



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

南海神狐海域天然气水合物微观赋存特征的超分辨率CT图像识别

李承峰, 叶旺全, 陈亮, 桂斌, 郝锡萍, 孙建业, 张永超, 刘乐乐, 陈强, 郑荣儿

Super-resolution CT image recognition of micro-occurrence characteristics of natural gas hydrates from Shenu area in northern South China Sea

LI Chengfeng, YE Wangquan, CHEN Liang, GUI Bin, HAO Xiluo, SUN Jianye, ZHANG Yongchao, LIU Lele, CHEN Qiang, and ZHENG Ronger

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023092801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海神狐海域非均质性天然气水合物储层的分频反演

Frequency-divided inversion method of heterogenous natural gas hydrates reservoir in the Shenu area, South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 106–120

海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法

Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 44–57

南海神狐海域天然气水合物饱和度的数值模拟分析

Numerical modeling of gas hydrate saturation for the Shenu area, South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 210–221

储层和开采参数对天然气水合物开采产能的影响分析

The influence of reservoir and exploitation parameters on production capacity of gas hydrate
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 202–216

南海北部神狐海域水合物赋存层位古环境和古生产率

Paleo-environment and paleo-productivity of the hydrate reservoirs in the Shenu area of northern South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 134–145

海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3–11



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李承峰, 叶旺全, 陈亮, 等. 南海神狐海域天然气水合物微观赋存特征的超分辨率 CT 图像识别 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 149-159.
LI Chengfeng, YE Wangquan, CHEN Liang, et al. Super-resolution CT image recognition of micro-occurrence characteristics of natural gas hydrates from Shenhua area in northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 149-159.

南海神狐海域天然气水合物微观赋存特征的超分辨率 CT 图像识别

李承峰^{1,2,3}, 叶旺全^{1,4}, 陈亮¹, 桂斌¹, 郝锡革^{2,3}, 孙建业^{2,3}, 张永超^{2,3}, 刘乐乐^{2,3,5}, 陈强^{2,3,5}, 郑荣儿¹

1. 中国海洋大学信息科学与工程学院, 物理与光电工程学院, 青岛 266100
2. 中国地质调查局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, 青岛 266237
3. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
4. 中国地质调查局舟山海洋地质灾害野外科学观测研究站, 青岛 266237
5. 自然资源部海洋甲烷监测工程技术创新中心, 青岛 266237

摘要: 南海神狐海域是我国天然气水合物资源勘探开发的主要目标区之一, 2017 和 2020 年先后两次现场试验性开采证实了水合物资源的利用前景。目前, 对该地区含水合物储层的精细评价还有待进一步提升, 水合物在沉积物孔隙空间中的微观赋存形态是其中的重要影响因素。针对水合物微观赋存形态 CT 图像表征存在的分辨率不足的问题, 建立了一种基于自监督学习的数字图像超分辨率重建算法, 实现了 CT 扫描图像空间分辨率的 2 倍和 4 倍提升。在此基础上, 对南海神狐海域含水合物沉积物孔隙结构演化规律和水合物微观赋存特征进行了形态表征。由于南海沉积物中存在大量有孔虫壳体, 水合物主要占据有孔虫壳体内部空间并堵塞了空隙间的连通喉道, 显著降低了沉积物的气、水渗透能力; 然而, 水合物未能全部占据整个孔隙空间, 仍然会有少量的气体和水残留, 气体则主要分布于水合物颗粒内部, 而水则主要分布在水合物颗粒表面, 上述实验结果对地震、测井等现场勘探数据解释具有一定的指导意义。

关键词: 天然气水合物储层; 微观赋存特征; 超分辨率重建; CT 图像

中图分类号:P744 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023092801

Super-resolution CT image recognition of micro-occurrence characteristics of natural gas hydrates from Shenhua area in northern South China Sea

LI Chengfeng^{1,2,3}, YE Wangquan^{1,4}, CHEN Liang¹, GUI Bin¹, HAO Xiluo^{2,3}, SUN Jianye^{2,3}, ZHANG Yongchao^{2,3}, LIU Lele^{2,3,5}, CHEN Qiang^{2,3,5}, ZHENG Ronger¹

1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China
4. Zhoushan Field Scientific Observation and Research Station for Marine Geo-hazards, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
5. Technology Innovation Center for Marine Methane Monitoring, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266237, China

Abstract: The Shenhua area in the South China Sea is one of the main areas rich in natural gas hydrate resources. Two on-site experimental explorations in 2017 and 2022 have confirmed the utilization prospects of hydrate resources. At present, precise evaluation on hydrate-containing reservoirs in the region yet needs further improvement as the microscopic occurrence of hydrates in sediment pore spaces is a key factor. This study addresses the issue of insufficient resolution in CT image representation of micro-occurrence forms of hydrates. A super-resolution reconstruction algorithm based on self-supervised deep-learning was established, in which a 2-fold and 4-fold increase in spatial

资助项目: 舟山海洋地质灾害野外科学工作站开放基金“海底含气土体微观结构探测技术与表征方法研究(ZSORS-22-12); 国家自然科学基金项目“CO₂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)”, “南海含有孔虫沉积物双重孔隙特征对水合物分解过程中渗透率演化的影响机理”(42006181)

作者简介: 李承峰(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事天然气水合物微观实验探测技术研究, E-mail: lchengfeng@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 叶旺全(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事海洋信息探测技术和图像数据处理相关研究, E-mail: yewangquan@ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-09-28; 改回日期: 2023-11-10. 张现荣编辑

resolution of CT scanning images were achieved. On this basis, the evolution of pore structure and microscopic occurrence characteristics of hydrates in the Shenhua area of the South China Sea were characterized. Due to the presence of a large number of foraminiferal shells in the sediments of the South China Sea, hydrates occupy mainly the internal space of the foraminiferal shells and block the connecting throats among pores, which significantly reduced the gas and water permeability of sediments. However, hydrates do not fully occupy the entire pore space, and there will still be a small amount of gas and water residue. Gas distributed mainly inside the hydrate particles, while water distributed mainly on the surface of hydrate particles. The above experimental results offered a guidance to the interpretation of on-site exploration data such as earthquakes and logging.

