



碳酸盐岩双重孔隙网络模型与微观气水流动研究

汇报人：赵星圆

指导老师：秦朝中 教授 李勇 副教授

学号：202220021038

专业：22级安全科学与工程

2025年5月27日



汇报提纲

动画演示：

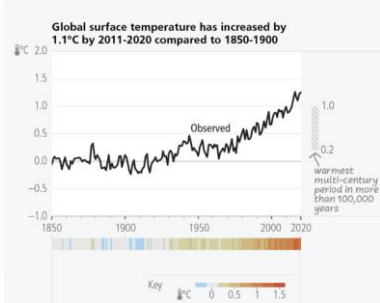
1. 研究背景及存在的问题
2. 碳酸盐岩多尺度数字岩心精细表征与
双重孔隙网络提取
3. 双重孔隙网络模型的预测能力研究
4. 碳酸盐岩毛管力与相渗曲线数值研究
5. 结论与展望

1.1 研究背景及意义

➤ 二氧化碳地质封存是实现双碳战略的重要途径之一

碳排放：导致全球气候变暖，产生温室效应，造成自然灾害

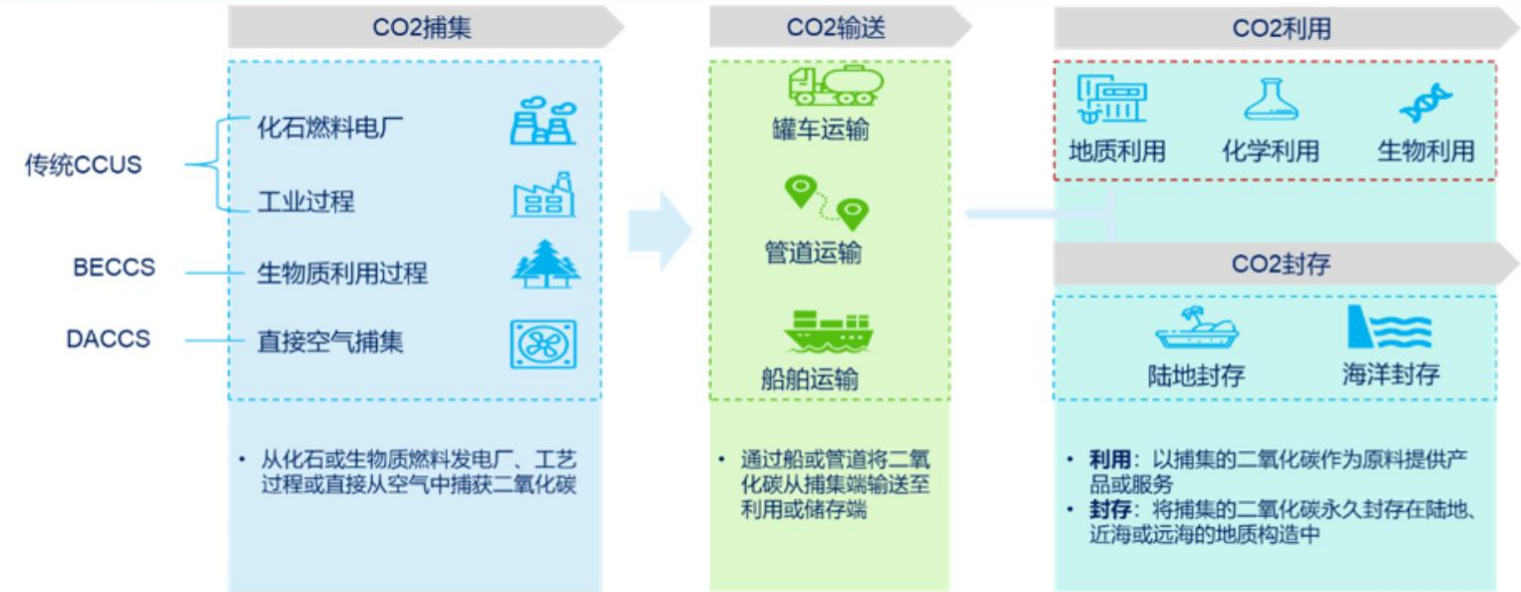
碳达峰碳中和
的双碳目标



全球平均气温升高



二氧化碳的捕集
与封存

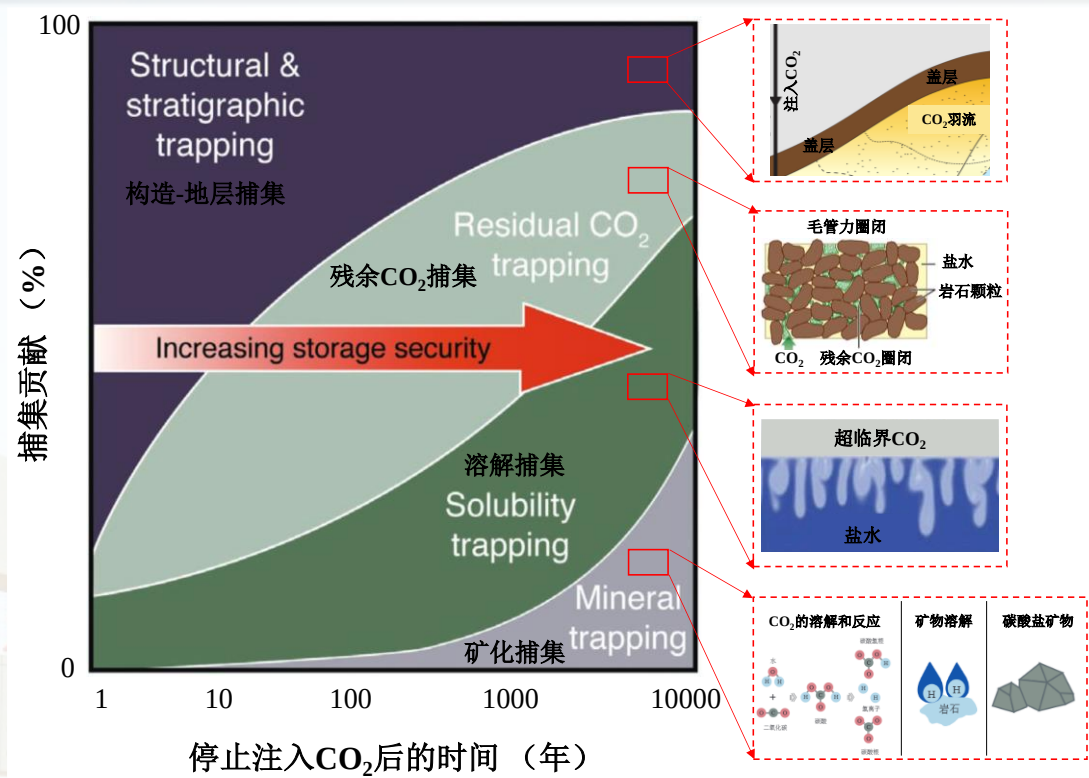


碳捕集、利用与**封存** (CCUS) 是将二氧化碳从排放源中分离后直接加以利用或封存，以实现二氧化碳减排

1.1 研究背景及意义

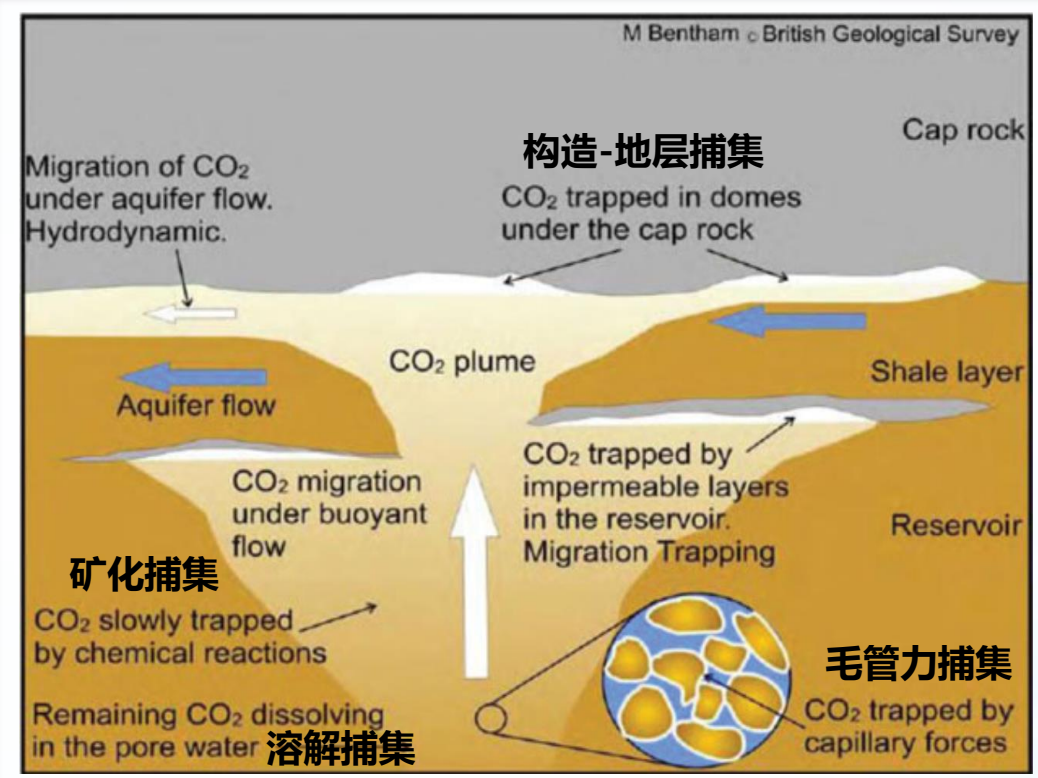
➤ 多孔岩石中的流动与传输是二氧化碳地质封存的关键物理过程之一

- ✓ 多孔岩石中流体流动行为研究对二氧化碳封存十分重要，在超临界二氧化碳驱替卤水、与卤水的对流-扩散-溶解、矿物沉淀等封存方式中处于关键位置



(Benson and Cole., 2008)

二氧化碳封存随时间变化机制



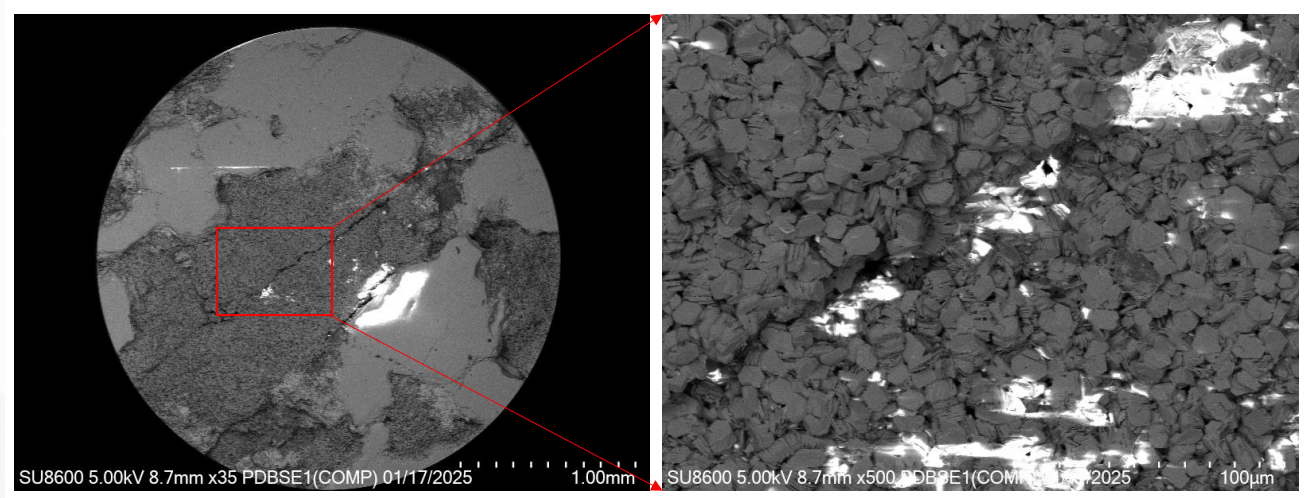
(Bentham., 2006)

二氧化碳封存机制

1.2 国内外研究现状

➤ 针对复杂孔隙结构，多尺度孔隙结构是如何影响渗透率各种参数

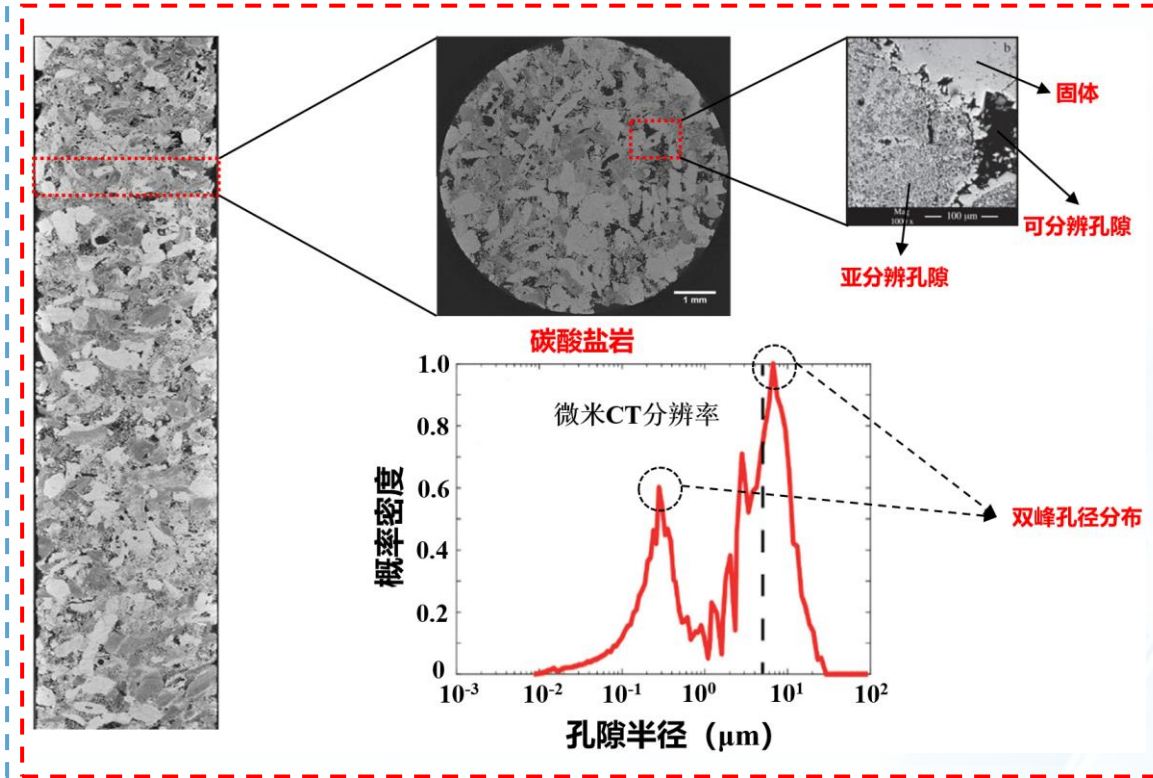
- ✓ 由于复杂多孔介质孔径分布广泛，具有微纳尺度到厘米的多尺度孔隙结构，表现为双峰或多峰孔径分布，同时由于岩心成像图像分辨率与视域的矛盾，难以获取全岩心的可分辨纳米孔隙结构



低分辨率：1mm (800×600) 高分辨率：100µm (800×600)

- 相同岩心尺寸下砂岩不同分辨率扫描电镜图像，低分辨率图像视域较大但是缺乏细节，高分辨率图像突出矿物细节但是视域较小

图像分辨率与视域的矛盾



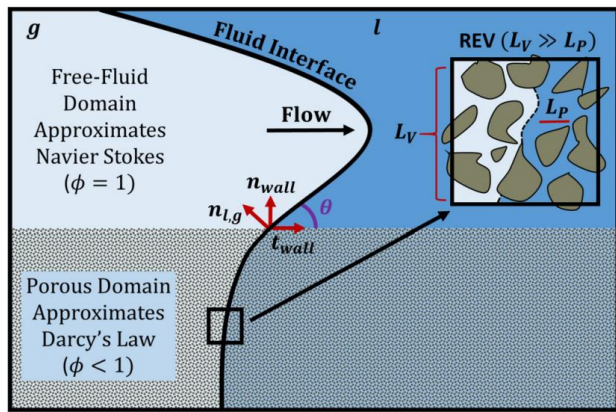
碳酸盐岩多尺度孔隙结构

1.2 国内外研究现状

➤ 基于复杂多孔介质的建模方法

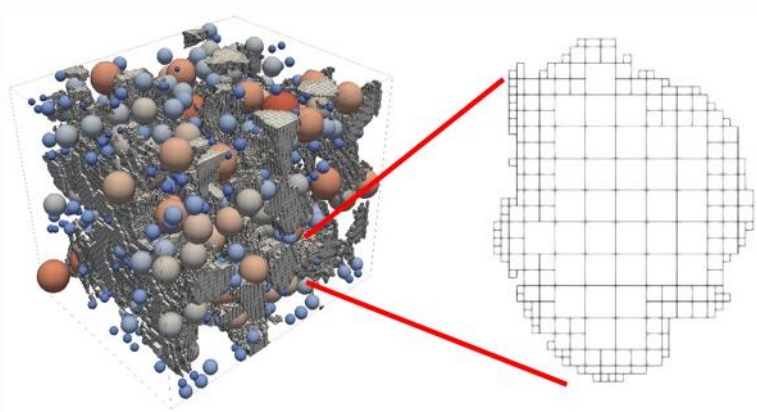
- ✓ 对于复杂多尺度多孔介质的孔隙结构，许多学者进行了研究并提出了不同的模型以及模拟方法，例如，多重孔隙网络模型、微观连续介质模型以及孔隙网络-连续介质混合模型

微观连续介质



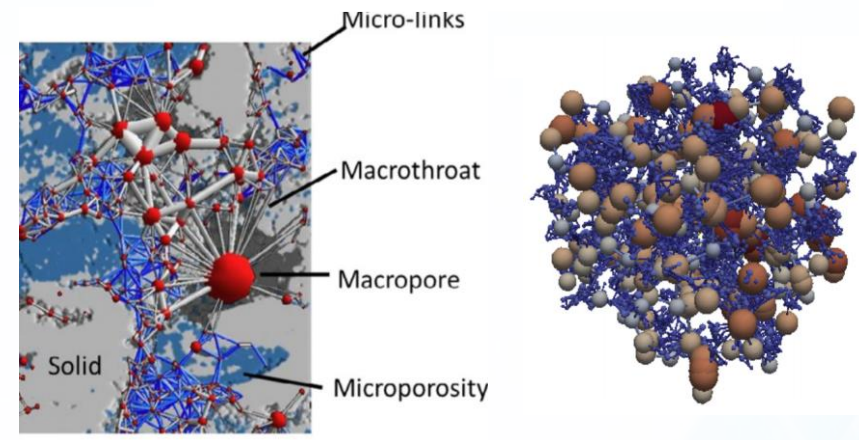
(Francisco J. Carrillo et al., 2020)

孔隙网络-连续介质



(Bowen Shi et al., 2024)

双重孔隙网络



(Tom Bultreys et al., 2015)

(Ayaz Mehmani et al., 2014)

