



中国石油大学学报(自然科学版)
Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)
ISSN 1673-5005, CN 37-1441/TE

《中国石油大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 基于平面相约束的三维砂体构型建模方法
作者: 邬德刚, 吴胜和, 刘常妮, 岳大力, 范峥
网络首发日期: 2024-06-18
引用格式: 邬德刚, 吴胜和, 刘常妮, 岳大力, 范峥. 基于平面相约束的三维砂体构型建模方法[J/OL]. 中国石油大学学报(自然科学版).
<https://link.cnki.net/urlid/37.1441.TE.20240617.1429.002>



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、外文字符、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。

基于平面相约束的三维砂体构型建模方法

邬德刚^{1,2,3},吴胜和^{2,3},刘常妮^{2,3},岳大力^{2,3},范峰⁴

(1.中国石油大学(北京)人工智能学院,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)油气资源与工程全国重点实验室,北京102249; 4.北京瑞马能源科技有限公司,北京102249)

摘要：将平面微相分布引入到基于一维井资料的三维砂体构型建模过程中,提出基于平面相约束的三维砂体构型建模方法。以不同微相类型单砂体为建模对象,引入平面相约束各个单砂体的平面分布范围及形态特征,通过在平面分布范围内确定砂体顶、底微构造面的方式建立三维砂体构型模型。使用数学模型优化单砂体微构造面,利用叠置关系优化砂体间的接触关系。结果表明,该方法能很好地表征不同微相类型单砂体,在刻画砂体复杂形态特征等方面具有较大优势,能有效刻画不同微相类型单砂体的复杂平面几何形态,良好地体现单砂体的剖面形态特征,合理表征不同构型单元间的复杂接触关系。

中图分类号: TE 19

文献标志码: A

关键词: 三维砂体构型建模; 平面相; 井资料; 微构造面

An intelligent 3D reservoir modeling method with constraint from planar distribution of sedimentary facies

WU Degang^{1,2,3}, WU Shenghe^{2,3}, LIU Changni^{2,3}, YUE Dali^{2,3}, FAN Zheng⁴

(1. College of Artificial Intelligence in China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences in China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Beijing Ruima Energy Science and Technology Company Limited, Beijing 102249, China)

Abstract: By introducing the microfacies planar distribution into the 3D sandbody architecture modeling process with 1D well data, a 3D sandbody architecture modeling method constrained by the microfacies planar distribution is proposed. Taking single sandbodies of different microfacies types as the modeling objects, we introduce the microfacies planar distribution to constrain the planar distribution range and morphological characteristics of each individual sandbody, and the 3D sandbody architecture model is established by identifying the top and bottom microstructural surfaces of the sandbody within the planar distribution range. The mathematical model is employed to optimize the microstructural surfaces of individual sandbodies, and the superposition relationship is utilized to optimize the contact relationship between sandbodies. The results indicate that the method can effectively represent different microfacies types of single sandbodies, exhibit significant advantages in portraying the complex morphological characteristics of sandbodies, efficiently depict the complex plane geometric shapes of single sandbodies of varying microfacies types, appropriately reflect the cross-sectional morphological characteristics of individual sandbodies, and reasonably represent the complex contact relationships between different architecture units.

Keywords: three-dimensional sandbody architecture modeling; microfacies planar distribution; well data; microstructural surface

基金项目: 湖盆扇三角洲前缘河口坝构型及形成机理研究(42272110); 中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专题(ZLZX2020-02)

第一作者及通信作者: 邬德刚(1999-),男,博士研究生,研究方向为油气资源大数据与智能工程等。E-mail: scholarwu@student.cup.edu.cn; 吴胜和(1963-),男,二级教授,主要从事油矿地质学、储集层表征与建模方面的教学和科研工作。E-mail: reser@cup.edu.cn。

砂体构型是指不同级次砂体形态、规模、方向及相互叠置关系,可以反映单砂体之间的连通程度及连通模式,决定了开发井网部署及地下油水的运动规律,因此砂体构型研究对于提高油气田开发效率具有重大意义^[1]。三维砂体构型建模是从三维角度对砂体构型进行定量研究并建立三维数字化模型,是表征不同微相砂体三维空间分布的重要手段^[2]。

当地震资料分辨率难于识别单一构型单元时,需要

依据井资料预测各个微相类型砂体空间分布。20世纪80年代以来,基于计算机技术国内外学者开展了大量基于一维井数据进行三维砂体构型建模的方法研究工作^[3-5]。早期的建模方法研究主要为基于克里金插值技术^[14]的两点地质统计学方法^[16],通过变差函数^[18]表征空间中任意两点间的相关性,因而难以再现复杂目标体的几何形态^[19]。后来逐渐发展出FLUVSIM模拟^[21]等基于目标的方法通过几何参数量化砂体空间分布形态特征,以及

Growthsim^[23-24]等多点地质统计方法^[6,25]、CGANs^[26-28]等深度学习方法通过训练图像提取定量地质模式，亦即使用几何参数或者训练图像表达地质体空间结构，使得建模方法能够良好地刻画简单砂体的三维空间展布形态^[29]。

然而，这些方法仍然难以实现复杂砂体构型建模。

本文所称的复杂砂体构型是指砂体类型多样、形态不规则，且其空间分布具有非平稳性特征。针对复杂砂体构型，几何参数难以有效刻画微相砂体的分布规律，导致基于目标等建模方法在吻合井点条件数据等方面存在困难；训练图像虽然能够一定程度再现微相砂体的分布规律，但是建模方法对训练图像的质量要求较高，三维样本集构建难度大。缺乏多样性的图像样本集无法全面刻画砂体分布规律，是导致多点地质统计等方法难以再现目标体连续性、深度学习方法在井点数据条件化方面存在困难的重要因素。

考虑到地质分析确定的平面微相分布图是对复合微相砂体平面空间展布的地质分析认识成果，能够体现复合砂体的分布范围、规模等特征，可用于约束三维建模中砂体的空间分布范围及复杂砂体形态。因此，本文提出了基于平面相约束的三维砂体构型建模方法（Architecture Modeling Based on Planar Facies Constraints, PFC），综合运用已有的一维单井微相解释结果、二维平面微相分布成果完成复杂砂体构型的三维表征与建模。

1 方法

PFC 方法是针对复杂砂体构型所提出的一种确定性建模方法，以单砂体为建模对象，建立能够反映不同微相类型单砂体构型界面的三维模型。为了刻画不同单砂体的三维表示，首先预测各个单砂体的平面展布范围，然后通过在平面范围及地层构造层面内确定单砂体顶、底微构造面的方式表征各个单砂体的三维分布。

PFC 方法使用平面微相分布图优化单砂体的几何形态。然而，值得注意的是，平面相图为一个地层单元的优势相图，优势相图中所反映的相是时间演化上多种相的叠置或复合^[30]，各个相之间的边界并非物理边界，不能简单地将相边界直接作为各个单砂体的平面范围边界。

因此，在平面相约束建模中存在以下亟需解决的关键问题：其一，如何依据平面相图优化单砂体平面几何形态和分布范围；其二，如何确定各个单砂体的顶底微构造面；其三，如何根据各个单砂体构建三维砂体构型模型。

为解决以上三个关键问题，本文在平面相约束下自动确定各单砂体的平面范围，通过数学模型约束预测单砂体的井间微构造面，采用叠置模式约束的嵌入式建模方法将各个单砂体构建为三维砂体构型模型。

1.1 平面相约束的单砂体范围确定方法

单砂体的平面展布范围（尖灭线）是确定单砂体顶底微构造面的基础。目前，井间自动确定单砂体尖灭线的方法有机器学习方法^[31]、数理统计方法^[32]等。其中机器学习方法在构型建模过程中通过生成对抗神经网络等方法学习训练图像中的定量模式，依模式确定各砂体的尖灭线，但是该方法对训练样本的多样性要求较高；数理统计方法可以通过砂体长宽比等定量统计规律确定砂体尖灭线，然而难以刻画复杂的平面分布形态特征。

