

### 3.2 曲流河致密油气储层水平井井网部署与轨迹优化

曲流河成因的致密油气藏在我国鄂尔多斯盆地苏里格气田、川西坳陷侏罗系沙溪庙组等广泛发育<sup>[122-123]</sup>。相比于常规储层，致密储层的曲流河砂体孔隙度与渗透率低、优质储层变化快、空间展布更加复杂，优化水平井开发技术、提高水平井砂体钻遇率是其增储上产的关键。砂体结构、砂体展布特征及井控程度是影响水平井部署与轨迹优化的主要因素<sup>[124]</sup>。在进行水平井网部署前，首先需通过井震结合进行系统的、基于单层的沉积构型表征，精细刻画不同级次砂体与隔夹层的展布特征、规模与空间叠置样式（包括侧向拼接样式及垂向叠加样式），并建立精细的三维地质模型，如曲流河构型或三角洲平原曲流带构型模型，进而基于三维模型部署水平井与轨迹优化（图 13）。研究证实，在河道多期叠置处（多期交汇处）的砂体厚度大、分布稳定、储层质量相对较好，是水平井部署的最有利位置<sup>[124]</sup>。对于呈条带状展布曲流河砂体，由于其摆动性强且横向展布局限，优先沿着砂体尖灭的逆方向设计平直型井轨迹，避免顺砂体尖灭方向设计水平井轨迹出现底穿和储层尖灭后大段泥岩的情况。而对于纵向多层展布的薄砂体储层，可适当增大水平段的角度，使水平井呈阶梯状斜穿多个砂层，以增加泄油范围。同时，在水平井随钻过程中，可依据水平井随钻数据和录井资料不断修正现有的三维沉积构型与属性参数模型，更准确地判断目的层段岩

性与物性的边界点，进而及时优化水平井的钻进方位和角度，最大限度地确保水平段在优势储层中钻进，大大提高储层的钻遇率<sup>[124]</sup>。

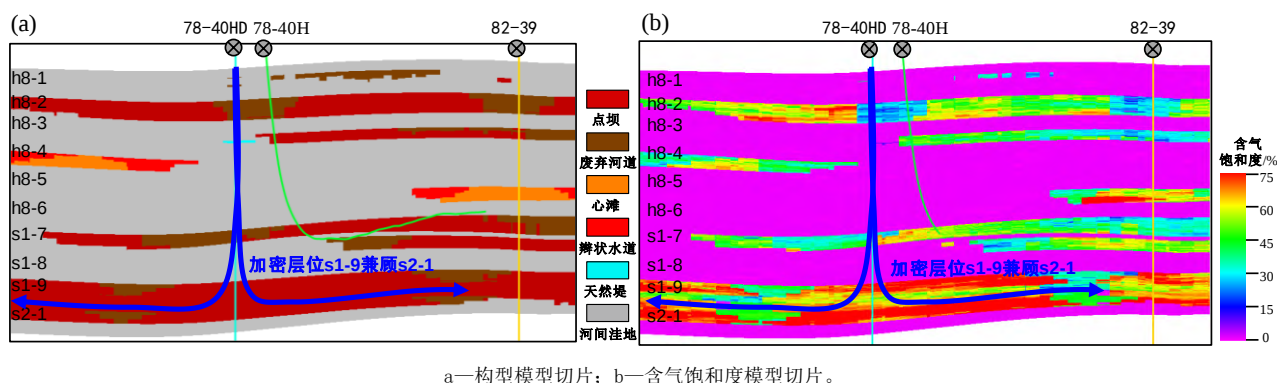


图 13 苏里格气田苏 A 区块基于地质模型的水平井部署示意图

Fig. 13 Schematic diagram of horizontal well deployment based on the geological model in the Su-A block, Sulige Gas Field

