



基于时间演化的天然气水合物CT图像阈值分割

陈 亮, 叶旺全, 李承峰, 孙建业, 郑荣儿

Natural Gas Hydrate CT Image Threshold Segmentation Based on Time Evolution

CHEN Liang, YE Wangquan, LI Chengfeng, SUN Jianye, and ZHENG Ronger

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2022.062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于支持向量回归的陆域天然气水合物成藏预测

Prediction of Terrestrial Gas Hydrate Accumulation Based on Support Vector Regression

CT理论与应用研究. 2019, 28(3): 299–310

地震资料宽频处理技术在天然气水合物矿体描述中的应用研究

Application of Broadband Seismic Data Processing Technology in the Description of Natural Gas Hydrate Ore Body

CT理论与应用研究. 2021, 30(5): 547–554

地震资料精细处理技术在神狐海域研究区的应用

The Application of Accurate Seismic Processing in Shenhu Area

CT理论与应用研究. 2019, 28(4): 427–437

肺部CT图像分割方法研究

Research of Lung Segmentation Based on CT Image

CT理论与应用研究. 2018, 27(6): 683–691

无井波阻抗反演在西沙水合物研究中的应用

CT理论与应用研究

CT理论与应用研究. 2017, 26(4): 425–434

动载作用下混凝土细观损伤的CT图像分割和灰度共生矩阵特征值研究

Study on Concrete Mesoscopic Damage Under Dynamic Loading Using CT Image Segmentation and Gray Level Co-occurrence Matrix Eigenvalue

CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 170–182



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈亮, 叶旺全, 李承峰, 等. 基于时间演化的天然气水合物 CT 图像阈值分割[J]. CT 理论与应用研究, 2023, 32(2): 171-178. DOI:10.15953/j.ctta.2022.062.
CHEN L, YE W Q, LI C F, et al. Natural Gas Hydrate CT Image Threshold Segmentation Based on Time Evolution[J]. CT Theory and Applications, 2023, 32(2): 171-178. DOI:10.15953/j.ctta.2022.062. (in Chinese).

基于时间演化的天然气水合物 CT 图像阈值分割

陈亮¹, 叶旺全¹, 李承峰^{1,2✉}, 孙建业², 郑荣儿¹

1. 中国海洋大学物理与光电工程学院, 山东 青岛 266100

2. 青岛海洋地质研究所自然资源部天然气水合物重点实验室, 山东 青岛 266237

摘要: 微米 X 射线计算机断层扫描作为一种数字岩心探测手段, 被广泛应用于研究含天然气水合物沉积物赋存形态, 但由于水合物与水对 X 射线的衰减系数相近, 二者在 CT 图像中灰度区间存在交集, 导致在从 CT 图像上对水合物与水进行分割时存在强非唯一性。为提高对 CT 图像中水合物与水阈值分割的准确性, 本文通过分析天然气水合物生长过程中不同时刻 CT 图像直方图特征, 提出归一化 CT 图像及其直方图的方法。首先选定甲烷气与石英砂的峰值灰度基准; 然后用高斯函数分别对当前 CT 图像直方图中的甲烷气与石英砂曲线进行拟合, 得到当前 CT 图像直方图中的甲烷气与石英砂峰值灰度; 再将当前 CT 图像直方图中的甲烷气峰值灰度与石英砂峰值灰度归一化到选定的峰值灰度基准; 进而用归一化的直方图对 CT 图像进行归一化; 最后根据归一化灰度直方图的变化趋势, 定量统计得到 CT 图像中水合物增加和气-水减少的灰度区间, 完成图像中不同组分的阈值划分。实验结果表明, 提出的阈值分割方法能够为天然气水合物 CT 图像中水合物与水边界的确定和水合物饱和度计算提供定量的依据, 具有实际的工程应用价值。

关键词: CT 图像; 天然气水合物; 阈值分割; 归一化

DOI:10.15953/j.ctta.2022.062

中图分类号: P 631.3; O 242

文献标识码: A

天然气水合物在海洋沉积物孔隙中的赋存规律对储层地震波、电阻率以及渗透率等物理特性具有显著影响^[1-4], 从而在很大程度上决定了水合物地球物理勘探和资源评价的精度。迄今, 全球已探明的海洋水合物产状仍以分散型为主, 如我国南海神狐海域^[5-6], 水合物主要充填于泥质或砂质沉积物的孔隙中。沉积物孔隙的直径通常在几微米到几百微米之间, 且水合物在孔隙中生长具有较大的随机性, 水合物赋存形态在不同的饱和度条件下呈现出多样性, 目前对此尚未形成统一的认识^[7-8]。