Darcy–Brinkman–Stokes 方程

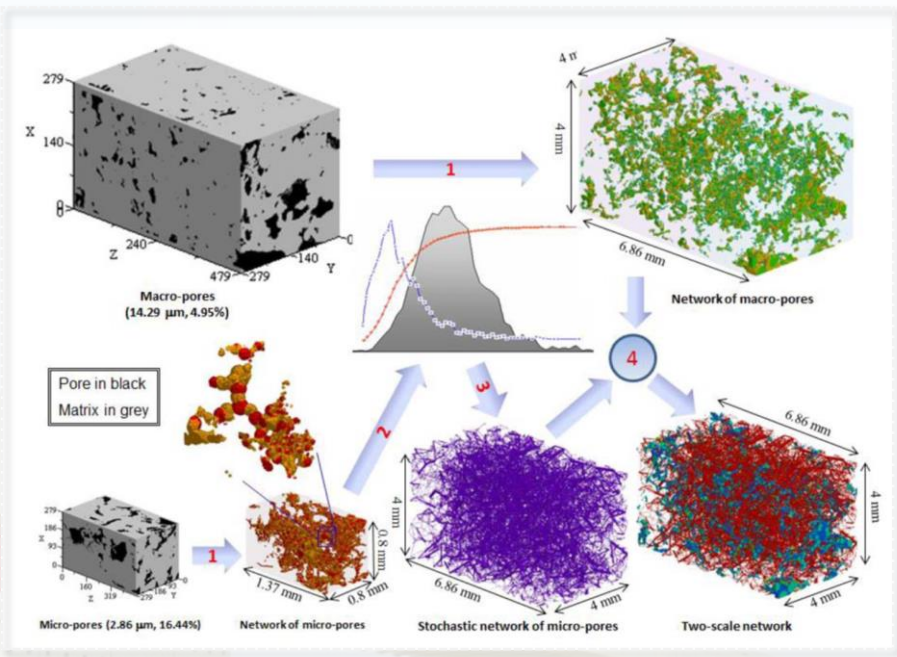
- 上述两种方法计算结果较为精确，但是计算量大，通常能够计算的区域也十分有限，小于**400³体素**

- 计算效率高，通常可以对大尺寸的岩心进行模拟（大于**1000³体素**），预测能力有待研究

1.2 国内外研究现状

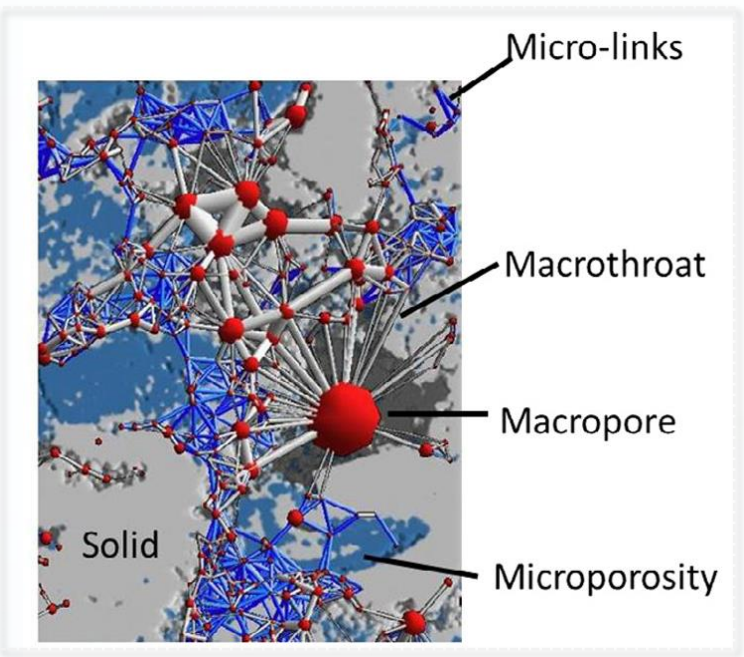
➤ 双重孔隙网络模型研究现状

- ✓ 目前针对双重孔隙网络模型的研究主要聚焦在基于不同方法建立双重孔隙网络模型，例如，跨尺度孔隙网络融合、微链接、SNOW算法等，但是针对双重孔隙网络模型本身预测能力的研究比较缺乏



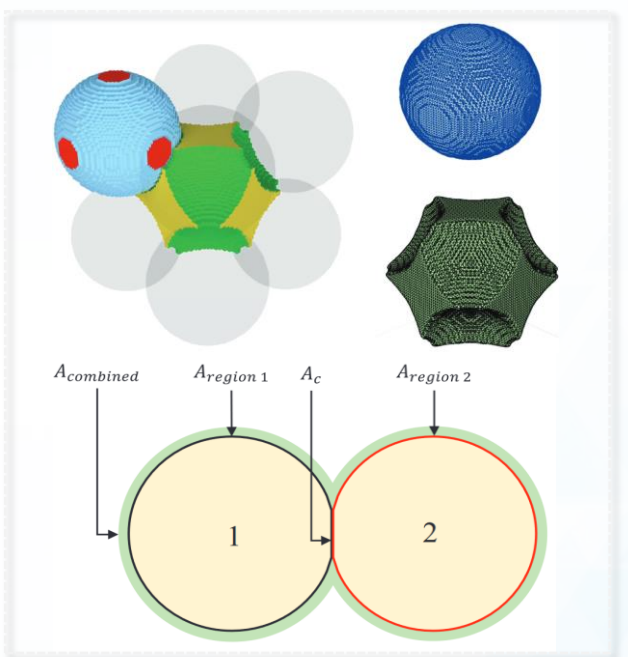
(Z. Jiang et al., 2013)

跨尺度孔隙网络融合



(Tom Bultreys et al., 2015)

微链接



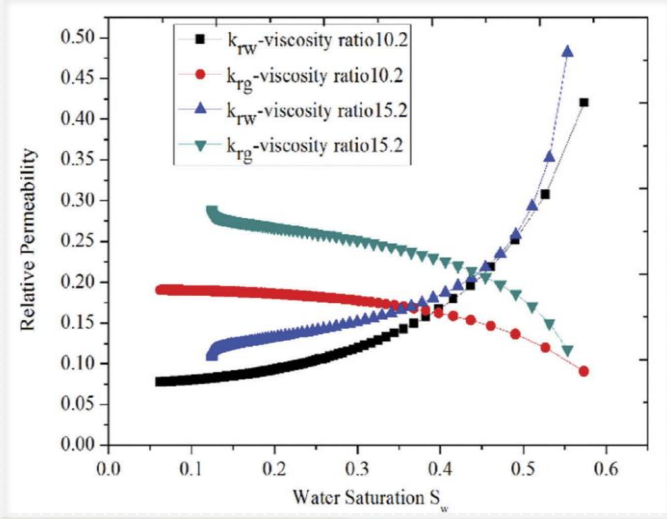
(Zohaib Atiq Khan et al., 2019)

SNOW DUAL

1.2 国内外研究现状

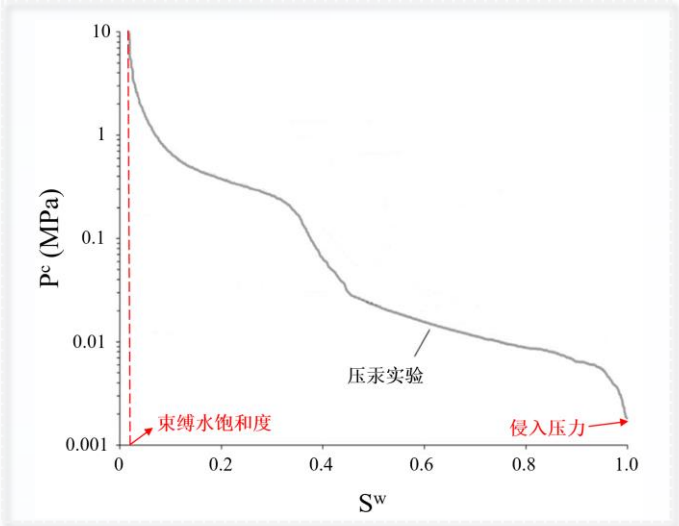
➤ 气水两相渗流研究

- ✓ 气水两相渗流研究中的毛细管力圈闭机制、气水两相流动的相对渗透率曲线等渗流机理在二氧化碳地质封存中的研究占据重要地位，但是多尺度孔隙结构中的微观流动机理研究比较欠缺



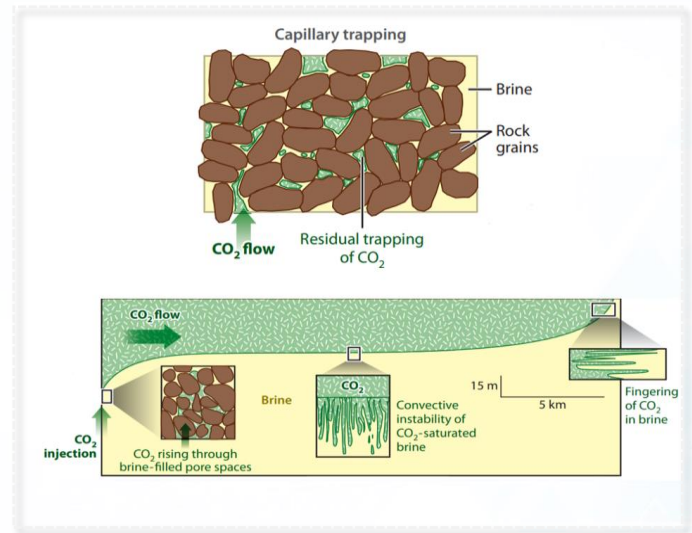
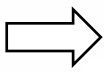
(Di He et al., 2019)

相对渗透率曲线



(Tom Bultreys et al., 2015)

毛细管力和饱和度曲线



(Herbert E. Huppert et al., 2014)

二氧化碳圈闭封存

- 毛管力曲线反映CO₂的运移与圈闭，相渗曲线反映CO₂的流动能力

1.3 研究内容与技术路线

➤ 论文研究内容与技术路线图

论文题目

碳酸盐岩双重孔隙网络模型与微观气水流动研究

关键问题

碳酸盐岩多尺度孔隙结构对二氧化碳运移的影响与控制机制

研究内容

1.碳酸盐岩多尺度孔隙结构的精细表征

- 多
阈
值
分
割
岩
心
图
像
- 微
孔
渗
参
数
的
计
算
方
法
- 双
重
孔
隙
网
络
提
取
流
程

- 阈值分割固体、大孔、微孔
- 提取融合微孔孔隙率和平均孔径的双重孔隙网络

2.双重孔隙网络模型及渗流参数的预测能力研究

- 预
测
绝
对
渗
透
率
和
地
层
因
子
- 图
像
分
辨
率
和
视
域
矛
盾
研
究
- 双
重
孔
隙
网
络
模
型
的
优
化

- 微孔非均质孔径分布对绝对渗透率和地层因子的影响
- 提高模型预测能力的优化方法
- 图像分辨率对渗透率的影响

3.二氧化碳地质封存下气水两相流动研究

- 准
静
态
两
相
渗
流
模
型
的
构
建
- 模
型
数
值
验
证
- 二
氧
化
碳
毛
细
管
力
圈
闭
研
究

- 双重孔隙网络准静态两相渗流模型的构建与验证
- 基于模型数值研究二氧化碳毛细管力圈闭和相渗曲线

研究目标

二氧化碳封存下多尺度孔隙结构中的微观流动机理研究



内容提要

1. 研究背景及研究现状
2. 碳酸盐岩多尺度数字岩心精细表征与
双重孔隙网络提取
3. 双重孔隙网络模型的预测能力研究
4. 碳酸盐岩毛管力与相渗曲线数值研究
5. 结论与展望



第二章：微米CT图像与微孔区孔渗参数计算

研究内一： dddddd

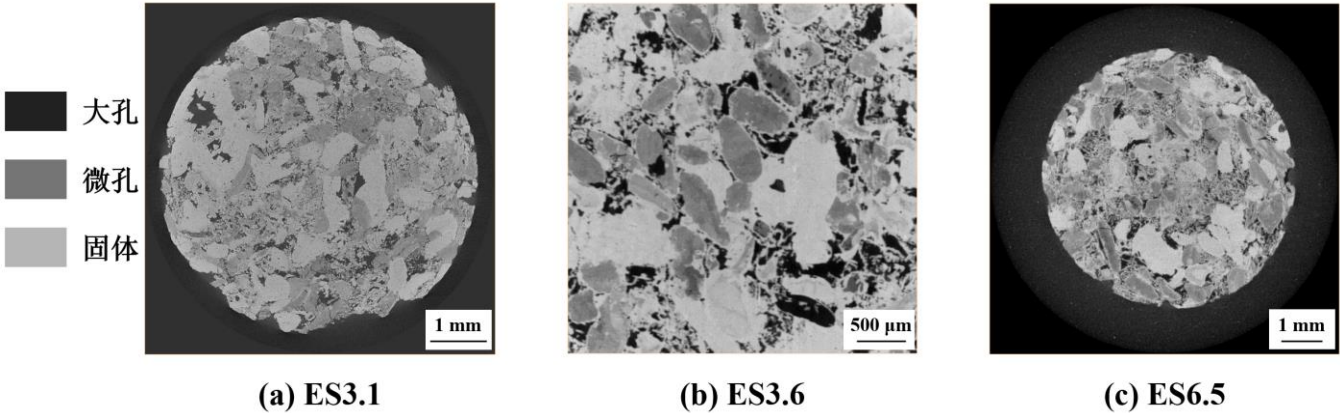
1. 23333
2. 223333
3. 4434444
4. 43

技术路线



第二章：微米CT图像与微孔区孔渗参数计算

➤ 微米CT图像



Estailades 石灰岩原始CT图像

样品编号	图像分辨率 (μm)	图像尺寸 (voxels)	总孔隙率 (%)	绝对渗透率 (mD)
				实验值
ES3.1	3.1	2000×2000×1725	25	260 ± 60
ES3.6	3.6	1000×1000×1000	29	/
ES6.5	6.5	1316×1316×1087	25	202.4 ± 86.9

参考文献中实验和模拟的物理参数

- 基于数字岩心数据库 (**Digital Rocks**) 选取了分辨率分别为3.1微米、3.6微米、6.5微米的三块 Estailades 石灰岩
- 岩石样品以及CT图像相关物理参数如表中所示，**参考文献中对于这三块岩样的孔隙结构表征的相关参数比较完备**
- 基于岩心CT图像可得，存在**可分辨孔隙（大孔）和亚分辨孔隙（微孔）**

2.1 微米CT图像与微孔区孔渗参数计算

➤ 微孔区孔隙率与渗透率计算

微孔体素孔隙率

基于岩心CT图像灰度值与孔隙率成线性比例关系，大孔孔隙率为1，固体孔隙率为0，则微孔孔隙率为0~1，微孔体素孔隙率的计算方程为：

$$\varepsilon_k = \frac{\bar{I}^S - I_k^{CT}}{\bar{I}^S - \bar{I}^V}$$

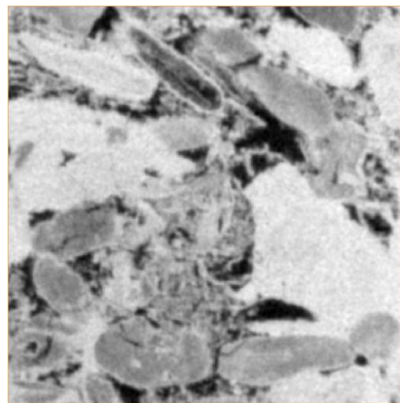
ε_k 微孔体素k的孔隙率

I_k^{CT} 微孔体素k的CT图像灰度值

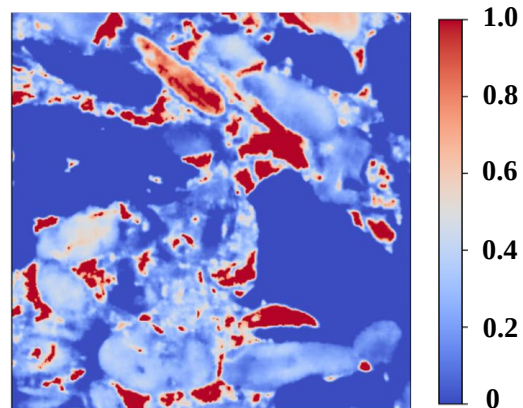
$\bar{I}^S$ 固体区域的平均灰度值

$\bar{I}^V$ 大孔区域的平均灰度值

以ES6.5岩样为例，基于图像灰度值计算的微孔体素孔隙率示意图如下图所示，由于CT图像灰度值与密度相关，固体密度最大，因此颜色最亮，大孔密度最小，颜色最暗，微孔亮度介于固体和大孔之间：



原始灰度图像



微孔体素孔隙率

2.1 微米CT图像与微孔区孔渗参数计算

➤ 微孔区孔隙率与渗透率计算

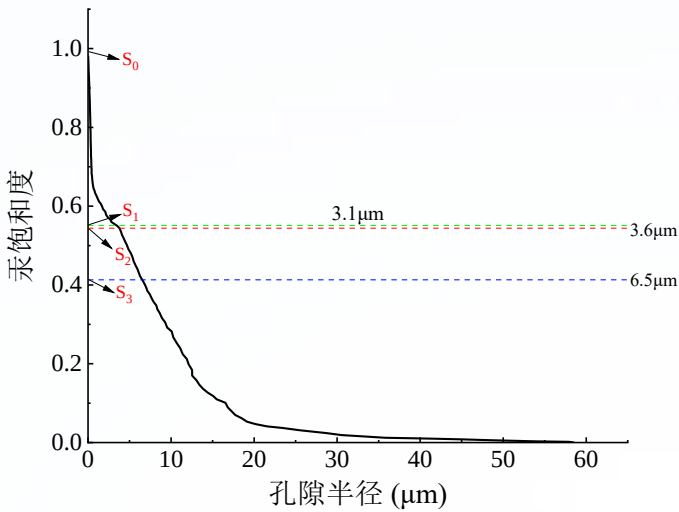
微孔体素渗透率采用Katz-Thompson公式计算，其中对于微孔孔径我们采用了两种计算方法，一种基于实验毛管力曲线计算微孔平均孔径，另一种采用实验侵入压力计算每个微孔体素的平均孔径：

Katz-Thompson

$$K_i = \frac{\varphi_i \bar{r}_i^2}{32\tau^2}$$

- K_i 微孔体素*i*的渗透率
- φ_i 微孔体素*i*的孔隙率
- $\bar{r}_i$ 微孔体素*i*的平均孔径
- τ 迂曲度，1.75

(1) 微孔采用统一的平均孔径：

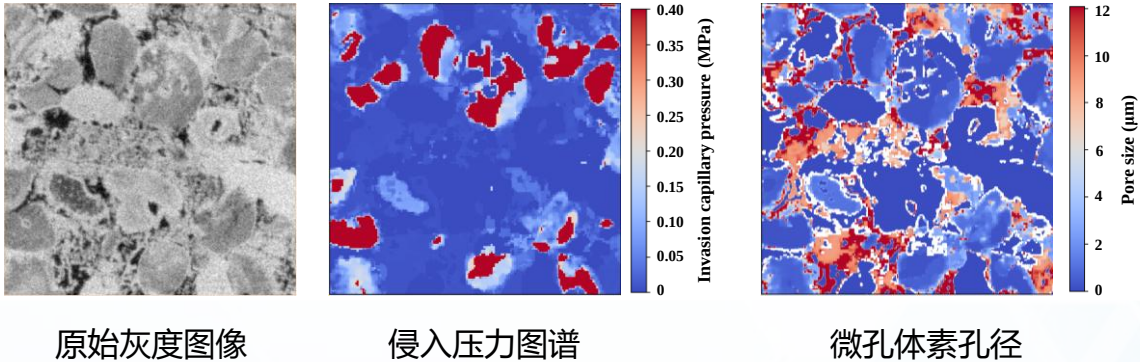


$$r_n = \frac{\int_{S_0}^{S_n} R(s) ds}{S_0 - S_n} \quad n = 1, 2, 3$$

r_n 微孔平均孔径
 $R(s)$ 汞饱和度和孔隙半径的关系曲线得出
3.1μm、3.6μm和6.5μm分别对应 S_1 、 S_2 和 S_3 的汞饱和度， S_0 表示上限为0.98