## 4 结论与展望

近年来，曲流河沉积构型模式、构型表征与建模方法、构型在油气田开发中的应用等方面得到了长足发展，特别是在曲流河定量构型模式、井震智能融合构型表征技术、智能构型建模方法方面取得显著进步；有效指导了油气储层的精细勘探与高效开发，特别是为常规油气田开发选区及高含水期剩余油挖潜、致密储层水平井井网部署与轨迹优化提供了表征技术与理论依据。相较其他沉积相类型而言，曲流河沉积构型研究已非常深入，但在不同类型曲流河构型形成机理、地质知识与数据双驱动的曲流河储层构型智能表征与建模技术方面仍面临挑战。

(1) 曲流河沉积演化过程模拟及定量构型模式。曲流河沉积构型模式研究十分丰富、也比较成熟，但也面临诸多问题，需持续攻关。一是当前针对曲流河沉积的水槽模拟实验与动力学沉积数值模拟技术仍不成熟，究其根本是曲流河的沉积机理与动力学机制仍需进一步完善；二是目前沉积学研究的时间尺度较大，河流动力学研究的时间尺度较小，如何实现河流沉积学与河流动力学深度交叉融合仍需进一步攻关；三是自然界存在大量非典型的曲流河，如低弯度或辫-曲过渡型河流，其沉积构型模式与形成机制需进一步完善。为解决上述问题，未来建议重点关注两个方面：一是加强沉积尺度上的曲流河沉积、侵蚀与保存机制的研究，构建河流沉积学与河流动力学深度融合的桥梁，并为曲流河沉积的水槽与数值模拟提供理论指导；二是明确不同曲流河类型的形成条件，建立沉积条件限制下的差异化沉积构型模式系列。

(2) 地质知识与数据双驱动的曲流河储层构型智能表征与建模技术。曲流河沉积构型表征与建模技术相对成熟，为进一步提升表征与建模精度，地质知识与数据双驱动的方法应运而生，然而，该领域的发展仍面临两大瓶颈：一是知识表征难，“知识”本身的内涵及其结构化表达尚存争议，如何将地质经验有效转化为算法可识别和利用的“知识”是一个根本性难题；二是协同驱动难，在深度学习驱动的储层智能表征与建模流程中，如何高效、鲁棒地引入地质知识约束，并实现知识与数据的有效协同驱动，目前仍处于初步探索阶段。为突破上述瓶颈，建议未来着重关注两个方面：一是构建基于地质目标、数据类型和知识形态的算法选择与评估框架，为曲流河沉积构型表征与建模任务科学筛选最优算法，提升模型性能；二是深化算法可解释性攻关，揭示不同智能算法（尤其是深度学习）在处理数据、提取特征及融合地质知识过程中的内在机制，提升模型的可解释性。