Key words: natural gas hydrate reservoirs; micro-occurrence characteristics; super-resolution reconstruction; CT images

中国南海天然气水合物主要赋存于海底松散沉积物中,天然气水合物在沉积物中的赋存形态具有多样性^[1-2]。这对天然气水合物赋存形态的准确表征在一定程度上影响了其储层物理特性如声波速度、电阻率、渗透率等参数的探测精度,对天然气水合物资源量及开采效率的评价具有重要的影响^[3-5]。

钻探结果表明,沉积物中天然气水合物的赋存形态主要包括块状、脉状、结核状等肉眼可见类型,以及分散状(孔隙充填型)等肉眼不可见的类型^[6-7]。其中,天然气水合物在沉积物孔隙中的分布具有显著的空间非均匀性,且天然气水合物与沉积物颗粒的接触形态有多种类型,这些特征在很大程度上会影响地球物理探测的精度^[8-10]。因此,准确识别并表征天然气水合物的微观赋存形态尤为重要,需借助高分辨的观测手段和定量化的表征方法。

目前,针对天然气水合物微观赋存形态的观测主要是通过微米级 X 射线计算机断层扫描成像技术(X-ray Computed Tomography, CT)。CT 成像的优点在于扫描过程对样品无损伤,能够对样品内部结构进行三维成像且空间分辨率较高(可达到微米级)。此外,X 射线可穿透一定厚度的金属或非金属容器,对需要保持低温或高压测试条件的天然气水合物样品具有很好的适用性。近年来,国内外研究者对中粗砂粒径沉积物孔隙中天然气水合物的赋存形态^[9,11-13]、微孔结构^[14-18]等方面开展了大量的实验研究,很大程度上拓展了人们对天然气水合物在孔隙尺度上的微观分布和动态演化规律的认知。然而,CT 扫描目前在天然气水合物相与沉积物颗粒界面识别方面仍存在较大的困难,一方面是受扫描图像空间分辨率的限制,导致沉积物与天然气水合物二者的边界处于同一像素内从而造成灰度值呈现的是两种组分的混合结果,灰度值大小处于天然气水合物与沉积物之间,容易造成“假水膜”的现象出现^[12,15];另一方面,由于天然气水合物与孔隙水对 X 射线的吸收系数较为相近,CT 图像中二者的灰度区间存在交集,这也给天然气水合物的微

观赋存形态及相边界识别带来了困难。

针对以上问题,研究者从实验和图像处理方面进行了多种尝试,如增大液体密度法^[12]、水合物内标法^[19]、图像梯度幅值和边缘检测算法^[20]以及灰度图像时间分辩法^[21]等,在一定程度上优化了 CT 图像对天然气水合物相边界的识别效果。针对海洋泥质沉积物类型,由于受 CT 图像分辨率的限制,只能观察到裂隙或有孔虫腔(颗粒内部的孔隙)中的天然气水合物分布,很难在图像中识别分散在沉积物细颗粒之间的微小天然气水合物晶体^[22-24]。

人工智能领域中的深度学习方法为提升地质样品的三维建模精度提供了一种新的途径。基于深度学习算法对实验获得的天然气水合物 CT 图像进行超分辨率重建,成为突破图像视场与分辨率相互制约的一种有效解决方案。目前应用在数字岩心领域的图像超分辨率重建算法主要有传统的超分辨率卷积神经网络^[25-27]以及基于生成对抗网络^[28-32]。基于这类方法,需要大量成对的高-低分辨率图像数据集用于学习直接的映射关系,继而在现有观测图像的基础上进行超分辨率重建。由于获得大量完全匹配的超分图像数据集仍是一个巨大的挑战,目前常用的方法是将原始高分辨率图像进行模糊以及下采样来制作低分辨率数据集,与相应的高分辨率图像组成成对的训练数据集^[33]。然而,采用上述方法训练得到的模型有着很多缺陷,首先,它无法对原始高分辨率图像进行超分从而得到更高质量的图像;其次,将该训练模型应用到未知图像数据中将产生严重的性能退化。

相比于需要大批数据进行训练的监督学习,自监督学习通过学习单张输入图像之间的内在联系,对图像进行超分辨率重建。自监督学习用于图像超分辨率重建分为两个阶段:图像退化模型的估计与图像超分辨率重建,结合 GAN 与传统图像重建网络可以实现对单幅图像的自监督学习。自监督学习方法不同于有监督的学习方法,其训练时不需要额外的“真值”(高分辨率图像),即其不需要成对

的高-低分辨率图像数据集进行训练。上述深度学习方法主要针对煤、碳酸盐岩、砂岩等岩石样本中进行数字图像超分辨率研究和应用^[34-36], 而针对海洋含天然气水合物沉积物尚缺少相应的研究。

本文对取自中国南海神狐海域天然气水合物富集区含有孔虫沉积物样品, 在实验室进行 CT 扫描, 并采用基于双反投影内部学习(Dual Back-Projection-Based Internal Learning, DBPI)算法对 CT 图像进行超分辨率重建, 并在此基础上对该海域天然气水合物微观赋存特征进行了识别与分析。

1 样品测试与分析方法

1.1 研究区概况

本文所采用海洋沉积物来源于中国南海北部陆坡神狐海域天然气水合物富集区(图 1), 该区位于南海北部陆缘的中段, 地处珠江口盆地珠江坳陷白云凹陷, 新生代沉积厚度达 1 000~7 000 m, 沉积速率为 40~120 cm/ka^[37], 有机碳含量为 0.46%~1.9%^[38], 具有较大的生烃潜力和有利的天然气水合物形成条件。海底地形起伏变化较大, 总体趋势表现为 NW-SE 倾斜^[39]。W18/19 站位水深约 1 272 m, 水合物埋深为 133~162 m, 富集层段厚度为 20~30 m, 水合物饱和度可达 64%^[40]。该站位主要发育两种类型的沉积相, 一种是浅层的半远洋沉积, 以细粒的黏

土或粉砂质黏土为主; 另一种为天然堤沉积, 以细粒的粉砂质黏土为主, 可见黏土质粉砂或粉砂岩层。

1.2 样品处理与测试

取自南海神狐海域的泥质沉积物在实验室内经过分样、切割, 制备成直径为 10 mm、高度 15 mm 的微型柱状样, 放在自主研制的可控温高压反应釜(图 2A)中模拟水合物的赋存环境, 并通过控制反应釜的温度和压强, 开展水合物生长和分解模拟实验。实验采用的气体为 99.99% 的纯甲烷, 反应釜为半导体控温, 实验温度设置为 2.0 °C, 初始压强为 6.0 MPa, 更加详细的实验流程可参考文献 [12]。

利用自然资源部天然气水合物重点实验室的微米级 X 射线 CT 对水合物在沉积物中的生长和分解过程进行在线测试(图 2B), 通过扫描的灰度图像记录和分析沉积物内部空间结构及水合物的微观赋存特征。仪器参数为: GE phoenix v|tome|x 型 CT, 射线源阳极为钨靶, 射线束焦点直径为 0.5 μm, 采用的射线管电压为 110 kV, 射线管电流为 120 μA, 反应釜固定在三维运动检测平台上进行 360°旋转扫描, 探测器尺寸为 20 cm×20 cm, 扫描图像的空间分辨率为 16 μm。