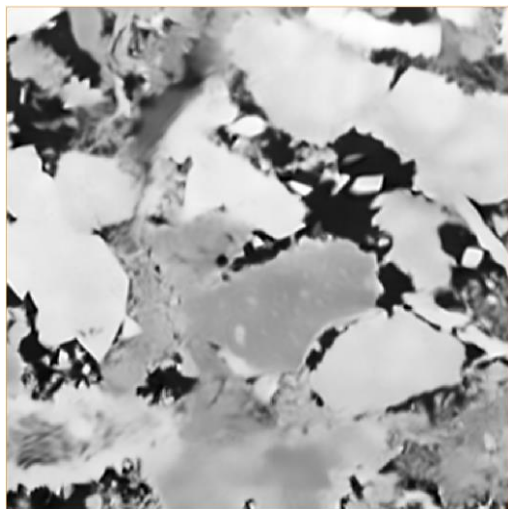
(2) 微孔采用非均质孔径：

基于侵入压力和Young-Laplace方程计算微孔体素的平均孔径

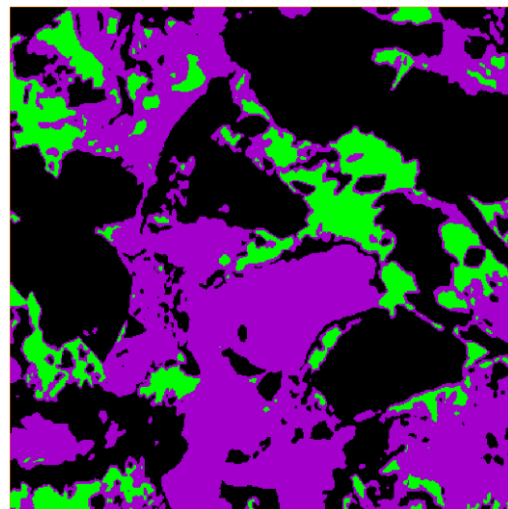


2.2 基于图像的双重孔隙网络提取

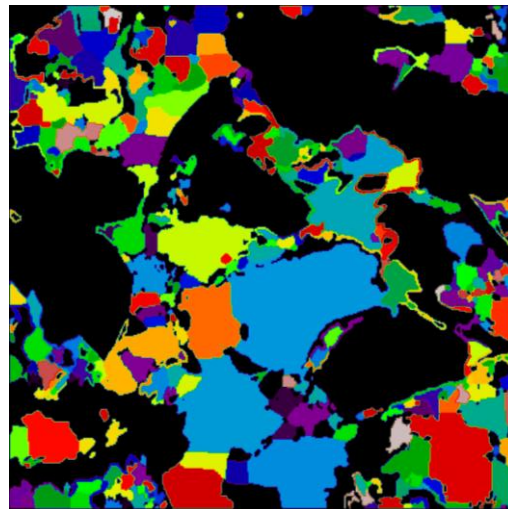
➤ 双重孔隙网络提取流程图



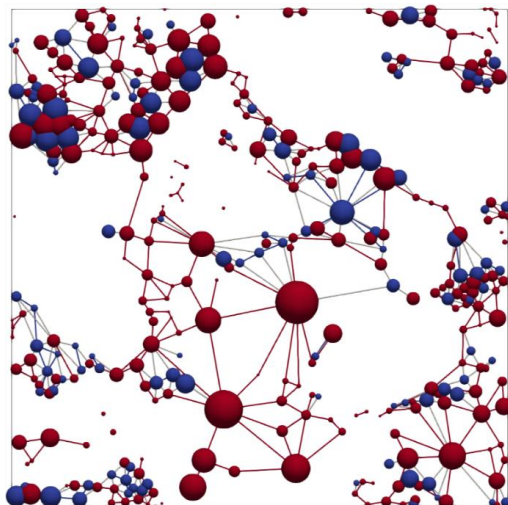
(a) 原始灰度图像



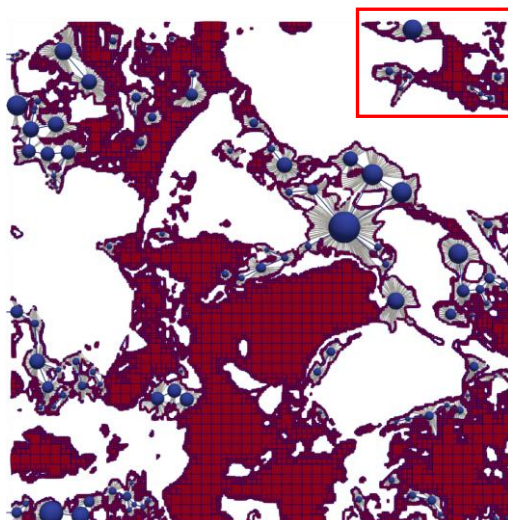
(b) 阈值分割不同区域



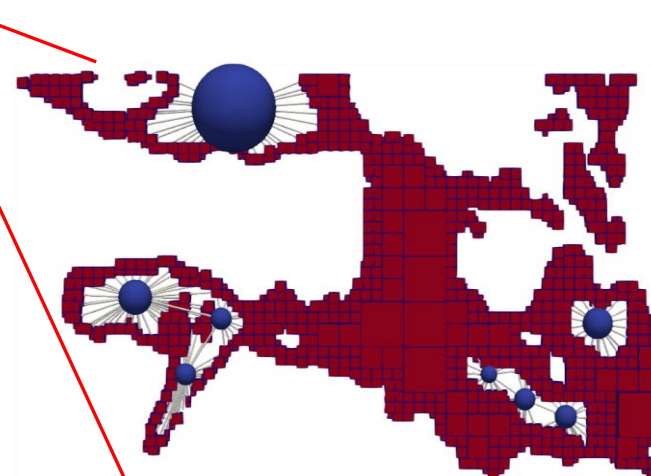
(c) 基于标记的分水岭分割



(d) 双重孔隙网络



(e) 孔隙网络-连续介质



(f) 多重卷积粗化的微孔体素网格

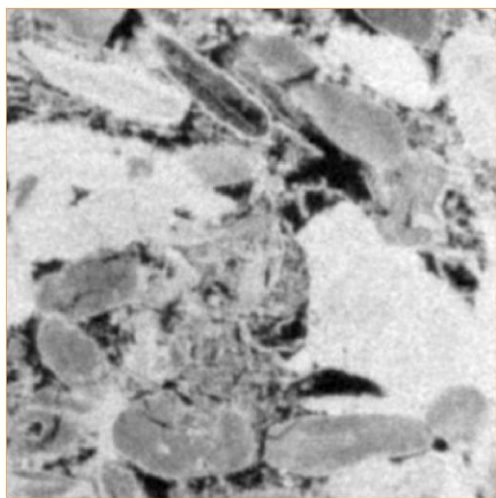
2.2 基于图像的双重孔隙网络提取

➤ 双重孔隙网络微孔单元孔隙率和平均孔径的计算

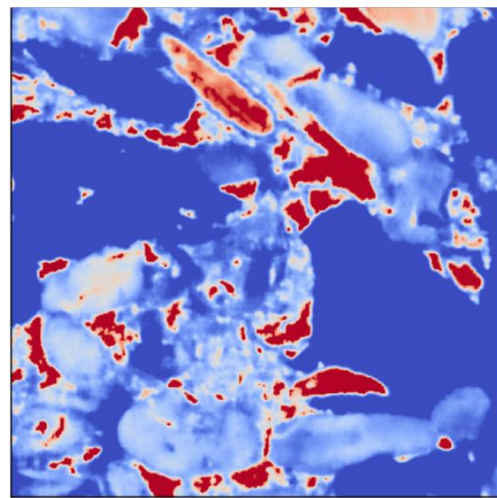
当微孔区域分割为若干个微孔单元时，每个微孔单元包含的每个微孔体素都有各自的孔隙率和平均孔径，如何求解每个微孔单元的孔隙率和平均孔径至关重要

(1) 微孔单元孔隙率的计算

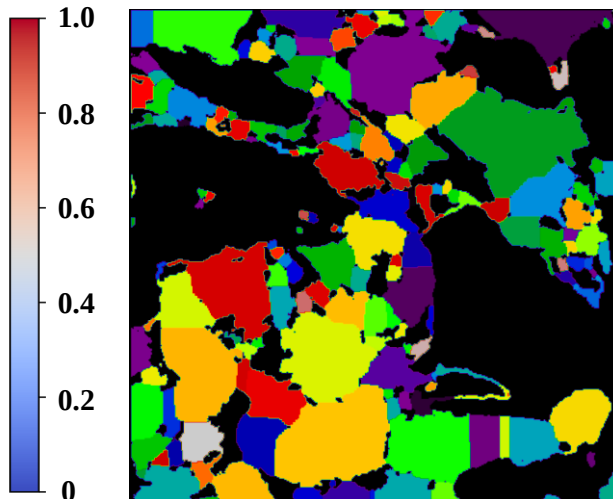
基于图像灰度值计算得到的微孔体素孔隙率，对每个微孔单元内的体素孔隙率算术平均，得到微孔单元的孔隙率：



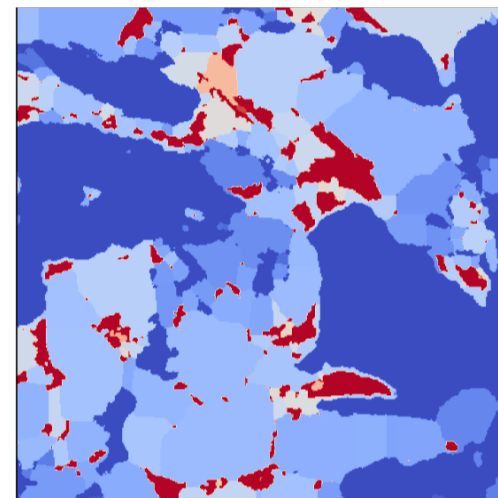
原始灰度图像



微孔体素孔隙率



基于标记的分水岭分割得到若干微孔单元



微孔单元孔隙率

2.2 基于图像的双重孔隙网络提取

► 双重孔隙网络微孔单元孔隙率和平均孔径的计算

当微孔区域分割为若干个微孔单元时，每个微孔单元包含的每个微孔体素都有各自的孔隙率和平均孔径，如何求解每个微孔单元的孔隙率和平均孔径至关重要

(2) 微孔单元平均孔径的计算

基于侵入压力计算得到的微孔体素平均孔径，本文采用的是等效的球形孔隙，因此采用每个微孔单元内总孔隙体积除以总孔隙数量求解微孔单元的平均孔径：

单个微孔体素的孔隙数量

$$M_k = \frac{V_k \varepsilon_k}{4\pi r_k^3 / 3}$$

r_k 微孔体素 k 的平均孔径

V_k 体素 k 的体积

ε_k 体素 k 的孔隙率

M_k 体素 k 包含的孔隙数量

微孔单元的平均孔径

$$\bar{r}_i = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^{N_i} V_k \varepsilon_k}{\sum_{k=1}^{N_i} M_k} \right)^{\frac{1}{3}}$$

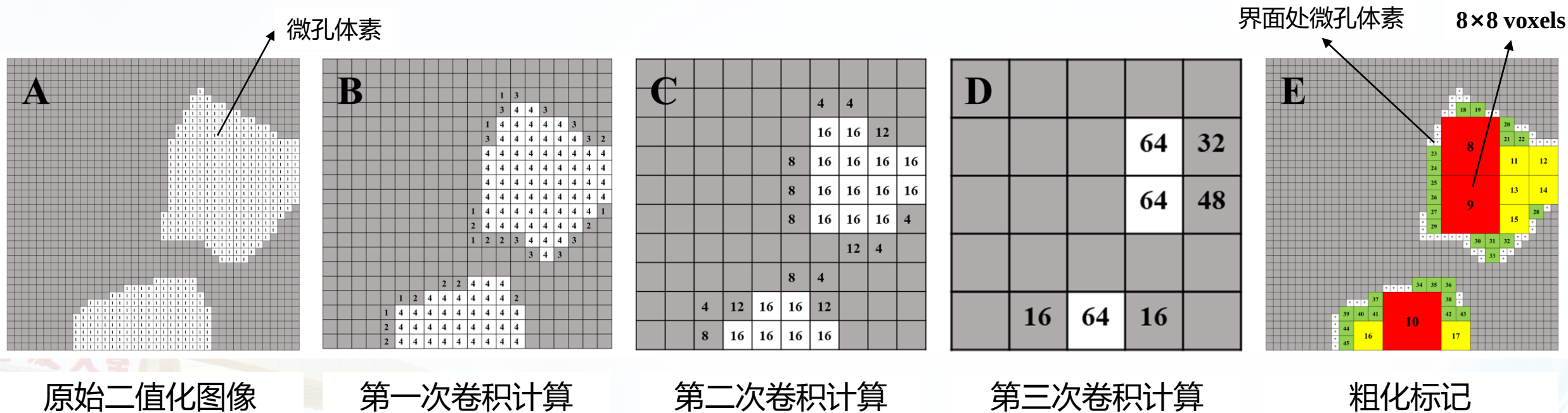
$\bar{r}_i$ 微孔单元 i 的平均孔径

N_i 微孔单元 i 包含的体素数量

2.3 基于图像的孔隙网络-连续介质计算网格提取

➤ 孔隙网络-连续介质微孔体素网格多重卷积粗化

大孔区域与双重孔隙网络一样，提取为孔隙网络，微孔视作连续介质，为了提高计算效率，对微孔体素网格进行了多重卷积粗化，并且为了更好地进行后续模型地对比研究，**孔隙网络-连续介质微孔粗化网格孔隙率和平均孔径的计算与双重孔隙网络保持一致**



(Bowen Shi et al., 2024)



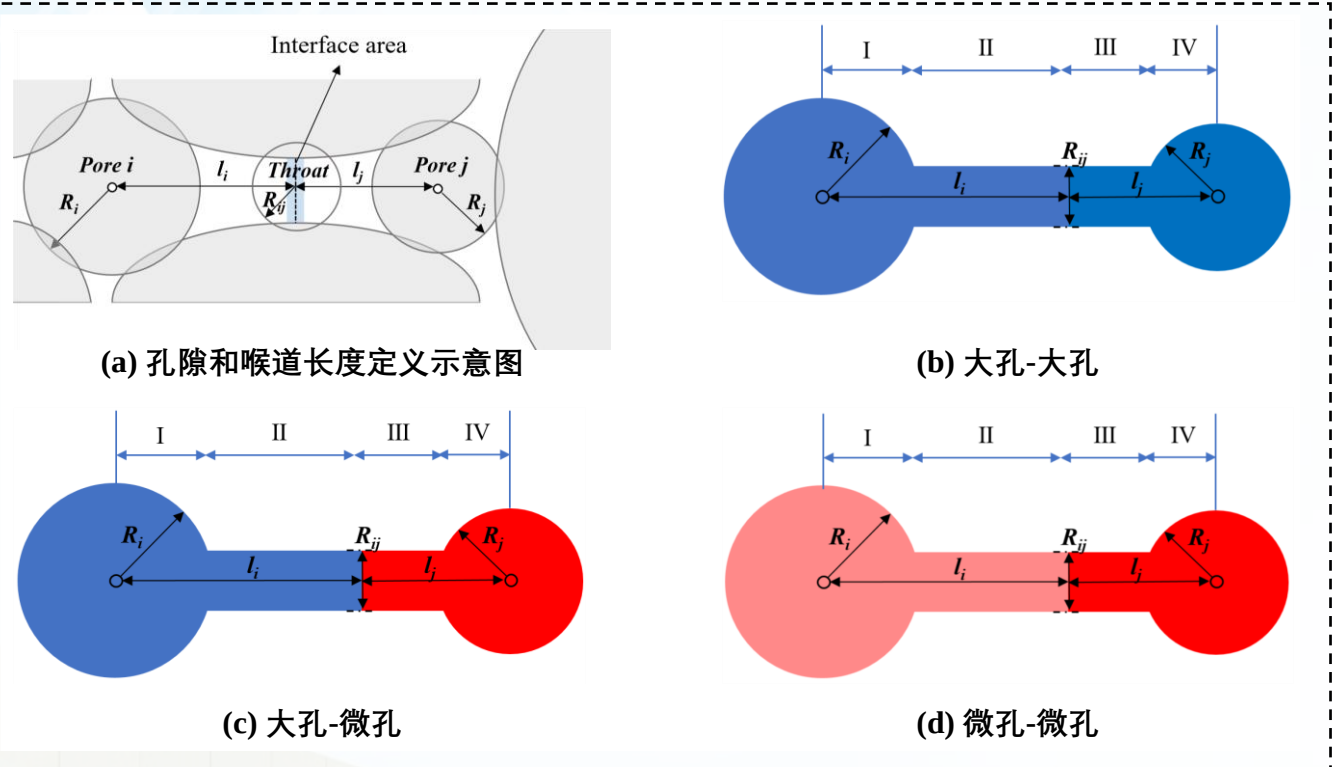
内容提要

1. 研究背景及研究现状
2. 碳酸盐岩多尺度数字岩心精细表征与
双重孔隙网络提取
3. 双重孔隙网络模型的预测能力研究
4. 碳酸盐岩毛管力与相渗曲线数值研究
5. 结论与展望



3.1 双重孔隙网络模型

➤ 双重孔隙网络模型求解绝对渗透率和地层因子的控制方程



● 传导系数计算

传导系数	大孔	微孔单元
水力传导系数		
a_i	$\pi R_i^4 / (8\mu R_i)$	$k_i \pi R_i^2 / (\mu R_i)$
a_j	$\pi R_j^4 / (8\mu R_j)$	$k_j \pi R_j^2 / (\mu R_j)$
a_{ij}^L	$\pi R_{ij}^4 / [8\mu(l_i - R_i)]$	$k_i \pi R_{ij}^2 / [\mu(l_i - R_i)]$
a_{ij}^R	$\pi R_{ij}^4 / [8\mu(l_j - R_j)]$	$k_j \pi R_{ij}^2 / [\mu(l_j - R_j)]$
电导系数		
b_i	$\sigma_w \pi R_i^2 / R_i$	$\sigma_{w,i}^{eff} \pi R_i^2 / R_i$
b_j	$\sigma_w \pi R_j^2 / R_j$	$\sigma_{w,j}^{eff} \pi R_j^2 / R_j$
b_{ij}^L	$\sigma_w \pi R_{ij}^2 / (l_i - R_i)$	$\sigma_{w,i}^{eff} \pi R_{ij}^2 / (l_i - R_i)$
b_{ij}^R	$\sigma_w \pi R_{ij}^2 / (l_j - R_j)$	$\sigma_{w,j}^{eff} \pi R_{ij}^2 / (l_j - R_j)$

