

模拟退火法结合两点簇函数重构与表征页岩有机质各向异性

隋微波^{1,2*}, 尤园¹, 程思¹, 郑衣珍¹

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, suiweibo@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-09-15

国家自然科学基金面上项目(51474224)资助

摘要 页岩有机质及其孔隙分布与页岩吸附气含量和气体微观渗流机理密切相关, 研究表明页岩中有机质分布在孔隙尺度下具有各向异性特征, 然而现有的页岩数字岩心重构算法未能对该特征进行有效描述。本文针对页岩样品中有机质分布的各向异性特征, 提出在数字岩心传统模拟退火数值重构方法基础上引进两点簇函数作为表征有机质分布连续性的统计指示函数。两点簇函数虽然属于两点概率函数, 但是含有高阶结构信息, 因此两点簇函数较之两点相关函数是对结构变化敏感性更强的统计指示函数。本文介绍了耦合两点簇函数的模拟退火算法模型, 并以四川盆地下志留系龙马溪组页岩岩心样品为例详细论述了“样品成像—图像处理—函数提取—重构计算”的系统性方法流程。研究通过场发射扫描电镜实验和聚焦离子束—场发射扫描电镜实验和图像处理, 获得了孔隙尺度下的页岩有机质及其孔隙分布, 并从中提取了岩心样品在三个正交方向的统计关联函数包括单点相关函数、两点相关函数、线性路径函数和两点簇函数。论文建立了有机质团块三维重构的有效方法, 并将以上统计关联函数应用于“双重区域”模拟退火法重构过程, 分别获得有机质、有机质孔隙和基质孔隙的重构模型, 通过将三者耦合获得页岩样品最终的数字岩心三维重构模型。重构页岩数字岩心三个正交方向的两点簇函数分布曲线表明有机质具有明显的各向异性。通过比较真实页岩样品与重构页岩数字岩心的有机质等体积半径分布、有机质面积、有机质延伸率等参数分布, 证明了两点簇函数方法表征页岩有机质各向异性分布特征的有效性, 该方法可应用于页岩数字岩心重构的相关研究工作中。

关键词 页岩; 数字岩心; 有机质孔隙; 两点簇函数; 各向异性; 模拟退火法

Reconstructing and characterizing the anisotropy of shale organic matter with a two-point cluster function and a simulated annealing method

SUI Weibo^{1,2}, YOU Yuan¹, CHENG Si¹, ZHENG Yizhen¹

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 隋微波, 尤园, 程思, 郑衣珍. 模拟退火法结合两点簇函数重构与表征页岩有机质各向异性. 石油科学通报, 2021, 01: 46-57

SUI Weibo, YOU Yuan, CHENG Si, ZHENG Yizhen. Reconstructing and characterizing the anisotropy of shale organic matter with a two-point cluster function and a simulated annealing method. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 46-57. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.004

Abstract Organic matter and its pore distribution are closely related to the adsorbed gas content of shale and the microscopic gas flow mechanism. Studies have shown that the organic matter distribution in shale has anisotropic characteristics at the pore scale. However, the existing digital core reconstruction algorithms for shale cannot effectively describe this feature. Aiming at the anisotropic characteristics of organic matter distribution in shale samples, this paper introduced a two-point cluster function as a statistical indicator to characterize the continuity of organic matter distribution based on the traditional simulated numerical annealing reconstruction method for digital cores. Although the two-point cluster function belongs to the two-point probability function, it contains high-order structural information. Therefore, the two-point cluster function is a statistical indicator that is more sensitive to structural changes than the two-point correlation function. This paper presented the mathematical model of the simulated annealing method coupled with a two-point cluster function. Meanwhile, taking the shale core sample of the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in the Sichuan Basin as an example, the systematic method flow of "sample imaging—image processing—function extraction—reconstruction calculation" was discussed in detail. Through field emission scanning electron microscopy (FESEM) and focused ion beam-field emission scanning electron microscopy (FIB-SEM) and image processing, the shale organic matter and its pore distribution at the pore scale were obtained, and the statistical correlation of core samples in three orthogonal directions was extracted. Functions include a single-point correlation function, two-point correlation function, linear path function and a two-point cluster function. The paper established an effective method for three-dimensional reconstruction of organic matter aggregates, and applied the above statistical correlation functions to the reconstruction process of the Dual-Region simulated annealing method to obtain reconstruction models of organic matter, organic matter pores and matrix pores respectively. Combining the three coupled regions produces the final digital core 3D reconstruction model of the shale sample. The reconstruction of the two-point cluster function distribution curve in three orthogonal directions of the shale digital core shows that the organic matter has obvious anisotropy. By comparing organic matter equivalent volume radius distribution, organic matter area, organic matter elongation and other parameter distributions of real shale samples and reconstructed shale digital cores, the validity of the two-point cluster function method to characterize the anisotropic distribution of shale organic matter has been proved. This method can be applied to related research work on shale digital core reconstruction.

Keywords shale; digital core; organic matter; two-point cluster function; anisotropy; simulated annealing method

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.004

0 引言

随着数字岩心技术的不断发展,逐渐成为研究储层微观孔隙结构、渗流特征参数和机理的新手段。利用数字岩心技术,我们可以准确观察目标区域样品的微观结构,在此基础上求取样品的岩石物理参数,并以数字岩心模型为流场研究流体微观运移规律^[1-2]。近年来随着微观成像和材料微观结构计算表征技术的共同进步,对于非均质性较强的材料进行定量的微观结构表征方法也成为了研究热点。

对于现阶段数字岩心重构技术的两种主要方法来说,直接成像法利用微米级甚至纳米级CT、聚焦离子束场发射扫描电镜等实验手段可以获得超高分辨率岩心三维图像^[3-4],结合有限元模拟等方法来预测其岩石物理特性或进行微观渗流和变形模拟^[5-6]。直接成像法实验一般费用昂贵、周期较长,获得的高分辨率岩石三维结构数据体非常庞大^[7],对于后期计算模拟来说包含很多必要性不强的冗余结构信息,且仅对实验样品进行表征,无法实现快速提取岩心样品的统计特性并进行迁移建模。因此在直接成像技术不断进步的今天,人们仍然需要发展高效稳定的数值重构方法来建

立数字岩心模型^[8]。

数值重构法通常结合已有的扫描电镜实验得到的二维数字岩心图像和各种统计学方法或模拟岩石的形成过程,结合优化算法建立数字岩心。目前较为典型的数值重构法包括模拟退火法、过程模拟法、多点地质统计法和马尔可夫链蒙特卡洛法。在页岩数字岩心重构方面,Sui等^[9]提出“双重区域重构”模式并采用非常快速模拟退火法重构页岩数字岩心;Chen等^[10]基于四川盆地页岩样品分辨率为5 nm的场发射扫描电镜图像,利用马尔可夫链蒙特卡罗法建立了页岩纳米级孔隙结构的三维数字岩心;庞伟^[11]以页岩纳米CT数据为训练图像,采用多点地质统计法重构页岩数字岩心;杨永飞等^[12]采用模拟退火法构建无机孔隙,采用马尔可夫链蒙特卡罗法构建有机孔隙,并将二者叠加整合获得页岩数字岩心;刘磊等^[8]以多点统计学为基础,考虑页岩储层微裂缝的影响,利用模式法进行多尺度页岩数字岩心重构。以上关于页岩数字岩心的重构方法的研究从不同程度上考虑了页岩储层发育不同孔隙类型和微裂缝,多尺度效应明显的特征,但是对于页岩储层中有机质分布的各向异性特征在重构过程中考虑不足。