1.3 超分辨率重建

1.3.1 数据集制备

利用 CT 扫描的数据进行重建, 得到 1 000 张高

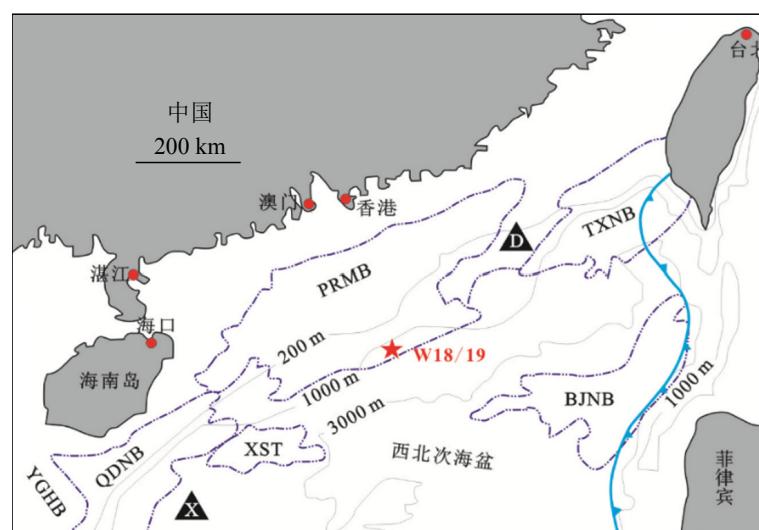


图 1 南海含水合物沉积物钻探站位位置^[40]

YGHB: 莺歌海盆地, QDNB: 琼东南盆地, PRMB: 珠江口盆地, TXNB: 台西南盆地, XST: 西沙海槽, BJNB: 笔架南盆地。

Fig.1 Location of drilling stations for hydrate-bearing sediments in the South China Sea^[40]

YGHB: Yinggehai Basin, QDNB: Qiongdongnan Basin, PRMB: the Pearl River Mouth Basin, TXNB: Taixinan Basin, XST: Xisha Trough, BJNB: Bijianan Basin.

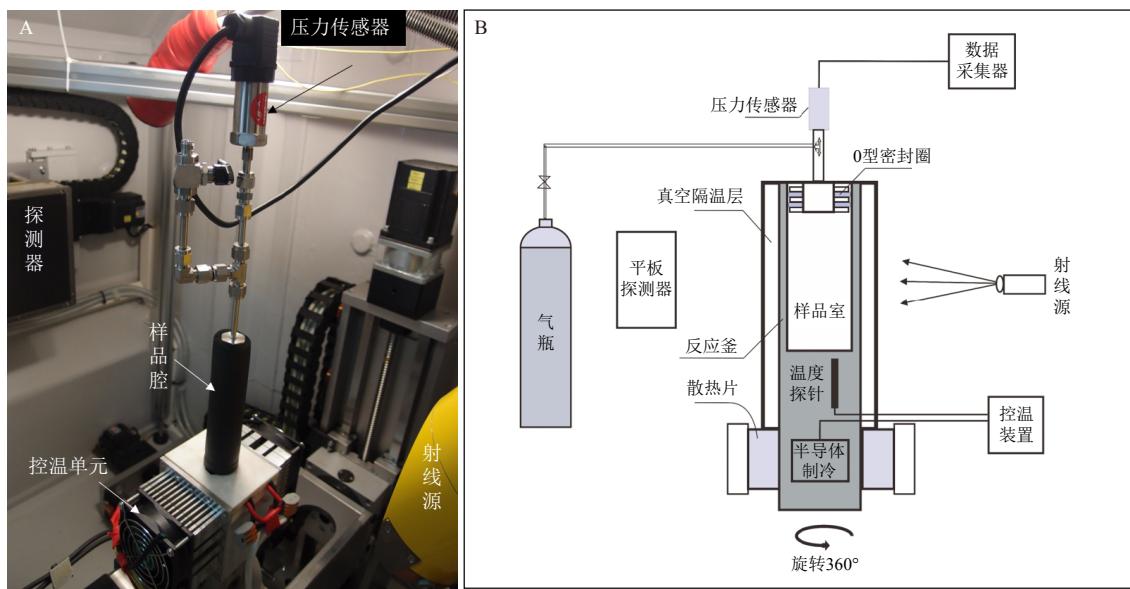


图2 实验装置照片（左）和反应釜结构图（右）

Fig.2 The experimental setup (left) and the reactor structure (right)

质量 CT 重建图像。首先对图像进行降噪和裁剪，从而获取待分析区域的灰度图像；其次，将预处理后的 CT 图像输入下采样网络得到下采样图像，得到 1 000 张对应的低质量 CT 重建图像；经过处理之后，2 000 张 CT 图像组成了 1 000 对匹配的低质量-高质量 CT 图像对，并按照 8 : 1 : 1 的比例随机划分为训练集、验证集、测试集三组。本文采用的 4 组数据集图像包含了 2 组水合物生长过程数据和 2 组分解过程数据。

1.3.2 模型概述

CT 扫描的图像作为原始低分辨率图像，期望获得更高分辨率的图像数据。由于在实验过程中难以获得对应样品的高分辨率实验观测图像，因此，通常用高分辨率图像的下采样图像作为对应的低分辨率图像，从而与 CT 扫描获得的原始图像建立映射关系，并将该映射关系应用于 CT 扫描图像，从而完成其超分辨率重建。

基于双反投影内部学习算法(DBPI)作为自监督学习方式，其用于图像超分辨率重建分为两个阶段：图像退化模型的估计与图像超分辨率重建。在原始高分辨率图像的下采样图像上进行超分辨率重建，自监督方法不需要成对的图像进行训练，只需要输入下采样图像就可以重建出高分辨率图像。其次，将 DBPI 自监督学习方法用于原始高分辨率图像上，可获得比原始高分辨率图像更清晰、对比度更高的图像。

DBPI 自监督算法整体训练框架如图 3 所示，包含两个循环过程以及下采样网络与上采样网络。

以两倍的超分倍数为例，在上采样循环过程中，输入图像经下采样网络后得到下采样图像，然后经过上采样网络得到上采样图像，最后进行反向传播优化模型参数；在下采样循环过程中进行完全相反的训练过程。经过反复的循环训练，下采样网络能够估计出输入图像的降质模糊核，上采样网络能够将输入图像的分辨率实现倍增。

1.3.3 图像质量评价依据

图像质量评价指标是衡量超分辨率重建图像效果的重要标准，主要有定性评价和定量评价两种方式。定性评价就是根据人的主观视觉感受对重建图像效果进行评判，虽然可以较好地评判图像的直观视觉效果，多针对图像中目标物的轮廓、边缘等进行评价；定量评价则多采用峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、结构相似度评价函数 (Structural Similarity Index, SSIM) 和图像清晰度评价函数 (Sum of Mean Modulus Difference, SMD) 来对图像质量进行评判，其评判依据描述如下：

(1) 峰值信噪比 (PSNR)

