引文格式：刘金, 陈代鑫, 覃得强, 等. 地层精细划分下的储层岩石学特征三维建模分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(10): 14-17. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.10.004

地层精细划分下的储层岩石学特征三维建模分析

刘　金[1]，陈代鑫[1]，覃得强[1]，刘克胜[1]，王　宇[1]，王　冲[2]
（1.中国石油长庆油田分公司第十二采油厂，陕西 西安710018；
2.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院，陕西 西安710018）

摘　要：可信度低的储层岩石学特征三维模型，会使得三维模型的应用价值下降。针对上述问题，构建地层精细划分下储层岩石学特征三维优化模型。选择Petrel软件作为储层岩石学特征三维建模工具，从钻井、沉积相、孔隙水等多个方面准备数据样本；模拟储层成岩与演化过程，设计地层结构精细划分标准，精细划分储层结构；从岩石颜色、矿物组分和沉积构造3个方面，分析储层岩石学特征，求解孔隙度、渗透率、含油饱和度等特征属性；按照优化设计的离散型变量和连续型变量，得出储层岩石学特征三维建模结果。通过模型验证实验得出结论：优化设计的储层岩石学三维模型的拟合度以及特征属性误差均满足预设要求，即构建的三维模型具有较高的可信度。

关键词：地层精细划分；储层岩石学；三维特征；特征建模分析
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）10-0014-04

3D Modeling Analysis of Reservoir Petrological Characteristics Based on Fine Stratigraphic Division

LIU Jin[1], CHEN Daixin[1], QIN Deqiang[1], LIU Kesheng[1], WANG Yu[1], WANG Chong[2]
(1. No.12 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China;
2.Research Institute of Exploration & Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China)

Abstract: 3D model of reservoir petrological characteristics with low reliability will reduce its application value. To solve the problems, we constructed a 3D optimization model of reservoir petrological characteristics based on fine stratigraphic division. We selected Petrel software as a 3D modeling tool for reservoir petrological characteristics, and prepared data samples from diverse sources like drilling, sedimentary facies, pore water. Then we simulated the diagenesis and evolution process of reservoirs, and designed fine division standards of stratigraphic structure to divide reservoir structure specifically. From rock color, mineral composition and sedimentary structure, we analyzed the petrological characteristics of reservoir, and solved the characteristic attributes such as porosity, permeability, oil saturation, etc. According to the discrete variables and continuous variables of optimal design, we got 3D modeling results of reservoir petrological characteristics. Through the model verification experiment, it is concluded that the fitting degree and characteristic attribute error of 3D optimization model meet the preset requirements, that is, the constructed 3D model has high reliability.

Key words: fine stratigraphic division, reservoir petrology, 3D feature, feature modeling analysis

地层精细划分是指在某一区域内，将地层剖面上的岩层进行划分，并确定地层层序。通过地层精细划分概念的应用，以期能够提高储层岩石学特征三维模型建造结果的应用价值。本文选择Petrel软件作为储层岩石学特征三维建模工具，从钻井、沉积相、孔隙水等多个方面准备数据样本；创新性地通过模拟储层成岩与演化过程，设计地层结构精细划分标准，精细划分储层结构；从岩石颜色、矿物组分和沉积构造3个方面，分析储层岩石学特征，求解孔隙度、渗透率、含油饱和度等特征属性；按照优化设计的离散型变量和连续型变量，获得储层岩石学特征三维建模结果。

1　研究对象

1.1　研究区概况

选择鄂尔多斯盆地区域作为研究对象，鄂尔多斯盆地横跨陕、甘、宁、蒙、晋、北接阴山，南抵秦岭、贺兰山、东部吕梁，总面积370 000 km^2，盆地的主体面积为250 000 km^2，它的外形呈长方形，在

收稿日期：2022-04-09。
项目来源：国家油气科技重大专项项目（2017ZX5013-004）。
第一作者简介：刘金（1984—），学士，主要研究方向为油气田开发，E-mail：luqiaoyic7n@163.com。