## 参考文献

- [1] MIALL A D. Architecture and sequence stratigraphy of pleistocene fluvial systems in the Malay Basin, based on seismic time-slice analysis[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(7): 1201-1216.
- [2] MCHARGUE T, PYRCZ M J, SULLIVAN M D, et al. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: patterns and predictions[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(3): 728-743.
- [3] SAMBROOK SMITH G H, BEST J L, BRISTOW C S, et al. Braided rivers: process, deposits, ecology and management[M]. 1st ed. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, 2006.
- [4] 徐安娜, 穆龙新, 裘恽楠. 我国不同沉积类型储集层中的储量和可动剩余油分布规律[J]. 石油勘探与开发, 1998(5): 41-44.
- [5] 岳大力, 李伟, 杜玉山, 等. 河流相储层地震属性优选与融合方法综述[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 3929-3943.
- [6] COLOMBERA L, MOUNTNEY N P, RUSSELL C E, et al. Geometry and compartmentalization of fluvial meander-belt reservoirs at the bar-form scale: quantitative insight from outcrop, modern and subsurface analogues[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 82: 35-55.
- [7] LI W, YUE D, WU S, et al. Characterizing meander belts and point bars in fluvial reservoirs by combining spectral decomposition and genetic inversion[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 105: 168-184.
- [8] MIALL A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22(4): 261-308.
- [9] 李胜利, 马水平, 周练武, 等. 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[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 3960-3976.
- [10] 闫百泉, 张鑫磊, 于利民, 等. 基于岩心及密井网的点坝构型与剩余油分析[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 597-604.
- [11] 岳大力. 曲流河储层构型分析与剩余油分布模式研究: 以孤岛油田馆陶组为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2006.
- [12] ATHY L F. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks1[J]. AAPG Bulletin, 1930, 14(1): 1-24.
- [13] ALLEN J R L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the brownstones (L. devonian), welsh borders[J]. Sedimentary Geology, 1983, 33(4): 237-293.
- [14] MIALL A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: anatomy of the Kayenta formation (lower jurassic), Southwest Colorado[J]. Sedimentary Geology, 1988, 55(3): 233-262.
- [15] 薛培华. 河流点坝相储层模式概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [16] BRIDGE J S, ALEXANDER J, COLLIER R E LI, et al. Ground-penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of point-bar deposits in three dimensions[J]. Sedimentology, 1995, 42(6): 839-852.
- [17] DONSELAAR M E, OVEREEM I. Connectivity of fluvial point-bar deposits: an example from the Miocene Huesca fluvial fan, Ebro Basin, Spain[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(9): 1109-1129.
- [18] YUE D, LI W, WANG W, et al. Analyzing the architecture of point bar of meandering fluvial river using ground penetration radar: a case study from Hulun Lake Depression, China[J]. Interpretation, 2019, 7(2): T437-T454.
- [19] 范峥, 吴胜和, 岳大力, 等. 曲流河点坝内部构型的嵌入式建模方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(3): 1-6.
- [20] 胡光义, 王海峰, 范廷恩, 等. 海上油田河流相复合砂体构型级次解析[J]. 古地理学报, 2021, 23(4): 810-823.
- [21] 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. 石油学报, 2007(4): 99-103.
- [22] 岳大力, 陈德坡, 徐樟有, 等. 济阳拗陷孤东油田曲流河河道储集层构型三维建模[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 233-240.
- [23] HICKIN A S, KERR B, BARCHYN T E, et al. Using ground-penetrating radar and capacitively coupled resistivity to investigate 3-D fluvial architecture and grain-size distribution of a gravel floodplain in Northeast British Columbia, Canada[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(6): 457-477.
- [24] WOOLDRIDGE C L, HICKIN E J. Radar architecture and evolution of channel bars in wandering gravel-bed rivers: fraser and squamish rivers, British Columbia, Canada[J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(5): 844-860.
- [25] 李胜利, 于兴河, 姜涛, 等. 河流辫-曲转换特点与废弃河道模式[J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 1-9.
- [26] 吴胜和, 岳大力, 刘建民, 等. 地下古河道储层构型的层次建模研究[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2008(增刊 1): 111-121.