有机质是页岩气储层的重要组成部分,其类型及含量是影响页岩气聚集的重要因素之一^[13]。泥页岩吸附气含量受有机质类型、丰度、成熟度及埋藏深度等多种因素影响,但在通常情况下与有机质丰度呈正相关关系^[14]。王世谦等^[15]认为,在相同温压条件下,富有机质的页岩较贫有机质的页岩具有更多的微孔隙空间,能吸附更多的天然气,因此有机质丰度成为页岩气评价的首要地质因素;姚军等^[16]从微观渗流角度研究了页岩有机质孔隙对页岩气流动能力影响,同时提出了有机质孔隙分布的三种模式,指出有机质孔隙条带状分布时气体流动能力最强;周枫等^[17]对四川盆地龙马溪组页岩各向异性影响因素进行研究,指出有机质含量对页岩各向异性有重要影响;Kwon等^[18]通过对美国Wicox页岩储层样品研究,发现在孔隙尺度下页岩中的有机质孔隙具有很大的长宽比,其结构呈现出明显的各向异性;Gu等^[19]利用中子散射定量研究了页岩有机质孔隙尺度的各向异性;王沫然等^[20]考虑页岩有机质各向异性特征对页岩的微观渗流机理进行了研究。

综上所述,页岩储层有机质分布在孔隙尺度存在各向异性特征,且对页岩宏观力学、渗流的各向异性存在重要影响,与页岩油气高效开发密切相关。本文针对目前页岩数字岩心重构未能充分考虑有机质分布各向异性特征的问题,提出在模拟退火随机重构过程中采用两点簇函数作为有机质三维连续性的统计指示函数,从而提高页岩数字岩心重构的准确性和可靠性。

1 重构算法统计函数定义

使用模拟退火法进行岩心的数值重构时,无法直接用图像作为约束条件,只能由统计函数来描述反映真实岩心微观结构特征的重要信息。而岩心重构过程的关键也在于所选取的统计函数能否有效地反映岩心微观结构特征。在运用传统模拟退火法重构页岩数字岩心时,主要应用了3种统计函数:单点相关函数、两点相关函数和线性路径函数^[21],本文在以上三种统计函数的基础上增加了另外一个微观结构的描述量即两点簇函数。以上四种统计函数的定义分别如下文,其物理含义的图形表示见图1。

1.1 单点相关函数

在多相系统中某一*i*相的指示函数为 $Z^{(i)}$,则该*i*相的指示函数定义为:

$$Z^{(i)}(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{x} \text{ 位于 } i \text{ 相之中} \\ 0 & \mathbf{x} \text{ 位于 } i \text{ 相之外} \end{cases} \quad (1)$$

其中 \mathbf{x} 表示该系统中的任意一点; $i=1, 2, 3, \dots, n$,其中 n 表示不同相的数量。该系统的单点相关函数 ϕ_i 表示第*i*相的体积分数,由上式的集合平均获得,可表示为

$$\phi_i = \langle Z^{(i)}(\mathbf{x}) \rangle \quad (2)$$

其中, $\langle \rangle$ 表示多个独立样品的集合平均或单一大块样品中不同区域的体积平均,各区域体积需满足遍历性要求。单点相关函数体现了在整个系统中某一相分布的多少,对于岩心中的孔隙和基质两相情况,则该值为孔隙度的体现。

1.2 两点相关函数

在上述多相系统中第*i*相和第*j*相的两点相关函数定义为:

$$S_2^{(ij)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \langle Z^{(i)}(\mathbf{x}_1) Z^{(j)}(\mathbf{x}_2) \rangle \quad (3)$$

该函数表示系统中随机选择的两点 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 分别分布于第*i*相和第*j*相的概率。如果系统中具有*n*个不同相则可写出 $n \times n$ 个不同的两点相关函数,其中独立的两点相关函数为*n*个,其他 $n \times (n-1)$ 个两点相关函数可由独立的*n*个函数进行表示。对于本文中研究的页岩有机质孔隙重构的情况 $n=2$,只需考虑有机质孔隙的两点自相关函数 S^P 和孔隙—基质之间的两点互相关

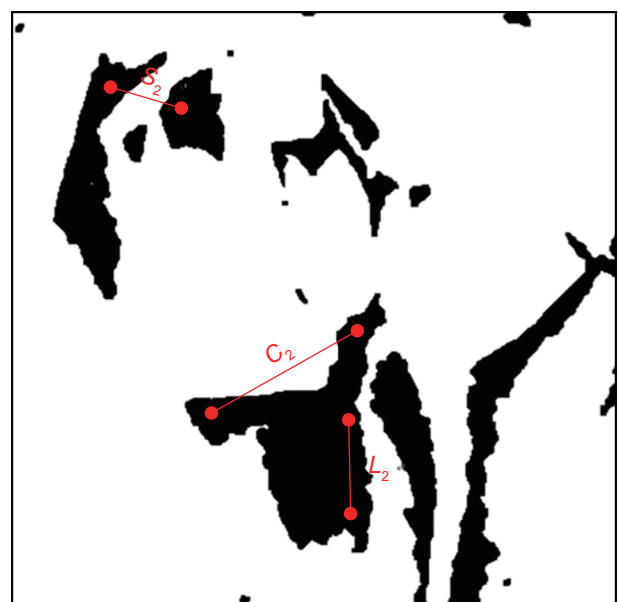


图1 两点相关函数 S_2 、线性路径函数 L_2 、两点簇函数 C_2
Fig. 1 Two-point correlation function S_2 , linear path function L_2 , two-point cluster function C_2

函数 S^{p-m} 即可, 其中 p 表示孔隙相, m 表示基质相。

两点相关函数只与两点之间的相对位移矢量有关, 即

$$S_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = S_2(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) = S_2(\mathbf{r}) \quad (4)$$

其中 $\mathbf{r} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$ 为相对位移矢量。 $\mathbf{r} = 0$ 时两点自相关函数退化为单点相关函数, 表示所选点分布于相应相中的概率即相应相的体积分; 由于某一点不可能同时分布于两相中, 因此 $\mathbf{r} = 0$ 时两点互相关函数值为零。当 \mathbf{r} 取值很大时, 两点位于相应相中的概率相关性很小, 因此两点自相关函数趋近于 φ_i^2 , 而两点互相关函数趋近于 $\varphi_i \varphi_j$ 。

对于统计意义上的各向同性材料, S_2 只与两点间距离相关, 因此无需考虑方向性对 S_2 的影响。对于本文中研究的页岩有机质孔隙来说, 实验数据表明其分布具有各向异性特征, 因此我们同时采用三个正交方向的 S_2 函数进行重构。三个正交方向依次为平行层理面的方向(XY平面)和垂直层理面两个正交平面(XZ与YZ平面)。具有方向性的两点相关函数可写为 $S_2^{\alpha, \beta}(\mathbf{r})$, 其中 $\alpha = \{p, p-m\}$, $\beta = \{XY, XZ, YZ\}$ 。

