

文章编号:1673-5005(2012)03-0001-06

曲流河点坝内部构型的嵌入式建模方法研究

范 峥^{1,2}, 吴胜和¹, 岳大力¹, 毕东亮², 温立峰³

(1. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 2. 北京泰隆恒业高新技术有限公司, 北京 100085;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:针对曲流河点坝厚砂体内储层非均质性表征,提出一种点坝内部构型的嵌入式建模方法。该方法以点坝级次三维模型及点坝内部构型分析结果为基础,依次通过基于三维向量场的侧积面模式拟合、侧积面趋势控制的侧积层厚度插值以及网格局部加密的侧积层模型嵌入等3个主要技术环节,形成一套完整的嵌入式构型建模技术流程及算法实现,并应用孤岛油田某区块曲流河点坝储层内部构型的三维建模实例,对建模方法的有效性进行验证。结果表明:嵌入式构型建模方法可建立与井点条件化的点坝内部侧积夹层精细三维模型,并可对井间侧积层分布进行有效预测;采用的网格局部加密侧积层模型嵌入方式优化了不同构型级次及尺寸规模构型单元的三维网格表示。

关键词:曲流河;点坝;内部构型;侧积层;嵌入式地质建模;孤岛油田

中图分类号:TE 319

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.001

Embedding modeling method for internal architecture of point bar sand body in meandering river reservoir

FAN Zheng^{1,2}, WU Sheng-he¹, YUE Da-li¹, BI Dong-liang², WEN Li-feng³

(1. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Telon Hi-Tech Company Limited, Beijing 100085, China;

3. Research Institute of Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: A new internal architecture embedding modeling method was proposed for the reservoir heterogeneity of lateral accretion shale beddings (LA) of point bar sand body in meandering river reservoir. Based on the point bar 3D grid model and the internal architecture analysis results, three-order modeling technology links were applied to form a full set of embedding modeling technology process and the algorithm implementation, which includes 3D vector field lateral accretion pattern fitting modeling, the LA thickness distribution interpolation in the control of lateral accretion surface trend and partial grid subdividing model embedding process. And then, the validity of the modeling method was validated. The results show that the embedding modeling method can be used to establish fine 3D model of LA which conditions to wells, and the LA distribution between wells can be drawn from this fine model. An optimized grid description of different levels and scale architecture units was provided through partial grid subdividing model embedding technology.

Key words: meandering river; point bar; internal architecture; lateral accretion shale beddings; embedding modeling; Gudao Oilfield

点坝(又称边滩)砂体是曲流河储层最重要的砂体类型。在点坝内部发育砂质侧积体和泥质侧积层两类构型单元,其中泥质侧积层是十分重要的渗

流屏障,在很大程度上控制着注水开发过程中点坝砂体内部油水运动,进而影响着点坝内部的剩余油分布^[1-3]。因此,建立以侧积层为目标的点坝砂体内

收稿日期:2011-10-09

基金项目:国家科技重大专项课题(2011ZX05009-003);国家自然科学基金项目(40902035);教育部博士点新教师基金项目(20090007120003)