考虑到平面相图在一定程度上反映了不同微相复合砂体的平面分布形态特征及展布范围，能够用于约束确定单砂体复杂尖灭线。因此，本文提出了一种以平面相图为约束的尖灭线动态确定方法，即在数理定量统计规律确定的砂体尖灭线基础上，使用平面相图反映的构型单元平面展布特征优化尖灭线形态，使用平面相图边界约束尖灭线范围。该方法主要包括以下几个步骤：

i) 构建初始尖灭线。选取某一沉积相类型的所有单砂体 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 及平面相区域 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ ，其中 s_i 为第 i 个单砂体， f_i 为第 i 个平面相区域。记单砂体 s_i 的所有井点集合为 w_i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$)，则所有单砂体 S 的井点数据可表示为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。依据长宽比等定量统计规律为每个单砂体 s_i 初始化砂体尖灭线。

ii) 构建几何学关系表 T 。依据 W 与 F 的几何学关系 $R(w, f)$ ，构建 $n \times m$ 的二维关系表。

$$R(w, f) = \begin{cases} 1, & w \subseteq f \\ 0, & f \cap w = \emptyset \\ 0.5, & \text{其它} \end{cases}, w \in W, f \in F \quad (1)$$

其中, \cap 为几何交操作, \subseteq 为几何包含关系, \emptyset 为空集。

iii) 几何学关系筛选。对于 $\forall f \in F$, 在几何学关系表 T 中筛选平面相子区域 f 的几何关系子集 $R_f = \{(w_i, s_i) | R(w_i, f_i) > 0, i = 1, 2, \dots, n\}$, 并为集合内所有元素重新编号为 $1, 2, \dots, z$, 其中 z 为集合 R_f 内元素个数。

iv) 外延处理平面相子区域 f 。对于关系子集 R_f , 若 $\exists (w, s) \in R_f$ 满足 $0 < R(w, f) < 1$, 即 w 、 f 具有相交的几何学关系, 亦即存在砂体井点不在 f 内, 此时将 f 外延处理为井点集合 w 与子区域 f 的最小凸包集。

以 $R_f = \{(w_1, s_1), (w_2, s_2)\}$ 为例, w 、 f 的几何关系如图1a所示, 井点集合 w_1 中井点 p 不在 f 范围内, 此时外延处理的具体做法如图1b所示。首先, 根据外部井点 p 的砂体厚度线性预测砂体厚度衰减区域, 该区域的边界与 f 边界的交点作为新增的边界点(插值点); 其次, 在 f 的边界上拾取外部井点 p 的最近邻点, 并以该点为中心, 指定搜索范围内搜索合适的裁剪段, 将该裁剪段从 f 的边界中移除; 最后, 依据插值点插值出光滑的曲线作为 f 的外延段, 并将外延段纳入 f 的边界, 从而得到外延处理后的 f (如图1c所示)。

v) 依据 R_f 内的元素 (w_j, s_j) 与子区域 f 的几何学关系确定单砂体 s_j 的平面展布范围 o_j , 即在条件 c 的约束下, 通过优化目标 t_1 和 t_2 的方式确定 o_j 。

$$c: (w_k - w_j) \cap o_j = \emptyset, k = 1, 2, \dots, l, k \neq j \quad (2)$$

$$t_1: \min \left| \bigcup_{j=1}^l o_j \sim f \right| \quad (3)$$

$$t_2: \max o_j, j = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

其中 $-$ 为集合求差运算, \sim 为几何学求差运算, \cap 为几何学交操作, \bigcup 为几何学并操作。

约束条件 c 的内涵是井点上不具有垂向叠置关系的单砂体, 其平面展布范围在井点处不重叠, 确保了单砂体平面展布范围与井点数据吻合; 优化目标 t_1 的内涵是最小化所有单砂体叠加的平面展布范围与平面相区域的差异, 保证了砂体的平面展布规模符合已有地质认识; 优化目标 t_2 的内涵是最大化各个单砂体的平面展布区域, 避免部分单砂体规模较小、与平面相反映的规模悬殊。

确定 o_j 的主要做法是取 o_j 为 f 与单砂体 s_i 初始尖灭线

的交, 并依据约束条件和优化目标在给定步长下逐步迭代外延 o_j 。约束过程中使用两种不同的策略: 静态约束和动态约束。其中, 静态约束是指当 $z = 1$ 时, R_f 与 f 为单射映射关系, 此时可直接设定 $o_j = f$; 动态约束是指当 $z \geq 2$ 时, R_f 与 f 为非单射关系, o_j 的外延操作会影响其它单砂体平面展布范围, 因此在每一步外延处理后及时动态迭代更新其它单砂体的展布范围。

同样以 $R_f = \{(w_1, s_1), (w_2, s_2)\}$ 为例, 经过以上处理步骤, 确定单砂体 s_1 、 s_2 的平面展布范围为 o_1 、 o_2 , 如图1d所示。

vi) 将光滑化处理后的 o_j 作为单砂体 s_j 的砂体尖灭线。

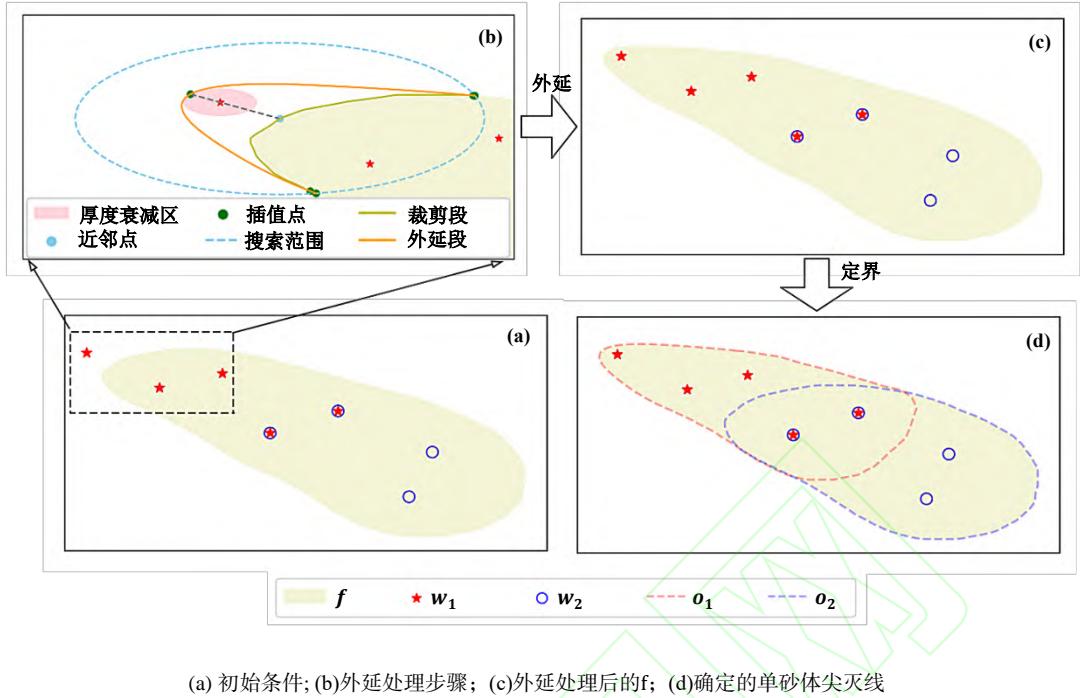
1.2 数学模型约束的微构造面预测方法

确定单砂体微构造面的主要思路是在砂体平面展布范围内对单井解释的砂体顶、底界面井间插值预测。为了合理刻画构型单元的剖面形态特征, 一般不直接插值预测砂体的所有微构造面。以河道为例, 更合理的做法是首先插值确定其具有线性变化特征的顶界面, 然后求取能够反映砂体剖面形态特征的厚度数据, 采用顶界面叠加厚度的方式确定底界面。即通过求取某二维界面 S 和平面厚度分布 D 的方式确定单砂体的两个微构造面。