野外常用的 X 射线岩心扫描仪, 可对现场钻探获取的柱状岩心进行整体扫描, 空间分辨率一般在厘米级, 能够获取岩心内部的沉积特征和较大的孔隙或裂隙空间结构, 但对于分散于沉积物孔隙中的水合物微观分布细节缺乏表征能力^[9-10]。微米 X 射线计算机断层扫描 (micro-scale X-ray computed tomography, micro-XCT) 能够在不破坏水合物赋存条件下直观呈现沉积物内部微观结构特征及其不同组分的相态变化, 在现有含水合物沉积物微观探测研究中应用较为广泛^[11]。然而, 在利用 CT 灰度图像来区分微米级孔隙中水与水合物时仍面临技术挑战, 这主要是由水和水合物对 X 射线的衰减系数相近所造成的, 表现为 CT 图像中二者的灰度区间存在交集。在进行水与水合物相态区分时, 由于传统阈值分割方法更多注重图像边缘轮廓的分割, 对于水合物与水在图像中处于混合状态的情况下选取的灰度阈值缺乏客观的标准^[12-13], 容易导致图像中部分水和水合物的分布范围发生偏差, 从而对准确识别二者的边界造成困难。

现有研究中解决这一相态区分问题的思路主要有两种: 一是在水中通过添加原子序数较高的化学物质来增加水与水合物二者之间的衰减系数差, 如利用碘化钾或溴化钠溶液代替水^[14-15], 或使用氙气、氙气等来增加水合物的衰减系数^[16-17], 在一定程度上能够增大图像中水与水合物的灰度差,

收稿日期: 2022-04-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (C02 置换甲烷水合物前缘演化及其力学特性和置换效率响应 (41976205))。

但沉积物孔隙中其他物质的加入也会造成水合物生成和分解动力学性质的改变；另一种思路是在低温高压容器内添加人工合成的块状水合物充当标记物，用以作为沉积物体系中新生成的水合物灰度值提取的参考，实验表明该方法能够取得比较理想的分辨效果^[18-20]，但缺点是转移水合物标记物的过程非常复杂，且容易导致用于充当标记物的水合物样品的分解。

此外，由于甲烷水合物的合成需要较为严格的温度和压力条件，部分学者也有使用氙气^[21-22]、二氧化碳^[23]、四氢呋喃^[24]等作为水合物客体分子进行实验，以此推断含甲烷水合物沉积物的性质。但由于客体分子类型的不同，上述类型水合物与甲烷水合物之间生长动力学及空间赋存规律上的差异尚有诸多不确定性，与野外勘探开发实际也有较大差距。

本研究针对水与水合物相态区分的技术难题，在实验室内获取石英砂颗粒孔隙中甲烷水合物生长过程不同时刻批量 CT 扫描灰度图像^[19-20]，在此基础上提出一种基于图像灰度直方图归一化的阈值分割方法；通过对不同生长时刻与初始时刻所对应的灰度直方图数据进行对比，即灰度值对应像素点减少的区间分别对应于甲烷气体和水，灰度值对应像素点增加的区间则对应于水合物，石英砂颗粒的灰度保持不变，从而确定图像中 4 种组分的灰度阈值；基于该灰度阈值，对水合物的空间分布形态进行表征。

1 CT 灰度图像及其直方图归一化方法

1.1 灰度直方图归一化

本文采用 0.3~0.8 mm 石英砂作为沉积物，将其放进可耐高压的反应容器中，并用去离子水将石英砂饱和。设置反应釜温度为 2℃，通入 6.2 MPa 甲烷气体后将反应容器密封，即容器内的甲烷气、水和石英砂为一封闭系统，与外界没有物质交换。在水合物生长的过程中，每间隔 2 h 进行一次 CT 扫描，获得反应容器内部的灰度图像。

在水合物生长过程中，除沉积物骨架外，孔隙内部的甲烷气、水合物、水 3 种组分的空间分布和含量处于动态变化中，同时受 CT 仪器稳定性和图像噪声的影响，不同阶段 CT 图像的灰度直方图会有所差异，特定组分的峰值灰度及灰度区间会发生偏移，不利于灰度数值的对比分析。本文提出的灰度直方图归一化方法，其核心是矫正 CT 图像中特定组分的峰值灰度及灰度区间，将不同时刻 CT 图像灰度直方图中处于最小值的甲烷气与处于最大值的石英砂二者的峰值分别标定在一个固定的灰度值上，对灰度直方图进行归一化，具体归一化步骤如下：