作者简介:范峥(1977-),男(汉族),重庆市人,博士研究生,研究方向为油气田开发地质。

部构型三维定量模型,对曲流河储层内部剩余油预测与挖潜具有很大的实用价值^[4-5]。曲流河储层构型建模可分为河道、点坝及点坝内部3个层次^[6],其中,河道与点坝层次构型建模方法相对成熟^[7]。但是,由于点坝内部侧积层几何形态及空间叠置关系相对复杂,现有的建模方法难于表征其空间分布。基于像元的指示克里金及序贯指示等离散属性建模方法主要通过变差函数表示空间相关性,难以描述储层构型层次的复杂空间结构特征^[8-9];基于目标的建模方法通过参数化信息描述地质体几何外形和空间分布,主要适用于几何形态相对简单的地质目标体建模^[10];基于沉积过程的建模方法在实际模拟过程控制及条件化方面还存在技术难题,目前仅用于概念性沉积模式的过程再现^[11];基于多点统计的地质统计学方法在三维训练图像的获取和平稳性方面还存在不足,不适用于内部构型的三维建模^[12-13]。同时,由于侧积层规模相对较小,即使密井网条件下也难以有效控制其分布,导致作为建模硬数据的井点信息相对不足;另外,侧积层、点坝及河道等不同级次砂体构型单元的规模相差较大,如何在一定分辨率的网格中有效表示其分布也成为一技术难点,迫切需要发展新的、有针对性的储层内部构型建模方法。因此,笔者探索一种嵌入式构型建模方法,实现点坝内部侧积层三维空间自动模式拟合及网格模型的生成,并进行现场实际应用。

1 建模方法原理

依据侧积层发育形式,曲流河点坝内部构型模式可划分为水平斜列式、阶梯斜列式以及波浪式3种类型^[14]。在波浪式的构型模式中侧积层几何形态及空间分布暂无规律可循,因此本文提出的建模方法只针对于水平斜列式及阶梯斜列式两种类型,其构型特征表现为多期侧积层在三维空间呈规则排列,单个侧积层为倾斜的新月形泥岩披覆体。

点坝内部构型建模的最终目标是在各单一点坝网格实体模型中嵌入网格化的侧积层模型。嵌入式构型建模方法首先通过一种自动模式拟合曲面建模技术建立解析式的侧积面模型,用以表征侧积层的空间分布与形态;其次,提取各井点处的侧积层厚度数据,并在侧积曲面范围内进行插值,从而建立侧积层厚度分布模型;最终,依据侧积曲面及侧积层厚度模型,以网格局部加密的方式将侧积夹层嵌入到先期建立的点坝实体模型中。

1.1 侧积面模式拟合

侧积面建模的最大难点是井点约束信息的不充分。在油田开发阶段,即使在密井网条件下也仅有少数井点钻遇侧积层,甚至部分侧积层分布于井间而无井控制,仅通过有限井点间的简单数学插值难以恢复其几何形态及空间分布。因此,侧积面建模将采用模式拟合的方式,即通过定量的构型界面模式与井点信息进行拟合,从而建立侧积面的三维分布。

1.1.1 侧积层定量模式参数

前人研究表明,侧积层作为点坝内部侧向加积的结果,在空间上多呈倾斜披覆状,平面几何形态呈弧形,剖面形态多呈斜插的泥楔,垂向延伸范围大致为2/3河深,从而形成多期侧积体间的半连通模式(图1)。表征单一侧积层空间分布特征的参数主要有倾向、倾角、延伸范围,而多个侧积层之间的距离可用侧积间距表达^[11]。

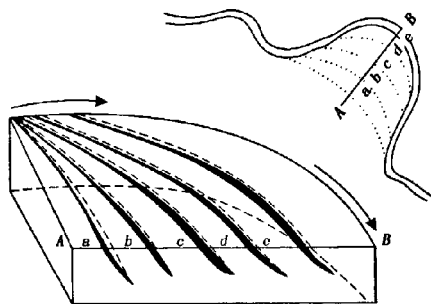


图1 点坝砂体内部泥质侧积夹层(据薛培华)

Fig.1 Lateral accretion shale beddings of point bar sand body(After XUE)

应用几何学中的样条曲面模型^[15],可将上述参数进一步综合为如图2所示的抽象几何模型。其中,该样条曲面又可称为侧积曲面,用以表示侧积层的几何形态与空间分布。在该模型中,侧积曲面在平面的投影轨迹被称为侧积准线,可表示该侧积层的平面形态及侧积期次;垂直于曲面顶、底准线的线段被称为柱线,其长度可表示侧积层的剖面形态及垂向延伸范围;柱线与水平面的投影夹角为侧积倾角;侧积准线曲率最大位置处的法线方向为点坝侧积倾向;两条侧积准线间的距离为侧积间距。