绝对渗透率

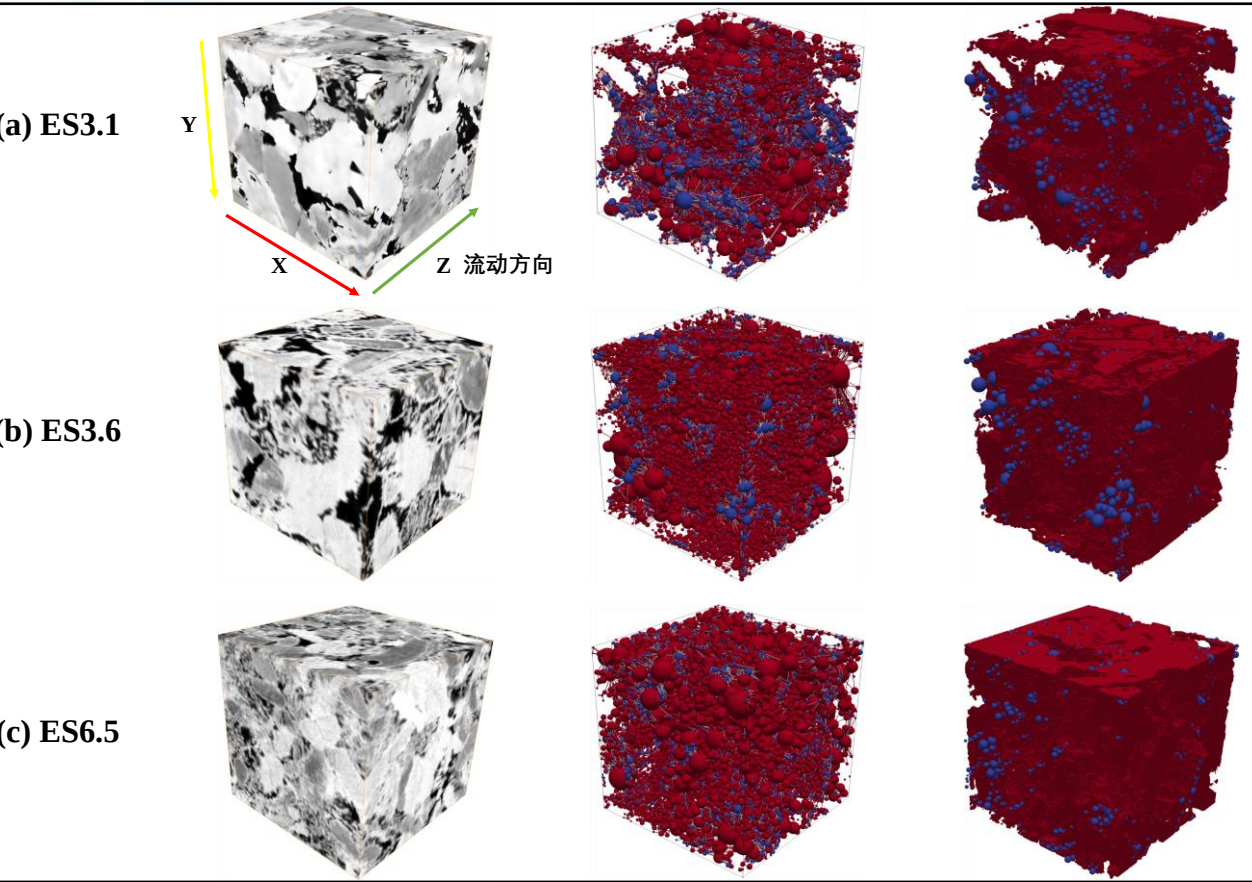
$$\sum_{j=1}^{N_i} Q_{ij} = \sum_{j=1}^{N_i} T_{ij} (p_i - p_j) = 0 \quad T_{ij} = \frac{a_i a_{ij}^L a_{ij}^R a_j}{a_i a_{ij}^L a_{ij}^R + a_i a_{ij}^L a_j + a_i a_{ij}^R a_j + a_{ij}^L a_{ij}^R a_j} \quad K = \frac{Q_{in} \mu L}{A \Delta p}$$

地层因子

$$\sum_{j=1}^{N_i} I_{ij} = \sum_{j=1}^{N_i} T_{ij}^e (U_i - U_j) = 0 \quad T_{ij}^e = \frac{b_i b_{ij}^L b_{ij}^R b_j}{b_i b_{ij}^L b_{ij}^R + b_i b_{ij}^L b_j + b_i b_{ij}^R b_j + b_{ij}^L b_{ij}^R b_j} \quad \sigma_{network} = \frac{I_{in} L}{A \Delta U} \quad FF = \frac{\sigma_w}{\sigma_{network}}$$

3.2 模型对比设置

➤ 模型对比相关参数设置



- 基于三个岩样分别提取双重孔隙网络和孔隙网络-连续介质，用于后续绝对渗透率和地层因子的计算

● 原始图像体素数，以及两种数值模型的孔隙体数和计算网格数

样品子体积 400 ³	孔隙区域	原始图像体素数	体积分数 (%)	DPNM ^a	PNCM ^b
ES3.1	大孔	6332318	9.9%	3569	3569
	微孔单元	21562493	33.7%	8375	3929815
ES3.6	大孔	5040267	7.9%	2172	2172
	微孔单元	32676964	51.1%	13228	4494989
ES6.5	大孔	3694907	5.8%	3827	3827
	微孔单元	40618405	63.5%	7930	4147069

^a 双重孔隙网络模型中提取的大孔隙和微孔单元的数量
^b 孔隙网络-连续介质模型中提取的大孔孔隙体的数量和粗化后微孔网格的数量

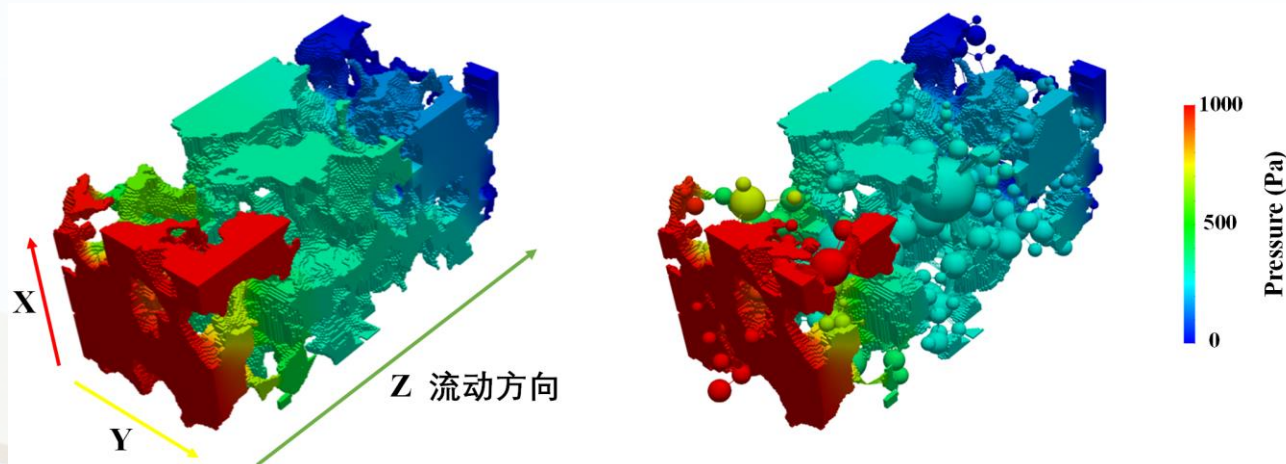
- 双重孔隙网络模型中大孔和微孔单元最少，计算高效
- 孔隙网络-连续介质模型中微孔体素经过多重卷积粗化，相较原始图像微孔体素数减少了85%以上的计算网格

3.2 模型对比设置

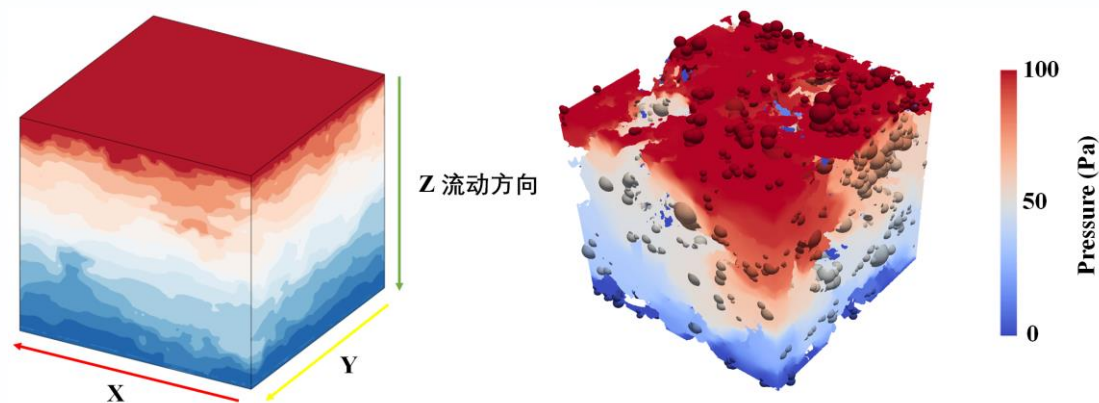
参考模型数值验证

本文主要以微孔体素未粗化的孔隙网络-连续介质模型为参考模型，并通过直接数值模拟进行参考模型数值验证，分别验证微孔为均质和非均质渗透率时参考模型的可靠性

(1) 微孔为均质渗透率



(2) 微孔为非均质渗透率



LBM vs. PNCM (186 mD vs. 174 mD)

- 采用ES6.5岩样，微孔基于侵入压力的非均质孔径，LBM和参考模型渗透率模拟结果非常接近

微孔渗透率	直接数值模拟 (mD)	参考模型 (mD)	相对偏差
10 mD	237	221	6.8%
100 mD	304	295	3%

3.3 对比结果与分析

➤ 渗透率和地层因子对比结果

绝对渗透率对比结果

岩石样品 (400 ³)	微孔平均孔径 (μm)	双重孔隙网络模型 (mD)	孔隙网络-连续介质模型 (mD)	参考模型 (mD)
ES3.1	0.61	109	116	117
ES3.6	0.74	34	37	37
ES6.5-1	1.81	28	18	18
ES6.5-2	基于侵入压力的非均质孔径	12	128	174

- 微孔为均质孔径时，双重孔隙网络模型与参考模型预测结果十分接近
- 微孔为非均质孔径时，双重孔隙网络模型低估渗透率超过一个数量级

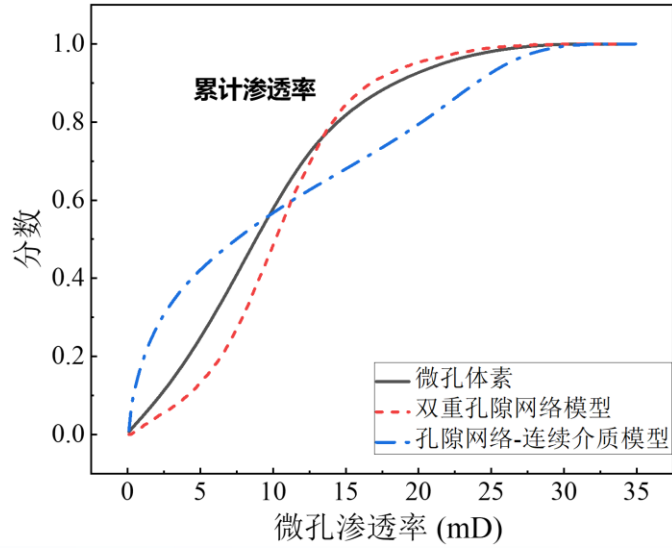
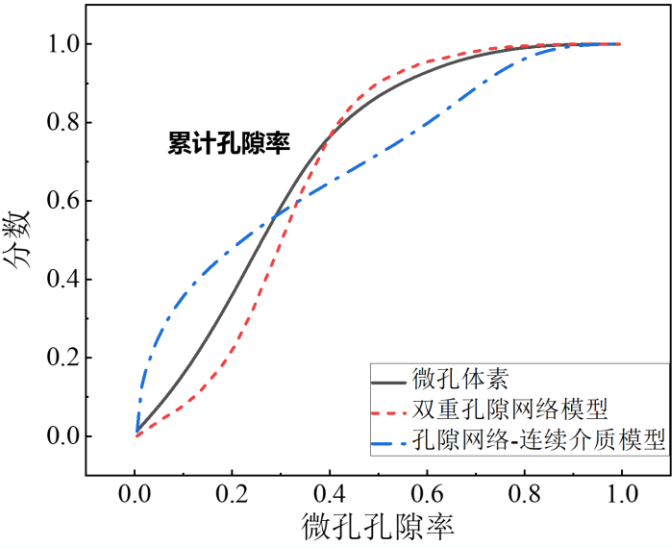
- 双重孔隙网络模型可以很好的预测地层因子（被流体饱和的多孔介质的电阻率与填充其孔隙的流体的电阻率之比）

地层因子对比结果

岩石样品 (400 ³)	双重孔隙网络模型 (-)	孔隙网络-连续介质模型 (-)	参考模型 (-)
ES3.1	17.24	19.61	19.23
ES3.6	23.81	23.81	23.26
ES6.5	18.52	20.41	19.23

3.3 对比结果与分析

➤ 微孔为非均质孔径时双重孔隙网络对绝对渗透率预测不佳因素分析

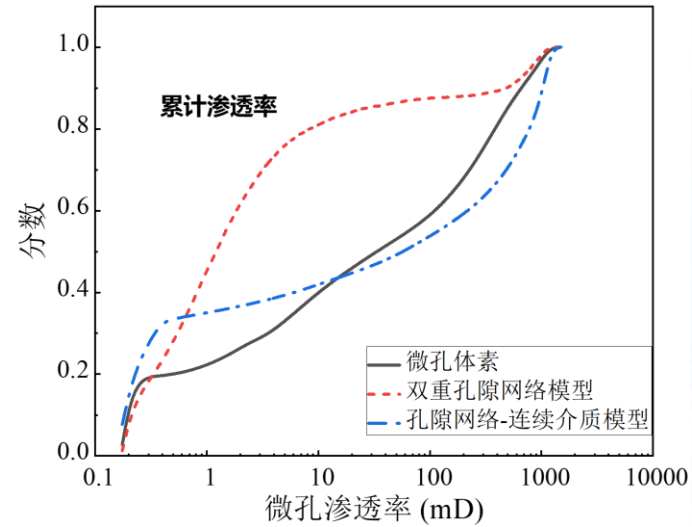
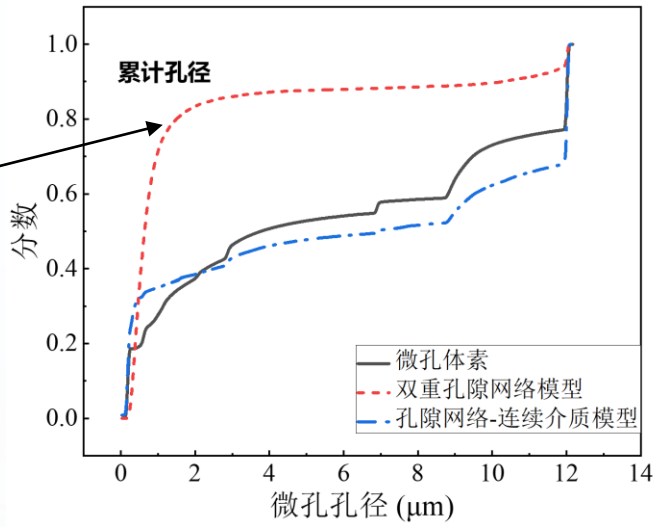


- 双重孔隙网络模型微孔单元平均孔隙率累计分布与图像微孔体素累计曲线非常接近
- 微孔孔隙率的非均质性仅导致渗透率跨越一到两个数量级

- 双重孔隙网络模型微孔单元平均孔隙半径小于2微米，微孔渗透率被严重低估，并且微孔渗透率在非均质孔径作用下跨越3~4个数量级

$$M_k = \frac{V_k \epsilon_k}{4\pi r_k^3 / 3}$$
$$\bar{r}_i = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^{N_i} V_k \epsilon_k}{\sum_{k=1}^{N_i} M_k} \right)^{\frac{1}{3}}$$

12 mD vs. 174 mD



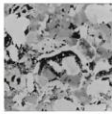
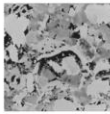
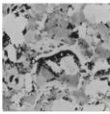
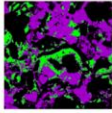
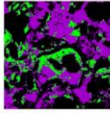
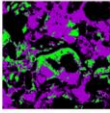
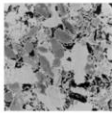
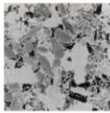
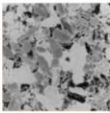
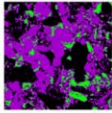
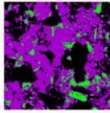
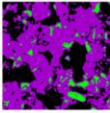
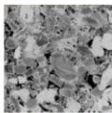
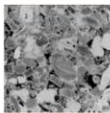
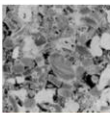
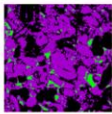
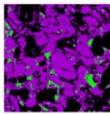
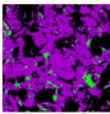
3.4 图像分辨率对渗透率预测的影响

降低图像分辨率对双重孔隙网络模型预测渗透率的影响

基于双重孔隙网络模型计算高效，由于岩心图像分辨率和视域之间的矛盾，分别提取三个大尺寸岩心用于模拟渗透率，探究分辨率对渗透率预测的影响

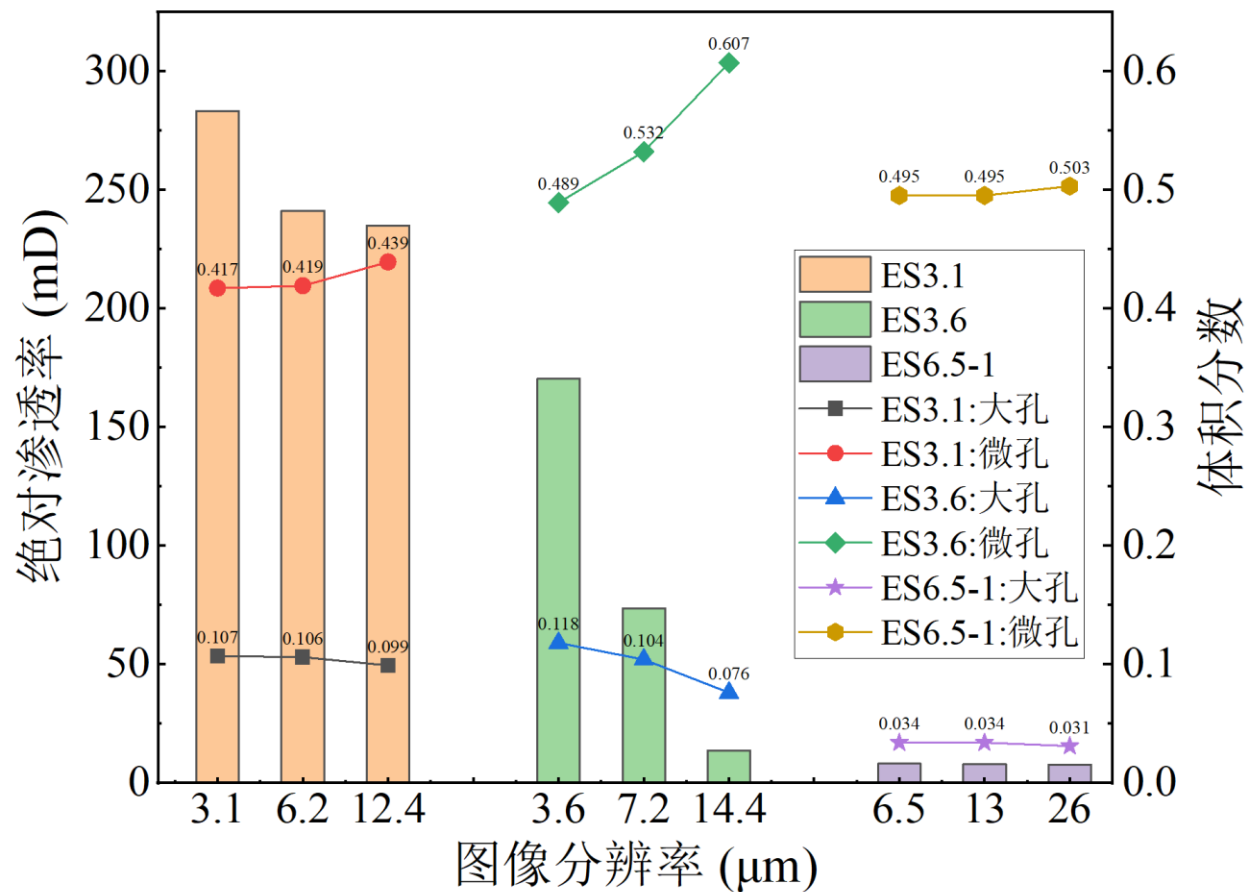
岩石样品	图像尺寸-体素数	大孔孔隙网络	双重孔隙网络
ES3.1	1000×1000×1001	271 mD	283 mD
ES3.6	1000×1000×1000	142 mD	170 mD
ES6.5-1	600×600×600	5 nD	8 mD