(1) 选取甲烷气与石英砂的峰值灰度基准。

(2) 提取甲烷水合物 CT 图像的有效区域，绘制直方图曲线。

(3) 分别拟合步骤 (2) 直方图曲线中的甲烷气与石英砂的高斯曲线，得到甲烷水合物 CT 图像直方图曲线中甲烷气与石英砂的峰值灰度。

(4) 以步骤 (3) 中拟合得到的高斯曲线峰值灰度作为当前灰度直方图曲线中甲烷气与石英砂的峰值灰度。

(5) 通过拟合步骤 (1) 中选取的峰值灰度基准与步骤 (4) 中得到的当前直方图峰值灰度的一次函数得到函数系数 a, b ，将灰度坐标 $g(g \in [0, 1, 2, \dots, 255])$ 作为自变量带入系数为 a, b 的一次函数中，计算得到新的灰度坐标 $g'(g' = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_n, n = 0, 1, 2, \dots, 255\})$ 。

(6) 以灰度坐标 g 作为归一化直方图曲线横坐标，以灰度坐标 g' 在原始灰度直方图曲线上对应灰度坐标的纵坐标作为归一化灰度直方图曲线纵坐标，得到归一化灰度直方图曲线。图 1 为直方图归一化流程图。

针对水合物生长过程中不同时刻的 CT 图像，挑选反应时间依次增长的 5 个时刻的数据进行分析，反应时间从短到长依次为 0、30、34、48 和 72 h。每个时刻的 CT 切片图像数量为 790 张，从样品底部到上部的切片编号依次为 1~790，每一张 CT 切片图像尺寸均为 530 × 530 像素。图 2 为选取的 5

个不同反应时间下,切片编号均为 150 位置处的 CT 图像直方图归一化结果,根据图像组分不超出灰度范围的原则,对比分析直方图曲线的峰值和峰宽,选取的甲烷气与石英砂峰值灰度基准分别为 35 和 220。其中图 2 (a) 为归一化之前的 CT 图像直方图曲线,图 2 (b) 为归一化之后的 CT 图像直方图曲线。

图 3 为图 2 (b) 中灰度坐标 59~135 范围内水合物与水混合区域灰度直方图曲线,图中随着反应时间的增长,水合物和水的混合峰的峰值灰度逐渐向低灰度值(水合物)方向偏移,表明了水合物含量的增加和水含量的减少。根据灰度直方图的这一变化趋势,通过定量统计的方法获得增加和减少的灰度区间,可为水合物与水的灰度阈值划分提供依据。

1.2 CT 灰度图像归一化

在 CT 图像灰度直方图归一化的基础上,利用直方图归一化的中间参数信息,对图像每个像素点重新赋值,将原始的 CT 图像与归一化的直方图曲线匹配,获得归一化的灰度图像,有助于识别水合物的分布特征。用公式(1)对原始甲烷水合物 CT 图像中每个像素点的灰度重新赋值,式中 $I(x,y)$ 为输入图像不同位置处的灰度值, $O(x,y)$ 为输出的对应位置处的灰度值, x_0 与 x_n 为直方图归一化步骤(5)中灰度坐标 g' 的最小值与最大值。通过遍历整个输入图像,得到归一化输出图像。

$$O(x,y) = \frac{I(x,y) - x_0}{x_n - x_0} \times 255. \quad (1)$$

图 4 为选取的 5 个不同反应时间下的 CT 灰度图像归一化前后对比(以切片编号 150 位置处图像为例),其中图 4 左列为归一化之前的 CT 切片图像,图 4 右列为归一化之后的 CT 切片图像。图像归一化结果表明,不同时刻 CT 图像的亮度、对比度等更加一致,且并未影响图像中各组分的空间分布及含量信息。