106°20′~110°30′E，35°00′~40°40′N之间。从盆地构造特点与历史演变来看，该地区包含6个区域构造单元，其中盆地边缘断层褶皱发育，而盆地内部结构较为简单，岩性较好，总体上倾斜度小于1°。

1.2　研究区储层岩石学特征

1.2.1　岩石颜色

长2储层组分主要为石英，包含岩屑质长石砂岩，并夹杂着灰色、黑色的有机矿物[1-3]。长6储集层的组成以长石为主，并含少量的暗色矿物，岩性为浅灰色、灰绿色的细长石，浅灰色的泥质、灰色的泥质和灰黑色的泥岩。

1.2.2　矿物组分

根据其碎屑组分的相对含量，采用三角形图解方法分析储层岩石中的矿物组成部分，储层岩石学中的矿物组分图解在储层环境中，采集各个地层中的样本，通过扫描电镜、普通薄片和铸体薄片观察、统计分析，确定储层中的矿物组成内容以及含量。

1.2.3　沉积构造

储层的沉积构造类型包括平行层理、块状层理、水平层理等。平行层理的特征是由于水流的强大动力推动，使其形成具有一定规律的分层结构[4-5]。块状层理特征是：在储集层中没有明显的层状结构，其内部的物质分布比较均匀，主要是由破碎物质迅速堆积而成。通过对划分地层之间结构的分析，可以得出沉积构造特征的分析结果。

2　储层岩石学特征三维模型

运用地质原理和三维地质建模原理[6]，对研究区进行高精度的三维地质建模。最终储层岩石学特征三维建模结果包括三维地质构造模型、确定性地质模型和粗化三维地质模型等部分，在特定的控制条件下，确定其可能发生的变化，再根据不同的目标进行选择，从而得到最合理的结果。

2.1　选择储层岩石学特征三维建模工具

Petrel地质建模软件集地震解释、构造建模、岩相建模、油藏属性建模和油藏数值模拟显示及虚拟现实于一体，为地质学家、地球物理学家，岩石物理学家，油藏工程人员提供了一个共享的信息平台。Petrel的功能不仅可以精确描述透视油藏属性的空间分布，还可以计算其储量和误差。

本文利用Petrel地质建模软件对该储层岩石特性进行了三维建模，根据Petrel软件的格式要求[7-8]，加载了初始数据与资料，通过模型软件的可视化展示功能，对异常的井段进行纠正，并得出可视化输出结果。

2.2　数据准备

建立储层岩石学特征的三维建模需要大量的数据，而数据准备则是建立一个由钻井数据、分层数据、沉积相数据、孔隙水数据等组成的数据库。在模型建立过程中，钻井数据是最基本的数据，井位数据包括井号、井口坐标、布井高度、深度、类型等。分层数据是指在各油井的基础上，按照预先研究的结果，划分出地层等级。分层数据是建立地基模型的依据，该类型数据能有效地控制地层的厚度和高度的波动[9-10]。高能相带中的粒状灰岩具有良好的孔渗能力，而低能相区的渗透性较差，因此，在对各油气田的沉积相分析过程中，将各储层的沉积相分为高能滩相区和低能区，并进行了分类统计。另外，孔渗数据主要指的是储层中不同深度位置上对应的孔隙度，可以通过实测孔隙度和渗透率的井获得数据，也可以通过测井获得孔隙度和渗透率数据。将各种准备数据转化为Petrel标准的文档，导入到已经建成的项目中，建立井位数据库，导入单井数据，将数据转换成分级数据。在储层岩石特性三维模型中，没有进行地震勘探，因此，地层资料全部来源于测井解释水平[11]。数据导入完毕后，利用三维可视化工具，与平面图对比，重新检查井位坐标，验证连井断面复检数据的正确性。