- 微孔单元采用统一的平均孔径
- ES3.1样品大孔连通性最好，ES6.5大孔基本不连通，主要依靠微孔来连通
- 针对三个样品，分别降低分辨率为原来的一半和四分之一，观察渗透率和孔隙体积分数的变化

样品编号	体素尺寸 (μm)	3.1	6.2	12.4
ES3.1	灰度图像			
	分割图像			
ES3.6	体素尺寸 (μm)	3.6	7.2	14.4
	灰度图像			
	分割图像			
ES6.5-1	体素尺寸 (μm)	6.5	13	26
	灰度图像			
	分割图像			

3.4 图像分辨率对渗透率预测的影响

降低图像分辨率对双重孔隙网络模型预测渗透率的影响



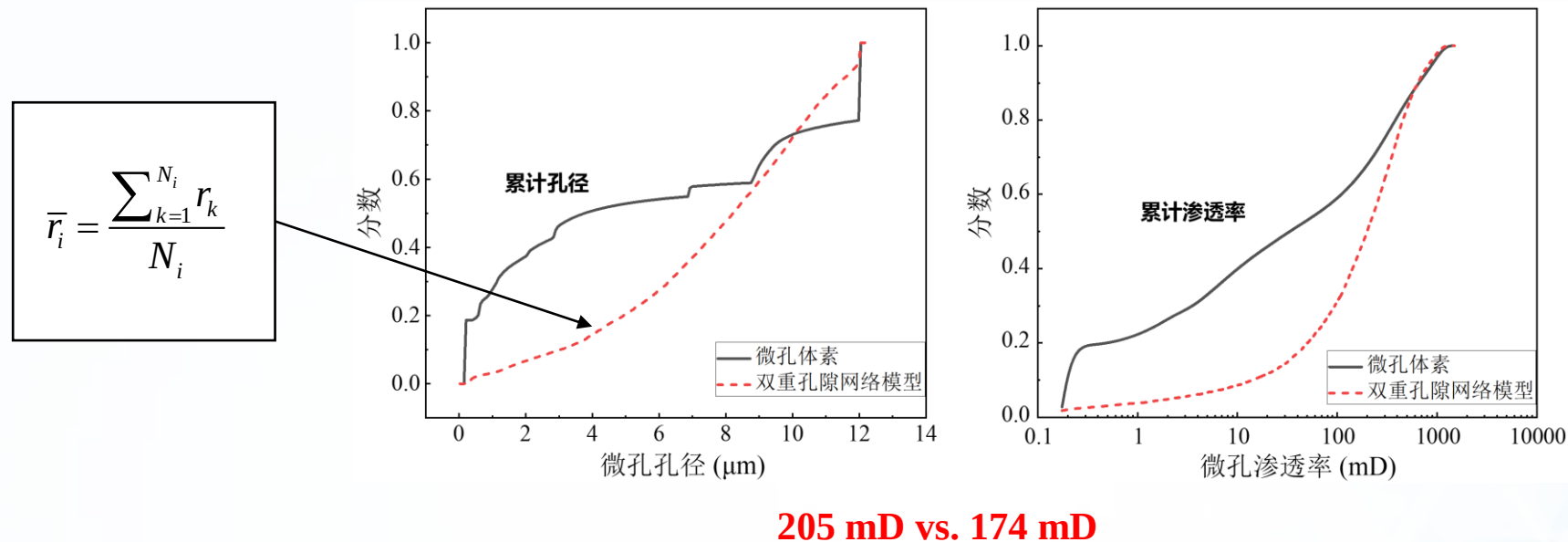
- 三个岩样双重孔隙网络模型预测渗透率随着图像分辨率的降低而降低
- 随着图像分辨率的降低，大孔体积分数减小，微孔体积分数增大
- 当大孔连通良好（ES3.1）或主要依靠微孔连通（ES6.5-1）时，图像分辨率对渗透率影响较小

3.5 双重孔隙网络模型优化研究

➤ 更新微孔单元平均孔径计算方法提高模型预测能力

(1) 算术平均求解微孔单元平均孔径

- 双重孔隙网络模型微孔单元平均孔径的累计分布向右偏移，表明平均孔径略微高估，但该方法提高了模型对渗透率的预测能力



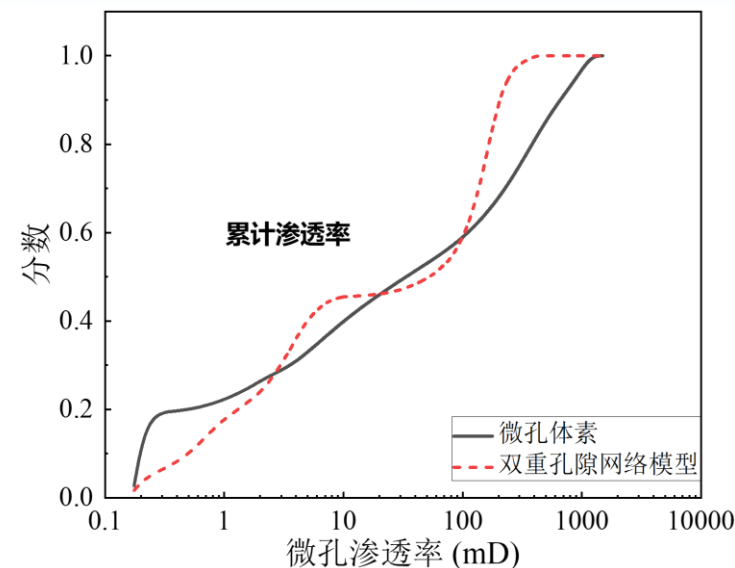
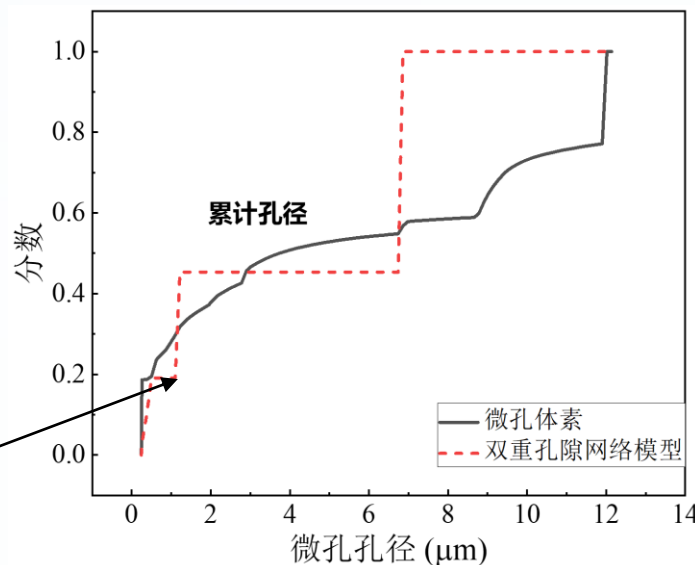
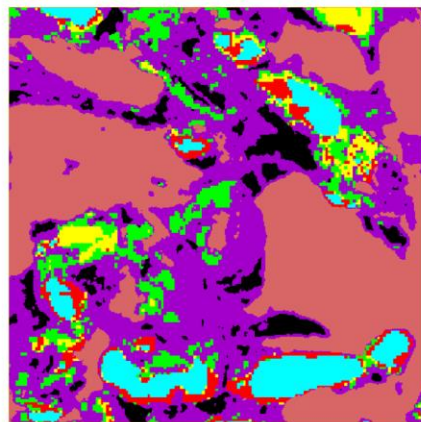
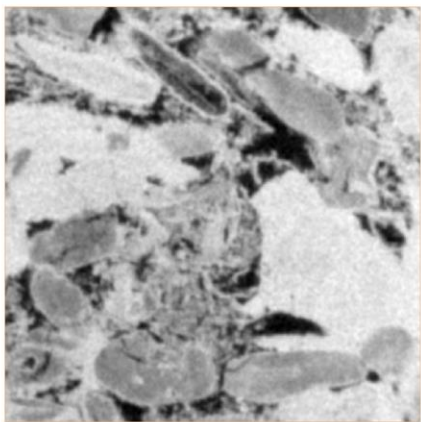
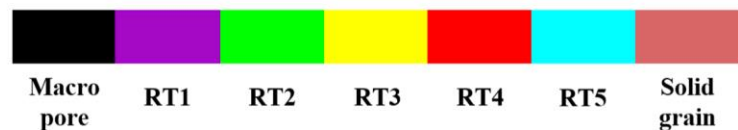
(2) 基于侵入压力对微孔分类

根据14、80、180、220、400 kPa 这5个入口压力值，得到5种亚分辨孔隙岩石类型，根据Young-Laplace方程，对应的孔隙半径分别为0.24、0.44、0.54、1.21和6.9 μm，将微孔区域分为5个微孔孔径区域，分别提取孔隙网络最后合并为一套微孔单元，结合大孔孔隙网络建立双重孔隙网络模型

3.5 双重孔隙网络模型优化研究

➤ 更新微孔单元平均孔径计算方法提高模型预测能力

(2) 基于侵入压力对微孔分类



112 mD vs. 174 mD

RT1~RT5为侵入毛细管压力最低到最高的微孔区域

- 基于侵入压力对微孔分类的方法提高了非均质孔径下双重孔隙网络模型对渗透率的预测能力，并且微孔单元与图像微孔体素累计渗透率曲线非常匹配



内容提要

1. 研究背景及研究现状
2. 碳酸盐岩多尺度数字岩心精细表征与
双重孔隙网络提取
3. 双重孔隙网络模型的预测能力研究
4. 碳酸盐岩毛管力与相渗曲线数值研究
5. 结论与展望

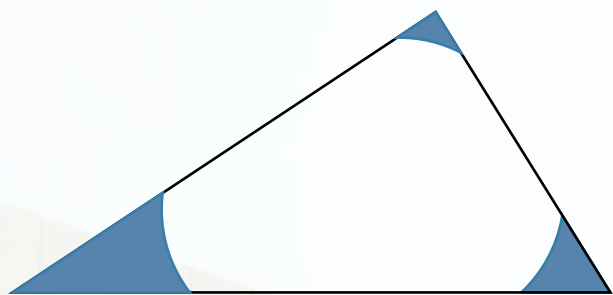


4.1 准静态两相渗流模型

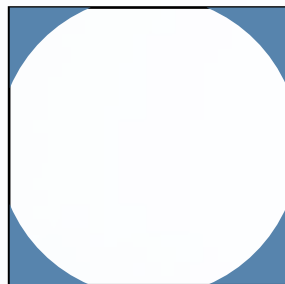
➤ 基于双重孔隙网络的准静态两相渗流模型

● 大孔中的准静态驱替和渗吸

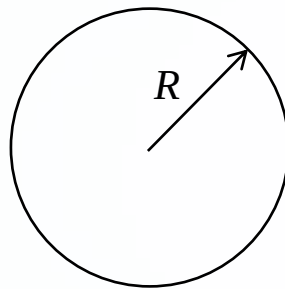
- 基于形状因子考虑不同截面形状的孔喉
- 侵入顺序遵循逾渗理论
- 采用MS-P理论计算侵入压力和渗吸过程中角膜面积



$$G \leq 0.0387$$



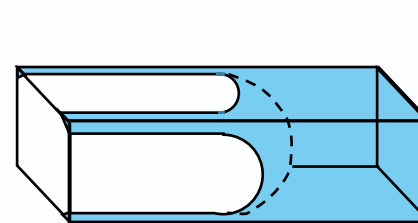
$$0.0387 < G \leq 0.0625$$



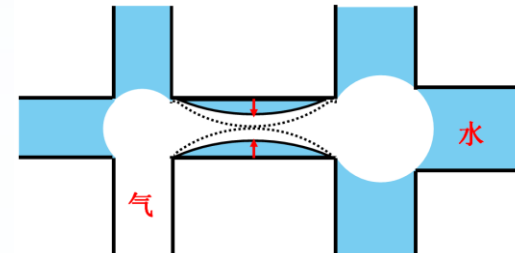
$$G > 0.0625$$

基于形状因子计算的不同孔喉截面

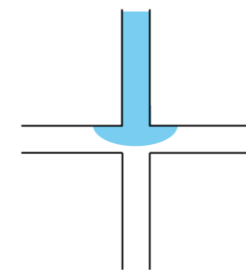
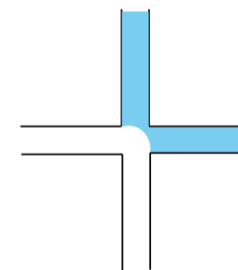
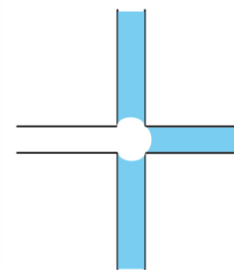
- 渗吸过程考虑了活塞驱替、圈闭和协同填充



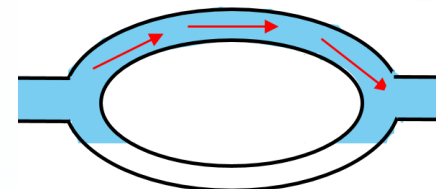
活塞驱替



卡断圈闭



协同填充



绕流圈闭

4.1 准静态两相渗流模型

➤ 基于双重孔隙网络的准静态两相渗流模型

● 微孔单元中的准静态驱替和渗吸

- 初次驱替和渗吸过程存在毛细滞后现象
- 毛细管力和饱和度曲线(P_c-S^w): 经典的VG模型+Land滞后模型
- 相对渗透率曲线(K_r-S^w): 经典的VG模型+Killough滞后模型

van Genuchten model

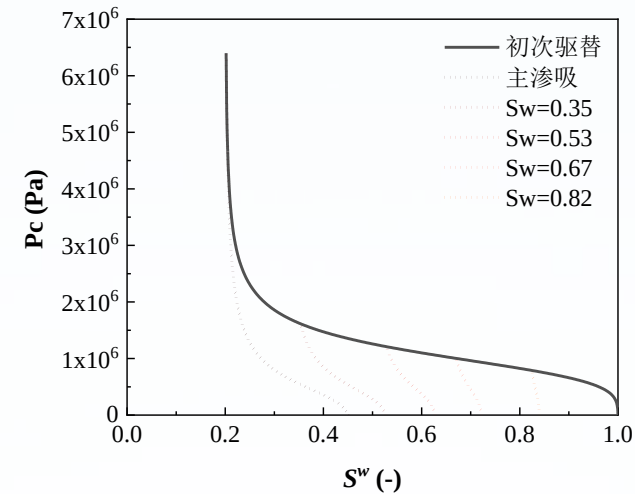
毛管力曲线

$$S_e^w = \left[1 + (ah^c)^N \right]^{-M}$$

相对渗透率曲线

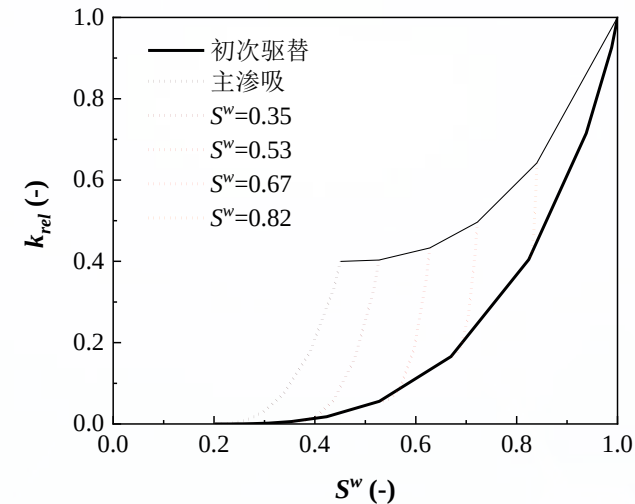
$$k_{rel}^w(s_e^w) = (s_e^w)^\kappa \left[1 - (1 - s_e^{w(1/M)})^M \right]^2$$

$$k_{rel}^n(s_e^w) = (1 - s_e^w)^\zeta \left[1 - s_e^{w(1/M)} \right]^{2M}$$



(Land, 1968)

Land trapping model



(Killough, 1976)

Killough hysteresis model

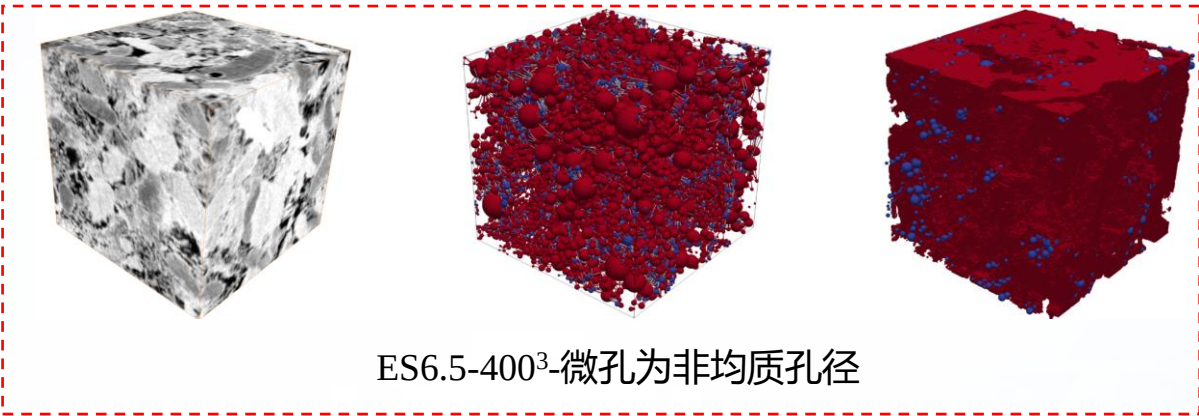
4.2 模型验证

➤ 双重孔隙网络准静态两相渗流模型的验证

微孔为均质孔径时，双重孔隙网络模型能够很好的预测绝对渗透率和地层因子，因此，**基于ES6.5岩样微孔为非均质孔径验证模型对两相渗流参数的预测能力**

● 微孔单元相关参数设置

亚分辨微孔单元	初次驱替	主渗吸
a [1/L]	$\frac{r}{2\sigma \cos \theta}$	$\frac{2.1r}{2\sigma \cos \theta}$
侵入压力 (P_{entry})	$\frac{\left(0.98^{\frac{1}{M}-1}\right)^{\frac{1}{N}}}{a}$	
逾渗阈值压力 ($P_{percolation}$)	$\frac{\left(0.80^{\frac{1}{M}-1}\right)^{\frac{1}{N}}}{a}$	
N	5.8	2.68
M	0.83	0.63
κ	6.32	-1.69
ζ	0.37	-0.068
渗透率 (k)	$\frac{\phi r^2}{32\tau^2}$	
孔隙率 (ε)	公式 2.1 和 2.7	