厚度分布 D 是刻画砂体剖面形态的关键。求取单砂体平面厚度分布的主要思路是基于井点数据对井间砂体厚度进行插值预测, 如距离反比加权、线性插值等^[33-34]数理统计插值方法, 普通克里金、泛克里金等^[35]地质统计插值方法。

然而, 值得注意的是井间砂体厚度分布虽然受井点数据约束, 但并不受井点分布控制, 两者具有弱相关性, 由于已有插值方法对井点位置依赖度较高, 在井点数据不足、井位分布不均匀等情况下, 插值等方法求取的砂体厚度分布难以符合地质沉积规律。如图2a所示, 基于数据的插值方法提取的厚度分布中右侧区域远离井点约束的砂体厚度快速趋近于0, 不符合砂体厚度逐渐减薄的分布规律。

基于以上问题, 本文通过引入厚度数学模型约束砂体井间厚度预测过程。



(a) 初始条件; (b)外延处理步骤; (c)外延处理后的f; (d)确定的单砂体尖灭线

图1 单砂体尖灭线的确定过程

Fig. 1 Determining the boundary line of single sand bodies

1.2.1 厚度数学模型

记 (x, y) 为单砂体平面展布范围 o 内任意一点 p 的坐标, (x_i, y_i) 为单砂体尖灭线 $l = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ 上 n 个尖灭点中第 i 个的坐标, 使用

$$v(p, l) = \min_{i=1}^n \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (5)$$

表示 p 点到砂体尖灭线 l 的距离, 则可构造用于计算 p 点砂体厚度的数学模型:

$$\begin{aligned} d(p; l, \alpha, \beta, \kappa) &= \alpha \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta v^\kappa(p, l)\right) \\ &= \alpha \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta \min_{i=1}^n \left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2\right)^{\kappa/2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

α 、 β 、 κ 是待估参数。其中 α 为度量因子, 度量砂体厚度规模, 决定了砂体的最大厚度; $\kappa \in (0, 1)$ 为曲率因子, 调节砂体厚度变化曲率特征, 其调节作用如图 3b 所示; β 为降级因子, 降低数据数量级差异, 弱化砂体平面展布规模对厚度预测过程的影响, 提高求解 κ 的收敛速率。对于确定的 κ , 限制

$$\beta \leq 1 / \max\{v^\kappa(p, l) | p \in o\} \quad (7)$$

即 β 不大于单砂体平面展布范围的长轴半径 κ 次幂倒数。

在以上设定条件下, 该砂体厚度模型满足以下 4 个约束条件:

①厚度模型函数在定义域 o 上具有连续的一阶导数 $d'(p; l, \alpha, \beta, \kappa) = \frac{\pi}{2} \kappa \alpha \beta \cos\left(\frac{\pi}{2} \beta v^\kappa(p, l)\right) v^{\kappa-1}(p, l) v'(p, l)$, 使得单砂体平面厚度分布具有较好的连续性及光滑性;

②对任意的砂体尖灭点 $p^o \in l$, 有 $d(p^o; l, \alpha, \beta, \kappa) = 0$, 即砂体边界处的砂厚为 0;

③由于公式 (7) 的限制作用, 对任意一点 $p \in o$ 有 $\beta v^\kappa(p, l) \leq 1$ 成立, 使得具有唯一变量 p 的厚度模型 $d(p; l, \alpha, \beta, \kappa)$ 在经 $v(p, l)$ 变换后的定义域上始终为单调增函数, 即满足单砂体的中心处厚度较边缘处厚度更具优势这一地质规律;

④厚度模型的一阶导数 $d'(p; l, \alpha, \beta, \kappa)$ 在经 $v(p, l)$ 变换后的定义域上为单调减函数, 使得由边缘向中心, 砂体厚度变化趋势减缓, 符合厚度变化率规律。

1.2.2 微构造面预测步骤

(1) 预测 S 。在等时地层格架内, 基于单井砂体解释的界面深度数据, 线性插值方法预测单砂体界面 S 的井间深度分布。为了提高预测精度, 界面 S 的选取遵循简易原则, 即依据砂体的侧向形态特征, 选取具有线性变化特征的界面作为 S 。如选取侧向上具有底平顶凸特征的河口坝底界面、具有顶平底凸特征的河道顶界面、具有透

镜状特征的滩坝虚拟水平面作为 S ;

(2) 求取 D 。求取单砂体平面厚度分布 D 主要包括以下几个子步骤:

i) 优选曲率因子 κ 。当约束单砂体的井数较多时, 可直接通过步骤iii) 构建数据拟合过程求取 κ 值; 反之, 由于井数较少, 步骤iii) 可求解出多组有关 α 、 β 、 κ 的解, 部分解可能不符合地质规律。在这种情况下, 可依据已有地质认识从多种取值(图2b)中挑选出合适的 κ 值, 或者对 κ 作区间约束后在步骤iii) 中求解 κ 。

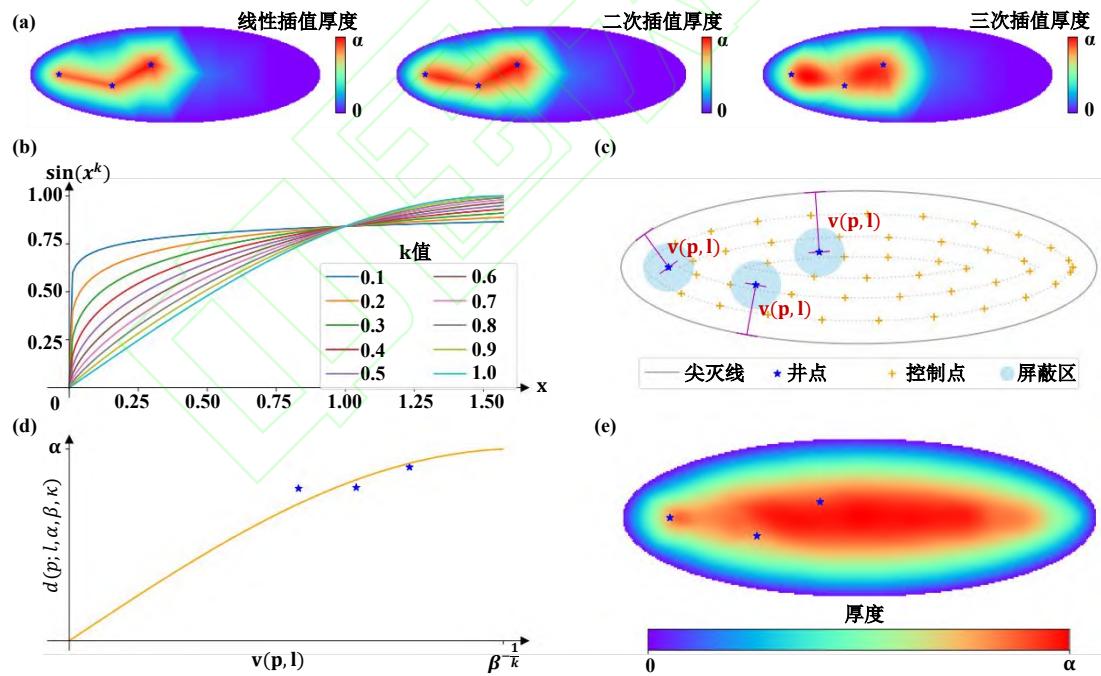
ii) 设计厚度控制点。依据单砂体的平面展布形态构造多组(2~5组)厚度控制点, 如图2c中标记所示。求取单砂体内各井点 p 到尖灭线 l 的距离 $v(p, l)$ 并为 p 设置屏蔽区域。屏蔽区域是指不设置控制点的井间邻近范围, 其作用是降低条件数据的分布密度, 既保证后续步骤预测的单砂体厚度吻合井点数据, 又使厚度分布具光滑性。

iii) 求解各单砂体的厚度模型。考虑到砂体厚度模

型是理想状态下的模型, 因此在求解厚度模型时采取拟合求解策略。如图2d所示, 依据上述步骤求取的 $v(p, l)$ 及单井砂体厚度数据, 构建关于未知参数 α 、 β 、 κ (κ 可在步骤1中确定)的条件约束函数拟合过程, 求解出各个单砂体的 $d(p; l, \alpha, \beta, \kappa)$ 数学模型。

iv) 依据 $d(p; l, \alpha, \beta, \kappa)$ 模型计算上述各控制点的砂体厚度数据, 构建符合精度要求的二维插值网格, 基于砂体尖灭线、井点、控制点的砂体厚度及点位坐标, 使用插值算法求取单砂体的厚度平面分布。其中, 插值算法可以有多种选择, 以二维三次插值算法为例, 其提取的厚度分布如图2e所示。