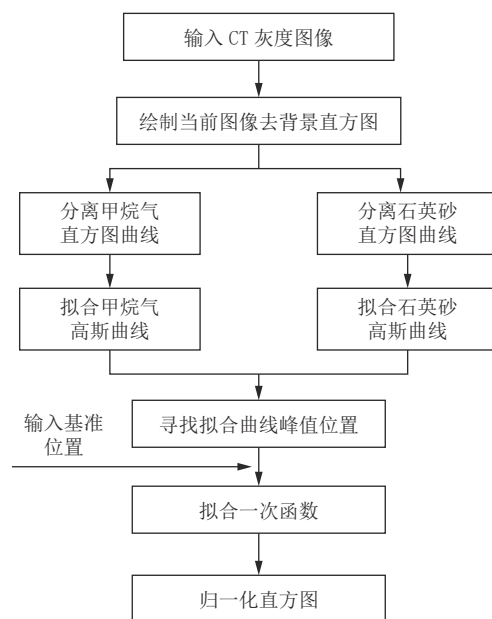


图 1 CT 灰度图像直方图归一化流程图

Fig.1 Histogram normalization flow chart of CT gray image

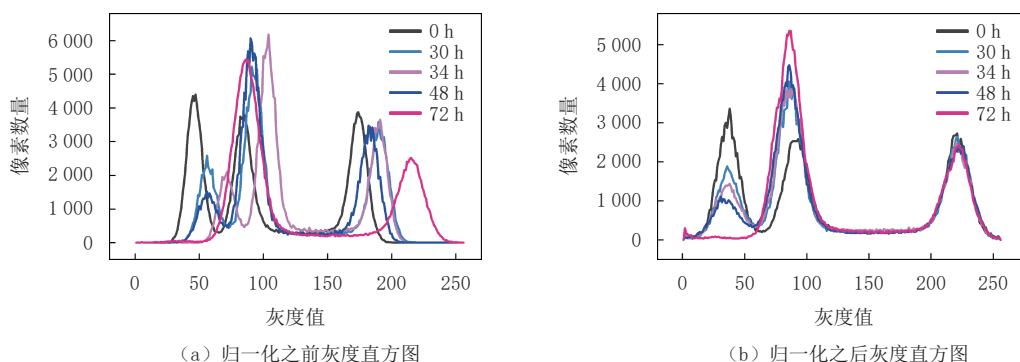


图 2 灰度直方图归一化对比(切片编号 150)

Fig.2 Comparison of histogram curves before and after normalization (slice 150)

2 CT 图像灰度阈值分割

2.1 确定各组分灰度阈值

灰度图像阈值分割是一种基于区域的图像分割技术，核心是按照灰度等级对像素集合进行划分，得到的每个子集形成一个与样品中不同组分相对应的灰度区间。水合物 CT 灰度图像中甲烷气体、水合物、水和砂各自占据不同的灰度级范围，阈值分割能够更直观地从图像上观察沉积物孔隙中水合物的空间分布特征。根据 CT 成像原理，在水合物与水的密度相近的情况下，CT 图像中水合物与水的灰度分布范围相互重叠，因此在灰度直方图中几乎不会出现水合物与水相互独立的两个峰，从而难以直接从单次 CT 扫描图像或灰度直方图中对二者进行准确区分。

通过对比归一化后的水合物生长不同时刻 CT 图像灰度直方图，在水合物与水混合灰度区间内筛选出强度持续增加的灰度范围，即代表水合物的灰度区间，其中，该灰度区间的最小灰度为甲烷气体与水合物的分割阈值，最大灰度为水合物与水的分割阈值。对于水与石英砂这两种组分边界，取甲烷水合物与水的整体曲线的峰值灰度与石英砂峰值灰度的中点作为其分割阈值。