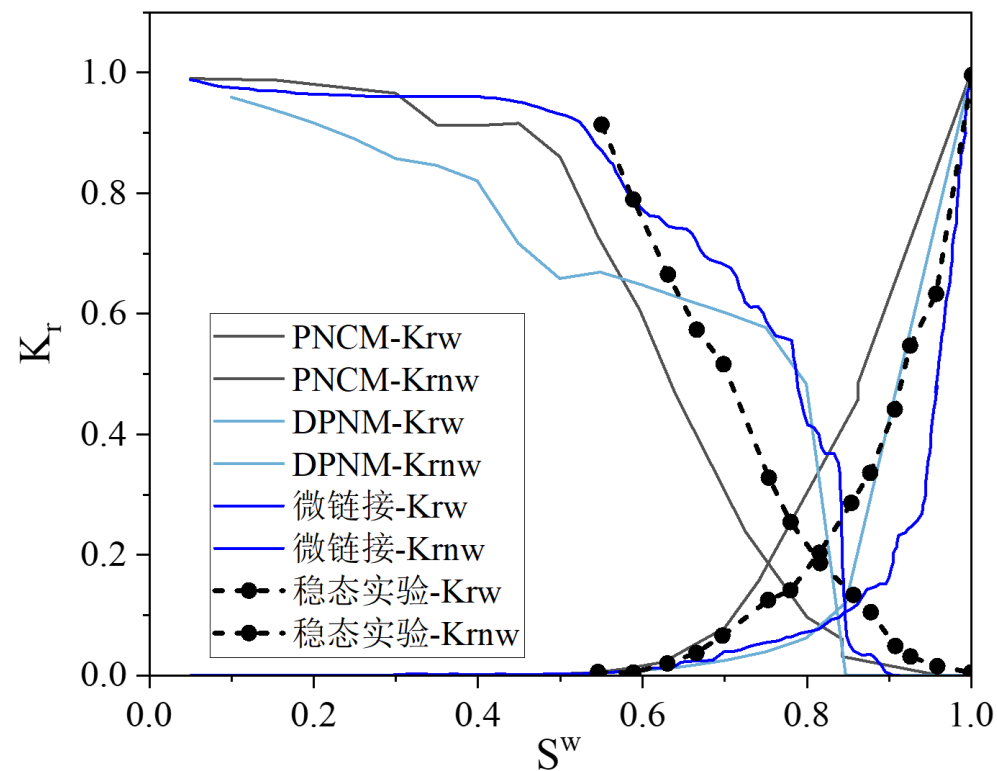
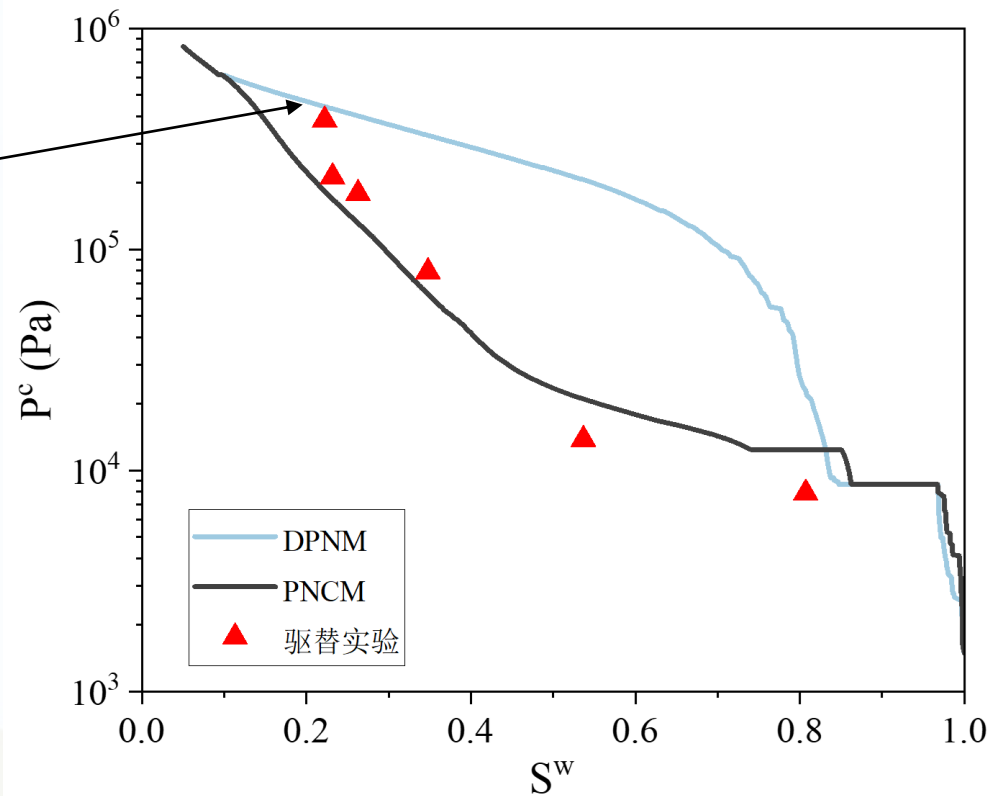


- 基于400³体素大小的ES6.5岩样计算模型对毛管力和相渗曲线的预测能力
- 提取**更大尺寸的双重孔隙网络模型**，探究模型预测能力

4.2 模型验证

➤ 双重孔隙网络准静态两相渗流模型的验证-400³体素大小的ES6.5岩样

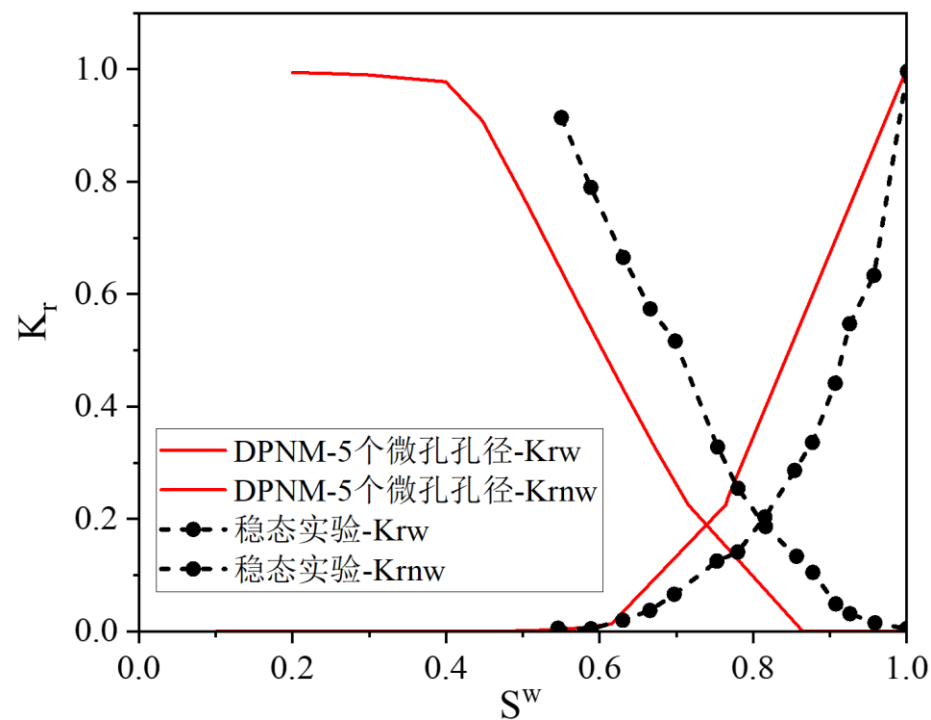
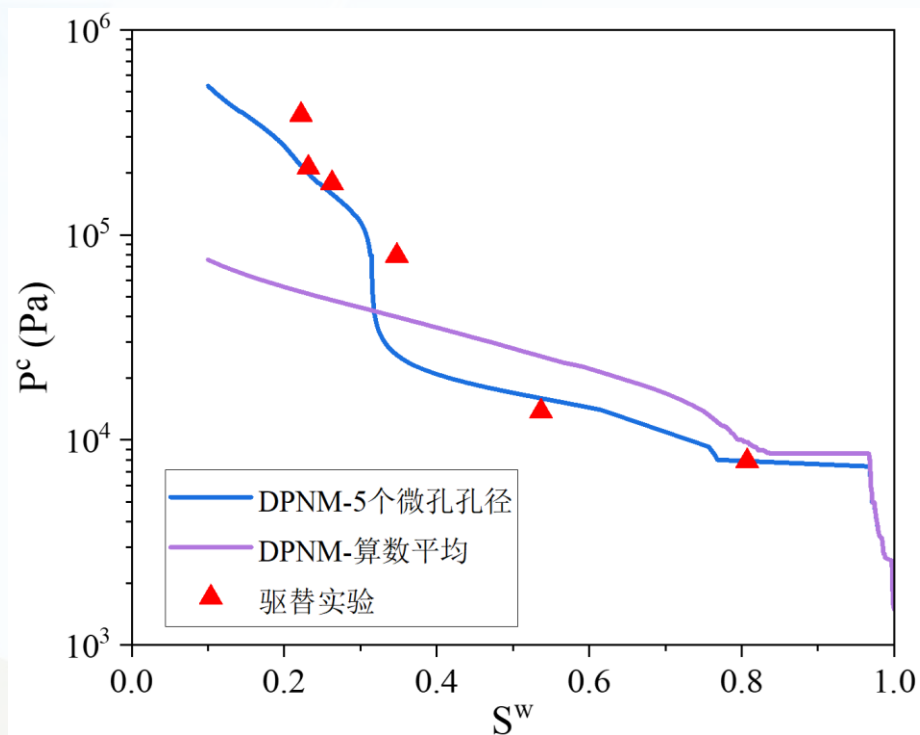
$$M_k = \frac{V_k \varepsilon_k}{4\pi r_k^3 / 3}$$
$$\bar{r}_i = \left(\frac{3 \sum_{k=1}^{N_i} V_k \varepsilon_k}{4\pi \sum_{k=1}^{N_i} M_k} \right)^{\frac{1}{3}}$$



- 微孔单元平均孔径的低估，导致毛细管力远大于实验和参考模型数据
- 相渗曲线与实验数据趋势和曲线两相等渗点均相差较大，但是双重孔隙网络模型与微链接模型预测接近，低估两相等渗点

4.2 模型验证

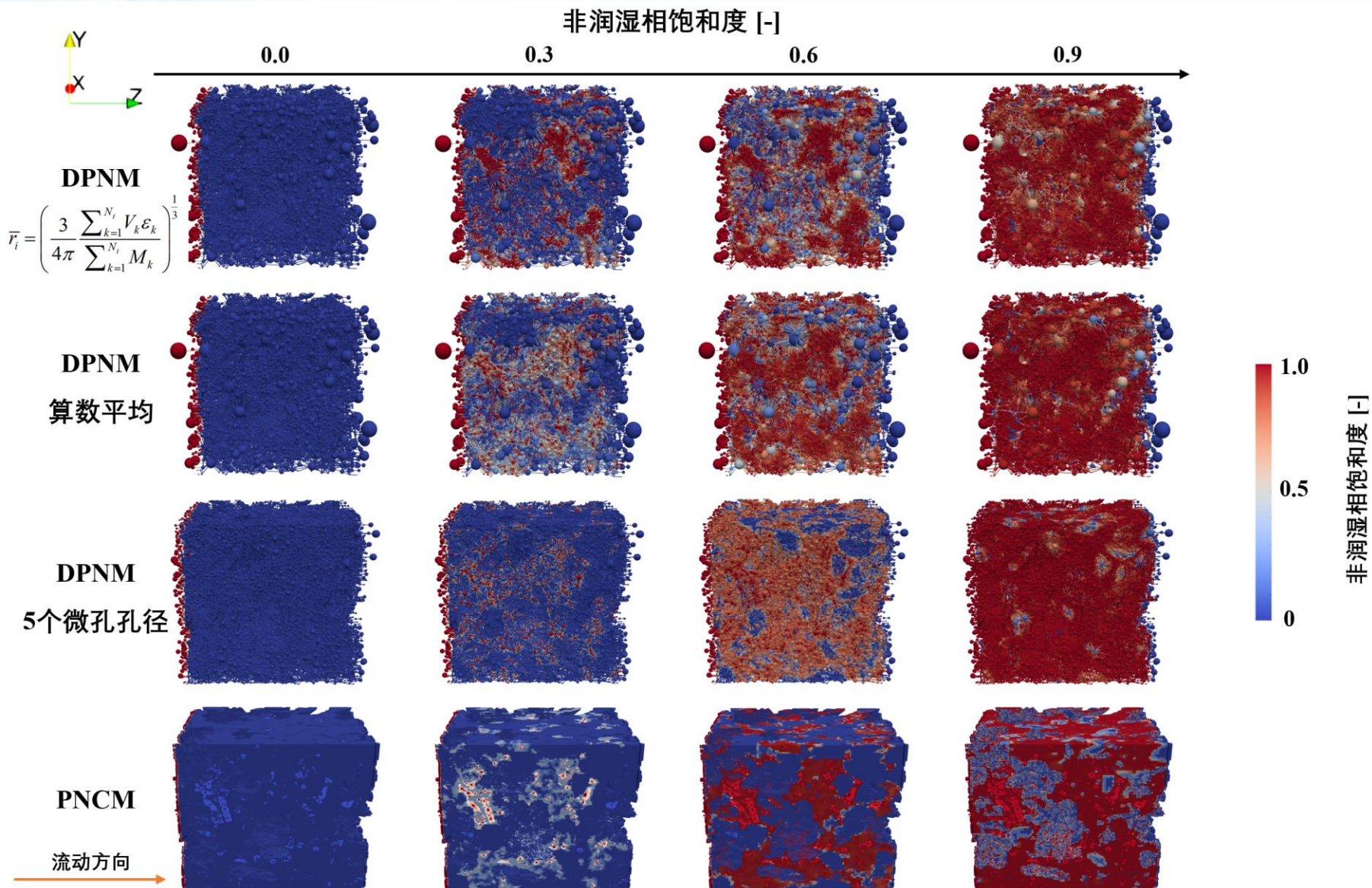
➤ 双重孔隙网络准静态两相渗流模型的验证-两种优化的计算微孔单元平均孔径方法



- **算数平均**求解微孔单元平均孔径，微孔单元孔径略微高估，因此毛细管力普遍偏低
- **基于侵入压力对微孔分类**，可以看到毛细管力和相渗曲线与实验数据都匹配较好

4.2 模型验证

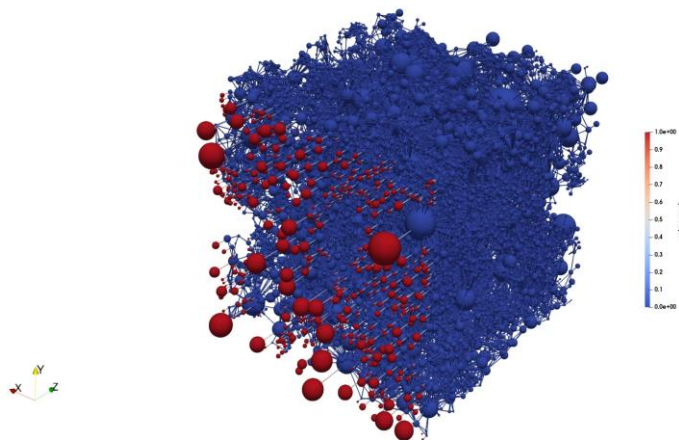
➤ 非润湿相饱和度分布云图



- 非润湿相总体饱和度相同时，微孔单元不同平均孔径方法模型内部饱和度分布不同
- 算数平均微孔孔径，孔径被高估，因此非润湿相突破较快
- 基于侵入压力对微孔分类，由于同类微孔单元具有相同的侵入压力，非润湿相的侵入呈现区域逐级突破的趋势

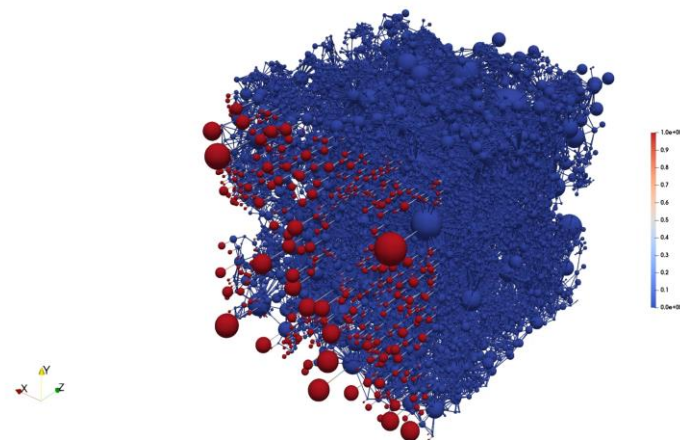
4.2 模型验证

➤ 非润湿相侵入的动态过程

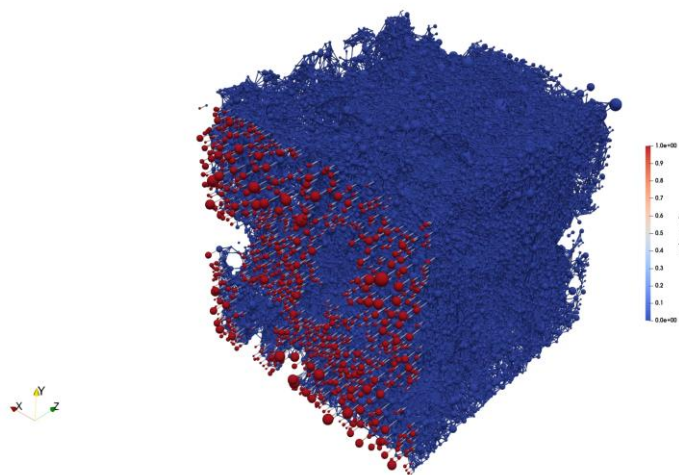


DPNM

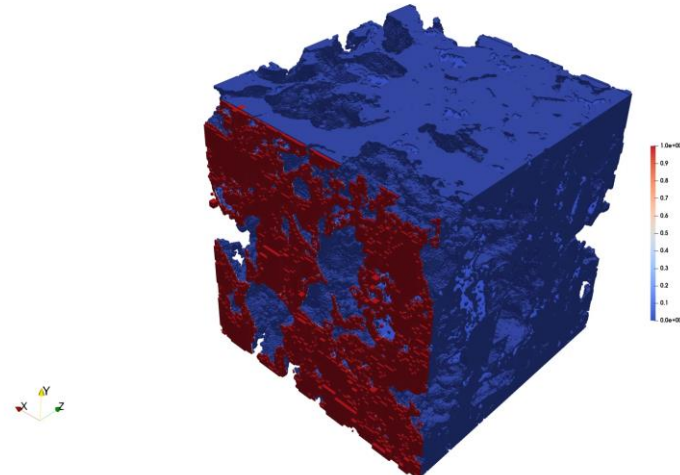
$$\bar{r}_i = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^{N_i} V_k \varepsilon_k}{\sum_{k=1}^{N_i} M_k} \right)^{\frac{1}{3}}$$