(3) 确定顶、底微构造面。若 S 为顶微构造面, 则通过 S 叠加 D 的方式确定底微构造面; 若 S 为底微构造面, 则通过 S 消减 D 的方式确定顶微构造面; 若 S 为虚拟水平面, 则通过 S 叠加半倍 D 的方式确定底微构造面, S 消减半倍 D 的方式确定顶微构造面。



(a)未约束情况下求取的 D ; (b)优选曲率因子 κ ; (c)设置控制点; (d)拟合厚度模型; (e)约束情况下求取的 D

图2 砂体厚度数学模型

Fig. 2 Mathematical model of sand body thickness

1.3 叠置模式约束的嵌入式建模方法

由不同微相类型单砂体构建构型模型过程中, 为了能够合理表征不同构型单元间的接触关系, 本文使用嵌

入式建模策略依次将不同类型构型单元单砂体嵌入背景相模型。

目前,已有建模软件中的嵌入式建模思路主要是将泥岩相等作为背景模型,依次将井点数据约束下建立的不同构型单元嵌入到背景相模型中,能够良好地体现各构型单元与背景相间的接触关系。然而,这种方法缺乏考虑不同构型单元间的叠置模式,难以表征构型单元间的复杂接触关系。以河道和河口坝为例,图3分别展示了两种情况下河道与河口坝的建模示例。当依据井点数据分别构建了3a1、3a2、3b1、3b2所示的河道与河口坝单砂体时,直接进行嵌入式建模时难以体现河道与河口坝之间的接触关系(如图3a3、3b3所示)。

基于以上问题,本文提出了一种叠置模式约束的嵌入式建模方法,通过优化各单砂体的井点约束数据重构部分单砂体的顶、底微构造面,以更好地表征构型单元间的复杂接触关系。

在论述该方法的主要步骤前,先阐述基准单元和重构单元这两个基本概念。基准单元与重构单元是用于描述具有接触关系的两个单砂体间的相对关系。为了刻画两个单砂体的复杂接触关系,在嵌入式建模过程中需要进行三维重构的那个单砂体称之为重构单元,另外一个即为基准单元,即重构单元与基准单元是一种相对概念。基准单元和重构单元基于地质成因分析等方式确定,一般情况下,在具有冲刷等地质作用的沉积环境中形成的单砂体为基准单元,遭受冲刷、剥蚀等作用形成的单砂体为重构单元。如对于具有接触关系的河道与河口坝,河道为基准单元,河口坝则为重构单元。

叠置模式约束的嵌入式建模过程主要包括以下几个步骤:

i) 依据地质认识确定单砂体的秩。秩是反映不同单砂体嵌入背景相次序的整型数值,同一类型的单砂体秩相同,不同类型单砂体的秩大小关系可以任意界定,然而其界定结果必须符合地质沉积规律,即先沉积形成的单砂体具有更低的秩,重构单元比基准单元具有更低的秩。如当河口坝的秩设定为2时,与其具有接触关系的河道的秩至少设定为3。

ii) 优化井点约束条件。依据构型单元之间的叠置关系将井点约束条件细分为双边约束条件及单边约束条件。

其中,单边约束条件是指只对某一构型单元界面进行约束的条件,双边约束条件是指对相邻的两个构型单元界面都进行约束的条件。单井上基准单元与重构单元的深度分界点即为单边约束条件,该条件只对基准单元进行约束;反之不是基准单元与重构单元的深度分界点,则为双边约束条件,如图3a4、3b4所示。

iii) 重建重构单元的顶、底微构造面,即优化界面 S 并重新提取厚度分布 D 。将重构单元的砂体界面 S 向基准单元方向外延,使用外延方向与基准单元相交点(外延点)、基准单元的顶界面边界点(基准校正点)及重构单元的双边约束条件重新提取重构单元的厚度分布,如图3a5、3b5所示。

iv) 根据顶底微构造面合成各单砂体的三维表示,依据秩大小正序排列单砂体并依次嵌入背景相模型中,如3a6、3b6所示。

1.4 方法步骤

PFC方法主要包括以下四个环节(如图4所示):划分单砂体、确定砂体尖灭线、预测微构造面、合成并嵌入单砂体。

(1) 划分单砂体。划分单砂体的主要目的是判断各井点的构型单元解释结果之间的关联性,确定各个单砂体内的所有井点数据。划分单砂体使用的资料主要为单井砂体解释、连井剖面成果(可选)等已有地质认识,运用的原则主要为垂向分期与侧向划界原则。其中,垂向分期是指在等时地层格架约束下,依据垂向韵律组合、砂体顶面高程差、连续细粒沉积等特征进行砂体的垂向期次划分;侧向划界是指在构型模式指导下,根据砂体展布范围、砂体顶面高程差、砂体厚度差异等构型单元划分标志,识别井间构型单元边界并将边界进行连接。

(2) 确定单砂体尖灭线。分相构建平面相区域与单砂体的几何学关系表,根据平面相与单砂体的映射关系特征,分别使用静态约束与动态约束方法在平面相图指导下确定各个单砂体的尖灭线。

(3) 预测微构造面。在等时地层格架内,基于单井砂体解释的界面深度数据,线性插值方法预测界面 S ;构建砂体厚度模型并基于井点样本数据完成模型的未知参数求解;在砂体厚度模型约束下预测平面厚度分布 D ;通

过界面S以及厚度D确定各个单砂体的顶底微构造面。

(4) 合成并嵌入单砂体, 形成构型模型。依据构型单元叠置模式重构部分单砂体的顶、底微构造面; 根据单砂体的微构造面构建各个单砂体的三维表示; 建立背景相模型, 基于地质规律确定各个单砂体的秩, 依秩各个单砂体嵌入背景相模型中。

2 实例分析

浅水三角洲-滩坝体系具有典型的复杂砂体构型特

征。该体系发育三角洲分流河道、河口坝、溢岸、滩坝主体及侧缘等多种沉积微相。不同沉积微相的形态和规模各异, 而且在顺源方向上微相分布具有明显的非平稳性。渤海湾盆地东营凹陷胜坨油田胜二区沙河街组二段1~2 砂组发育典型的湖盆浅水三角洲-滩坝体系。