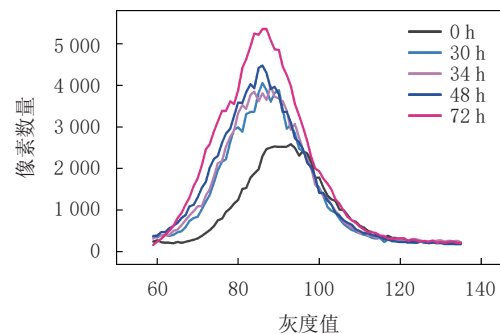


图 3 水合物与水混合峰区域

Fig.3 Mixing peak region of hydrate and water

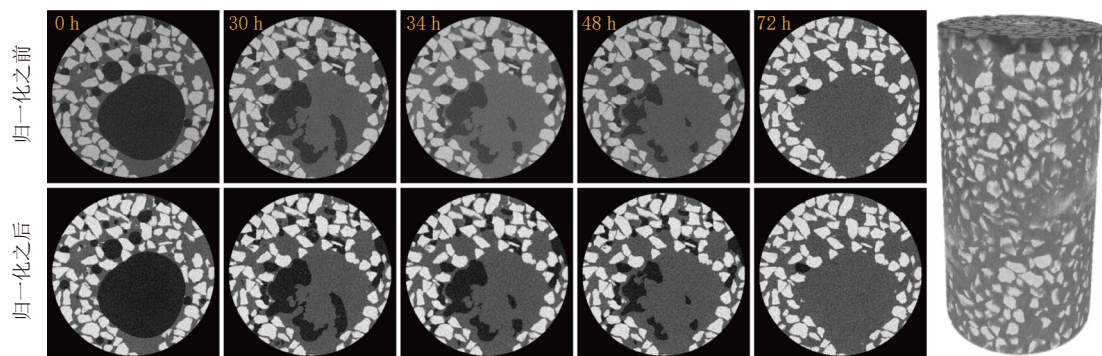


图 4 图像归一化对比 (切片编号 150) 及三维数字岩心图像

Fig.4 Image normalization contrast (slice 150) and 3D digital core

图 5 展示了水合物生长过程中反应时间 30、34、48 和 72 h 下 CT 切片图像 (以切片编号 150 位置处图像为例) 灰度直方图与反应时间 0 h 对应的灰度直方图差值的变化规律，其纵坐标负值表示在这个过程中强度在减少的灰度范围，正值代表强度增加的灰度范围，从而确定了各种组分的分割阈值 (表 1)。

2.2 图像四值化

图 6 是选取的 5 个不同反应时间下，CT 图像的阈值分割后对应的伪彩色图像以及局部放大图像，其中灰黑色代表甲烷气、黄色代表水合物、青色代表水、白色代表石英砂。结果表明，水合物在孔隙空间中的生长是一个具有空间非均匀性的替代过程，水合物容易在较大的孔隙空间中赋

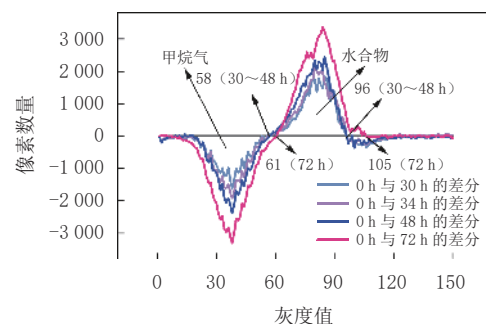


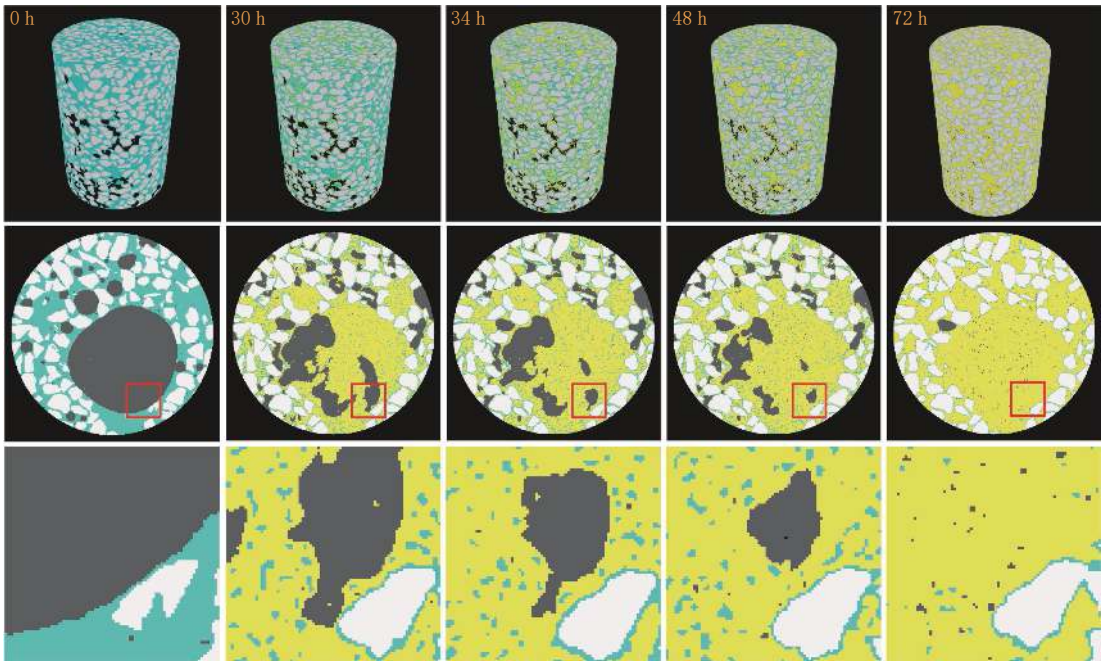
图 5 不同时刻 CT 图像直方图曲线差值 (切片编号 150)