- [27] 张宪国, 王涵巍, 张涛, 等. 曲流串沟型江心洲形成机制与演化探讨: 以现代松花江为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(5): 1215-1227.
- [28] 吴胜和, 翟瑞, 李宇鹏. 地下储层构型表征: 现状与展望[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 15-23.
- [29] 岳大力, 吴胜和, 谭河清, 等. 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[J]. 地学前缘, 2008(1): 101-109.
- [30] 林承焰, 张宪国, 董春梅. 地震沉积学及其初步应用[J]. 石油学报, 2007(2): 69-72.
- [31] ZENG H. Thickness imaging for high-resolution stratigraphic interpretation by linear combination and color blending of multiple-frequency panels[J]. Interpretation, 2017, 5(3): T411-T422.
- [32] ZENG H. What is seismic sedimentology? A tutorial[J]. Interpretation, 2018, 6(2): SD1-SD12.
- [33] ZENG H, RUPPEL S, KERANS C, et al. Full-spectrum seismic inversion as a hard constraint in reservoir modeling and simulation[M]//SEG Technical program expanded abstracts 2005. Houston, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2005: 1629-1632.
- [34] 岳大力, 李伟, 王军, 等. 基于分频融合地震属性的曲流带预测与点坝识别: 以渤海湾盆地埕岛油田馆陶组为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(6): 941-950.
- [35] 岳大力, 胡光义, 李伟, 等. 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[J]. 中国海上油气, 2018, 30(1): 99-109.
- [36] 岳大力, 李伟, 王武荣, 等. 碎屑岩储层智能表征与建模方法研究现状及展望[J]. 古地理学报, 2025, 27(4): 903-923.
- [37] 张宪国, 吴啸啸, 黄德榕, 等. 极限学习机驱动的地震多属性融合识别曲流带单一点坝[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1340-1350, 1200-1201.
- [38] YUE D, LI W, WANG W, et al. Fused spectral-decomposition seismic attributes and forward seismic modelling to predict sand bodies in meandering fluvial reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 99: 27-44.
- [39] STREBELLE S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics[J]. Mathematical Geology, 2002, 34(1): 1-21.
- [40] WANG Y C, PYRCZ M J, CATUNEANU O, et al. Conditioning 3D object-based models to dense well data[J]. Computers & Geosciences, 2018, 115: 1-11.
- [41] 尹艳树, 吴胜和. 储层随机建模研究进展[J]. 天然气地球科学, 2006(2): 210-216.
- [42] 尹艳树, 张昌民, 李玖勇, 等. 多点地质统计学研究进展与展望[J]. 古地理学报, 2011, 13(2): 245-252.
- [43] 王立鑫, 尹艳树, 王晖, 等. 基于自适应空间抽样由二维剖面重构三维地质模型的方法: 以加拿大某区块 McMurray 组储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 347-359.
- [44] 李少华, 刘显太, 王军, 等. 基于沉积过程建模算法 Alluvsim 的改进[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 140-144.
- [45] 宋随宏, 史燕青, 侯加根. 基于生成对抗网络的储层地质建模方法研究进展[J]. 石油科学通报, 2022, 7(1): 34-49.
- [46] PYRCZ M J, BOISVERT J B, DEUTSCH C V. ALLUVSIM: a program for event-based stochastic modeling of fluvial depositional systems[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(8): 1671-1685.
- [47] 胡勇, 高小洋, 何文祥, 等. 利用条件生成对抗网络建立曲流河地质模型[J]. 沉积学报, 2024, 42(1): 201-218.
- [48] LIU X, CHEN X, CHENG J, et al. Simulation of complex geological architectures based on multistage generative adversarial networks integrating with attention mechanism and spectral normalization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-15.
- [49] LIU L, YUE D, LI W, et al. A novel stochastic simulation method for sedimentary facies based on the generative adversarial network with a spatially-adaptive conditioning module and comprehensive attention mechanisms[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 249: 213758.
- [50] ZHANG T F, TILKE P, DUPONT E, et al. Generating geologically realistic 3D reservoir facies models using deep learning of sedimentary architecture with generative adversarial networks[J]. Petroleum Science, 2019, 16(3): 541-549.
- [51] 吴胜和, 纪友亮, 岳大力, 等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 12-22.
- [52] GHAZI S, MOUNTNEY N P. Facies and architectural element analysis of a meandering fluvial succession: the Permian warchha sandstone, salt range, pakistan[J]. Sedimentary Geology, 2009, 221(1/2/3/4): 99-126.
- [53] 李伟, 岳大力, 李健, 等. 基准面旋回控制的河流相储层差异构型模式: 以山西大同侏罗系露头为例[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 3977-3988.