DPNM
算术平均



DPNM
5个微孔孔径



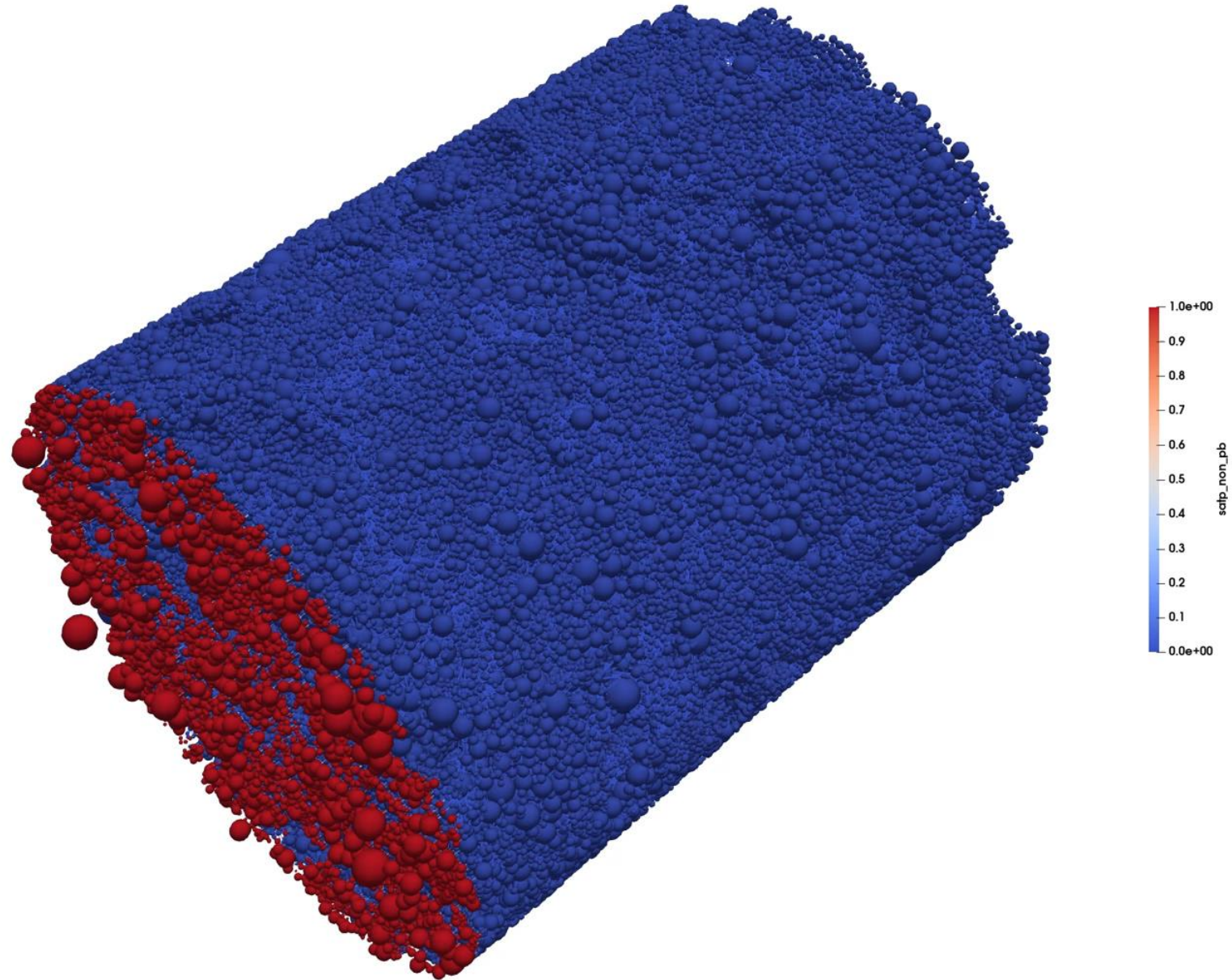
PNCM
$$\bar{r}_i = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^{N_i} V_k \varepsilon_k}{\sum_{k=1}^{N_i} M_k} \right)^{\frac{1}{3}}$$

4.2 模型验证

➤ 全

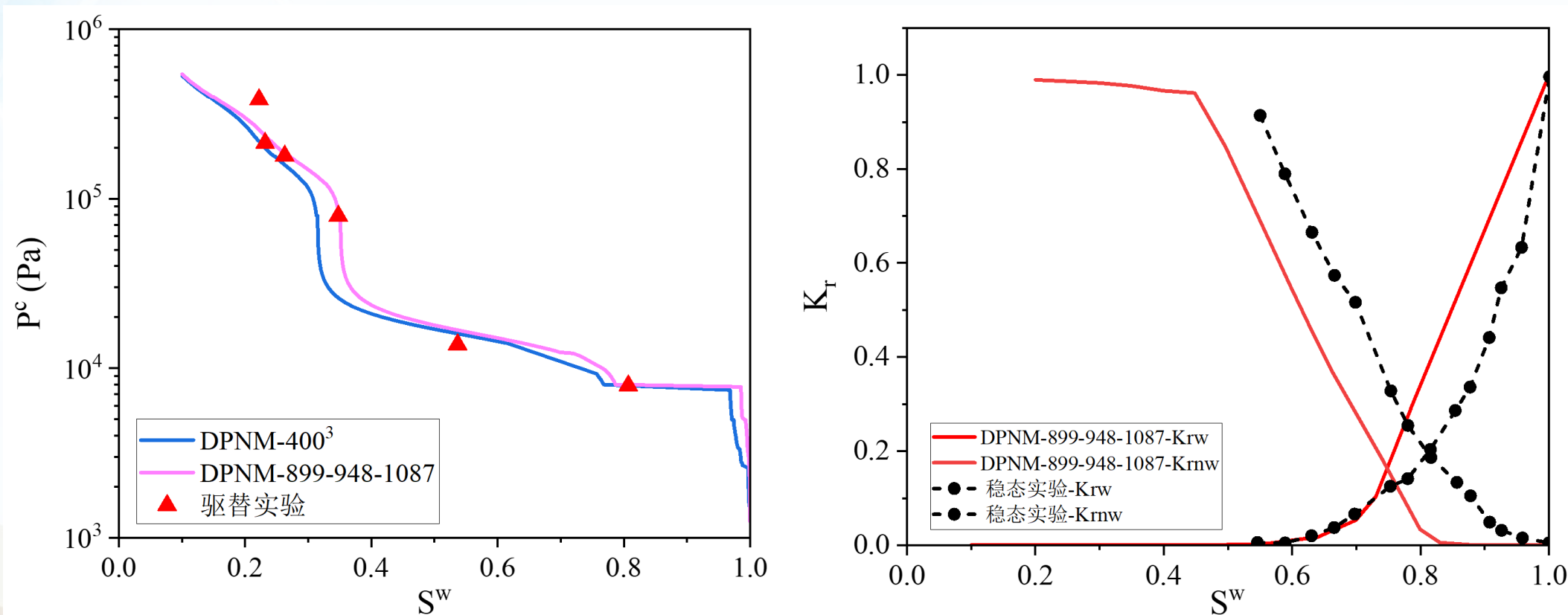
基于
行模

进



4.2 模型验证

➤ 全图像尺寸的ES6.5-基于侵入压力对微孔分类的模型验证



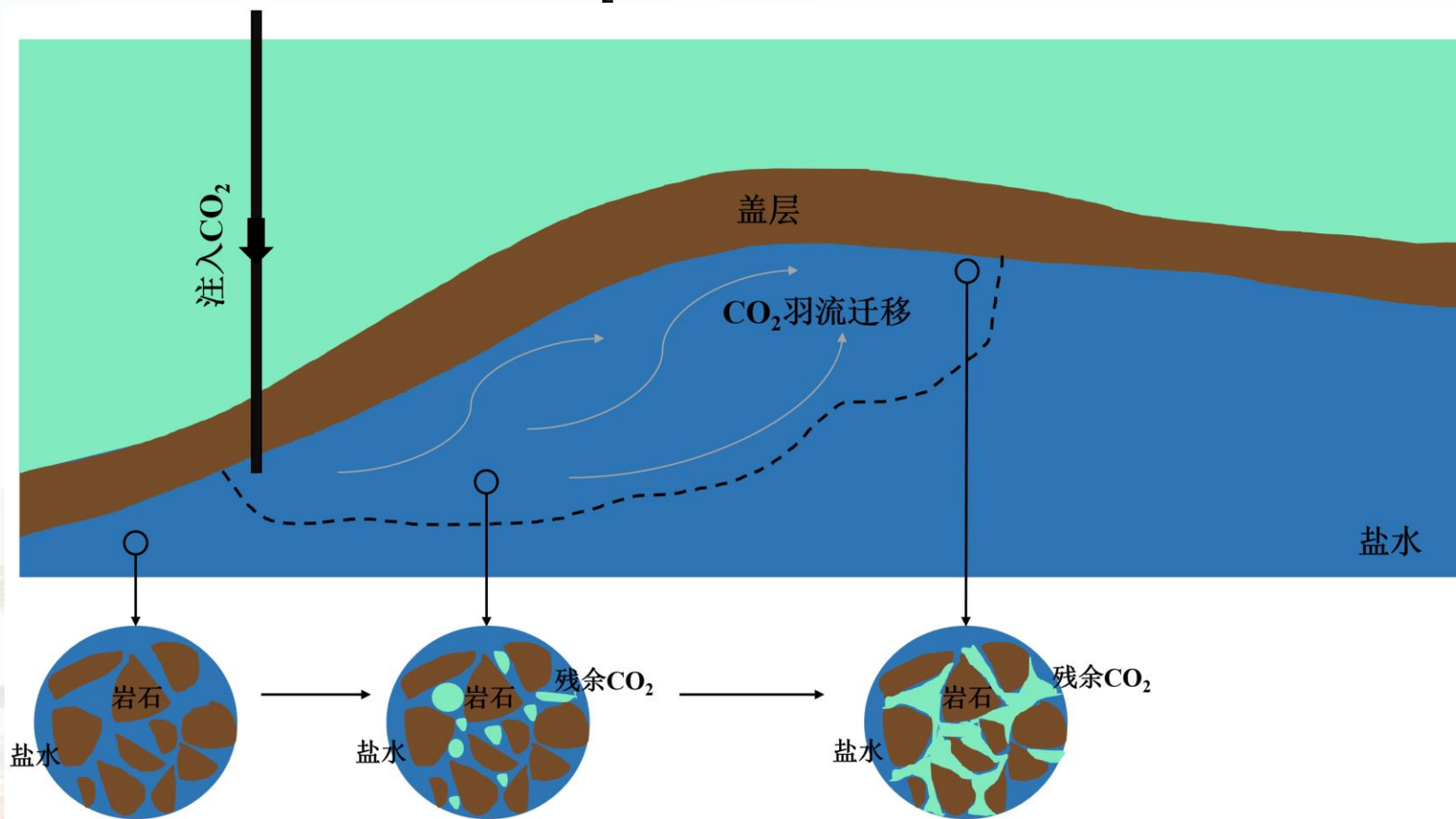
- 全图像尺寸的双重孔隙网络准静态两相渗流模型，计算得到的毛管力和相渗曲线与实验数据匹配很好，再次证明基于侵入压力对微孔分类的方法可以提高双重孔隙网络模型的预测能力

4.3 CO₂毛细管力圈闭与相渗曲线

➤ 基于全图像尺寸的双重孔隙网络模型进行CO₂毛细管力圈闭研究

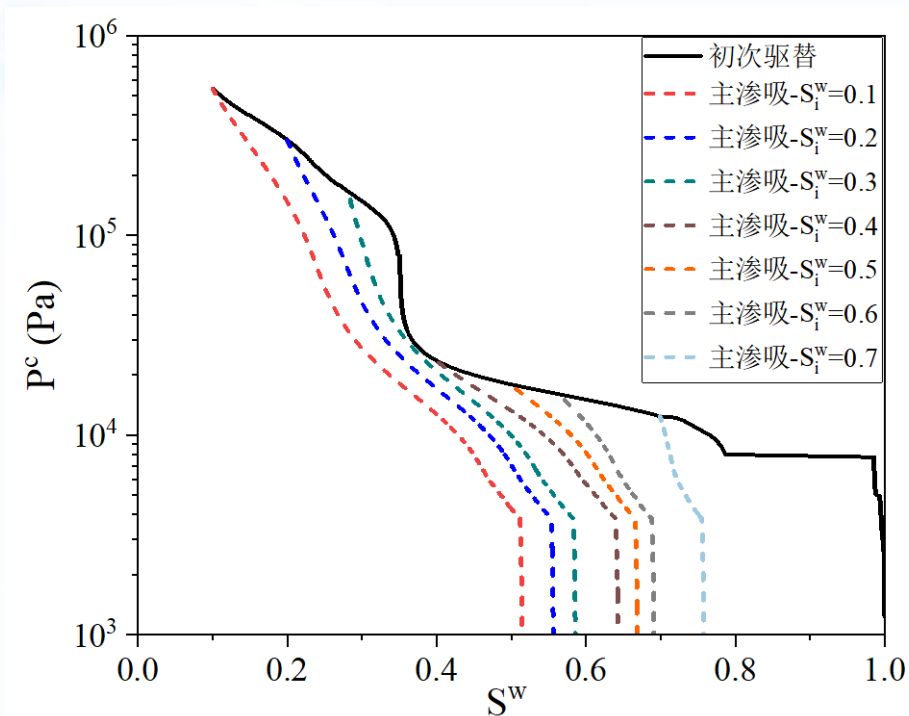
二氧化碳地质封存中，毛细管力具有其独特的优势，相对来说具有更广泛的应用空间和较短的封存周期，因此进行CO₂毛细管力圈闭研究至关重要

● CO₂毛细管力圈闭封存示意简图

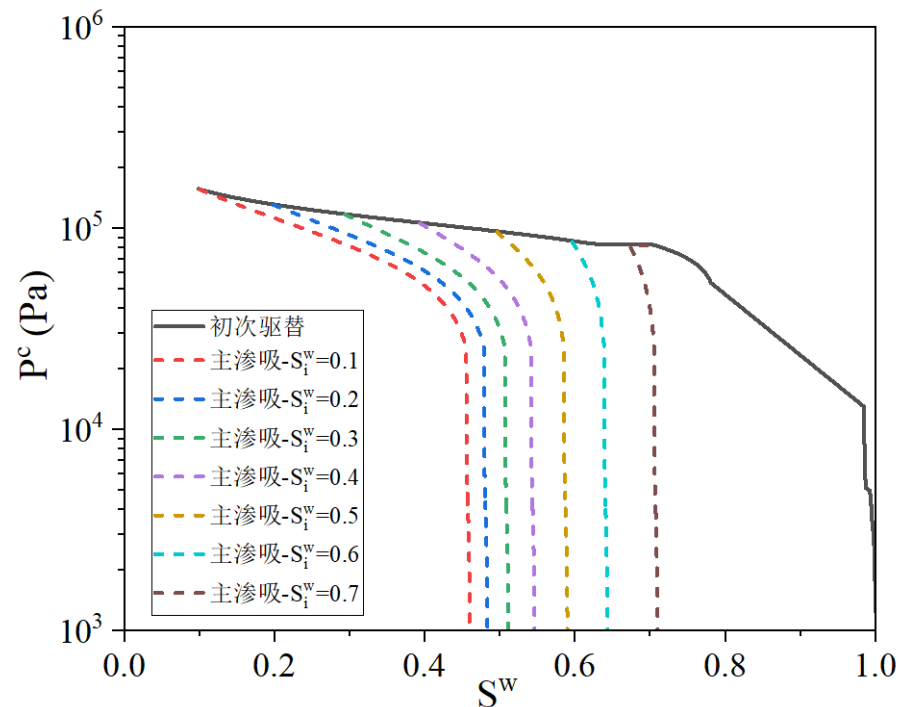


4.3 CO₂毛细管力圈闭与相渗曲线

➤ ES6.5岩样分别进行微孔为均质和非均质孔径的毛管力曲线计算



微孔为非均质孔径

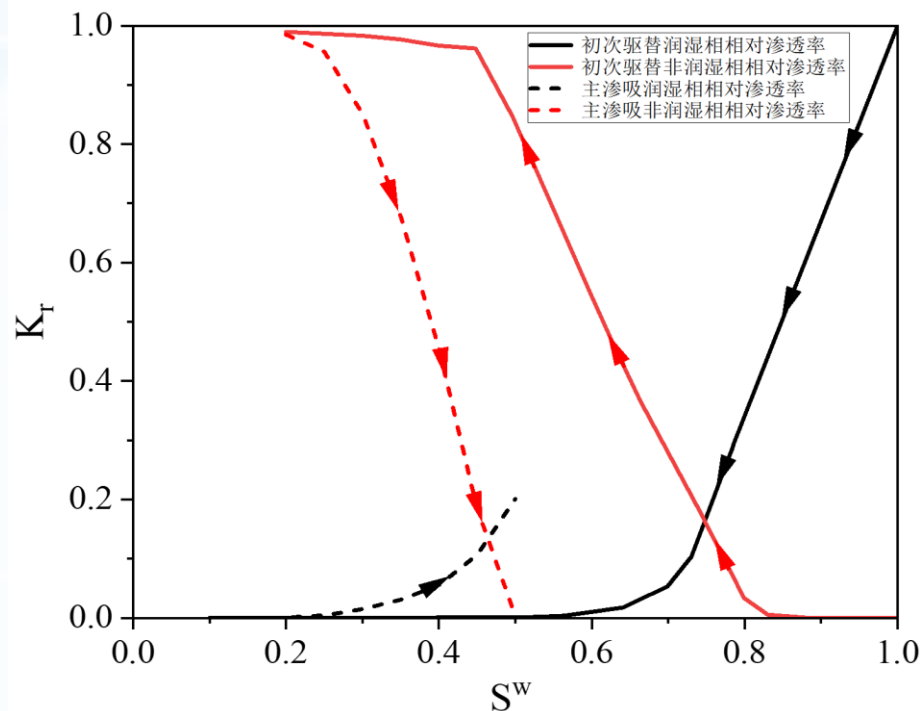


微孔为均质孔径

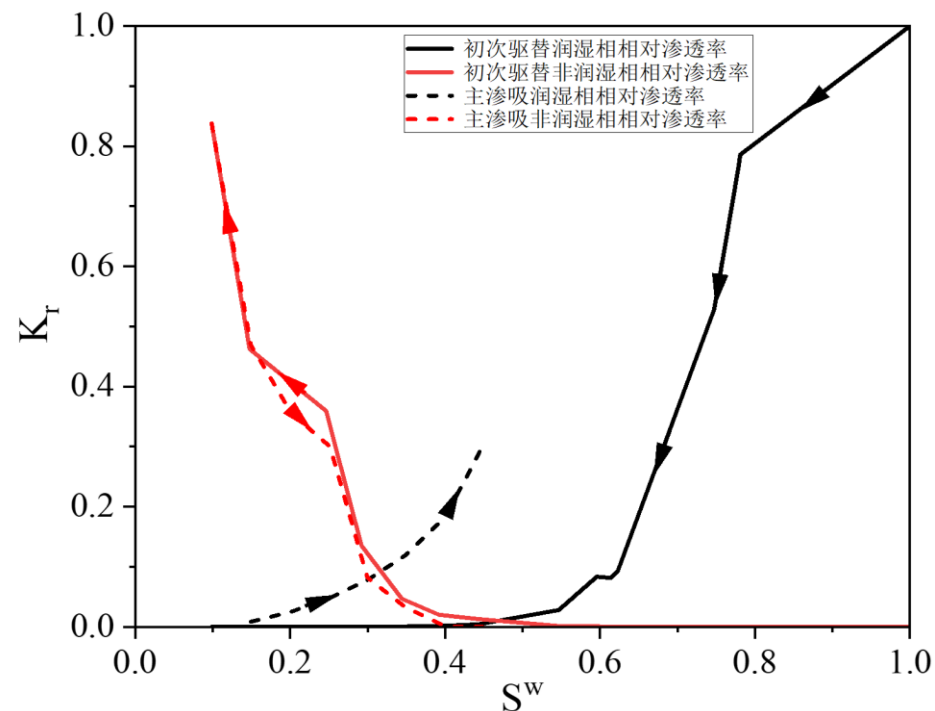
- 强水湿（接触角为0度）条件下，改变初次驱替后束缚水饱和度从0.1到0.7，微孔区无论采用非均质还是均质孔径分布，残余CO₂圈闭量都是随着初始CO₂含量的增加而增加
- 微孔均质孔径分布的驱替和渗吸毛管力曲线变化范围更小，变化趋势平缓