2.3　模拟储层成岩与演化过程

油气藏的形成与沉积、构造、成岩、压力、流体、温度等地质活动以及无机、有机地球化学等诸多方面的综合影响[12]。

随着地层深度的增加，储层受到了机械压实的影响，其中包含了多种岩石碎片组成的矿物和碎片矿物也开始了水化[12]。胶结物绿泥石被包裹成膜状，由此可以阻止其与孔隙水的接触，降低其他胶结物的胶结和沉淀，另一方面也使砂体的抗压实性能得到提高。通过物理和化学两种因素的综合作用，使接触点数个结晶格子发生变形、溶解，从而形成压溶，这是由于机械压紧作用持续加强的结果。压溶是最普遍的一种压溶现象，它使石英粒子互相嵌入，产生线接触、凹凸接触和缝合接触，同时石英压溶后的产物在孔隙中溶解，使储集层的孔隙率下降。由于孔隙溶液中的过量饱和物质的沉淀，形成了硅质岩、硅酸盐、硫酸盐类和粘土矿物。在机械压实、压溶、胶结等作用下，通过层层堆积逐渐在储层中形成岩石，并经过长期演化，原生矿物被后生矿物替代，岩石中组分也会溶解到地下水溶液中，逐渐形成成熟的岩石并稳定存储在储层中。

2.4 精细划分储层地层结构

根据储层岩石形成演化过程，储层的连续特征主要有孔隙度、渗透率等。基于储层的连续特征，设计地层结构精细划分标准对储层所处环境的地层进行划分。表1表示的是设置的地层精细划分标准。

根据储层成岩与演化的模拟结果，提取地层划分相关数据，并通过与表1中数据的比对，得出储层区域地层的精细划分结果。

表1 地层精细划分标准

类 型	中高渗透层（Ⅰ类）	低渗透层（Ⅱ类）		特低渗透层（Ⅲ类）		超低渗透层（Ⅳ类）		致密层（Ⅴ类）
		Ⅱa	Ⅱb	Ⅲa	Ⅲb	Ⅳa	Ⅳb	
渗透率/($\times10^{-3}\mu m^2$)	>100	100~50	50~10	10~3	3~1	1~0.2	0.2~0.1	<0.1
孔隙度/%	>20	20~17	17~15	15~13	13~10	10~8	8~7	<7
中值压力/(MPa)	<0.19	0.19~0.27	0.27~0.68	0.68~1.00	1.00~2.49	2.49~6.16	6.16~9.10	>9.10

2.5 求解储层岩石学特征属性

储层属性是以随机模拟为基础，通过对储集层的随机模拟，得出了储层物性的三维空间分布。储层的连续特征主要有孔隙度、渗透率、含油饱和度等。其中孔隙度属性的计算公式如下：

$$\eta_{\text{hole}} = 0.116\,9\Delta t - 16.597 \tag{1}$$

式中，Δt 为声波时差；渗透率则是指液体在某一特定情况下穿过地层的能力，它反映了岩石容许液体的能力，该属性与孔隙度属性之间的关系可以用公式（2）表示。

$$\eta_{\text{infiltration}} = 0.015\,6e^{0.225\,9\eta_{\text{hole}}} \tag{2}$$

将公式（1）的计算结果代入到公式（2）中，即可得出储层渗透率的量化求解结果。含油饱和度属性的测定以电阻率测井作为理论基础，其计算公式为：

$$\lambda = \left(\frac{\text{ab}\eta_{\text{res}}}{\eta_{\text{hole}}^{m}}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{3}$$

式中，a、b均为常数系数，系数的具体取值由储层地层的精细划分结果决定，η_{res} 为电阻率，参数 n 和 m 对应的是产层饱和度和孔隙度指数。另外，设置储层岩石学特征三维建模的默认网格大小为16 m×16 m×1 m，以储层岩石学离散特征包括沉积相、储集砂体、储层构型、隔层、夹层、流动单元、储量等。以储量属性为例，其计算公式为：

$$W = \frac{100Sh\eta_{\text{hole}}\eta_{\text{infiltration}}\rho_o}{B_{oi}} \tag{4}$$