PSNR 主要反映两幅大小相同的图像对应像素点之间的误差，其值越高代表重建图像与原图像越接近，重建图像质量越高，PSNR 的计算公式如下：

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}} \right) \quad (1)$$

式中 MSE 表示两幅图像之间的均方误差， MAX_I 表示图像像素点的最大数值，在本文中对图像做了归一化处理，因此其值取 1。

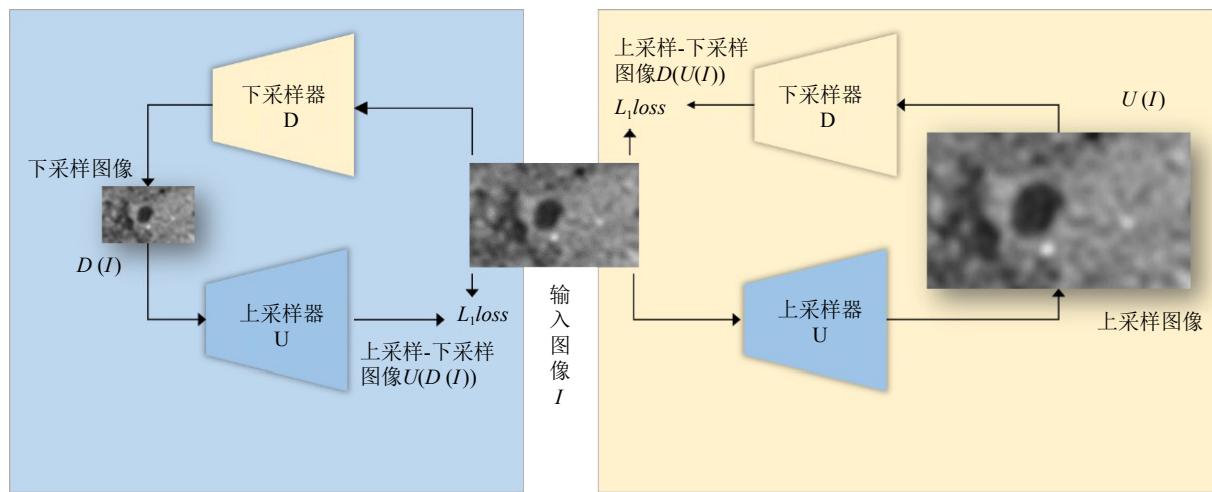


图 3 模型训练框架

Fig.3 Model training framework

(2) 结构相似度 (SSIM)

SSIM 主要反映两幅大小相同的图像之间的结构纹理相似程度的评价指标。理论上来说, SSIM 的值越接近于 1 代表重建图像的纹理结构与原图像越相似, 其计算公式如下:

$$\text{SSIM} = [l(X, \hat{X})]^\alpha [c(X, \hat{X})]^\beta [s(X, \hat{X})]^\gamma \quad (2)$$

式中 X 为参考的高质量图像, \hat{X} 为重建图像, 分别表示从亮度、对比度、结构三个方面对图像进行计算, SSIM 的最终计算公式如下:

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_X\mu_{\hat{X}} + C_1)(2\sigma_{X\hat{X}} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_{\hat{X}}^2 + C_1)(\sigma_X^2 + \sigma_{\hat{X}}^2 + C_2)} \quad (3)$$

式中 μ_X 和 $\mu_{\hat{X}}$ 分别表示 X、 \hat{X} 的平均值, σ_X 和 $\sigma_{\hat{X}}$ 分别表示 X、 \hat{X} 的标准差, $\sigma_{X\hat{X}}$ 表示 X、 \hat{X} 的协方差, C_1 和 C_2 为常数。

(3) 图像清晰度评价函数 (SMD)

SMD 通过计算图像内相邻像素之间差值的绝对值之和来评判图像的清晰度, SMD 的值越大, 代表图像越清晰, 其计算公式如下:

$$\text{SMD} = \sum_i \sum_j (|I(i, j) - I(i, j-1)| + |I(i, j) - I(i+1, j)|) \quad (4)$$

式中 $I(i, j)$ 表示对应坐标像素的灰度值大小。

2 结果与讨论

2.1 沉积物样品 CT 图像超分辨率重建结果评价

2.1.1 定性评价

沉积物样品 CT 扫描原始灰度图像和经 DBPI 自监督学习算法进行的 2 倍和 4 倍超分辨率重建图

像如图 4 所示。通过图 4A、B、C 的对比可以看出: 自监督学习提取图像内部特征信息方面具有显著的优势, 能够弥补放大图像中缺失的细节, 如有孔虫壳体内部的隔壁等, 其在提高图像分辨率的同时提高了清晰度和对比度。在 CT 原始图像中, 通过选取特定感兴趣区域进行局部放大后(图 4D), 图像的分辨率保持不变, 可明显地看到图像噪声也相应地被放大了, 因此图像清晰度有所下降。DBPI 算法在图像清晰度和边缘识别方面具有一定的优势, 主要原因是自监督学习方法是通过提取图像内部信息来对放大图像中的区域进行插值, 因此会“充分”放大图像的内部细节。相比图 4D 可以看出, 经超分辨率重建后(图 4E、F), 图中有孔虫壳壁边缘和内部的气体、液体等组分的边缘更加锐化, 有利于图像组分的阈值分割和定量计算。此外, 由于 CT 重建图像受仪器噪声以及重建算法的影响, 每种组分的密度分布是不均匀的, 特别是在单一物质内部(比如泥质沉积物), 这一现象经超分辨率重建后, 沉积物颗粒和孔隙空间的灰度差异更加明显, 这间接地证明了自监督学习可以探索更多的图像细节。

图 5 是对水合物生成后的 CT 扫描图像以及超分辨率重建图像的对比结果, 由于原始扫描图像的空间分辨率为 $16 \mu\text{m}$, 且气体和水转化为固态水合物后, 水合物区域的灰度值变化有限, 因此在原始 CT 扫描图像(图 5A、D)中, 水合物的分布较难以准备识别。通过对图像分辨率的提升, 增强了图像中水合物固体轮廓的清晰度, 通过其三维形态的特征判断更有利于对水合物的分布进行提取(图 5B、E)。图 5C、F 为 CT 扫描图像 4 倍超分辨率重建后的切片图及局部放大图, 图像中有孔虫颗粒与沉积物之