如图2(a)所示,对于单个“侧积曲面A”,可认为其由保持一定倾向、倾角的“柱线B”沿“侧积准线C”移动一周而确立。通过倾向、倾角和延伸范围参数以及一条二维侧积准线函数方程即可以数学解析形式表示一个斜列式的空间侧积曲面模型。同

理,再给定一簇渐变的多期侧积准线函数方程(可通过点坝首期/末期侧积准线及侧积间距求取),即可解析表示一个点坝内部的多期侧积曲面。

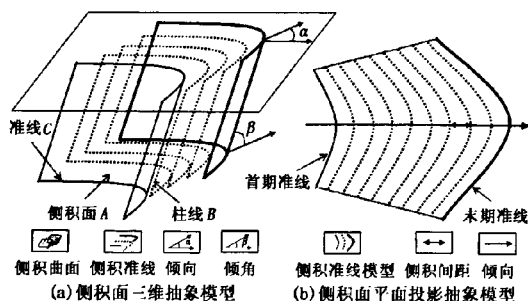


图2 点坝内部侧积面抽象几何模型

Fig.2 Abstract geometry model of LA surface inside the point bar

1.1.2 条件化侧积模型生成

根据抽象解析式模型,应用实际建模区的定量侧积模式参数可建立非条件化的初始侧积曲面模型,然后根据井点对初始模型进行优化调整,使各个侧积面与井点位置相吻合。若初始模型与井点差别较大,则需要进一步确认先期所建立的定量侧积模式参数。

1.2 侧积层厚度表征

由于井点约束信息的不足,难以通过井点间的简单插值确立侧积层厚度分布,可通过侧积层厚度分布趋势控制并综合井点值进行厚度插值。一般认为沿侧积层纵向(从顶部到底部)厚度呈线性变化,顶部厚度最大,底部厚度最小;沿侧积层横向厚度无明显变化。因此,根据井点处统计获得的侧积层最小、最大厚度参数即可建立初始侧积层厚度分布,并最终应用各井点处厚度值对初始厚度模型进行局部校正,从而建立与井点条件化的侧积层厚度模型。

1.3 侧积层模型嵌入

点坝内部侧积层厚度规模一般为 $0.2 \sim 1.0 \text{ m}^{[16]}$,而河道与点坝砂体规模相对较大,如何在大尺度的高级次构型模型中嵌入小规模的低级次构型单元成为了一项技术难题。对于河道及点坝构型级次,建模时三维网格模型3个方向上一般按 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的分辨率即可有效描述其构型特征,但对于厚度较小且倾斜分布的点坝内部侧积夹层,该网格分辨率显得太过粗略;反之,如果根据侧积层几何尺寸建立三维网格,势必导致整个网格节点的膨胀,难以满足地质建模和后续油藏数值模拟的要求。

因此,最优化的技术方案为在点坝粗网格构型模型中以网格局部加密方式实现侧积夹层的模型嵌入。实现过程可首先基于侧积曲面与点坝网格模型的几何求交,计算得到侧积面穿过的粗网格,即需要被局部加密的网格单元,再根据侧积层厚度规模对加密细网格赋值夹层属性,从而实现侧积夹层在点坝网格模型中的嵌入。

2 建模方法步骤

2.1 侧积面模式拟合建模

(1)侧积向量场的建立。根据平面首期/末期侧积准线及侧积倾向、倾角等参数,建立点坝内部三维侧积向量场,作为后续侧积面模式拟合的计算坐标系。其中,沿准线方向为 X 坐标轴,沿侧积倾向方向为 Y 坐标轴,沿垂直于准线的侧积倾角方向为 Z 坐标轴,且在 XY 平面内根据点坝形态(准线长度及点坝宽度)建立 $0 \sim 1$ 的归一化平面局部坐标系(图3)。