- [54] 谭程鹏, 于兴河, 刘蓓蓓, 等. 季节性河流体系高流态沉积构造特征:以内蒙古岱海湖半滩子河为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(6): 929-940.
- [55] CROSS,TA. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 322-350.
- [56] HOLBROOK J, AUTIN W J, RITTENOUR T M, et al. Stratigraphic evidence for millennial-scale temporal clustering of earthquakes on a continental-interior fault: Holocene Mississippi River floodplain deposits, New Madrid seismic zone, USA[J]. Tectonophysics, 2006, 420(3/4): 431-454.
- [57] KJEMPERUD A V, SCHOMACKER E R, CROSS T A. Architecture and stratigraphy of alluvial deposits, Morrison Formation (Upper Jurassic), Utah[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(8): 1055-1076.
- [58] YAO Z, YU X, SHAN X, et al. Braided-meandering system evolution in the rock record: implications for climate control on the Middle-Upper Jurassic in the southern Junggar Basin, North-West China[J]. Geological Journal, 2018, 53(6): 2710-2731.
- [59] JORGENSEN HARBOR D, SCHUMM S A, HARVEY M D. Tectonic control of the Indus River in Sindh, Pakistan[C]//SCHUMM S A. The variability of large Alluvial rivers. New York, USA, 1994: 161-175.
- [60] HANSFORD M R, PLINK-BJÖRKLUND P. River discharge variability as the link between climate and fluvial fan formation[J]. Geology, 2020, 48(10): 952-956.
- [61] FIELDING C R, ALEXANDER J, ALLEN J P. The role of discharge variability in the formation and preservation of alluvial sediment bodies[J]. Sedimentary Geology, 2018, 365: 1-20.
- [62] GHINASSI M, IELPI A, ALDINUCCI M, et al. Downstream-migrating fluvial point bars in the rock record[J]. Sedimentary Geology, 2016, 334: 66-96.
- [63] CHADWICK A J, GREENBERG E, GANTI V. Single- and multithread rivers originate from (im)balance between lateral erosion and accretion[J]. Science, 2025, 389(6756): 146-150.
- [64] CHARLTON R. Fundamentals of fluvial geomorphology[M]. London: Routledge, 2007.
- [65] 赵晓明, 冯圣伦, 谭程鹏, 等. 平移型点坝形成机理与沉积特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 22-36.
- [66] YAN N, MOUNTNEY N P, COLOMBERA L, et al. A 3D forward stratigraphic model of fluvial meander-bend evolution for prediction of point-bar lithofacies architecture[J]. Computers & Geosciences, 2017, 105: 65-80.
- [67] GRENFELL M, AALTO R, NICHOLAS A. Chute channel dynamics in large, sand-bed meandering rivers[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(3): 315-331.
- [68] 梁宏伟, 何彬, 范子菲, 等. 基准面旋回控制下的复合点坝分布模式[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4602-4609.
- [69] 吴胜和, 岳大力, 冯文杰, 等. 碎屑岩沉积构型研究若干进展[J]. 古地理学报, 2021, 23(2): 245-262.
- [70] 李志威, 王兆印, 徐梦珍, 等. 弯曲河流颈口裁弯模式与机理[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(5): 618-624.
- [71] HICKIN E J, NANSON G C. The character of channel migration on the beatton river, Northeast British Columbia, Canada[J]. GSA Bulletin, 1975, 86(4): 487-494.
- [72] LEOPOLD L B, WOLMAN M G. River meanders[J]. GSA Bulletin, 1960, 71(6): 769-793.
- [73] 石书缘, 胡素云, 冯文杰, 等. 基于 Google Earth 软件建立曲流河地质知识库[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 869-878.
- [74] LEEDER M R. Fluvial fining-upwards cycles and the magnitude of palaeochannels[J]. Geological Magazine, 1973, 110(3): 265-276.
- [75] LORENZ J C, HEINZE D M, CLARK J A, et al. Determination of widths of meander-belt sandstone reservoirs from vertical downhole data, Mesaverde Group, Piceance Creek Basin, Colorado1[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(5): 710-721.
- [76] 乔辉, 王志章, 李莉, 等. 基于卫星影像建立曲流河地质知识库及应用[J]. 现代地质, 2015, 29(6): 1444-1453.
- [77] BRADLEY R W, VENDITTI J G. Reevaluating dune scaling relations[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 165: 356-376.
- [78] LECLAIR S F, BRIDGE J S. Quantitative interpretation of sedimentary structures formed by river dunes[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(5): 713-716.
- [79] 王海峰, 范廷恩, 宋来明, 等. 高弯度曲流河砂体规模定量表征研究[J]. 沉积学报, 2017, 35(2): 279-289.
- [80] PRANTER M J, ELLISON A I, COLE R D, et al. Analysis and modeling of intermediate-scale reservoir heterogeneity based on a fluvial point-bar outcrop analog, Williams Fork Formation, Piceance Basin, Colorado[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(7): 1025-1051.