1.3 线性路径函数

线性路径函数 $L^{(i)}(\mathbf{r})$ 表示沿向量 \mathbf{r} 方向任意截取长度为 $r = |\mathbf{r}|$ 的线段完全落入第 i 相的概率。线性路径函数是关于 \mathbf{r} 的单调递减函数, 当 $\mathbf{r} = 0$ 时, 线性路径函数退化为单点相关函数 $L^{(i)}(0) = \varphi_i$ 。由于在岩心中想找到一条长度非常大的线段完全落入孔隙或基质相的概率微乎其微, 对于较大的 \mathbf{r} 值, $L^{(i)}$ 值迅速减小并趋于零即 $L^{(i)}(\infty) = 0$ 。线性路径函数表征系统中各相沿线性路径的连通特性, 是描述多孔介质微观结构的重要函数。

1.4 两点簇函数

如果将系统中第 i 相中“簇”定义为其中任意两点都可通过连续路径相通的区域, 则两点簇函数 $C_2^{(i)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 表示系统中随机选择的两点落入第 i 相中同一簇的概率^[22]。对于统计意义上的均匀介质, 两点簇函数只与两点间距离有关, 即 $C_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = C_2(\mathbf{r})$ 。与线性路径函数相比, C_2 包含某一相中簇的完整联通信息, 对于材料的系统属性具有重大影响。在进行材料的三维重构时, 两点相关函数和线性路径函数一般均由二维切片的图像获取, 但是两点簇函数需要通过

完整的三维图像获得, 否则很难反映真实的三维系统连通信息。

目前关于两点簇函数的研究已证明, 如果将系统中随机选择的两点落入第 i 相中不同簇的概率记为 $D_2^{(i)}(\mathbf{r})$, 则存在以下关系:

$$S_2^{(ii)}(\mathbf{r}) = C_2^{(i)}(\mathbf{r}) + D_2^{(i)}(\mathbf{r}) \quad (5)$$

由上式可知, 两点簇函数实际上是两点相关函数的连通性表征。对于本文中讨论的页岩有机质孔隙重构的情况, 两点簇函数写作 $C_2^{\alpha, \beta}(\mathbf{r})$, 其中 $\alpha = \{p, p-m\}$, $\beta = \{XY, XZ, YZ\}$ 。对于数字岩心的重构来所, 孔隙相的 $C_2(\mathbf{r})$ 为短距离函数, 其值随两点距离增加迅速下降, 当 \mathbf{r} 接近连通孔隙中最远距离时 $C_2(\mathbf{r})$ 趋于零。两点簇函数虽然也属于两点概率函数, 但是却含有高阶结构信息, 因此两点簇函数较之两点相关函数是对结构变化敏感性更强的统计指示函数。

2 模拟退火法重构页岩数字岩心

2.1 模拟退火法数值重构原理

本次重构页岩岩心有机质孔隙选择使用模拟退火法, 与高斯随机场法和最近发展起来的光栅路径法相比, 模拟退火法可以结合任何类型的关联函数, 灵活性较大。模拟退火法是局部搜索算法的扩展, 理论上是一种全局最优算法, 在本文中简称为SA(Simulated Annealing method)。它通过模拟退火过程中原子能量的概率分布进行优化计算, 定义第 $k+1$ 次搜索时状态的接受概率 P 为:

$$P = \begin{cases} 1 & \Delta E \leq 0 \\ \exp(-\frac{\Delta E}{T}) & \Delta E > 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\Delta E = E^{k+1} - E^k$, 目标函数 E 定义为各项衡量指标与参考介质所提供的参考指标差值平方和, T 为引进的控制参数, 称之为“温度”, 通常初始温度的值为 $T = (5 \sim 10)\Delta E_{\max}$, ΔE_{\max} 则由具体选择的统计函数决定。模拟中任意时刻的“能量” ΔE 为^[23]:

$$\Delta E = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_r \left[f^{\alpha, \beta}(\mathbf{r}) - \bar{f}^{\alpha, \beta}(\mathbf{r}) \right]^2 \quad (7)$$

其中 $\bar{f}^{\alpha, \beta}(\mathbf{r})$ 为参考系统中沿 β 方向关于 α 的相关函数, $f^{\alpha, \beta}(\mathbf{r})$ 则为重构系统中对应的相关函数。相应状态的Metropolis可接受准则为:

$$P \geq \text{rand}(0, 1) \quad (8)$$

其中 $rand(0,1)$ 为在 $[0.0,1.0]$ 范围内选取具有等概率的随机数。满足该准则才是系统第 $k+1$ 次可更新的状态。当 ΔE 小于预先设定的容许误差时迭代终止,本文中取 $\Delta E = 10^{-10}$ 。

模拟退火法数值重构岩心的主要流程为:基于直接成像实验所得图像计算约束函数值;随机生成初始模型,设定初始温度、降温速率、终止温度和换点失败率,计算初始模型的相应函数值及能量值;换点并计算新模型的函数值及能量值,判断是否满足更新条件,若满足则替代原模型,若不满足判断是否满足降温条件,即同一温度下模型更新失败率大于某一临界值,若满足则进行降温,若不满足则继续换点更新模型;当系统温度降低到终止温度,表明此时模型已经趋于最优状态,即可结束程序。

2.2 样品信息及成像处理

本次重构实验所用样品为四川盆地下志留系龙马溪组页岩岩心。首先对页岩样品进行研磨抛光后在表面镀金,然后分别进行场发射扫描电子显微镜(SEM)和聚焦离子束扫描电镜实验(FIB-SEM)。场发射扫描电镜成像实验在中国石油大学(北京)能源材料微结构实验室进行,所使用的设备是荷兰FEI公司的Quanta 200F场发射环境扫描电子显微镜;聚焦离子束扫描电镜实验在中国科学院地质与地球物理研究所微纳结构成像与数字岩石物理实验室进行,采用ZEISS Crossbeam 540型号聚离子束扫描电镜,该设备聚焦离子束最优分辨率为 $3\text{ nm}/\text{像素}$,即切片最薄厚度为 3 nm ;场发射扫描电镜最优分辨率为 $0.9\text{ nm}/\text{像素}$,放大倍数 $12\sim 2\times 10^6$ 倍。