因此, 本文以沙河街组二段 1~2 砂组为例, 进一步说明本文方法的主要步骤及应用效果, 并分析其实用性。

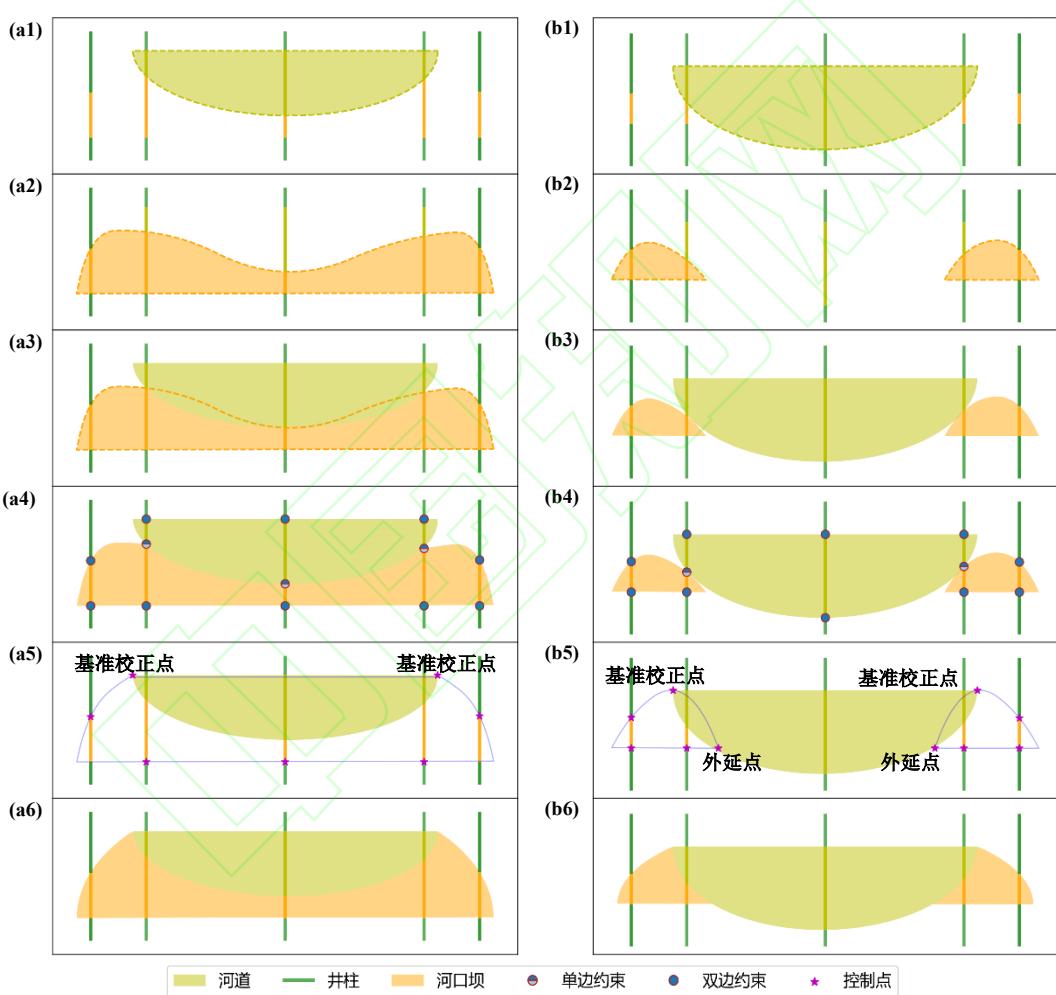


图 3 河道与河口坝的嵌入式建模过程示意图

Fig. 3 Embedded modeling process of river channel and estuary dams

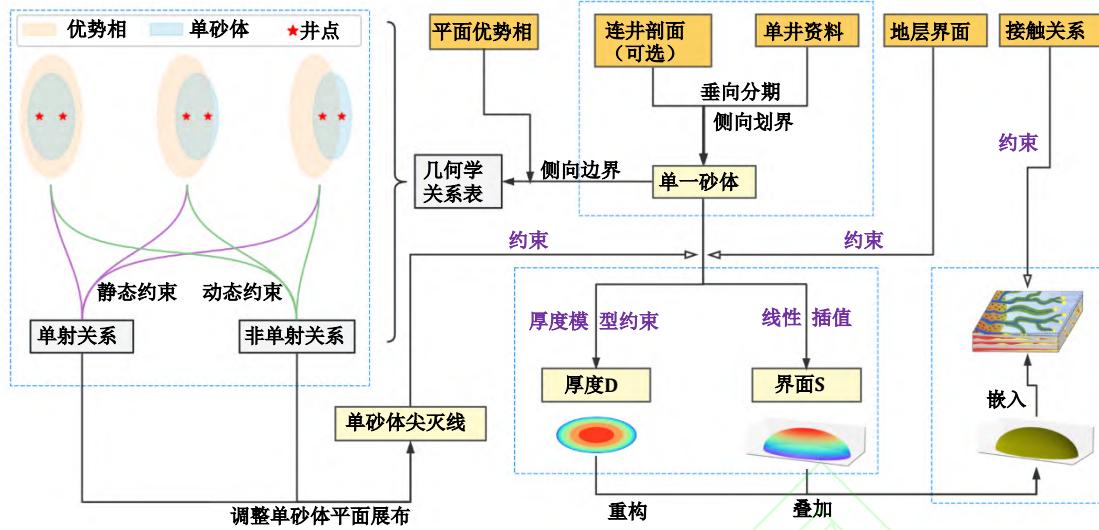


图 4 PFC 方法的技术路线

Fig. 4 Technical route of the PFC method

2.1 研究区地质背景

胜坨油田位于渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷的北部, 研究区胜二区构造位置处于胜坨油田东部高点的西南翼, 北、东部以二级断层为界, 西、南以油水边界紧邻胜一区(如图 5 所示)。

研究区地层自上而下发育第四系、新近系和古近系。古近系自上而下依次为东营组、沙河街组和孔店组。按照岩性及古生物资料沙河街组可划分为四段^[36], 自上而下依次为沙一段、沙二段、沙三段和沙四段。其中沙二段又细分为 15 个砂组, 自上而下分别为 1 砂组-15 砂组, 1-2 砂组为本次研究的目的层位。1-2 砂组可进一步划分出若干小层和单层, 如表 1 所示。

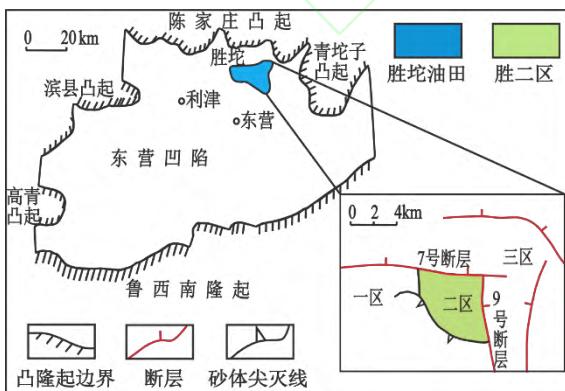


图 5 胜坨油田区域位置图 (据黄文科, 2007, 有修改)

Fig. 5 Location of the Shengtuo (Huang, 2007, modified)

表 1 胜坨油田胜二区沙二段 1~2 砂组地层划分方案

Table 1 Stratigraphy division scheme of sand group 1~2 in the second number of the Shahejie formation of Shengtuo Oilfield
Shengtuo 2 Area

	油层组	砂层组	小层	单层
沙二 1	沙二 1 ¹			
		沙二 1 ²⁽¹⁾		
		沙二 1 ²	沙二 1 ²⁽²⁾	
		沙二 1 ³⁽¹⁾	沙二 1 ³⁽²⁾	
		沙二 1 ³	沙二 1 ³⁽²⁾	
沙二段	沙二 1 ⁴			
		沙二 1 ⁵		
		沙二 2 ¹		
		沙二 2 ²	沙二 2 ²⁽¹⁾	
		沙二 2 ²	沙二 2 ²⁽²⁾	
沙二 2	沙二 2 ³			
		沙二 2 ⁴	沙二 2 ³⁽¹⁾	
		沙二 2 ⁵	沙二 2 ³⁽²⁾	
		沙二 2 ⁶		
		沙二 2 ⁷		

胜坨油田整体表现为受东西走向胜北断层控制的逆牵引背斜构造^[37], 研究区胜二区为构造相对单一并呈“扇

形”分布的单斜油藏，沙二 1-2 砂组地层单元为东北-西南倾伏的断鼻构造，内部断层不发育，地层倾角 1-6°。

东营凹陷在沙二段沉积时期，沉降幅度差异小，整体沉积环境以冲积平原和浅湖环境为主，发育河流-三角洲沉积^[38]。研究区目的层位浅水三角洲与滩坝体系频繁交替发育^[39]，共识别出分流河道、溢岸、河口坝、河道间、浅湖、滩坝 6 种沉积微相类型。其中，分流河道在研究区北东方向呈连片状分布，末端呈树杈状深入浅湖；溢岸呈裙带状布于河道两侧；河口坝呈朵状分布于河道末端；滩砂呈带状或透镜状分布，与湖岸平行（图 6）。