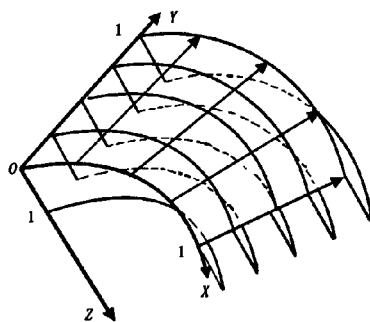


图3 点坝内部三维侧积向量场

Fig.3 Three-dimension lateral accretion vector field of point bar

(2)钻遇同一侧积层井点的识别与归类。在三维侧积向量场内将各侧积夹层井点沿 Z 轴方向投影到二维 XY 平面,并计算得到各井点归一化的 X 、 Y 坐标(图4(b))。其中, X 坐标表示井点在侧积层上的横向位置,如 X 值为 0.5 时表示该井点钻遇侧积层中部; Y 坐标表示井点与首期侧积层间的距离,如 Y 值为 1 时表示该井点钻遇最末期侧积层。 Y 坐标值相同的井点可被认为是处于同一期侧积层,但一般由于侧积层形态的局部变化,钻遇同一侧积层的各井点 Y 坐标值只能是大致相近,因此可应用模糊聚类方法^[17]对各井点按 Y 坐标值进行归类,被归于同一类的点即为钻遇同一侧积层的井点(图4(c))。

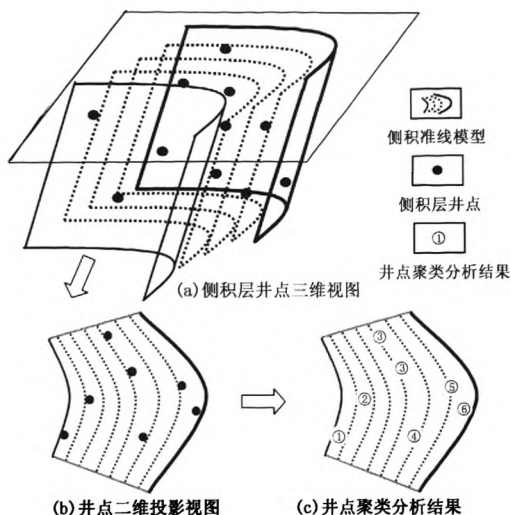


图4 侧积层井点聚类分析过程示意图

Fig.4 LA well points clustering analysis diagram

(3) 初始模型生成与井点条件化。基于三维侧积向量场,应用先验的侧积间距参数生成初始的侧积曲面模型。如图5(a)所示,根据首期/末期侧积准线,在点坝内部按等间距的方式插入了6个形态渐变的侧积曲面。此时该初始模型与井点只是大致吻合,还需做进一步的井点条件化处理。井点条件化的第一步,是将初始模型中的侧积曲面位置进行优化调整,使得调整后各井点到各自钻遇侧积层的距离之和达到最小,无井点钻遇的侧积层将参考侧积间距和其他侧积层的位置移动做相应调整;第二步,通过井点坐标值对侧积曲面进行局部校正,确保各曲面穿过井点处的侧积夹层位置(图5(b))。在建立侧积面模型基础上即可在侧积面范围内进行侧积层厚度插值,具体实现过程参照1.2章节。

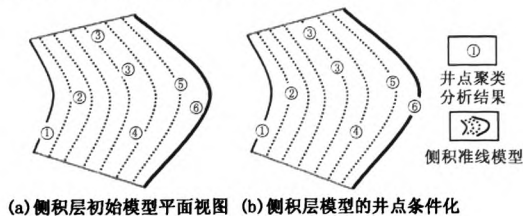


图5 侧积层初始模型生成及条件化过程示意图

Fig.5 Diagram of initiation and well conditioning process for LA model

2.2 侧积夹层模型嵌入

侧积夹层网格模型嵌入过程如下:首先,通过侧积曲面与点坝层次构型三维网格模型的几何求交,计算得到侧积曲面穿过的粗网格单元,并设置该网

格单元的加密次数,从而对粗网格进行局部加密。例如,点坝级次网格模型分辨率3个方向分别为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,可设置 $10 \times 10 \times 5$ 次的加密次数将网格分辨率提高到 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0.1\text{ m}$;其次,根据侧积曲面空间形态及侧积层厚度分布模型对其所穿过的加密网格赋值夹层属性,从而实现在点坝三维模型中嵌入较小规模的次一级侧积层构型网格模型。