通过观察大量SEM和FIB-SEM实验图像后发现,有机质发育具有各向异性。大量有机质在平行层理面

上无定向发育,而在垂直层理面则多为连续长条形,如图2所示。

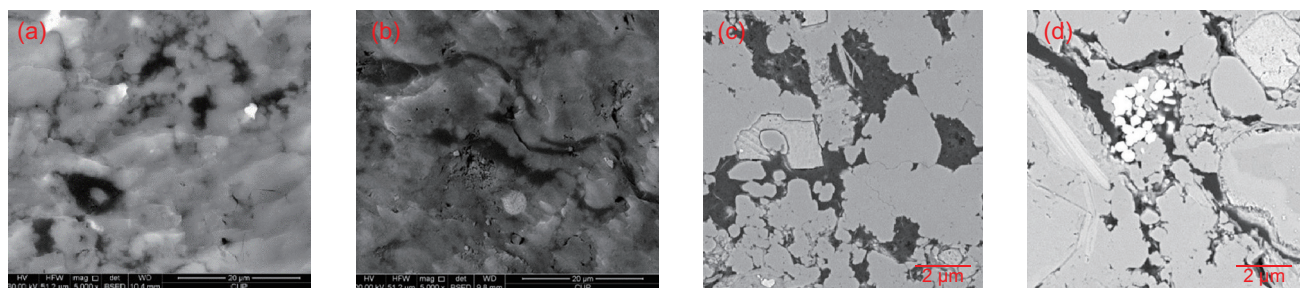
基于上述观察,从页岩样品的FIB-SEM实验结果中选取400张连续的富有机质图像,每张图像的像幅为 1900×3000 ,分辨率为 $6.5\text{ nm}/\text{像素}$,实际物理尺寸为 $12.35\text{ }\mu\text{m}\times 19.5\text{ }\mu\text{m}$ (图3a),其中抽提的有机质部分三维图像见图3b。对图像进行初步分析后使用ImageJ软件对每张图像截取 400×400 像素大小区域,然后对图像进行非局部均值滤波和阈值分割并将像幅尺寸粗化至 $100\times 100\times 100$,有机质占比为 10.44% ,使用AVIZO软件进行三维可视化,结果如图3b所示。从图中可以看出,有机质孔隙发育具有明显定向性,与二维图像观察结果相吻合。以此三维数字岩心作为参考模型,进行页岩有机质三维重构,并将参考模型用于评价重构三维数字岩心的准确性,接下来对具体重构过程进行详细说明。

2.3 有机质与有机质孔隙重构

模拟退火法在初始化时会在模型中随机分布灰度值为0的像素点,为了在不影响模型效果的情况下加快重构速度,提出将初始模型优化方法,即将孔隙简化为规则形状取代模型最初的随机分布,然后结合两点簇函数和预判方法继续进行重构。下面以页岩样品的FIB-SEM实验图像为基础,通过对有机质和有机质孔隙的重构过程对初始模型方法进行详细说明。

2.3.1 有机质重构

有机质的形状、轮廓复杂,并且分布散乱,不具有明显的分布特征规律。采用面积、周长、角度、延伸率等参数对其几何分布特征进行描述^[24]。在计算特征参数时,有机质面积和周长均为实际有机质的面积和周长,同时假设任何一个有机质形状都可以用一个



(a) 页岩样品平行层理面SEM图像; (b) 页岩样品垂直层理面SEM图像; (c) 页岩样品平行层理面FIB-SEM图像; (d) 页岩样品垂直层理面FIB-SEM图像。各图中亮度最低的深黑色部分均为有机质及其孔隙, d图中亮度最高的白色点状部分为黄铁矿,各图中亮度中等的灰色部分为页岩样品中的基质区域,主要由无机质矿物和其中少量孔隙构成

图2 页岩有机质孔隙SEM与FIB-SEM图像

Fig.2 SEM and FIB-SEM images of the organic matter pores in the shale samples

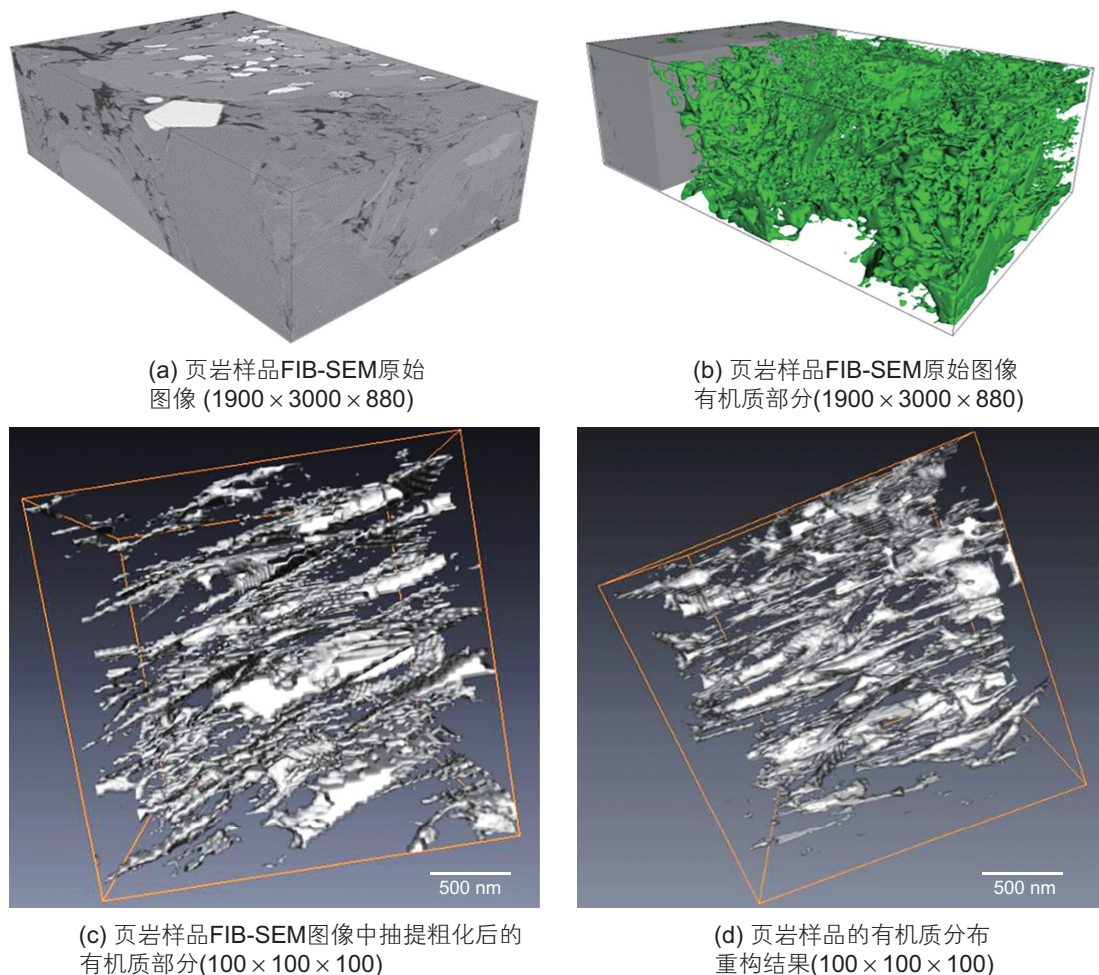


图3 页岩样品有机质 FIB-SEM 图像与重构结果

Fig. 3 FIB-SEM images and reconstruction results of the organic matters in the shale samples

与其面积相等的椭圆来进行等效，从而进行有机质延伸率的计算。有机质延伸率的定义为，该有机质团块与具有相同标准二阶中心矩的椭圆的长轴长度与短轴长度之比(图4)。

第一步，选取二维图像。选取参考模型在XY、XZ和YZ平面上的图像，如图5所示。

第二步，参数统计。对三维参考模型中的有机质进行参数统计，用于验证重构模型的准确性。对所选取二维图像中的有机质的质心坐标、面积、角度和延伸率等参数进行统计分析，对面积和角度分组后，计算XY、XZ和YZ平面的面积分布频率和角度分布频率。将有机质简化为长方体。