式中，变量 S 和 h 分别为含油面积和油层平均有效厚度，ρ_o 为平均地面原油密度，而参数 B_{oi} 为平均地层原油体积系数。根据已有的井点资料，采用随机法对各3D网格进行数值模拟，从而构建了油藏的三维属性数据。在实际建模过程中，利用测井资料作为主要控制资料，通过序贯高斯仿真，先对孔隙度进行三维随机建模，然后利用该模型作为约束条件，建立了三维模型属性约束条件。

2.6 实现储层岩石学特征三维建模

按照储层的地层精细划分结果得出储层的基本结构模型，在此基础上输入岩石学特征以及属性的分析与计算数据，不同的地质变量类型具有不同的概率分布特征，定位离散型变量和连续型变量的分布函数为：

$$\begin{cases} F(x,z) = \text{Prob}\{Z(x) <= z\} \\ F[x,k(n)] = \text{Prob}\{Z(x) = k(n)\} \end{cases} \tag{5}$$

式中，$Z(x)$ 为储层的岩石学特征与属性变量；z 和 $k(n)$ 为变量类型，分布对应的是离散型和连续型变量，而 Prob{·} 函数则代表数值落在指定区间内的对应概率。按照优化设计的离散型变量和连续型变量，结合建模流程，得出最终的可视化模型输出结果。

3 储层岩石学特征三维模型可信度验证

为了验证设计的地层精细划分下的储层岩石学特征三维模型的可信度与应用价值，设计模型验证测试实验。三维模型的可信度可以由三维模型岩石学属性、地层曲线分布以及与实际储层结构的比较验证来确定，如果三维模型与实际储层的结构与特征差异越小，说明三维模型的可信度越高，测试得出的三维模型可信度越高，则相应模型的应用价值越高。

3.1 设置验证指标

此次模型验证实验分别从储层构造结构和岩石学特征属性指标2个方面进行测试，设置储层地层构造拟合度、储层孔隙度、渗透率和储量误差作为实验的量化测试指标，其中拟合度的数值结果为：

$$\gamma = \frac{V_{\text{coin}}}{V_{\text{all}}} \tag{6}$$

式中，变量 V_{coin} 和 V_{all} 分别为模型与实际储层构造结构的重合体积以及研究区域内储层的总体积，计算得出模型的拟合度越高，说明建立储层岩石学特征三维模型的可信度越高。另外，储层孔隙度、渗透率以及储量的误差测试结果可以表示为：

$$\begin{cases}\varepsilon_{\text{hole}}=\sum\left|\eta_{\text{M-hole}}-\eta_{\text{A-hole}}\right| \\ \varepsilon_{\text{infiltration}}=\sum\left|\eta_{\text{M-infiltration}}-\eta_{\text{A-nfiltration}}\right| \\ \varepsilon_{W}=\sum\left|W_{\text{M}}-W_{\text{A}}\right|\end{cases} \tag{7}$$

式中，变量 $\eta_{\text{M-hole}}$、$\eta_{\text{A-hole}}$、$\eta_{\text{M-infiltration}}$、$\eta_{\text{A-nfiltration}}$、$W_{\text{M}}$ 和 W_{A} 分别为储层孔隙度、渗透率以及储量特征属性的模型输出数据和真实数据，计算得出模型的岩石学特征属性误差越大，说明构建模型的可信度越低。设置拟合度预设值为0.85，属性误差的预设值为0.1，要求优化设计储层岩石学特征三维模型的拟合度不得低于预设值，属性误差不得高于预设值。