根据上述建模方法原理及技术流程,基于Direct数字化油藏表征的软件平台,编制了点坝侧积夹层嵌入式建模的软件模块。

3 应用实例

以中国东部胜利油区孤岛油田馆陶组某小层典型高弯曲流河储层为例,对上述建模方法和软件模块进行实例应用和效果分析。实例区为该油田的一个区块,共有钻井47口,平均井距100 m。

3.1 建模基础

点坝内部构型建模的基础包括以下3个方面:

(1) 三维点坝模型。已有的精细地质研究表明,建模区曲流河砂体内部发育3个完整的单一点坝,厚度约为3~5 m,跨度约为600 m,各点坝平面位置及形态如图6(a)所示。采用指示克里金插值及人机交互方式,建立确定性的点坝层次构型三维模型,其网格 $I/J/K$ 方向分辨率为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (图7)。

(2) 井点侧积层解释数据。研究区侧积层较薄,通过岩心观察厚度一般为0.3~0.8 m,测井曲线表现为微电极曲线明显回返且幅度差减小,自然伽马曲线见回返,自然电位曲线轻微回返。在单井处通过岩心及测井曲线解释并划分侧积夹层段,进而提取其中心点坐标及厚度值,作为侧积面模式拟合及侧积层厚度插值的井点约束信息(图6(c))。

(3) 侧积层定量模式参数。研究表明,点坝砂体内部发育水平斜列式侧积层,侧积倾角为 $5^\circ \sim 10^\circ$,横向延伸长度为70~150 m,侧积间距为20~35 m。各点坝内部构型定量模式参数如表1所示。

表1 研究区点坝内部定量侧积模式参数

Table 1 Quantitative lateral accretion parameters of point bar in study area

侧积模式参数	倾向 $\alpha/(\circ)$	倾角 $\beta/(\circ)$	间距 s/m	垂向延伸长度 L/m
点坝1(14-914井组)	160.0	7.0	25.0	3.0
点坝2(B108井组)	90.0	6.0	30.0	3.0
点坝3(15-811井组)	22.5	7.5	25.0	3.2

3.2 点坝内部构型建模

首先在侧积层模式拟合时,将各种已先期确立的定量侧积模式参数及井点条件化信息作为建模原始信息输入(表1),并通过建模软件在后台对模式拟合数学算法的调用执行,即可建立条件化的侧积曲面模型,具体实现过程及成果如图6所示。自动调用侧积层厚度插值算法,在侧积面范围内自动生

成各期次侧积层厚度模型。

在模型嵌入过程中,采用了 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ 分辨率的局部加密网格来近似表达 $0.3\sim 0.8\text{ m}$ 厚度规模的侧积夹层,确保了有效体积误差和网格节点个数的要求,并最终将侧积夹层嵌入到点坝网格模型中(图7)。