Fig.5 Histogram curves of CT images subtracted at different times (slice 150)

存；生成的水合物固体颗粒内部，存在较多粒内孔，填充了部分甲烷气体或水，其直径主要介于 20~100 μm。

表 1 CT 图像中各种组分的灰度区间
Table 1 Gray intervals of various components of CT images

反应时间/h	灰度区间（0~255）			
	甲烷气	甲烷水合物	水	砂
0	0~58	—	59~156	157~255
30	0~58	59~96	97~156	157~255
34	0~58	58~96	97~156	157~255
48	0~58	59~96	97~156	157~255
72	0~61	62~105	106~156	157~255



注：■ 甲烷气，■ 甲烷水合物，■ 水，■ 石英砂。

图 6 基于本文阈值分割方法得到的伪彩色三维数字岩心及图像的孔隙局部放大图像

Fig.6 Pseudo-color digital core and local pore magnification image obtained based on threshold segmentation method used in this study

2.3 有效性验证

在 CT 图像中各组分灰度阈值确定后，基于像素统计的方法即可获得含水合物沉积物各个组分的体积百分含量，因此可采用水合物饱和度参数这一定量指标来对阈值分割的有效性进行验证。沉积物孔隙部分包括甲烷气、水合物和水，骨架部分为石英砂，水合物饱和度定义为水合物体积占据孔隙体积的百分比。

文献 [19] 提出了一种基于物质界面处灰度值随距离变化曲线识别方法，通过不同物质之间的灰度值梯度变化来确定其灰度分割阈值；文献 [20] 则采用外加人工水合物颗粒作为标定的方法，确定水合物的灰度值区间，从而判别水合物与气体、水之间的灰度阈值。为验证本文阈值分割结果的准确性，采用以上文献中的两种方法分别对本文 CT 图像进行阈值分割并计算水合物饱和度参数，用于对比分析，如图 7 所示。

结果表明: 本文阈值分割方法所获得水合物饱和度数值介于文献 [19] 和文献 [20] 方法计算结果之间, 与二者平均绝对误差分别为 7.8% 和 4.2%, 且水合物饱和度参数随着水合物生长过程的演变具有较好的一致性。另外, 相比文献 [19] 中的阈值分割方法, 其需要挑选感兴趣区域进行局部灰度值变化趋势分析, 不同部位因水合物含量的多少会对阈值选取造成影响, 而本研究是基于每次 CT 扫描的整体三维数据体进行的总体分析, 从而避免了因局部水合物分布的空间各向异性造成的差异。

同时, 本研究相比文献 [20] 所采用的外加水合物颗粒作为标定物方法, 实验操作更加简便, 也能够避免因先后两次合成的水合物笼占有率不同而对 CT 图像灰度产生的误差。最后, 本研究

方法的分割阈值是通过一定的模型从数据中合理预测得到的, 相比于其他通过直方图曲线的波峰/波谷确定分割阈值的方法, 本文中的方法能在一定程度上避免主观因素的干扰。

3 结论

为准确区分天然气水合物 CT 图像中水合物与水的边界, 提高阈值分割精确度, 本文围绕沉积物孔隙中水合物生长动态过程的 CT 扫描图像创新性提出了基于水合物生长时间演化的阈值分割方法, 表征了水合物微观分布形态特征。实验结果表明:

(1) 提出的阈值分割方法能够在一定程度上降低天然气水合物 CT 图像灰度偏移, 更为准确、便捷地获得封闭体系中甲烷气、水合物、水、石英砂 4 种组分的灰度阈值; 若实验样品在开放的环境中, 气、水或沉积物与外界发生物质迁移, 则本阈值分割方法不再适用。