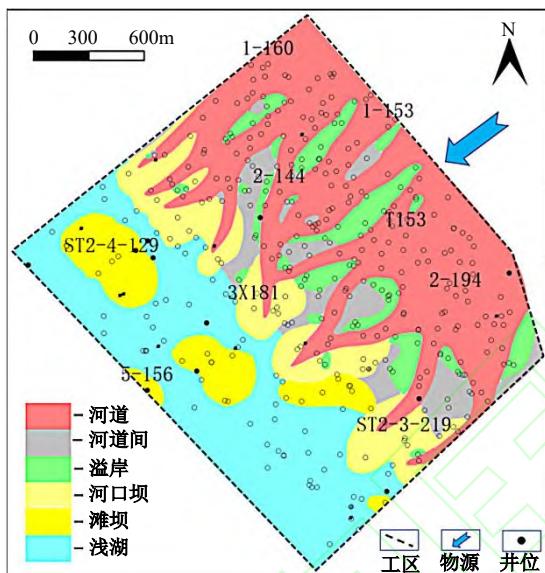


图 6 沙二 1²⁽¹⁾单层平面平面相图（据李浩男，2021）

Fig.6 facies distribution of E2sII¹²⁽¹⁾ (according to Li, 2021)

2.2 PFC 方法建模步骤

研究区目的层段中沙二 1²⁽¹⁾单层沉积模式较为复杂，因此以沙二 1²⁽¹⁾单层为例，论述 PFC 建模方法完成分流河道、河口坝、溢岸、滩坝构型建模的主要步骤。

(1) 划分单砂体。依据上文单砂体划分方法划分沙二 1²⁽¹⁾单层的分流河道、河口坝、溢岸、滩坝四种类型单砂体，确定各个单砂体的井点数据。

(2) 确定单砂体尖灭线。分相构建平面相与单砂体的几何学关系表，依据平面相约束的单砂体尖灭线确定方法确定沙二 1²⁽¹⁾单层各单砂体的尖灭线，如图 7 所示。

(3) 预测微构造面。选取分流河道顶面、河口坝底面、溢岸底面、滩坝的底面作为界面 S 。在单砂体尖灭线

分布范围内构建精度为 $8m \times 8m$ 的插值网格，根据井点解释的砂体界面数据二维线性插值方法预测各单砂体的界面 S ；提取单砂体井点砂厚数据，完成各单砂体砂厚数学模型参数求解。构造三组厚度控制点，使用砂厚模型预测控制点的砂体厚度。建立精度为 $8m \times 8m$ 的平面插值网格，以井点砂厚及控制点砂厚为输入，使用二维三次插值算法计算插值网格点厚度数据，从而预测出单砂体厚度分布 D ；依据 S 、 D 计算出单砂体的顶底微构造面。

(4) 合成并嵌入单砂体，构建构型模型。以河道为基准单元，河口坝为重构单元，重新求取河口坝单砂体微构造面，由顶、底微构造面构建各单砂体的三维表示；设置滩坝、溢岸、河口坝、分流河道的秩分别为 1、2、3、4；初始化河道间与浅湖沉积为背景相模型，根据秩大小依次将滩坝、溢岸、河口坝、分流河道嵌入背景相模型中，得到沙二 1²⁽¹⁾单层三维构型模型，如图 8 所示。

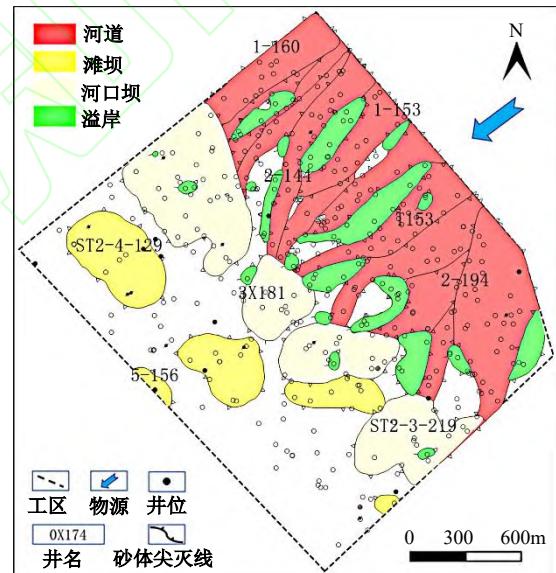


图 7 平面相约束方法确定沙二 1²⁽¹⁾单层单砂体平面范围

Fig.7 Determine bounds of sands in E2sII¹²⁽¹⁾

2.3 建模效果分析

基于建立的沙二 1²⁽¹⁾单层三维砂体构型模型及其剖面切片（切片位置如图 8 所示）分析本文方法的实用性。

PFC 方法能够良好地刻画复杂构型砂体的平面分布形态。由于平面相既能反映垂向上多期单砂体的复合分布范围，又能刻画复杂砂体的平面形态，因此在使用平面相约束建模后，三维砂体模型的砂体平面分布与平面相成果相似，各个单砂体的平面形态特征符合砂体分布

规律,如图8所示。

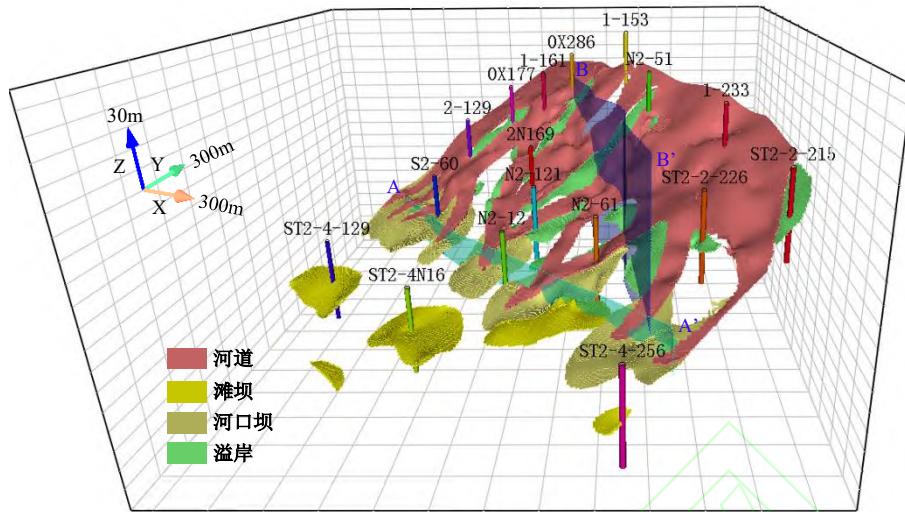


图8 沙二 12(1)单层的三维砂体模型

Fig. 8 Three-dimensional sand body model of E2s₁₁¹²⁽¹⁾

PFC方法能够良好地表征出单层内部垂向上的多期单砂体,如图9剖面BB'所示两期溢岸砂体。在建模过程中,由于针对不同构型类型的各个单砂体分别确定其砂体尖灭线,并依各单砂体的平面展布范围提取顶底微构造面,因此能够独立地表征每一个单砂体的三维特征,使得建模结果与井点数据完全吻合。

PFC方法能够良好地表征各个单砂体的剖面形态特征,如图9剖面AA'所示。在建模过程中,由于使用河道的顶面及河口坝的底面作为具有线性变化特征的界面S,因此,构型模型中河道的顶面及河口坝的底面较为平整,良好地展现了河道顶平底凸和河口坝底平顶凸的几何形态特征;由于使用砂体厚度模型作约束,各单砂体的厚度变化符合由中心向边缘减薄的趋势,剖面形态符合地质沉积规律;考虑到在本文中河口坝和河道间的相对关系分别为重构单元和基准单元,以河道单砂体为基准单元,基于河道的界面及厚度,重构与其具有接触关系的河口坝单砂体的顶、底微构造面,因此在嵌入各个单砂体过程中,秩较低的河口坝先嵌入背景相模型中,而秩相对高的河道会在河口坝之后嵌入,故而剖面上两者具有良好的接触关系。