第三步，根据有机质的面积和角度统计结果，随机给各有机质随机分配XY、XZ和YZ平面的面积值和角度值，并根据所分配的参数值计算各有机质长方体的三条边长和体积。逐个随机分配有机质参数，直至已分配的总有机质体积占比与二维图像中有机质平

均占比的相对误差小于0.5%。

第四步，计算已生成有机质的面积和角度分布频率，并与原始二维图像统计结果中的面积和角度分布

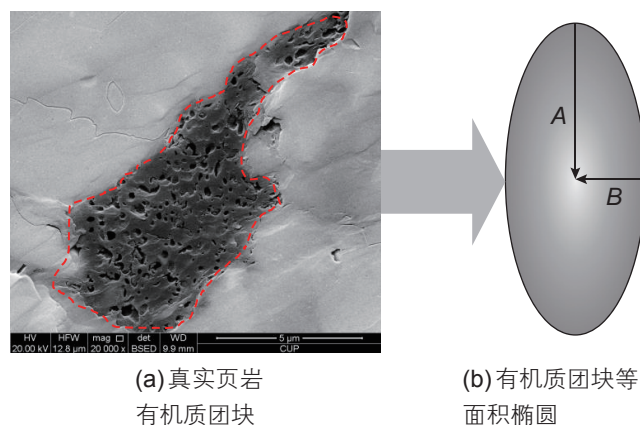


图4 页岩有机质延伸率示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the organic matter elongation ratio in the shale sample

频率相比较,计算平均相对误差。若平均相对误差均小于10%,则将已生成的有机质各参数按体积值从大到小依次排序;否则,重复第三步直至满足条件。

第五步,在模型中给有机质随机分配质心点坐标、最大体积值及对应的各参数值,计算该有机质长方体的8个顶点坐标和6个平面方程。判断各顶点是否在模型范围内,若在范围内,则计算模型中有哪些像素点在这6个平面所包围的区域内,确定该有机质长方体的完整区域;若不在范围内,则重复该步骤直至各顶点均在模型范围内。

第六步,通过计算三维模型中有机质相的体素点数量判断新生成的有机质与之前已生成的有机质是否重叠。若重叠,则重复执行第五步;若不重叠,则删

除该有机质对应的各参数值,执行下一步。

第七步,按照体积值从大到小依次给有机质分配质心点坐标和各参数值,重复执行第五步和第六步,直至生成所有有机质长方体,有机质初始模型优化完成。

第八步,初始模型优化完成后,应用模拟退火法结合两点簇函数和预判方法进行重构。重构结果三维可视化如图3c所示。

2.3.2 有机质孔隙重构

选择重构有机质所截取的400张 400×400 像素大小的原始图片,对图像进行非局部均值滤波和阈值分割提取其中的有机质孔隙,并将像幅尺寸粗化至 $100 \times 100 \times 100$,有机质孔隙占比为0.52%,使用AVIZO软件进行三维可视化(图6a),以此三维数字岩

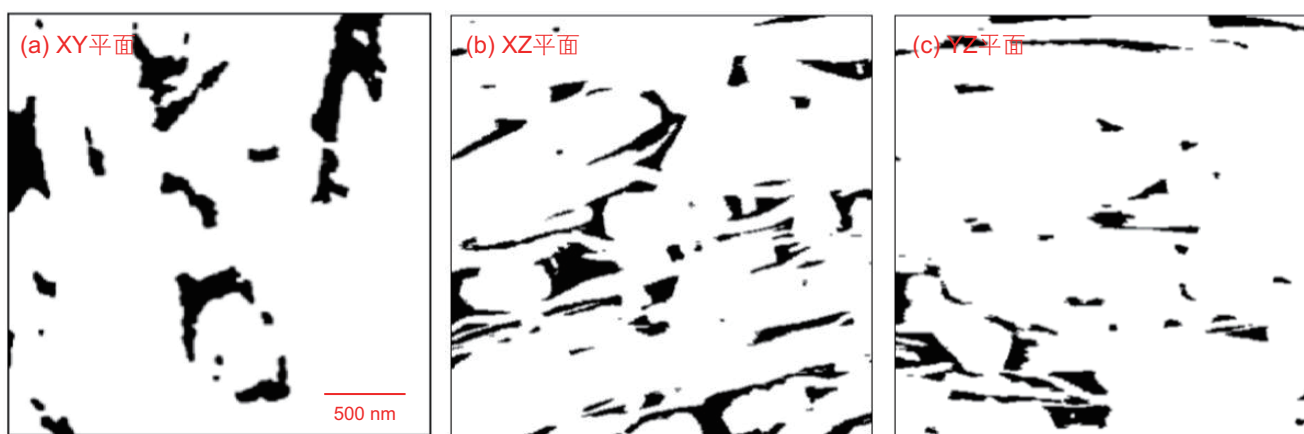
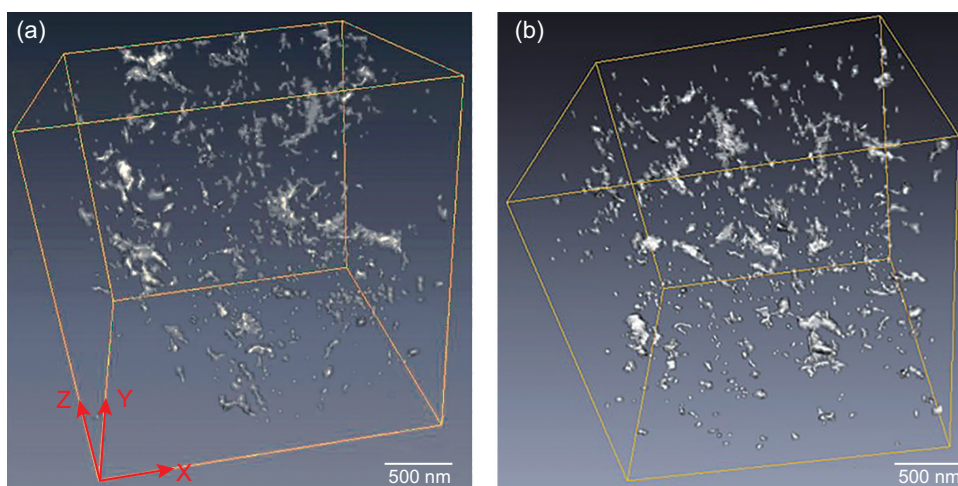


图5 页岩样品FIB-SEM实验获得三个正交方向的有机质二值化图像示例

Fig. 5 Example of the binary images of the organic matters in three orthogonal directions obtained by FIB-SEM experiments of the shale samples



(a) 页岩样品有机质孔隙FIB-SEM三维可视化图像; (b) 页岩样品有机质孔隙重构结果。其中白色区域代表孔隙,透明区域代表有机质。

图6 页岩样品有机质孔隙的FIB-SEM图像和重构结果

Fig.6 FIB-SEM image and reconstruction result of the organic matter pores in the shale samples

心作为有机质孔隙参考模型，进行页岩有机质孔隙三维重构，并将参考模型用于评价有机质孔隙重构结果的准确性。接下来将对具体重构过程进行详细说明，流程框图如图 7 所示。