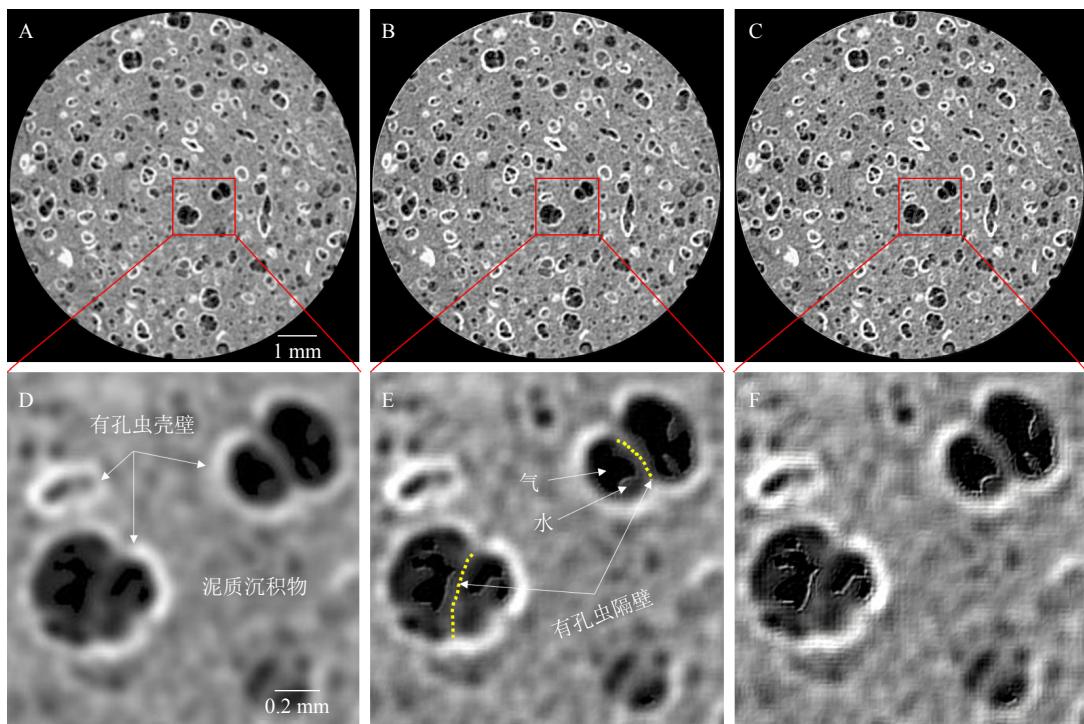


图4 水合物生成前沉积物内部CT切片原始灰度图和超分辨率重建图

A为原始图, B为DBPI算法二倍超分辨图, C为DBPI算法4倍超分辨图, D、E、F则分别为A、B、C的局部放大图。

Fig.4 Original grayscale and super-resolution reconstruction images of CT slices inside sediment before hydrate formation

A: The original image; B: the double super-resolution image of the DBPI algorithm; C: the 4 \times super-resolution image of the DBPI algorithm; D, E, and F: the close-ups of A, B, and C, respectively

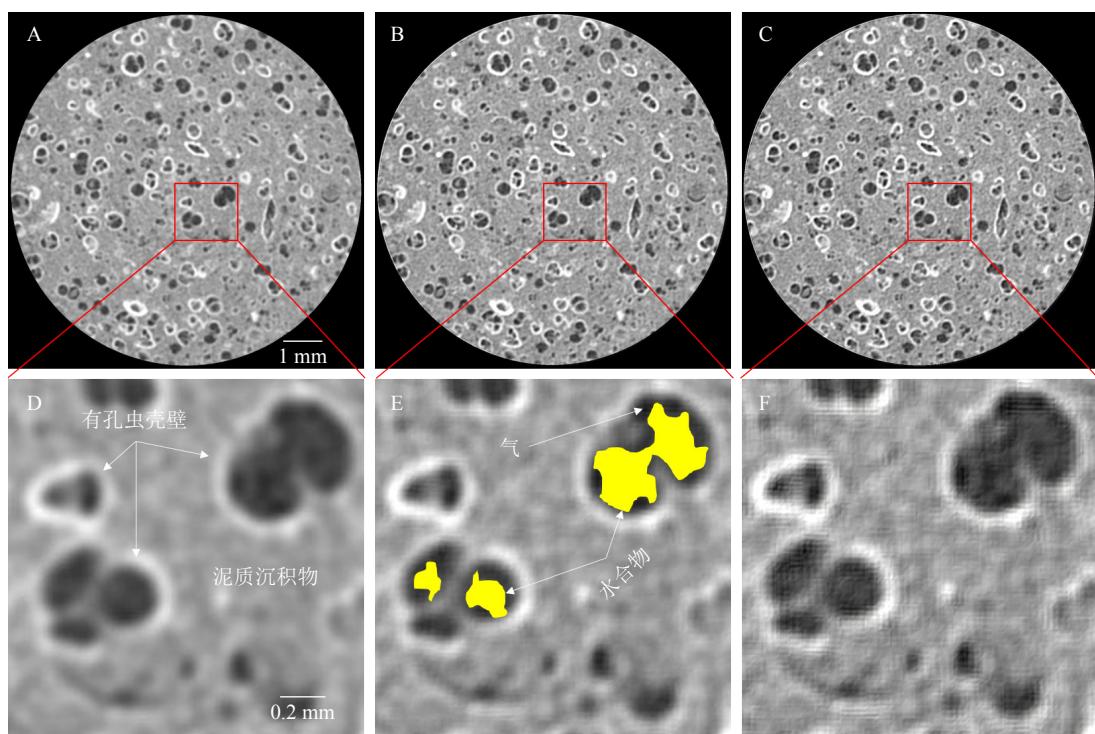


图5 水合物生成后沉积物内部CT切片原始灰度图和超分辨率重建图

A为原始图, B为DBPI算法二倍超分辨图, C为DBPI算法四倍超分辨图, D、E、F图则分别为A、B、C图的局部放大图。

Fig.5 Original grayscale and super-resolution reconstruction images of CT slices inside sediment after hydrate formation

A: The original image; B: the double super-resolution image of the DBPI algorithm; C: the quadruple super-resolution image of the DBPI algorithm; D, E, and F: close-ups of A, B, and C, respectively.

间的边界较原始图像和 2 倍超分图像更加清晰。

2.1.2 定量评价

根据 1.3.3 中的图像质量定量评价指标, 分别计算了水合物生成前、后超分辨率重建图像的峰值信噪比、结构相似度评价函数和图像清晰度评价函数的数值(表 1)。结果表明, 本文所采用的 DBPI 自监督学习的图像超分辨率重建算法不仅能够生成更高分辨率的图像, 且在较大程度上保证了超分辨率重建图像与原始图像的一致性。峰值信噪比为 30~40, 表明与原始扫描图像非常接近, 其中 2 倍超分辨图像的峰值信噪比参数略优于 4 倍超分辨图像; 超分辨率重建图像与原始扫描图像的结构相似度均大于 90%, 绝大部分结构信息得以保留; 在图像清晰度方面, 2 倍和 4 倍超分辨率重建图像均优于原始扫描图像。

结合上述图像定性和定量评价的结果可以看出, 基于 DBPI 算法的超分辨率重建在改善原始 CT 扫描图像的空间分辨率、清晰度等参数方面均具有一定的优势。同时, 随着超分辨率倍数的提升, 图像质量并非呈正相关趋势, 2 倍超分图像在峰值信噪比、结构相似度方面均优于 4 倍超分图像, 而在图像清晰度提升方面, 4 倍超分图像则优于 2 倍超分图像。这也表明了超分辨率重建在对图像的质量提升的同时也会造成一定的损伤。综合考虑, 鉴于本文所研究的对象为南海含水合物泥质沉积物, 对于沉积物孔隙结构及水合物几何形态的识别主要依赖于图像的高信噪比, 降低沉积物中水合物和有孔虫颗粒边缘的失真程度, 而沉积物基质自身的清晰度等参量对研究结果的影响较小, 在此情形下, 采用 DBPI 二倍超分辨率重建获得的图像进行结构表征所获取的结果更加准确。