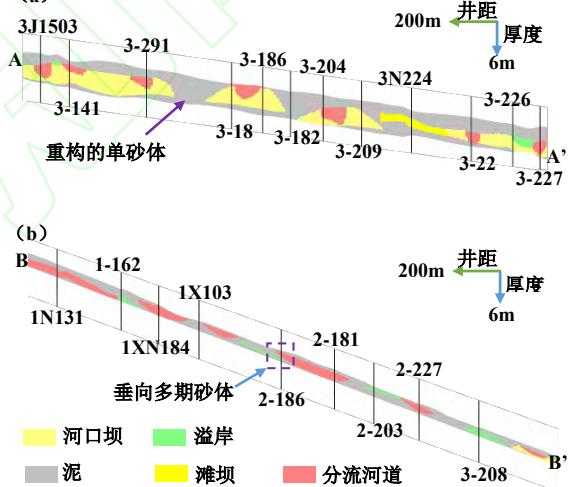


图9 PFC方法建模AA'剖面(上)和BB'剖面(下)切片

Fig. 9 AA' profile (top) and BB' profile (bottom) of the model obtained by the PFC approach

2.4 建模方法比较分析

已有建模方法主要通过变差函数、几何参数、训练图像等表征地质体的空间结构特征,因此,本文从此三大类方法中分别选取适用于研究区的指示克里金、FLUVSIM 模拟及 SNESIM 算法实现目的层段的砂体构型单元建模,并将建模结果与本文方法结果作对比分析。

其中,指示克里金方法是一种通过在克里金预测的空间变异性模型中增加独立的指示变量实现离散变量的两点统计空间插值方法。在构型建模过程中,方法主要

应用井资料（井眼解释的沉积相）进行井间插值实现构型建模，其主要步骤包括井数据网格化、分相设置变差函数等。以分流河道为例，变差函数模型选择为球状模型，设置基台值为1，块金值为0，方位角为30°，倾角为3°，主变种程1500，次变种程500，垂向变程为5；FLUVSIM^[40]是一种基于目标的层次模拟方法，通过参数化各类相单元几何形态的方式完成三维建模。建模步骤主要包括微相空间体积占比分析、不同类型砂体形态参数设置等。以分流河道为例，设置其体积百分比为26.1%、模拟条数为5、最大迭代次数为1000、流向40°、波长315、幅长40、宽度40、厚度3m；SNESIM算法^[41]是Strebelle于2000年提出的一种基于多点地质统计理论的建模方法，能够一定程度再现目标体形态特征。在砂体建模过程中，该方法以井资料为输入，通过扫描三维训练图像获取各待模拟点砂体类型分布概率。

基于以上方法建立的构型模型如图10、11、12所示。三维模型及其AA'剖面切片表明，指示克里金方法建立的模型能够一定程度上反映构型单元的分布特征，如河道的流向及规模等，但是难以有效体现砂体的几何形态特征及空间连续性；与指示克里金方法相比，SNESIM方法建模结果在表征构型单元的空间连续性方面效果更好，能良好刻画河道等砂体的平面分布形态，然而难以体现不同砂体的剖面形态特征；FLUVSIM模拟的砂体则具有良好的空间几何形态，然而难以刻画研究区砂体分布的非平稳性，模拟结果与井点数据吻合度低。此外，以上方法的建模结果均难以有效刻画不同构型单元间的复杂接触关系。因此，与已有建模方法相比，本文提出的PFC方法具有更加良好的建模应用效果。

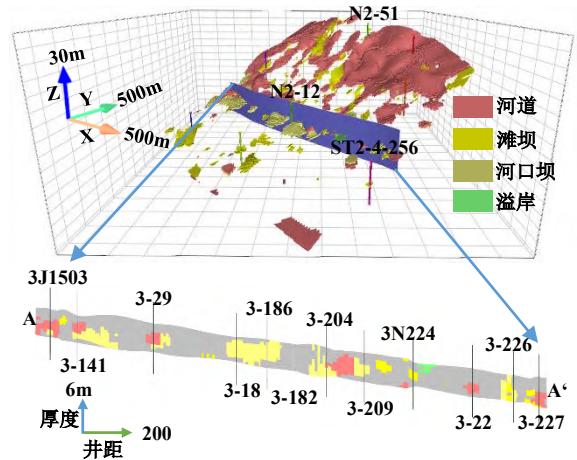


图10 指示克里金方法所建模型及其AA'剖面
Fig. 10 Models constructed by the Indicator Kriging method and its AA' profiles

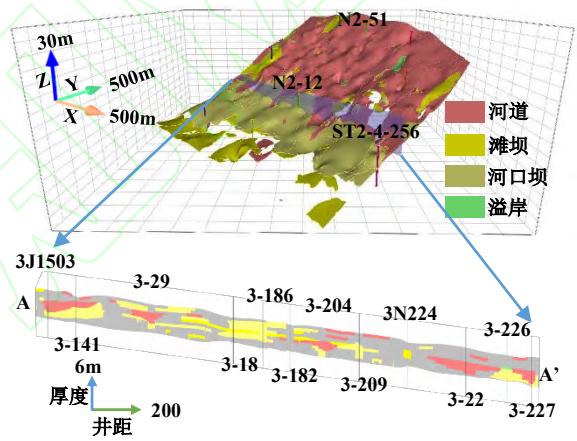


图11 SNESIM 建模方法所建模型及其AA'剖面
Fig. 11 The model constructed by the SNESIM method and its AA' profile

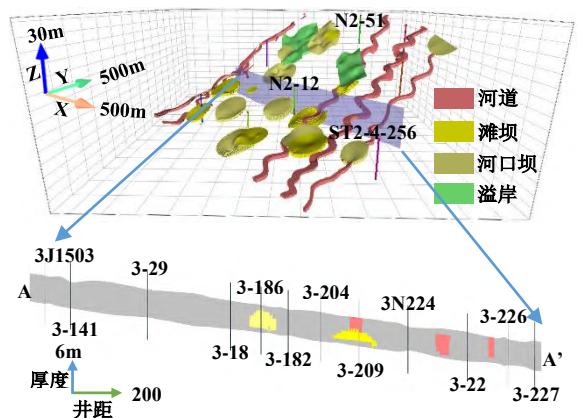


图12 FLUVSIM 模拟方法所建模型及其AA'剖面
Fig. 12 Models constructed by the FLUVSIM method and its AA' profiles

3 结论

(1) 通过确定各个单砂体顶、底微构造面的方式建立能够体现不同微相类型单砂体界面的构型模型。为有效刻画不同微相类型单砂体的复杂平面几何形态,综合运用一维井资料和二维平面相成果自动确定各单砂体的平面展布范围;为良好体现单砂体的剖面形态特征,引入数学模型约束单砂体的厚度分布,克服了井点数据缺乏、井位分布不均匀等情况下砂体厚度预测结果不合理等问题;为合理表征不同构型单元间的复杂接触关系,通过叠置模式约束重构顶、底微构造面的方式优化单砂体的三维表示,嵌入式建立三维砂体构型模型。

(2) 与已有的 FLUVSIM 模拟等建模方法相比,本文中方法在表征单一砂体、刻画不同微相类型砂体的空间分布形态特征方面更具优势。

参考文献:

- [1] 吴胜和.储层表征与建模[M].北京:石油工业出版,2010: 136-150.
- [2] 吴胜和,金振奎,黄沧钿,等.储层建模[M].北京:石油工业出版社,1999: 57-77.
- [3] HERBERT M H, JONES C B, TUDHOPE D S. Three-dimensional reconstruction of geoscientific objects from serial sections[J]. The Visual Computer, 1995, 11(7): 343-359.
- [4] 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.
- [5] 谢鹏飞,侯加根,汪彦,等.碳酸盐岩缝洞型储层多元信息融合建模方法在塔河油田十二区奥陶系油藏的应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(3):1-14.
XIE Pengfei, HOU Jiagen, WANG Yan, et al. Application of multi-information fusion modeling of fracture-vuggy reservoir in Ordovician reservoir of 12th block in Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023,47(3): 1-14.
- [6] 刘钧,杨希濮,吕文睿,等.多点地质统计建模在扇三角洲沉积中的应用[J].西南石油大学学报(自然科学版),2022,44(5): 47-60.
LIU Jun, YANG Xipu, LÜ Wenrui, et al. Application of Multi-point Geostatistical Modeling in Fan Delta Sedimentary Model[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(5): 47-60.
- [7] 王鸣川,段太忠.基于相序的多点地质统计学相建模方法及其应用[J].石油与天然气地质,2023,44(1): 238-246.
WANG Mingchuan, DUAN Taizhong. Multi-point geostatistical phase modeling method based on phase sequence and its application[J]. Oil and Gas Geology, 2023, 44(1): 238-246.
- [8] WANG X, YU S, LI S, et al. Two parameter optimization methods of multi-point geostatistics[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109724.
- [9] 王冬焕,黄思静.单砂体建模技术及应用:以华北油田某区块为例[J].岩性油气藏,2012, 24(4): 93-98.
WANG Donghuan, HUANG Sijing. Modeling technology and application of single sand body: taking a block in North China Oilfield as an example[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4): 93-98.
- [10] JACKSON M D D, PERCIVAL J R R, MOSTAGHIMI P, et al. Reservoir modeling for flow simulation by use of surfaces, adaptive unstructured meshes, and an overlapping-control-volume finite-element method[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2015, 18(2): 115-132.
- [11] HUANG J, LONGXIN M U, HEPING C, et al. Preliminary study on a depositional interface-based reservoir modeling method[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 635-639.
- [12] Bo N, Jiahong Z, Ping F U, et al. Trend judgment of abandoned channels and fine architecture characterization in meandering river reservoirs: a case study of Neogene Minhuazhen Formation NmIII2 layer in Shijiutuo bulge, Chengning uplift, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 943-953.
- [13] 高博禹,孙立春,胡光义,等.基于单砂体的河流相储层地质建模方法探讨[J].中国海上油气,2008, 20(1): 34-37.
GAO Boyu, SUN Lichun, HU Guangyi, et al. Geological modeling of fluvial reservoirs based on single sand body[J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(1): 34-37.
- [14] JOURNEL A G. Nonparametric estimation of spatial distributions[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1983, 15: 445-468.
- [15] ZENG L, REN W, SHAN L, et al. Lithology spatial distribution prediction based on recurrent neural network with Kriging technology[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 214: 110538.
- [16] Erdogan Erten G, Yavuz M, Deutsch C V. Combination of machine learning and kriging for spatial estimation of geological attributes[J]. Natural Resources Research, 2022, 31(1): 191-213.
- [17] MATHERON G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [18] KRIGE D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1951, 52(6): 119-139.
- [19] VERLY G W. Sequential gaussian cosimulation: a simulation method integrating several types of information[J]. Geostatistics Tróia'92. 1993,1: 543-554.
- [20] 潘少伟,罗海宁,郭智.序贯指示模拟法夹层模型建立[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014, 36(05): 59-66.
PAN Shaowei, LUO Haining, GUO Zhi. Intercalation modeling by sequential indication simulation method[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2014, 36(05): 59-66.
- [21] DEUTSCH C V, TRAN T T. Fluvsim: a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(4): 525-535.
- [22] LI W, LI S, YU J, et al. A well conditioning method of object-based models[J]. Interpretation, 2023, 11(1): SA115-SA125.
- [23] 吴玉其,林承焰,任丽华,等.基于多点地质统计学的数字岩心建模[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(03):12-21.
WU Yuqi, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Digital core modeling based on multi-point geostatistics[J]. Journal of China University of

Petroleum(Natural Science Edition),2018,42(03):12-21.

- [24] ESKANDARI K, SRINIVASAN S. Reservoir modelling of complex geological systems: a multiple-point perspective[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2010, 49(8): 59-69.
- [25] 王恺其,肖凡.多点地质统计学的理论、方法、应用及发展现状[J].地质科技通报,2019,38(6): 256-268.
WANG Kaiqi, XIAO Fan. Theory, method, application and current development of multi-point geostatistics[J]. Geoscience and Technology Bulletin, 2019, 38(6): 256-268.
- [26] SONG S, MUKERJI T, HOU J, et al. GANSim-3D for conditional geomodeling: theory and field application[J]. Water Resources Research, 2022, 58(7): 1-54.
- [27] HU F, WU C, SHANG J, et al. Multi-condition controlled sedimentary facies modeling based on generative adversarial network[J]. Computers & Geosciences, 2023, 171: 105290.
- [28] SUN C, DEMYANOV V, ARNOLD D. Geological realism in Fluvial facies modelling with GAN under variable depositional conditions[J]. Computational Geosciences, 2023, 27(2): 203-221.
- [29] 吴胜和,李宇鹏.储层地质建模的现状与展望[J].海相油气地质,2007,12(3): 53-60.
WU Shenghe, LI Yupeng. Current status and outlook of reservoir geologic modeling[J]. Offshore Oil and Gas Geology, 2007, 12(3): 53-60.
- [30] 李增学,李莹,刘海燕,等.岩相古地理优势相方法及应用:兼谈“广义”与“狭义”岩相古地理及若干新的研究方向[J].古地理学报,2021,23(3): 489-506.
LI Zengxue, LI Ying, LIU Haiyan, et al. The dominant phase method and application of petrographic paleogeography: an overview of "broad" and "narrow" petrographic paleogeography and some new research directions[J]. Journal of Paleogeography, 2021, 23(3): 489-506.
- [31] RAZAK S M, JAFARPOUR B. Conditioning generative adversarial networks on nonlinear data for subsurface flow model calibration and uncertainty quantification[J]. Computational Geosciences, 2022, 26(1): 29-52.
- [32] 徐帅,孙豁然,穆太升,等.三维实体建模中矿岩尖灭线自动生成系统的研究与实现[J].金属矿山,2008 (11): 93-96.
XU Shuai, SUN Kuaoran, MU Taisheng, et al. Research and implementation of automatic generation system for ore cusp extinction line in three-dimensional solid modeling[J]. Metal Mining, 2008 (11): 93-96.
- [33] DE MESNARD L. Pollution models and inverse distance weighting: some critical remarks[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 459-469.
- [34] XIE Y, CHEN T, LEI M, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: accuracy and uncertainty analysis[J]. Chemosphere, 2011, 82(3): 468-476.
- [35] MENG Q, LIU Z, BORDERS B E. Assessment of regression kriging for spatial interpolation—comparisons of seven GIS interpolation methods[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2013, 40(1): 28-39.
- [36] 马义权,杜学斌,刘惠民,等.东营凹陷沙四上亚段陆相页岩岩相特征、成因及演化[J].地球科学,2017,42(7): 1195-1208.
MA Yiquan, DU Xuebin, LIU Huimin, et al. Petrographic characteristics, genesis and evolution of terrestrial shales in the upper subsection of Shasi, Dongying Depression[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1195-1208.
- [37] 黄文科,戴俊生,窦之林,等.胜坨油田储层砂体建筑结构分析[J].西南石油大学学报,2007(3):32-35, 15.
HUANG Wenke, DAI Junsheng, DO Zhilin, et al. Structural analysis of reservoir sand body in Shengtuo Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007(3):32-35, 15.
- [38] 王居峰.济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组沉积相[J].古地理学报,2005(1):45-58.
WANG Jufeng. Sedimentary phases of the Paleocene Shahejie Formation in the Dongying Depression of the Jiyang Depression[J]. Journal of Paleogeography, 2005(1):45-58.
- [39] 李浩男.胜坨油田胜二区沙二段1~2砂组三角洲-滩坝砂体构型研究[D].北京:中国石油大学(北京), 2021.
- [40] DEUTSCH C V, TRAN T T. Fluvsim: a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(4): 525-535.
- [41] Strebelle S, Cavelius C. Solving speed and memory issues in multiple-point statistics simulation program SNESIM[J]. Mathematical Geosciences, 2014, 46: 171-186.