- [81] 李阳, 吴胜和, 侯加根, 等. 油气藏开发地质研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 569-579.
- [82] LI W, YUE D, WU S, et al. Thickness prediction for high-resolution stratigraphic interpretation by fusing seismic attributes of target and neighboring zones with an svr algorithm[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104153.
- [83] LI W, YUE D, COLOMBERA L, et al. Quantitative prediction of fluvial sandbodies by combining seismic attributes of neighboring zones[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107749.
- [84] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 沉积地质学发展新航程: 地震沉积学[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 189-201.
- [85] 王彦仓, 秦凤启, 杜维良, 等. 地震属性优选、融合探讨[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(6): 69-73.
- [86] CHOPRA S, MARFURT K J. Seismic attributes: a historical perspective[J]. Geophysics, 2005, 70(5): 3SO-28SO.
- [87] CHEN Q, SIDNEY S. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring[J]. The Leading Edge, 1997, 16(5): 445-450.
- [88] HART B S. Channel detection in 3-D seismic data using sweetness[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(6): 733-742.
- [89] BITRUS P R, IACOPINI D, BOND C E. Defining the 3D geometry of thin shale units in the Sleipner reservoir using seismic attributes[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 78: 405-425.
- [90] MCARDLE N J, IACOPINI D, KUNLEDARE M A, et al. The use of geologic expression workflows for basin scale reconnaissance: a case study from the Exmouth Subbasin, North Carnarvon Basin, northwestern Australia[J]. Interpretation, 2014, 2(1): SA163-SA177.
- [91] WANG X, ZHANG B, ZHAO T, et al. Facies analysis by integrating 3D seismic attributes and well logs for prospect identification and evaluation — A case study from Northwest China[J]. Interpretation, 2017, 5(2): 61-74.
- [92] 刘磊, 李伟, 杜玉山, 等. 基于 Stacking 集成学习的分频地震属性融合储层预测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(1): 12-22.
- [93] MALEKI M, DAVOLIO A, SCHIOZER D J. Quantitative integration of 3D and 4D seismic impedance into reservoir simulation model updating in the Norne Field[J]. Geophysical Prospecting, 2019, 67(1): 167-187.
- [94] 李洪辉, 岳大力, 李伟, 等. 基于分频智能反演的曲流河点坝与废弃河道识别[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(2): 358-368.
- [95] 白振强, 王清华, 杜庆龙, 等. 曲流河砂体三维构型地质建模及数值模拟研究[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 898-902, 907.
- [96] 胡向阳, 熊琦华, 吴胜和. 储层建模方法研究进展[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001(1): 107-112, 0.
- [97] 叶小明, 刘小鸿, 张岚, 等. 曲流河储层构型建模方法研究进展[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 84-93.
- [98] 尹艳树, 冯舒, 尹太举. 曲流河储层建模方法的比较研究[J]. 断块油气田, 2012, 19(1): 44-46, 64.
- [99] COMUNIAN A, JHA S K, GIAMBASTIANI B M S, et al. Training images from process-imitating methods[J]. Mathematical Geosciences, 2014, 46(2): 241-260.
- [100] MULLINS J, VAN DER VEGT H, HOWELL J. Combining process-based models and multiple-point geostatistics for improved reservoir modelling[J]. Petroleum Geoscience, 2021, 27(3): petgeo2020-012.
- [101] JOURNAL A, ZHANG T. The necessity of a multiple-point prior model[J]. Mathematical Geology, 2006, 38(5): 591-610.
- [102] LOPEZ S, COJAN I, RIVOIRARD J, et al. Process-based stochastic modelling: meandering channelized reservoirs[C]//DE BOER P, POSTMA G, VAN DER ZWAN K, et al. Analogue and numerical modelling of sedimentary systems: from understanding to prediction. 1st ed. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, New York, 2008: 139-144.
- [103] 尹艳树, 吴胜和, 张昌民, 等. 基于储层骨架的多点地质统计学方法[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2008(增刊 2): 157-164.
- [104] 陈仕臻, 林承焰, 任丽华. 构型模式控制下的曲流河多尺度地质建模研究: 以胜利油田史南区块为例[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(3): 552-562.
- [105] LI J, LIN C, ZHANG X, et al. Multiscale modeling of meandering fluvial reservoir architecture based on multiple-point geostatistics: a case study of the minghuazhen formation, Yangerzhuang Oilfield, Bohai Bay Basin, China[J]. Geofluids, 2021, 2021(1): 1717195.
- [106] 高兴军, 宋新民, 孟立新, 等. 特高含水期构型控制隐蔽剩余油定量表征技术[J]. 石油学报, 2016, 37(S2): 99-111.