第一步，选取二维图像。从有机质孔隙 FIB-SEM 三维参考模型(图 6a)的 XY、XZ 和 YZ 平面上选取图像，得到二值化的孔隙二维图像。

第二步，参考模型的参数统计。岩心结构主要由孔隙的大小和形状及分布决定的，因此可从孔隙半径、孔隙半径分布情况等方面来表征岩心结构。对三维参考模型中的有机质孔隙进行参数统计，统计结果用于验证重构模型的准确性。对所选取二维图像中的有机质孔隙面积进行统计，计算对应的孔隙半径，对孔隙半径分组后计算孔隙半径分布频率。

第三步，初始化重构模型孔隙半径。将重构三维数字岩心中所有有机质像素点的灰度值暂时设置为 0.5，将有机质孔隙简化为球体。给有机质孔隙随机分配质心点坐标和孔隙半径，直至已分配的有机质总孔隙度与二维图像中有机质孔隙平均占比的相对误差小于 0.5%。

第四步，计算已生成有机质孔隙的孔隙半径分布频率，并与原始二维图像有机质孔隙统计结果中的孔隙半径分布频率相比较，计算平均相对误差。若平均相对误差均小于 10%，则将已生成的有机质孔隙体积

值从大到小依次排序；否则，重复第三步。

第五步，初始化有机质孔隙位置。在模型中随机给出有机质孔隙的质心点坐标，将上一步得到的最大体积值赋给该有机质孔隙并判断其是否完全在重构模型的有机质区域内部。若在，则确定该有机质孔隙的完整区域；若不在，则重复此步骤直至完全在有机质区域内部。

第六步，通过计算三维模型中有机质孔隙相的体素点数量判断新生成的有机质孔隙与之前已生成的有机质孔隙是否重叠。若重叠，则重复执行第五步；若不重叠，则删除最大体积值，执行下一步。

第七步，重复执行第五步和第六步，直至生成所有有机质孔隙，此时有机质孔隙初始模型优化完成。

第八步，初始模型优化完成后，利用模拟退火法结合两点簇函数和预判算法采用进行重构，得到能准确反映参考系统的有机质孔隙模型。重构结果三维可视化如图 6b 所示。

2.4 页岩样品三维重构结果

页岩样品基质孔隙可采取与有机质孔隙重构相同方法进行，获得基质孔隙分布模型后采用“双重区域”方法进行重构^[9,12]。该方法将页岩样品分为 2 大区域：①孔隙发育程度较好的孔隙发育区，主要由有机质构成；②孔隙发育程度较低的基质区，主要由粘土矿物

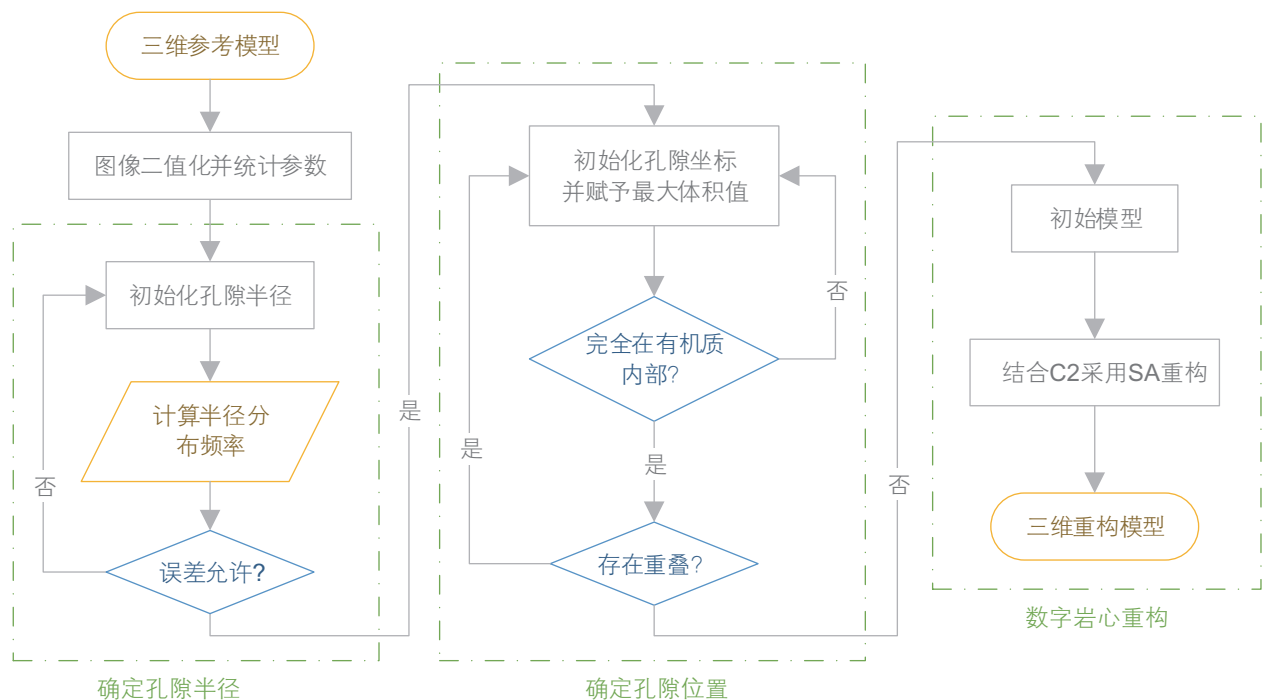


图 7 页岩样品有机质孔隙重构流程框图

Fig.7 Flow chart of the organic matter pores reconstruction in the shale samples

和无机质矿物及其中的孔隙构成。当孔隙发育区与基质区的内部孔隙均重构完成后,再根据各区域在样品中的原始位置进行耦合叠加,最终形成整体的重构岩心模型。该方法可以提高页岩数字岩心重构的精度并大大降低重构时间。

与之前获得的有机质重构模型、有机质孔隙模型相耦合从而建立最终的页岩样品数字岩心模型(图8)。真实三维数字岩心的有机质、有机质孔隙和基质孔隙体积占比分别为:10.44%、0.43%和0.042%。重构三维数字岩心的有机质、有机质孔隙和基质孔隙体积占比分别为:10.40%、0.43%和0.042%,与真实三维数字岩心基本吻合。

3 结果分析

本节主要从孔隙度及孔隙半径、面积、延伸率和两点簇函数等方面对比重构数字岩心与真实页岩岩心,评价分析重构三维数字岩心的准确性。

(1) 等体积半径

统计真实三维数字岩心和重构三维数字岩心中各有机质、有机质孔隙和基质孔隙的体积,并计算等体积半径得到半径分布曲线,如图9所示。通过对比真实岩心和重构岩心的有机质等体积半径分布曲线、有机质孔隙半径分布曲线和基质孔隙半径分布曲线,发



图8 重构页岩样品三维数字岩心,其中深灰色代表有机质,灰色代表有机质孔隙,白色代表基质孔隙,黑色代表基质

Fig. 8 The three-dimensional reconstructed digital core of the shale sample, where dark gray stands for organic matter, gray for organic matter pores, white for matrix pores, and black for matrix