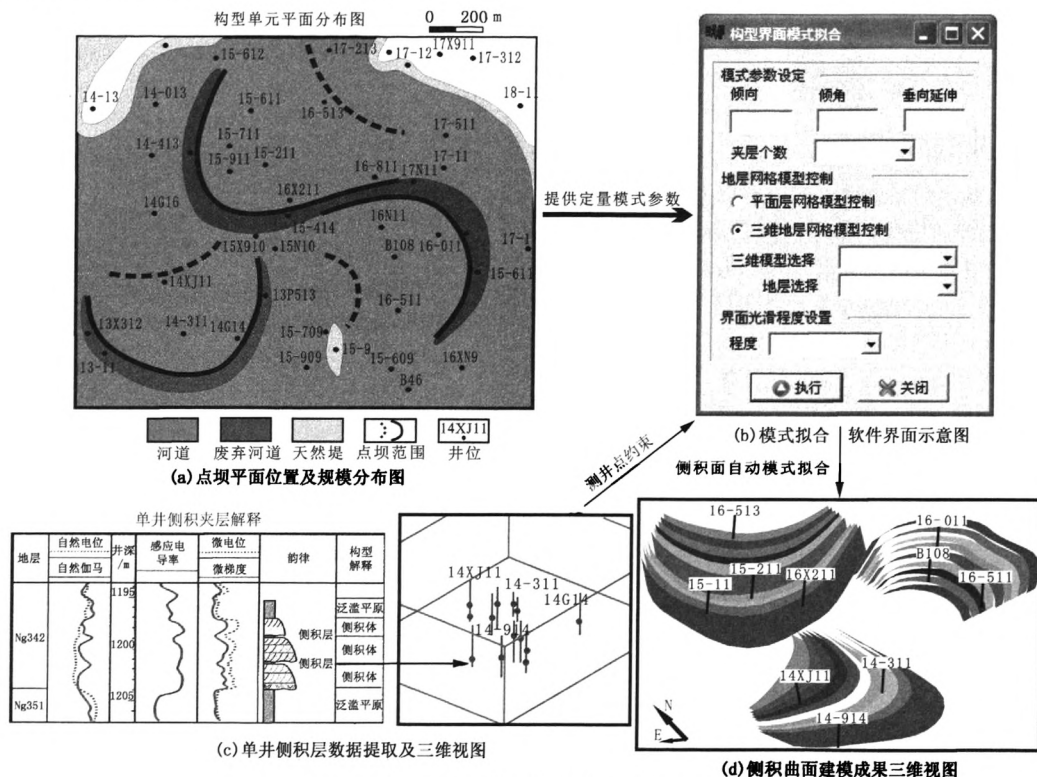


图6 研究区侧积层模式拟合建模过程及成果图

Fig.6 LA pattern fitting modeling process and 3D view of result model in study area

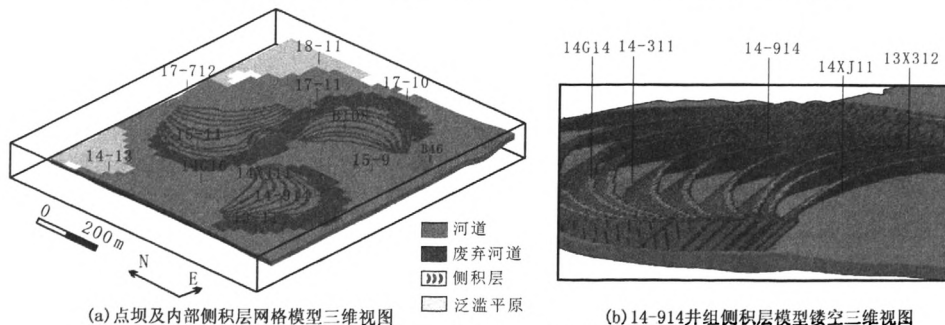


图7 研究区点坝内部构型建模成果

Fig.7 Internal architecture modeling result of point bar in study area

通过上述嵌入式建模方法,成功实现了点坝内部储层构型的三维表征,再现了侧积体与侧积层构

型单元的几何外形、接触关系和空间分布,并实现了在各井点位置处的条件化,同时对井间构型单元的

分布进行了有效预测。以 14-914 井组所钻遇的点坝为例(图 7),该井组在建模时仅有 3 口钻井,通过定量侧积模式的指导和井点约束建立了点坝内部构型模型。从模型可知该点坝内部共发育 9 期侧积体,且相互间在中上部被泥质侧积层所分隔,各期次侧积体和侧积层在形态、规模和位置上呈现继承性的渐变规律。后期在该点坝范围内新钻井 2 口,分别为 14XJ11 和 13X312,对新井资料的解释发现井点处泥质夹层发育情况与所建模型完全吻合,充分验证了嵌入式建模方法的技术先进性和有效性。