3.2　验证结果与分析

通过实际勘测得出储层岩石学特征的实际数据，提取三维模型中的相关数据，通过公式（6）的计算得出模型拟合度的测试结果，如图1所示。

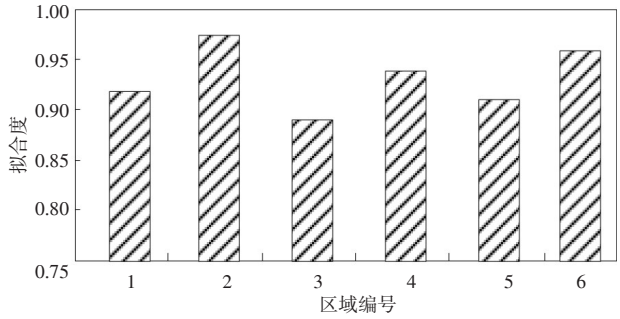


图1　储层岩石学特征三维模型拟合度测试结果

从图1中可以看出，在地层精细划分下，优化构建储层岩石学特征三维模型拟合度的最小值为0.89，高于预设值。另外，模型岩石学特征属性误差的测试数据如表2所示。

表2　模型岩石学特征属性误差测试数据表

区域编号	$\eta_{\text{M-hole}}$/%	$\eta_{\text{A-hole}}$/%	$\eta_{\text{M-infiltration}}$/%	$\eta_{\text{A-nfiltration}}$/%	W_{M}/t	W_{A}/t
1	4.95	4.97	13.73	13.76	58.43	58.49
2	8.61	8.62	14.42	14.45	62.30	62.31
3	3.52	3.53	9.14	9.17	77.21	77.24
4	7.44	7.46	11.91	11.95	83.12	83.15
5	2.78	2.81	13.82	13.83	60.75	60.77
6	8.44	8.47	16.76	16.79	69.24	69.28

将表2中的数据代入到公式（7）中，计算得出储层孔隙度、渗透率和储量特征属性的平均误差值分别为0.020、0.028和0.032，均低于0.1。由此证明，地层精细划分下的建立储层岩石学特征三维模型具有较高的可信度。

4　结　语

储层岩石学特征三维模型对于地下资源的开发具有重要的应用意义，通过地层精细划分概念的应用，分析储层构造与岩石学特征属性，从岩石颜色、矿物组分和沉积构造3个方面，对各控制点之间的数据进行精确的插值和外推，通过储层岩石学多类型特征组成，输出储层参数空间的整合分析结果，提高了储层岩石学特征三维模型的可信度与应用价值。

参考文献

[1]　王晓雷. 松辽盆地南部泉四段地层特征与储层发育规律[J]. 西部探矿工程,2021,33(6):41-45

[2]　张莉,舒志国,何生,等. 川东建南地区须家河组储层特征及其差异演化过程[J]. 地球科学,2021,46(9):3 139-3 156

[3]　朱世发,崔航,陈嘉豪,等. 浅水三角洲沉积体系与储层岩石学特征:以鄂尔多斯盆地西部地区山1—盒8段为例[J]. 沉积学报,2021,39(1):126-139

[4]　刘洪伟. 济阳坳陷馆陶组储层岩石学特征[J]. 石化技术,2020,27(7):115-116

[5]　黎胜男,崔英敏,石观涛,等. 鄂尔多斯盆地子长油田Y11井区长2油组储层特征研究[J]. 新疆地质,2020,38(4):512-515

[6]　王梦琪,张强,谢俊,等. 莱州湾凹陷南部地区浅层沙三下亚段混积岩岩石学特征及成岩作用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(4):83-94

[7]　罗婷婷,姚振杰,段景杰,等. 低渗透油藏储层特征描述及三维地质建模研究[J]. 辽宁石油化工大学学报,2020,40(3):40-44

[8]　崔雅男,马青. 塔西南地区齐姆根凸起中新统储层发育特征分析[J]. 化工设计通讯,2021,47(1):190-191

[9]　冷丹凤,孟旺才,王彩霞,等. 子北油田高台:毛家河北储层基本特征[J]. 非常规油气,2020,7(3):46-54

[10]　陈新，曾涛，曹泽宁，等. 基于修正SGOG编码的三维地层模型转换研究[J]. 地理空间信息，2022，20(1):4-8

[11]　刘冲. 海中凹陷3号断裂带南缘储层特征研究[J]. 广东石油化工学院学报,2020,30(3):34-37

[12]　刘震，朱茂林，刘惠民，等. 花岗岩风化壳储层形成机理及分布特征:以东营凹陷北带西段为例[J].石油学报，2021，42(2):163-175