- [107] 孙红霞, 赵玉杰, 姚军. 一种新的曲流河点坝砂体侧积层建模方法: 以孤东油田七区西 Ng5<sup>2+3</sup> 层系为例[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(4): 477-481.
- [108] HU X, SONG S, HOU J, et al. Stochastic modeling of thin mud drapes inside point bar reservoirs with Alluvsim-Gansim[J]. Water Resources Research, 2024, 60(6): e2023WR035989.
- [109] ZHANG T, JI X, ZHANG A. Reconstruction of fluvial reservoirs using multiple-stage concurrent generative adversarial networks[J]. Computational Geosciences, 2021, 25(6): 1983-2004.
- [110] 陈麒玉, 张如甜, 崔哲思, 等. 基于 Lap-SAGAN 的多尺度三维地质模型重构方法[J]. 地学前缘, 2025: 1-30.
- [111] LIU X, CHENG J, CAI Y, et al. Stochastic simulation of facies using deep convolutional generative adversarial network and image quilting[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 146: 105932.
- [112] ZHANG K, YU H Q, MA X P, et al. Multi-source information fused generative adversarial network model and data assimilation based history matching for reservoir with complex geologies[J]. Petroleum Science, 2022, 19(2): 707-719.
- [113] SONG S, ZHANG D, MUKERJI T, et al. Gansim-surrogate: an integrated framework for stochastic conditional geomodelling[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129493.
- [114] CUI Z, CHEN Q, LIU G. Characterization of subsurface hydrogeological structures with convolutional conditional neural processes on limited training data[J]. Water Resources Research, 2022, 58(12): e2022WR033161.
- [115] CHEN M, WU S, BEDLE H, et al. Modeling of subsurface sedimentary facies using self-attention generative adversarial networks (SAGANs)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 214: 110470.
- [116] CUI Z, CHEN Q, JIANG S, et al. Interpretable deep learning-based characterization of hydrogeological structures with self-representation learning[J]. Journal of Hydrology, 2025, 662: 133943.
- [117] 杨民鑫, 赵晓明, 梁岳立, 等. 基于分频 RGB 融合技术的储层构型精细解剖: 以东海盆地西湖凹陷渐新统花港组为例[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(7): 1323-1338.
- [118] 岳大力, 赵俊威, 温立峰. 辫状河心滩内部夹层控制的剩余油分布物理模拟实验[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 157-161.
- [119] 王凤兰, 白振强, 朱伟. 曲流河砂体内部构型及不同开发阶段剩余油分布研究[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 512-519.
- [120] 闫百泉, 马世忠, 王龙, 等. 曲流点坝内部剩余油形成与分布规律物理模拟[J]. 地学前缘, 2008(1): 65-70.
- [121] 朱丽红. 特高含水期厚油层剩余油综合描述及分布特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(6): 58-62.
- [122] 谢庆宾, 孙建, 陈菁萍, 等. 苏里格大气田多成因河道砂体的分布模式研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 40-51.
- [123] 张小菊, 邓虎成, 伏美燕, 等. 多级界面约束下构型对储层非均质性控制作用: 以川西沙溪庙组曲流河为例[J]. 沉积学报, 2024, 42(4): 1384-1400.
- [124] 费世祥, 余浩杰, 陈存良, 等. 致密砂岩气藏水平井开发关键技术: 以苏里格气田上古生界为例[J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2022, 37(4): 26-35.