4 结论与建议

(1) 提出的新点坝内部构型嵌入式建模思路与方法包括基于三维向量场的侧积面模式拟合、侧积面趋势控制的侧积层厚度插值以及网格局部加密的侧积层模型嵌入等 3 个主要技术环节。

(2) 应用该建模方法可建立条件化到井点的点坝内部侧积夹层精细三维模型,并且所建模型可对井间侧积层分布进行有效预测。采用网格局部加密侧积层模型嵌入方式优化可优化不同级次及规模构型单元的三维网格表示。

参考文献:

- [1] 薛培华. 河流点坝相储层模式概论[M]. 北京:石油工业出版社,1991:55-63.
- [2] MIALD A D. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology[M]. New York: Springer-Verlag, 1996:74-98.
- [3] 王夕宴,钟建华,薛照杰,等. 孤岛油田馆(1+2)砂层组沉积模式及其对剩余油分布的控制[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(6):44-47.
WANG Xi-bin, ZHONG Jian-hua, XUE Zhao-jie, et al. Sedimentary model of Guan(1+2) sand sets and its control over distribution of remaining oil in Gudao Oilfield[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004,28(6):44-47.
- [4] 贾爱林. 中国储层地质模型 20 年[J]. 石油学报, 2011,1(1):181-188.
JIA Ai-lin. Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past two decades[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,1(1):181-188.
- [5] 林承焰. 剩余油形成与分布[M]. 东营:石油大学出版社,2000.
- [6] 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,2008,38(增刊 I):111-121.
- [7] 岳大力,吴胜和,程会明,等. 基于三维储层构型模型的油藏数值模拟及剩余油分布模式[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(2):21-27.
YUE Da-li, WU Sheng-he, CHENG Hui-ming, et al. Numerical reservoir simulation and remaining oil distribution patterns based on 3D reservoir architecture model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(2):21-27.
- [8] 吴胜和,金振奎,黄沧钊,等. 储层建模[M]. 北京:石油工业出版社,1997.
- [9] 王家华,张团峰. 油气储层随机建模[M]. 北京:石油工业出版社,2001:10-142.
- [10] DEUTSCH C V, WANG L. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs[J]. Math Geology, 1996,28(7):857-880.
- [11] PYRCZ M J, DEUTSCH C V. ALLUVSIM: A program for event-based stochastic modeling of fluvial depositional systems[J]. Computers & Geosciences, 2009,35:1671-1685.
- [12] JSTREBELLE S. Conditional simulation of complex geological structure using multiple-point statistics[J]. Mathematical Geology, 2002,34(1):1-21.
- [13] 吴胜和,李文克. 多点地质统计学:理论、应用与展望[J]. 古地理学报,2005,7(1):137-144
WU Sheng-he, LI Wen-ke. Multiple-point geostatistics: theory, application and perspective[J]. Journal of Palaeogeography, 2005,7(1):137-144.
- [14] 岳大力. 曲流河构型分析与剩余油分布模式研究[D]. 北京:中国石油大学资源与信息学院,2006.
YUE Da-li. The study on architecture analysis and remaining oil distribution patterns of meandering river reservoir[D]. Beijing: Faculty of Natural Resource & Information Technology in China University of Petroleum (Beijing), 2006.
- [15] 莫蓉,常智勇. 计算机辅助几何造型技术[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [16] 赵翰卿. 河道砂岩中夹层的稳定性[J]. 大庆石油地质与开发,1985,4(3):1-12.
ZHAO Han-qing. Continuity of intercalated in channel sandstones[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1985,4(3):1-12.
- [17] 边肇祺,张学工. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

(编辑 徐会永)