(2) 通过该阈值计算的水合物饱和度参数与文献中常用的饱和度计算方法相比, 计算结果具有较高的一致性。

(3) 在阈值分割的基础上, 可对甲烷气、水合物、水以及石英砂骨架四种组分的空间分布进行表征, 水合物在孔隙空间中的生长行为具有较大的空间非均匀性, 且生成的水合物固体颗粒内部存在较多粒内孔, 这些空间分布特征对天然气水合物储层地震、电阻等现场勘探数据的解释具有显著的影响, 值得进一步深入研究。

参考文献

- [1] PRIEST J A, BEST A I, CLAYTON C R I, et al. A laboratory investigation into the seismic velocities of methane gas hydrate-bearing sand[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110: B04102.
- [2] REN A R, LIU Y J, LIU Y X, et al. Acoustic velocity and electrical resistance of hydrate bearing sediments[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 70: 52-56.
- [3] ZHANG L, GE K, WANG J, et al. Pore-scale investigation of permeability evolution during 364 hydrate formation using a pore network model based on X-ray CT[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 113: 104157.
- [4] 李淑霞, 郭尚平, 陈月明, 等. 天然气水合物开发多物理场特征及耦合渗流研究进展与建议[J]. *力学学报*, 2020, 52(3): 828-842.
LI S X, GUO S P, CHEN M Y, et al. Research progress and suggestions on characteristics of multi-physical fields and coupled seepage in gas hydrate development[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(3): 828-842. (in Chinese).
- [5] LIU C L, MENG Q G, HU G W, et al. Characterization of hydrate-bearing sediments recovered from the Shenhu area of the South China Sea[J]. *Interpretation*, 2017, 5(3): 1-39.
- [6] 叶建良, 秦绪文, 谢文卫, 等. 中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J]. *中国地质*, 2020, 47(3):

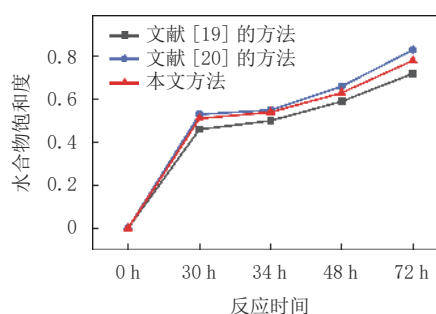


图 7 饱和度参数对比图

Fig.7 Comparison of hydrate saturation

- 557-568.
- YE J L, QIN X W, XIE W W, et al. Major process of second trial exploitation on gas hydrate in the South China Sea[J]. *Geology in China*, 2020, 47(3): 557-568. (in Chinese).
- [7] SELL K, SAENGER E H, FALENTY A, et al. On the path to the digital rock physics of gas hydrate-bearing sediments-processing of in situ synchrotron-tomography data[J]. *Solid Earth*, 2016, 7(4): 1243-1258.
- [8] LEI L, SEOL Y, JARVIS K. Pore-scale visualization of methane hydrate-bearing sediments with micro-CT[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(11): 5417-5426.
- [9] LEE J Y, JUNG J W, LEE M H, et al. Pressure core based study of gas hydrates in the ulleung basin and implication for geomechanical controls on gas hydrate occurrence[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2013, 47: 85-98.
- [10] KNEAFSEY T J, MORIDIS G J. X-ray computed tomography examination and comparison of gas hydrate dissociation in NGHP-01 expedition (India) and Mount Elbert (Alaska) sediment cores: Experimental observations and numerical modeling[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 526-539.
- [11] JIN S, NAGAO J, TAKEYA S, et al. Structural investigation of methane hydrate sediments by microfocus X-ray computed tomography technique under high-pressure conditions[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(24-28): L714-L716.
- [12] 刘冬梅. 结合 Retinex 校正和显著性的主动轮廓图像分割[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1593-1600.
- LIU D M. Active contour model for image segmentation based on Retinex correction and saliency[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1593-1600. (in Chinese).
- [13] 袁小翠, 吴禄慎, 陈华伟. 基于 Otsu 方法的钢轨图像分割[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1772-1781.
- YUAN X C, WU L S, CHEN H W. Rail image segmentation based on Otsu threshold method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1772-1781. (in Chinese).
- [14] KERKAR P B, KRISTINE H, KEITH W J, et al. Imaging methane hydrates growth dynamics in porous media using synchrotron X-ray computed microtomography[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(12): 4759-4768.
- [15] TA X H, TAE S Y, BALASINGAM M, et al. Observations of pore-scale growth patterns of carbon dioxide hydrate using X-ray computed microtomography[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(3): 912-924.
- [16] CHAOUACHI M, ANDRZEJ F, KATHLEEN S, et al. Microstructural evolution of gas hydrates in sedimentary matrices observed with synchrotron X-ray computed tomographic microscopy[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(6): 1711-1722.
- [17] CHEN X Y, ESPINOZA D N. Ostwald ripening changes the pore habit and spatial variability of clathrate hydrate[J]. *Fuel*, 2018, 214: 614-622.
- [18] 李承峰, 胡高伟, 业渝光, 等. X 射线计算机断层扫描测定沉积物中水合物微观分布[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(3): 551-557.
- LI C F, HU G W, YE Y G, et al. The microscopic distribution observation of hydrate in sediments by X-ray computed tomography[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, 24(3): 551-557. (in Chinese).
- [19] 胡高伟, 李承峰, 业渝光, 等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(5): 1675-1682.
- HU G W, LI C F, YE Y G, et al. Microscopic distribution of gas hydrate in pore sediments[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 1675-1682. (in Chinese).
- [20] LI C F, LIU C L, HU G W, et al. Investigation on the multiparameter of hydrate-bearing sands using nano-focus X-ray computed tomography[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2019, 124(3): 2286-2296.
- [21] YANG L, ZHAO J, LIU W, et al. Microstructure observations of natural gas hydrate occurrence in porous media using micro-focus X-ray computed tomography[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(8): 4835-4841.
- [22] 李晨安, 李承峰, 刘昌岭, 等. CT 图像法观测不同粒径多孔介质中水合物分布[J]. *核电子学与探测技术*, 2018, (4): 545-551.
- LI C A, LI C F, LIU C L, et al. Hydrate distribution observation in porous media with different particle sizes in CT image[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2018, (4): 545-551. (in Chinese).
- [23] LIU Z C, KIM J C, LEI L, et al. 2019. Tetrahydrofuran hydrate in clayey sediments: Laboratory formation, morphology, and wave characterization[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(4): 3307-3319.