2.2 沉积物孔隙结构演化过程观测

由于水合物作为固体填充于沉积物的孔隙空间中, 会在很大程度上影响气体和水在孔隙间的流动, 即沉积物的渗透性发生改变。为分析水合物的生长和分解微观赋存形态变化对沉积物孔隙结构的影响, 本文在 CT 在线观测的基础上, 通过对扫描图像进行 2 倍超分辨率重建, 获得了空间分辨率为 8 μm 的沉积物内部切片图像。沉积物样品粒度分布如图 6 所示, 主要以细砂(3.91~62.5 μm)和中砂(62.5~2000 μm)为主, 中砂组颗粒较大者多为有孔虫壳体, 3.91 μm 以下的极细砂和泥则只占 9.24%。

通过灰度提取的方法获得了沉积物孔隙结构的演化过程, 图 7 展示的是水合物生长前和水合物

表 1 超分辨率重建图像的质量评价结果

Table 1 Quality evaluation results of super-resolution reconstructed images

样品类型	超分倍数	PSNR	SSIM	SMD
	原始	—	1	2.16
南海泥质沉积物	2倍	37.75	0.97	4.36
	4倍	33.66	0.95	3.79
含水合物沉积物	原始	—	1	2.54
	2倍	35.81	0.96	3.75
	4倍	31.16	0.92	3.33

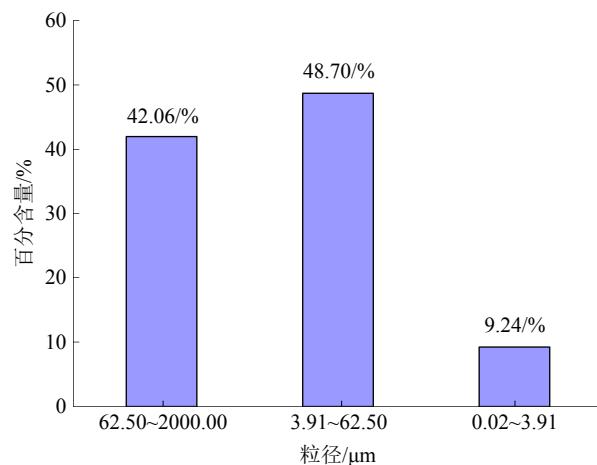


图 6 沉积物粒径分布

Fig.6 Distribution of sediment particle size

生长后孔隙结构的 CT 三维图像, 其中红色部分代表孔隙, 其余沉积物骨架和固态水合物进行了透明化处理, 使得沉积物内部的孔隙结构和连通状态更加直观地显现。由图 7A、B 对比显示, 水合物生长前, 沉积物中的大孔隙主要集中在有孔虫壳体内部, 因此孔隙结构多呈现出较为规则圆球形, 孔隙之间连通喉道较为单一, 主要为有孔虫的口孔部位。而随着水合物在孔隙中的不断生长和富集, 水合物逐渐占据了孔隙内部的主要空间且孔隙间喉道也多被堵塞, 呈现出小孔隙的孤立分布特征(图 7B)。由于受到气、水供给的限制, 部分有孔虫内部的孔隙空间未能全部充满水合物。通过 CT 灰度图像的体素统计方法, 可估算被扫描沉积物样品的孔隙度参数, 对应水合物生长前和生长后沉积物的孔隙度大小分别为 37.6% 和 12.4%。值得注意的是, 通过 CT 图像计算获得的沉积物孔隙度参数, 是将水合物作为固体骨架的组成部分, 孔隙空间只包括气体和液体两相所占的体积, 且沉积物中直径小于图像分辨率大小的部分孔隙未能被识别, 因此,

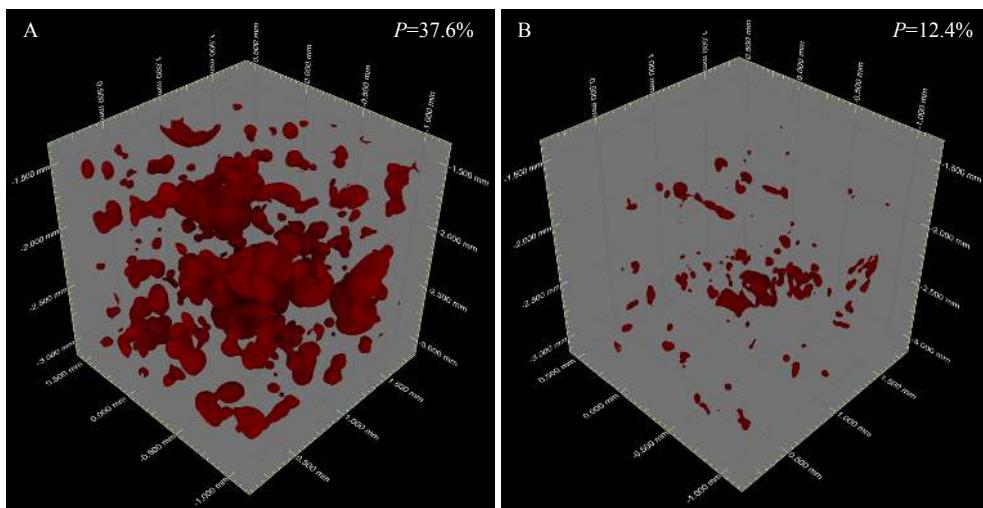


图7 水合物生长前（A）与水合物生长后（B）沉积物孔隙三维结构图
红色部分代表孔隙，即气体和水所占的空间。

Fig.7 3D structure of sediment pores before (A) and after (B) hydrate growth

Red ones are pores that filled with gas and water.

该孔隙度估算值较真实值偏低。

2.3 水合物微观赋存形态分析

水合物在孔隙中的生长和富集是影响沉积物孔隙结构的关键因素，关系到现场地球物理探测及资源评价的精度。有研究表明，在相同水合物饱和度条件下，水合物的微观赋存形态的差异也会显著影响声波速度、电阻率和渗透率等宏观物性参数的测量精度^[41-42]。沉积物内部水合物微观形态的可视化表征，是深入理解储层结构的前提，为储层物性参数的定量化分析奠定基础。图8和图9分别是利用超分辨的CT扫描图像对沉积物孔隙中水合物的微观分布形态进行二维和三维可视化表征，通过水合物生长前后孔隙空间物质组分的分布特征，反映了气体、水和水合物三者之间的相态转化。

通过结合图8和图9可以看出，当有孔虫内部空间被水合物填充后，仍然会有少量的气体和水残留，气体则主要分布于水合物颗粒内部，而水则主要分布在水合物颗粒表面，水合物充当了隔离的角色，当气、水二者无法接触并产生新的界面时，水合物相变的过程便无法继续下去。因此，在水合物储层地震、测井等现场勘探时，需要充分考虑到残留水和气的存在及其对测量结果的影响。