现吻合程度良好,表明重构所得三维数字岩心表征页岩有机质、有机质孔隙和基质孔隙尺度较准确。

(2) 面积

统计真实三维数字岩心和重构三维数字岩心XY、XZ和YZ平面上所有有机质、有机质孔隙和基质孔隙的面积,对统计结果分组后得到面积分布曲线,如图10~12所示。各面积分布曲线均比较吻合,表明三维重构效果较好。

(3) 有机质延伸率

不管是真实岩心还是重构岩心,相比较于平行层理面,两个垂直层理面上的有机质延伸率明显偏高,如图13所示,表明页岩有机质分布具有各向异性。

(4) 两点簇函数

为了更准确地重构页岩三维数字岩心,使用约束

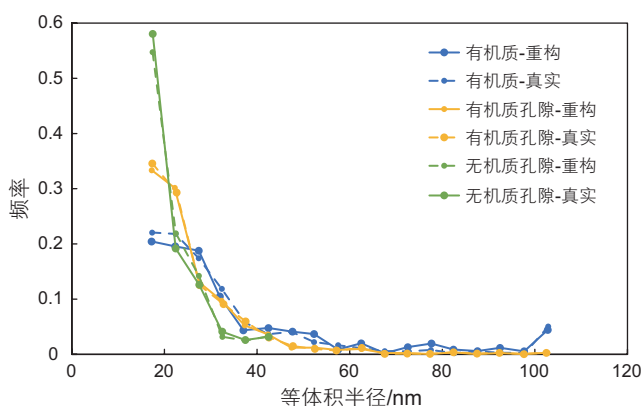


图9 真实页岩样品与重构页岩数字岩心中有有机质、有机质孔隙与基质孔隙等体积半径分布比较

Fig. 9 Comparison of the equivalent volume radius distribution of organic matter, organic matter pores and matrix pores between the real shale sample and the reconstructed shale digital core

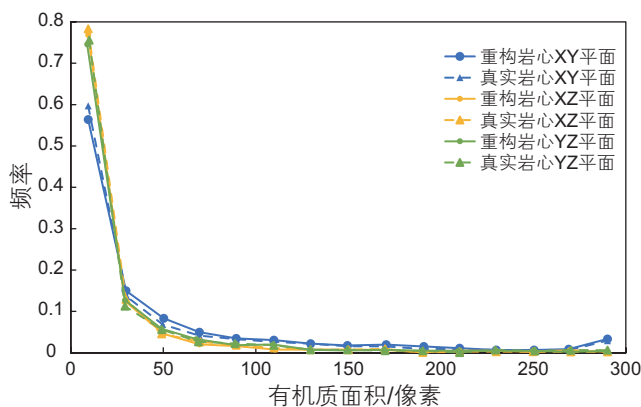


图10 真实页岩样品与重构页岩数字岩心中有有机质面积分布比较

Fig. 10 Comparison of the area distribution of organic matter between the real shale sample and the reconstructed shale digital core

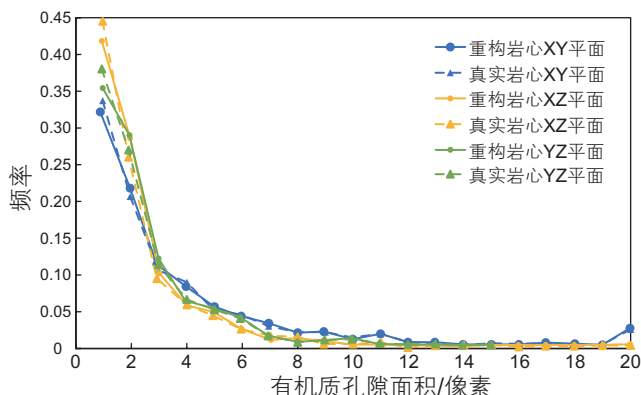


图 11 真实页岩样品与重构页岩数字岩心中有机质孔隙面积分布比较

Fig. 11 Comparison of the area distribution of organic matter pores between the real shale sample and the reconstructed shale digital core

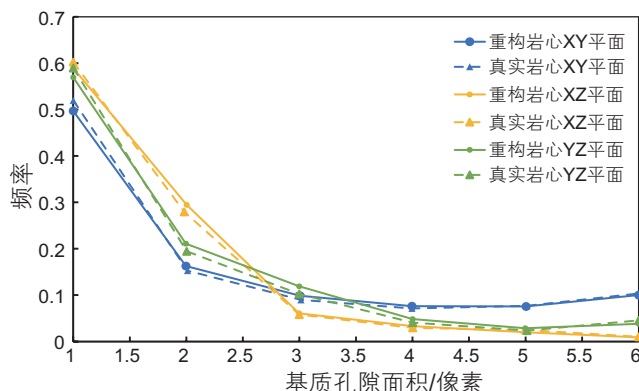


图 12 真实页岩样品与重构页岩数字岩心中基质孔隙面积分布比较

Fig. 12 Comparison of the area distribution of matrix pores between the real shale sample and the reconstructed shale digital core

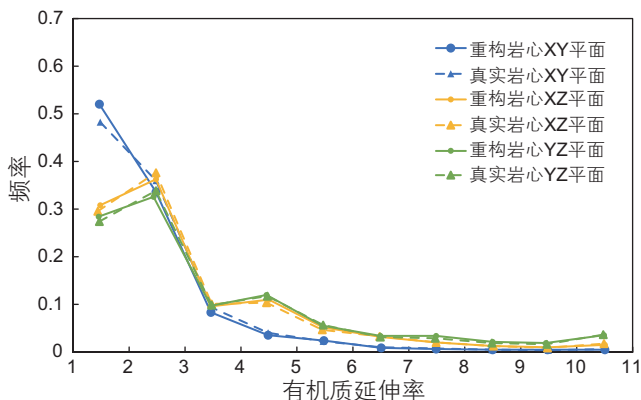


图 13 真实页岩样品与重构页岩数字岩心中有机质延伸率比较

Fig. 13 Comparison of the elongation ratio of organic matter between the real shale sample and the reconstructed shale digital core

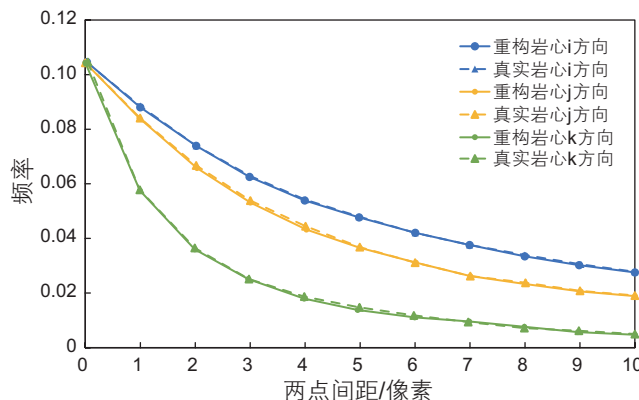


图 14 真实页岩样品与重构页岩数字岩心中有机质部分两点簇函数在 3 个正交方向上的分布比较

Fig. 14 Comparison of the two-point cluster functions of the organic matters in three orthogonal directions between the real shale sample and the reconstructed shale digital core