- [24] 李志军, 张佳璐, 解恺, 等. 含粉砂四氢呋喃水合物微观结构试验[J]. 油气储运, 2021, 41(1): 84-90.
LI Z J, ZHANG J L, XIE K, et al. Experimental study on microstructure of silty sand tetrahydrofuran hydrate[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 41(1): 84-90. (in Chinese).

Natural Gas Hydrate CT Image Threshold Segmentation Based on Time Evolution

CHEN Liang¹, YE Wangquan¹, LI Chengfeng^{1,2✉}, SUN Jianye², ZHENG Ronger¹

1. College of Physics and Opto-electronic Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Key Laboratory of Gas Hydrates, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China

Abstract: Micro-scale X-ray computed tomography (CT) has been widely used to study the occurrence forms of gas hydrate-bearing sediments. However, the similarity between the X-ray attenuation coefficient of hydrate and that of water leads to a strong non-uniqueness in their phase differentiation in CT images. To improve threshold segmentation accuracy between hydrate and water in CT images, this study proposes a CT image and histogram normalized method by analyzing the histogram characteristics of CT images at different times during the growth process of natural gas hydrate. First, the peak gray value baseline of methane gas and quartz sand was selected. Then, a Gaussian function was used to fit the curves corresponding to methane gas and quartz sand in the current CT image histogram to obtain the peak gray values. In addition, the peak gray values of methane gas and quartz sand in the current CT image histogram were normalized to the chosen peak gray baseline. Subsequently, the normalized histogram was used to normalize the corresponding CT images. Finally, according to the changing trend of normalized gray histogram curves, the increasing gray ranges of hydrate and decreasing gray ranges of gas-water in CT images were obtained quantitatively, which guided threshold segmentation of CT images. Experimental results show that the proposed threshold segmentation method can provide a basis for phase differentiation between hydrate and water in CT images, improving the threshold segmentation accuracy.

Keywords: CT image; gas hydrate; threshold segmentation; normalization



作者简介: 陈亮, 男, 中国海洋大学光电信息工程专业在读硕士研究生, 主要从事图像处理及其应用相关研究, E-mail: cl6707@std.ouc.edu.cn; 李承峰[✉], 男, 青岛海洋地质研究所天然气水合物重点实验室工程师, 主要从事天然气水合物微尺度实验探测技术研究, E-mail: lchengfeng@mail.cgs.gov.cn。