3 结论

本文建立的自监督学习的超分方法能够生成比原始CT扫描图像的空间分辨率、清晰度更高的

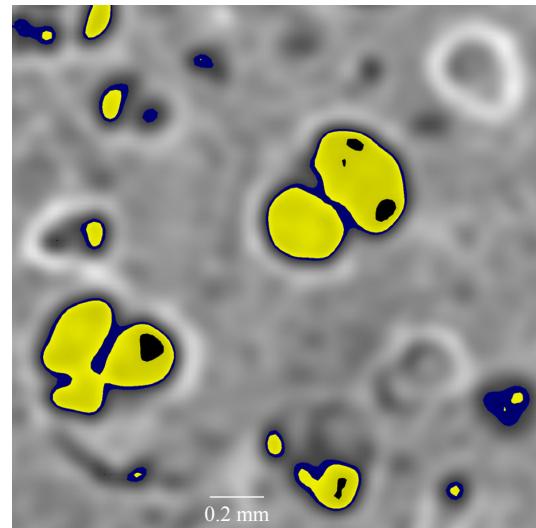


图8 含水合物沉积物内部各种组分的二维分布
黑色代表气体，蓝色代表水，黄色代表水合物。

Fig.8 2D distribution of various components inside hydrate-containing sediments

Black represents gas, blue for water, and yellow for hydrates.

图像；超分辨率重建图像质量定性和定量评价结果表明：采用DBPI算法获得的2倍超分辨率重建图像较4倍超分辨率图像质量更佳。基于超分辨率图像数据对南海含水合物泥质沉积物孔隙结构和水合物赋存特征进行了形态分析，研究发现，水合物主要占据有孔虫壳体内部空间，并堵塞了空隙间的连通喉道，显著降低了沉积物的气、水渗透能力；当有孔虫内部空间被水合物填充后，仍然会有少量的气体和水残留，气体则主要分布于水合物颗粒内部，

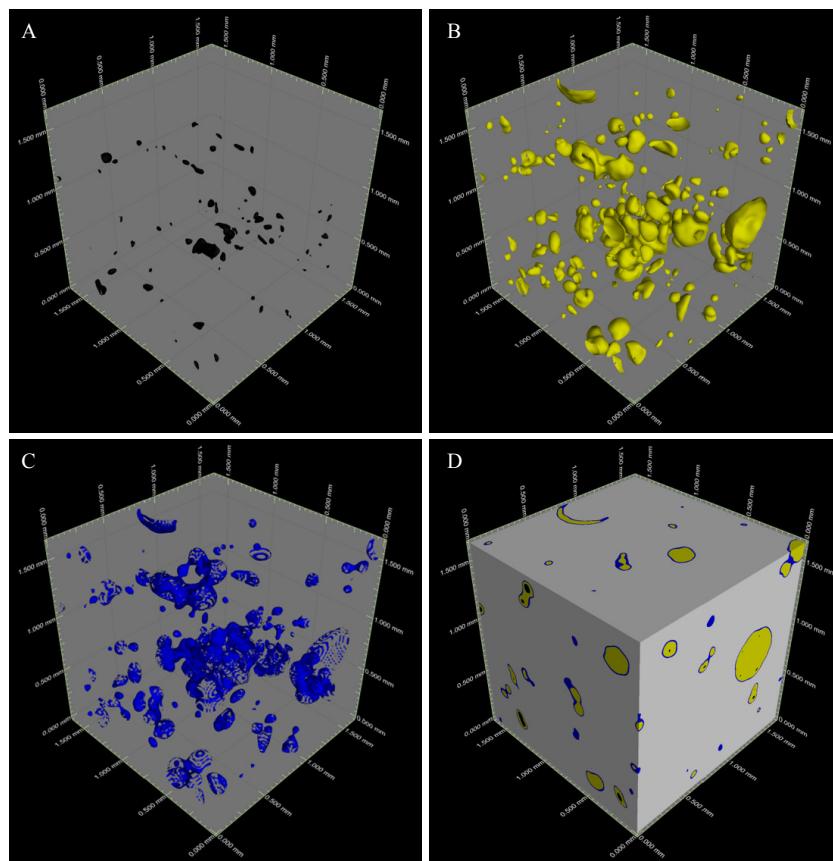


图 9 含水合物沉积物内部各种组分的三维分布

A 为气体的空间分布, B 为水合物的空间分布, C 为水的空间分布, D 为沉积物全组分的三维图。

Fig.9 3D distribution of various components inside hydrate-containing sediments

A: The spatial distribution of gas; B: the spatial distribution of hydrates; C: the spatial distribution of water; D: a three-dimensional map of the entire sediment component.

而水则主要分布在水合物颗粒表面, 水合物充当了隔离的角色。研究结果对地震、测井等现场勘探结果的解释具有一定的指导意义。

致谢: 感谢广州海洋地质调查局为本研究提供了地质样品, 感谢审稿人给予的宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] Wang H B, Yang S X, Wu N Y, et al. Controlling factors for gas hydrate occurrence in Shenu area on the northern slope of the South China Sea[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(4): 513-520.
- [2] Wang X J, Hutchinson D R, Wu S G, et al. Elevated gas hydrate saturation within silt and silty clay sediments in the Shenu area, South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B5): B05102.
- [3] 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 Shuxia, GUO Shangping, CHEN Yueming, et al. Advances and recom-

mendations for multi-field characteristics and coupling seepage in natural gas hydrate development[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(3): 828-842.]

- [4] Konno Y, Oyama H, Nagao J, et al. Numerical analysis of the dissociation experiment of naturally occurring gas hydrate in sediment cores obtained at the Eastern Nankai Trough, Japan[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(12): 6353-6358.
- [5] 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): 557-568. [YE Jianliang, QIN Xuwen, XIE Wenwei, et al. Main progress of the second gas hydrate trial production in the South China Sea[J]. *Geology in China*, 2020, 47(3): 557-568.]
- [6] 杨胜雄, 梁金强, 刘昌岭, 等. 海域天然气水合物资源勘查工程进展 [J]. 中国地质调查, 2017, 4(2): 1-8. [YANG Shengxiong, LIANG Jinqiang, LIU Changling, et al. Progresses of gas hydrate resources exploration in sea area[J]. *Geological Survey of China*, 2017, 4(2): 1-8.]
- [7] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识 [J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 1-14. [YANG Shengxiong, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. New understandings on the characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in the Shenu area on the northern slope of the South China Sea[J].]

- Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 1-14.]
- [8] 刘昌岭, 孟庆国, 李承峰, 等. 南海北部陆坡天然气水合物及其赋存沉积物特征 [J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 41-50. [LIU Changling, MENG Qingguo, LI Chengfeng, et al. Characterization of natural gas hydrate and its deposits recovered from the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 41-50.]
- [9] 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 Gaowei, LI Chengfeng, YE Yuguang, et al. Observation of gas hydrate distribution in sediment pore space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1675-1682.]
- [10] Liu C L, Meng Q G, Hu G W, et al. Characterization of hydrate-bearing sediments recovered from the Shenhua Area of the South China Sea[J]. Interpretation, 2017, 5(3): SM13-SM23.
- [11] Jin S, Takeya S, Hayashi J, et al. Structure analyses of artificial methane hydrate sediments by microfocus X-ray computed tomography[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(8R): 5673-5675.
- [12] 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 Chengfeng, HU Gaowei, YE Yuguang, et al. Microscopic distribution of gas hydrate in sediment determined by X-ray computerized tomography[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2013, 24(3): 551-557.]
- [13] Yang L, Zhao J F, Liu W G, et al. Microstructure observations of natural gas hydrate occurrence in porous media using microfocus X-ray computed tomography[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(8): 4835-4841.
- [14] Zhang L X, Zhao J F, Dong H S, et al. Magnetic resonance imaging for in-situ observation of the effect of depressurizing range and rate on methane hydrate dissociation[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 144: 135-143.
- [15] 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.
- [16] Lei L, Seol Y. High-saturation gas hydrate reservoirs-A pore scale investigation of their Formation from free gas and dissociation in sediments[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2019, 124(12): 12430-12444.
- [17] 王代刚, 魏伟, 孙静静, 等. 水合物降压分解过程中沉积物孔隙结构动态演化规律 [J]. 科学通报, 2020, 65(21): 2292-2302. [WANG Daigang, WEI Wei, SUN Jingjing, et al. Dynamic evolution of pore structures of hydrate-bearing sediments induced by step-wise depressurization[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(21): 2292-2302.]
- [18] 张辉, 卢海龙, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域沉积物颗粒对天然气水合物聚集的主要影响 [J]. 科学通报, 2016, 61(3): 388-397. [ZHANG Hui, LU Hailong, LIANG Jinqiang, et al. The methane hydrate accumulation controlled compellingly by sediment grain at Shenhua, northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(3): 388-397.]
- [19] 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.
- [20] 张巍, 李承峰, 刘昌岭, 等. 多孔介质中甲烷水合物边界的 CT 图像识别技术 [J]. CT 理论与应用研究, 2016, 25(1): 13-22. [ZHANG Wei, LI Chengfeng, LIU Changling, et al. Identification technology of the CT images for distinguishing the boundary condition of methane hydrate in porous media[J]. CT Theory and Applications, 2016, 25(1): 13-22.]
- [21] 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. [CHEN Liang, YE Wangquan, LI Chengfeng, et al. Natural gas hydrate CT image threshold segmentation based on time evolution[J]. CT Theory and Applications, 2023, 32(2): 171-178.]
- [22] Meng Q G, Liu C L, Lu Z Q, et al. Growth behavior and resource potential evaluation of gas hydrate in core fractures in Qilian Mountain permafrost area, Qinghai-Tibet Plateau[J]. China Geology, 2023, 6(2): 208-215.
- [23] Li C F, Hu G W, Zhang W, et al. Influence of foraminifera on Formation and occurrence characteristics of natural gas hydrates in fine-grained sediments from Shenhua area, South China Sea[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(11): 2223-2230.
- [24] 陈芳, 苏新, 陆红峰, 等. 南海神狐海域有孔虫与高饱和度水合物的储存关系 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2013, 38(5): 907-915. [CHEN Fang, SU Xin, LU Hongfeng, et al. Relations between biogenic component (Foraminifera) and highly saturated gas hydrates distribution from Shenhua Area, Northern South China Sea[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(5): 907-915.]
- [25] Shi W Z, Caballero J, Huszár F, et al. Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016: 1874-1883.
- [26] Kim J, Lee J K, Lee K M. Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016: 1646-1654.
- [27] Tai Y, Yang J, Liu X M. Image super-resolution via deep recursive residual network[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 2790-2798.
- [28] Ledig C, Theis L, Huszár F, et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 105-114.
- [29] Kim J, Kim S, Park C, et al. Construction of prior models for ES-MDA by a deep neural network with a stacked autoencoder for predicting reservoir production[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 187: 106800.
- [30] Buono G, Caliro S, Macedonio G, et al. Exploring microstructure and petrophysical properties of microporous volcanic rocks through 3D multiscale and super-resolution imaging[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 6651.
- [31] Karimpouli S, Kadyrov R. Multistep Super Resolution Double-U-net (SRDUN) for enhancing the resolution of Berea sandstone images[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 216: 110833.

- [32] Zhang T, Liu Q Y, Du Y. Super-resolution reconstruction of porous media using concurrent generative adversarial networks and residual blocks[J]. *Transport in Porous Media*, 2023, 149(1): 299-343.
- [33] Zuo J W, Wang Z, Zhang Y, et al. Research on image super-resolution algorithm based on mixed deep convolutional networks[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2021, 95: 107422.
- [34] 何治亮, 赵向原, 张文彪, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 16-33. [HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 16-33.]
- [35] 要惠芳, 赵明坤, 陈强. 基于机器学习的煤系致密砂岩气储层分类研究: 以鄂尔多斯盆地 DJ 区块为例 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 260-270. [YAO Huifang, ZHAO Mingkun, CHEN Qiang. Research on classification of tight sandstone gas reservoir in coal measures based on machine learning: a case from DJ Block of Ordos Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 260-270.]
- [36] 余晓露, 叶恺, 杜崇娇, 等. 基于卷积神经网络的碳酸盐岩生物化石显微图像识别 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 880-885, 895. [YU Xiaolu, YE Kai, DU Chongjiao, et al. Microscopic recognition of micro fossils in carbonate rocks based on convolutional neural network[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 880-885, 895.]
- [37] 梁劲, 王明君, 王宏斌, 等. 南海神狐海域天然气水合物声波测井速度与饱和度关系分析 [J]. 现代地质, 2009, 23(2): 217-223. [LIANG
- Jin, WANG Mingjun, WANG Hongbin, et al. Relationship between the sonic logging velocity and saturation of gas hydrate in Shenhua area, northern slope of South China Sea[J]. *Geoscience*, 2009, 23(2): 217-223.]
- [38] McDonnell S L, Max M D, Cherkis N Z, et al. Tectono-sedimentary controls on the likelihood of gas hydrate occurrence near Taiwan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(8): 929-936.
- [39] 苏明, 杨睿, 吴能友, 等. 南海北部陆坡区神狐海域构造特征及对水合物的控制 [J]. 地质学报, 2014, 88(3): 318-326. [SU Ming, YANG Rui, WU Nengyou, et al. Structural characteristics in the Shenhua area, northern continental slope of South China Sea, and their influences on gas hydrate[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(3): 318-326.]
- [40] Yang S X, Zhang M, Liang J Q, et al. Preliminary results of China's third gas hydrate drilling expedition: a critical step from discovery to development in the South China Sea[J]. *Fire in the Ice*, 2015, 15(2): 1-5.
- [41] Priest J A, Rees E V L, Clayton C R I. Influence of gas hydrate morphology on the seismic velocities of sands[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 141(B11): B11205.
- [42] 王秀娟, 钱进, LEE M. 天然气水合物和游离气饱和度评价方法及其在南海北部的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 35-47. [WANG Xiujuan, QIAN Jin, LEE M. Methods for estimation of gas hydrate and free gas saturations and application to the northern slope of South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 35-47.]