函数时结合了可表征拓扑连通性的两点簇函数，为研究页岩各向异性，沿 3 个正交方向计算独立的结构信息，有机质部分的两点簇函数结果如图 14 所示。从图中可以看出，重构数字岩心与真实数字岩心的在各方向上均拟合较好。有机质两点簇函数 k 方向与 i 、 j 方向的值差距较大，表明有机质具有明显的各向异性。

4 结束语

针对页岩样品中有机质分布的各向异性特征，本

文提出在传统模拟退火数值重构方法基础上引进两点簇函数作为表征有机质分布连续性的统计指示函数，并利用实际页岩岩心样品的数值重构对该方法的应用进行说明，通过对页岩样品重构结果的有效性评价，证明了两点簇函数方法表征页岩有机质各向异性分布特征的有效性。

致谢

感谢美国亚利桑那州立大学 Yang Jiao 教授在两点簇函数程序编制方面提供的帮助。

参考文献

[1] 林承焰, 吴玉其, 任丽华, 等. 数字岩心建模方法研究现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(02): 679-689. [LIN C Y, WU Y Q,

- REN L H, et al. Review of digital core modeling methods [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(02): 679–689.]
- [2] 汪勇, 孙业恒, 梁栋, 等. 基于数字岩心与格子 Boltzmann 方法的致密砂岩自发渗吸模拟研究[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(04): 458–466. [WANG Y, SUN Y H, LIANG D, et al. Spontaneous imbibition simulation of tight sandstone based on digital rock and lattice Boltzmann method [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(04): 458–466.]
- [3] HERMAN G T. *Fundamentals of computerized tomography: image reconstruction from projections*[M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [4] 董怀民, 孙建孟, 林振洲, 等. 基于CT扫描的天然水合物储层微孔结构定量表征及特征分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(06): 40–49. [DONG H M, SUN J M, LIN Z Z, et al. Quantitative characterization and characteristics analysis of microscopic pore structure in natural gas hydrate based on CT scanning [J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2018, 42(06): 40–49.]
- [5] SIDHU R, CHAWLA N. Three-dimensional (3D) visualization and microstructure-based modeling of deformation in a Sn-rich solder[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(9): 1627–1631.
- [6] 程志林, 隋微波, 宁正福, 等. 数字岩芯微观结构特征及其对岩石力学性能的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(02): 449–460. [CHENG Z L, SUI W B, NING Z F, et al. Microstructure characteristics and its effects on mechanical properties of digital core [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(02): 449–460.]
- [7] XU C S, HAYWORTH K J, LU Z, et al. Enhanced FIB-SEM systems for large-volume 3D imaging[J]. *Elife*, 2017, 6: e25916.
- [8] 刘磊, 姚军, 孙海, 等. 考虑微裂缝的数字岩心多点统计学构建方法[J]. *科学通报*, 2018, 63(30): 3146–3157. [LIU L, YAO J, SUN H, et al. Reconstruction of digital rock considering micro-fracture based on multi-point statistics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(30): 3146–3157.]
- [9] SUI W, ZOU M, WANG X, et al. Reconstruction of shale using dual-region strategy and very fast simulated annealing algorithm[C]. *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference*, 2014.
- [10] CHEN L, ZHANG L, KANG Q, et al. Nanoscale simulation of shale transport properties using the lattice Boltzmann method: permeability and diffusivity[J]. *Scientific reports*, 2015, 5(1): 1–8.
- [11] 庞伟. 采用多点地质统计法重构页岩的数字岩心[J]. *天然气工业*, 2017, 37(09): 71–78. [PANG W. Reconstruction of digital shale cores using multi-point geostatistics [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(09): 71–78.]
- [12] 杨永飞, 刘志辉, 姚军, 等. 基于叠加数字岩心和孔隙网络模型的页岩基质储层孔隙空间表征方法[J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(05): 488–498. [YANG Y F, LIU Z H, YAO J, et al. Pore space characterization method of shale matrix formation based on superposed digital rock and pore-network model [J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2018, 48(05): 488–498.]
- [13] 高之业, 范毓鹏, 胡钦红, 等. 川南地区龙马溪组页岩有机质孔隙差异化发育特征及其对储集空间的影响[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(01): 1–16. [GAO Z Y, FAN Y P, HU Q H, et al. Differential development characteristics of organic matter pores and their impact on reservoir space of Longmaxi Formation shale from the south Sichuan Basin [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(01): 1–16.]
- [14] 滕吉文, 刘有山. 中国油气页岩分布与存储潜能和前景分析[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(03): 1083–1108. [TENG J W, LIU Y S. Analysis of distribution, storage potential and prospect for shale oil and gas in China [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(03): 1083–1108.]
- [15] 王世谦, 陈更生, 董大忠, 等. 四川盆地地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. *天然气工业*, 2009, 29(05): 51–58+137–138. [WANG S Q, CHEN G S, DONG D Z, et al. Accumulation conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(05): 51–58+137–138.]
- [16] 姚军, 宋文辉, 李阳, 等. 有机质孔隙对页岩气流能力影响研究[J]. *中国科学: 物理学、力学、天文学*, 2017, 47(09): 55–66. [YAO J, SONG W H, LI Y, et al. Study on the influence of organic pores on shale gas flow ability [J]. *Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2017, 47(09): 55–66.]
- [17] 周枫, 刘卫华, 奚相. 四川盆地龙马溪组页岩各向异性影响因素[J]. *地质学刊*, 2016, 40(04): 583–588. [ZHOU F, LIU W H, XI X. Controlling factors on anisotropy of the Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin [J]. *Journal of Geology*, 2016, 40(04): 583–588.]
- [18] KWON O, KRONENBERG A K, GANGI A F, et al. Permeability of illite - bearing shale: 1. Anisotropy and effects of clay content and loading[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B10).
- [19] GU X, COLE D R, ROTHER G, et al. Pores in Marcellus shale: A neutron scattering and FIB-SEM study[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(3): 1295–1308.
- [20] 王沫然, 王梓岩. 地下深层岩石微米级孔隙内气体渗流的多尺度模拟与分析[J]. *地球科学*, 2018, 43(05): 1792–1816. [WANG M R, WANG Z Y. Multiscale simulation and analysis for gas flow in deep-seated micronano pore[J]. *Earth Science*, 2018, 43(05): 1792–1816.]
- [21] 赵秀才, 姚军, 陶军, 等. 基于模拟退火算法的数字岩心建模方法[J]. *高校应用数学学报A辑*, 2007, 2: 127–133. [ZHAO X C, YAO J, TAO, J, et al. A method of constructing digital core by simulated annealing algorithm [J]. *Applied Mathematics A Journal of*

- Chinese Universities(Ser. A), 2007, 2: 127–133.]
- [22] JIAO Y, CHAWLA N. Modeling and characterizing anisotropic inclusion orientation in heterogeneous material via directional cluster functions and stochastic microstructure reconstruction[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(9): 093511.
- [23] LIU X, SUN J, WANG H. Reconstruction of 3-D digital cores using a hybrid method[J]. Applied Geophysics, 2009, 6(2): 105–112.
- [24] 张爽, 隋微波. 页岩储层有机质分布定量分析及重构模型[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(02): 22–28. [ZHANG S, SUI W B. Re-construction and quantitative analysis methods for organic matter distribution in shale reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(02): 22–28.]

(责任编辑 廖广志 编辑 付娟娟)