4.3 CO₂毛细管力圈闭与相渗曲线

➤ ES6.5岩样分别进行微孔为均质和非均质孔径的相渗曲线计算



微孔为非均质孔径

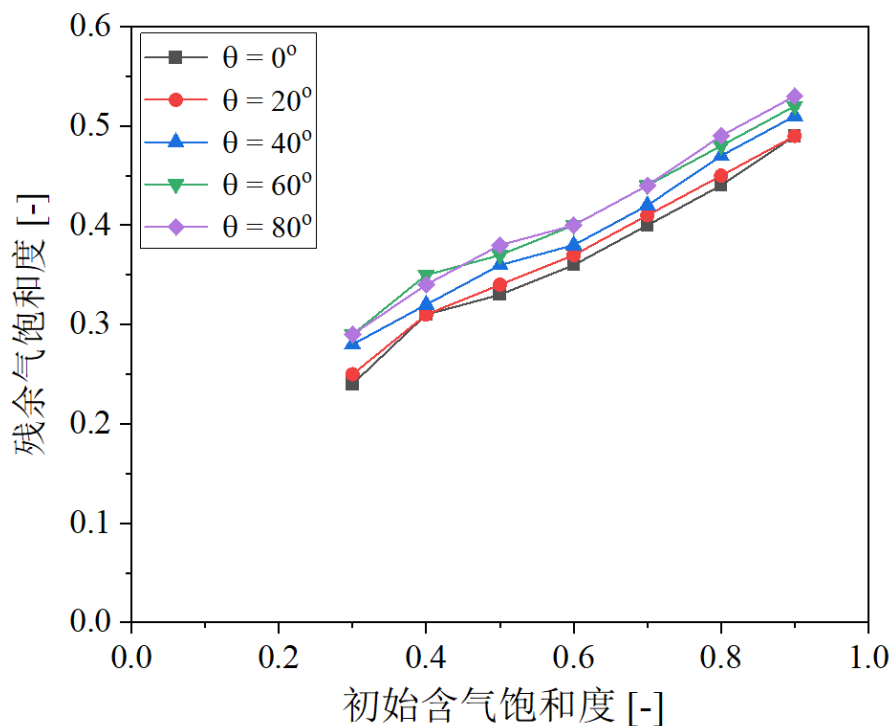


微孔为均质孔径

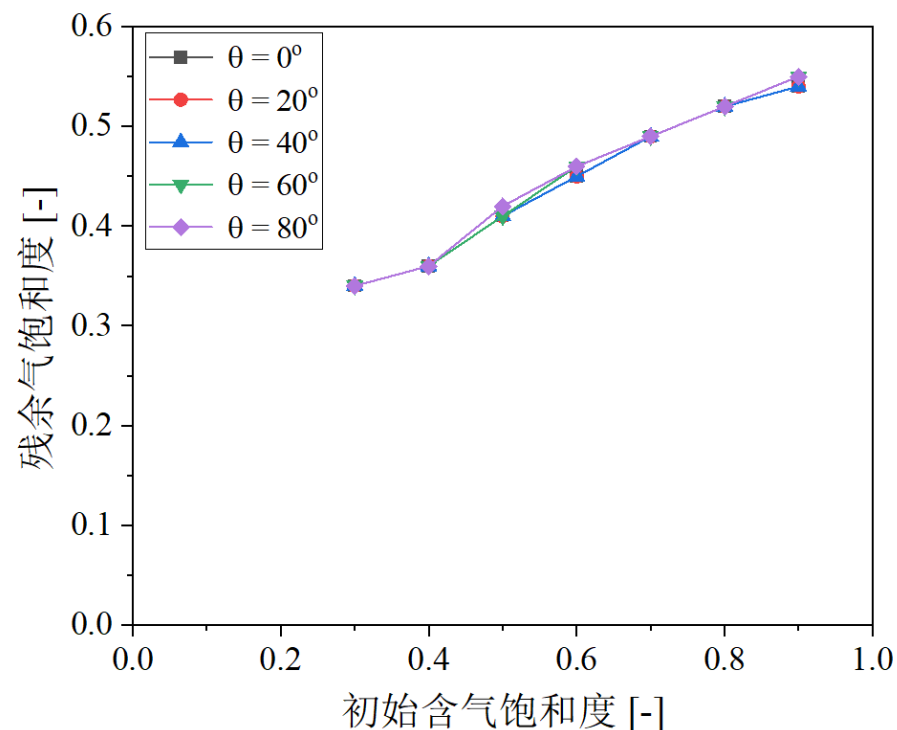
- 微孔区假设为均质孔径时，毛细滞后现象比较弱
- 微孔为非均质和均质孔径下的非润湿相（这里指CO₂）的相对渗透率较大，表明其流动能力较强，在一定的注入压力下，可以实现更高的注入速率

4.3 CO₂毛细管力圈闭与相渗曲线

➤ 基于Land模型探究不同接触角下CO₂初始含量对残余CO₂圈闭量的影响



微孔为非均质孔径

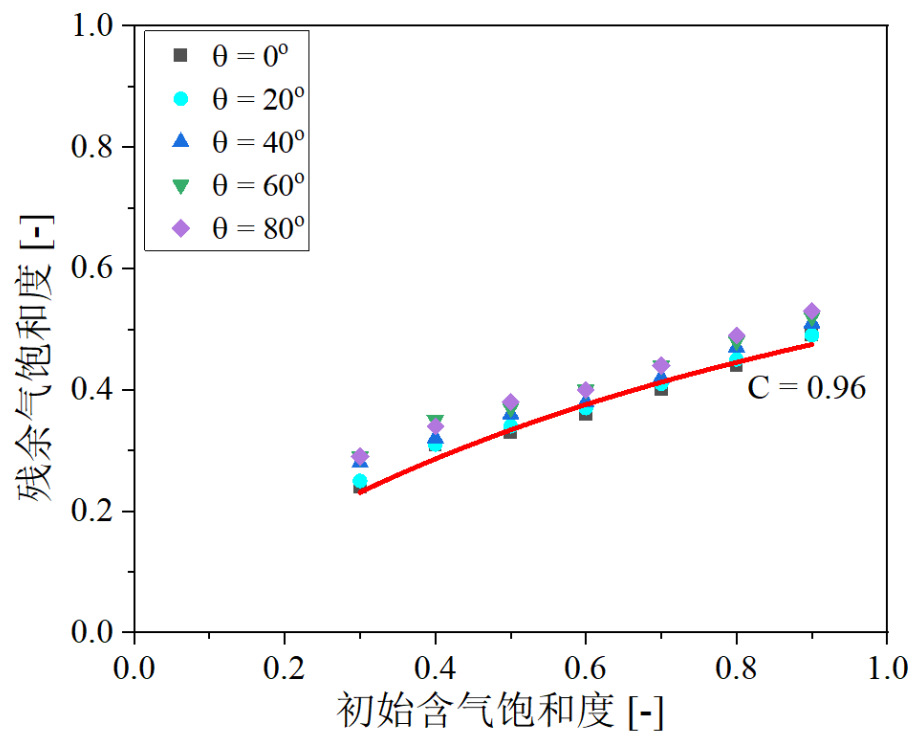


微孔为均质孔径

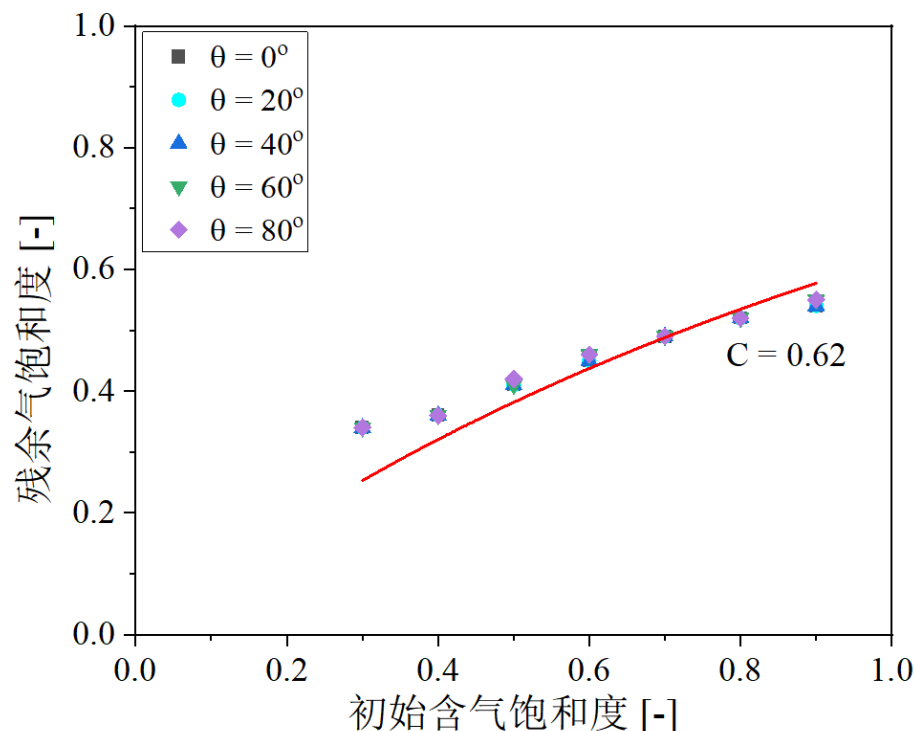
- 接触角从0度变化到80度，残余气饱和度（这里指CO₂）随着初始含气饱和度的增加而增加
- 微孔区采用均质孔径分布时，改变接触角，初始和残余气饱和度几乎不变化，图中可以看到曲线基本重合

4.3 CO₂毛细管力圈闭与相渗曲线

➤ 拟合Land圈闭系数



微孔为非均质孔径



微孔为均质孔径

- 基于双重孔隙网络准静态两相渗流模型计算得到的初始含气饱和度与残余气饱和度的关系与参考文献中二者数据库中曲线趋势很吻合
- 微孔为非均质孔径分布拟合的圈闭系数值0.96与经验公式计算的值0.90非常接近，但微孔为均质孔径时拟合的圈闭系数值0.62与经验公式计算的值0.82偏差较大



内容提要

1. 研究背景及研究现状
2. 碳酸盐岩多尺度数字岩心精细表征与
双重孔隙网络提取
3. 双重孔隙网络模型的预测能力研究
4. 碳酸盐岩毛管力与相渗曲线数值研究
5. 结论与展望



5.1 主要结论

(1) 当假设**微孔区均质**（统一的平均孔径）时，双重孔隙网络模型可以较好的预测绝对渗透率和地层因子。然而，对于真实的碳酸盐岩，即**微孔区非均质的孔径分布**，**双重孔隙网络模型低估绝对渗透率超过一个数量级**。为了提高模型的预测精度，我们测试了两种方法，包括**基于微孔单元内体素个数的算术平均求解单元平均孔径以及基于侵入压力对微孔区的分类**。这两种方法都能显著提高双重孔隙网络模型对绝对渗透率的预测性能。

(2) **基于侵入压力对微孔区域进行分类**的双重孔隙网络模型优化方法，显著提升了模型对两相渗流参数，即**毛细管力和相对渗透率曲线**的预测能力。优化后模型计算所得曲线与实验数据吻合良好，证明该优化方法的可靠性与适用性。

(3) 二氧化碳和盐水两相驱替、渗吸数值模拟结果表明，在水湿条件下，**二氧化碳残余饱和度随着初始二氧化碳饱和度的增加而增加**。此外，基于真实**微孔区非均质**的碳酸盐岩建立的双重孔隙网络模型，计算得到的Land模型圈闭系数与经验公式计算数值较为吻合

5.2 本文创新点

创新点 1

研究现状	本文创新
目前研究主要聚焦于如何建立双重孔隙网络模型，很少针对模型本身预测能力的研究	通过模型对比，研究了双重孔隙网络模型对单相以及两相渗流参数的预测能力，并提出了优化方法

创新点 2

研究现状	本文创新
针对复杂多尺度孔隙结构中的微观流动机理研究比较欠缺	基于表征这种多尺度孔隙结构的双重孔隙网络模型，揭示碳酸盐岩多尺度孔隙结构对二氧化碳毛细力圈闭的作用机制

5.3 工作展望

(1) 当由于实验条件的限制，无法获取微孔区域精细的侵入压力图谱时，可以尝试**将孔径分布与微孔区域的相关长度相结合**，进而实现简便而又精细的表征微孔孔径分布，优化双重孔隙网络模型的预测能力。

(2) 本文只进行了**准静态两相流动模拟**，后续的研究中可以加入时间项，实现**动态双重孔隙网络两相流动模拟**，从而更加精细全面的进行二氧化碳毛管力圈闭的影响与控制机制的研究。

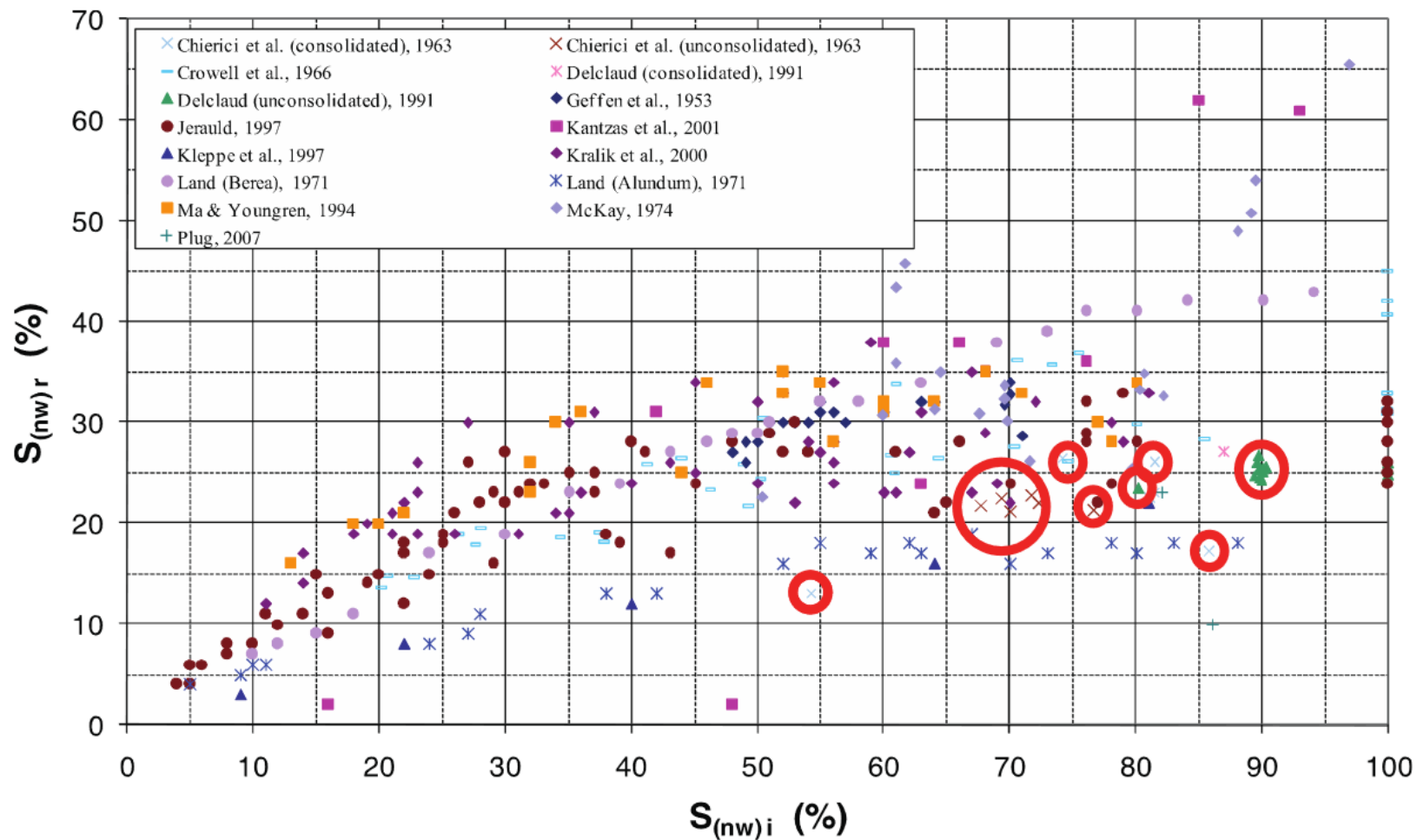




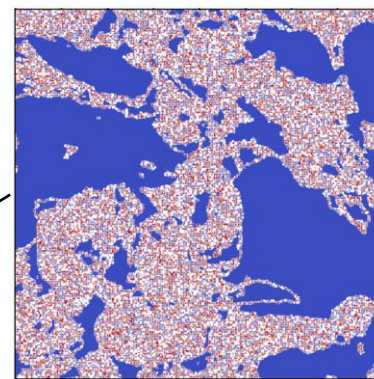
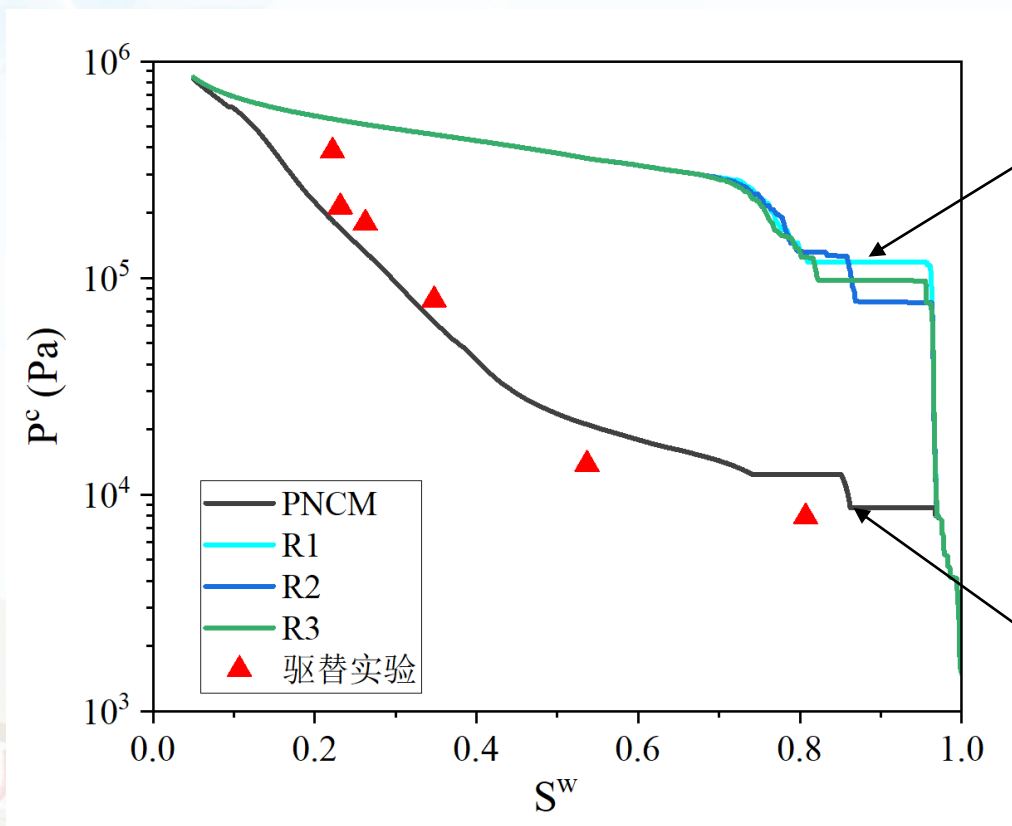
谢 谢!

敬请各位专家批评指正!

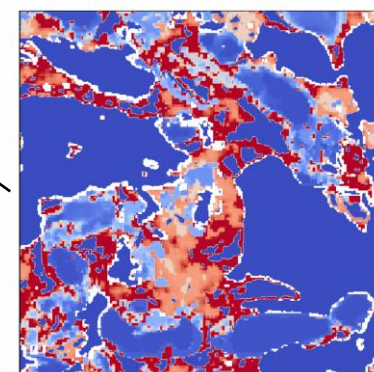
初始含气饱和度和残余气饱和度关系数据库



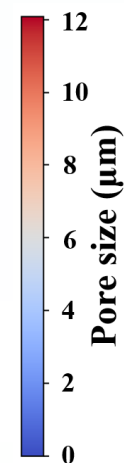
微孔孔径未精细表征



基于压汞曲线随机分布的微孔孔径

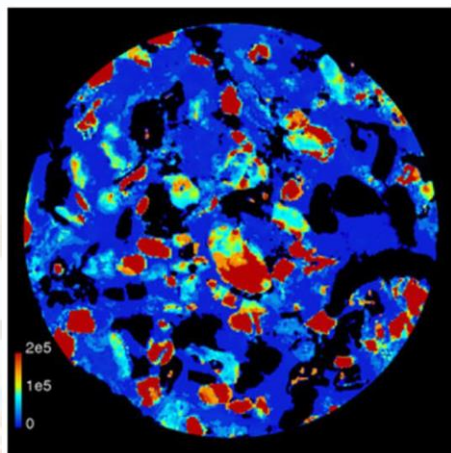
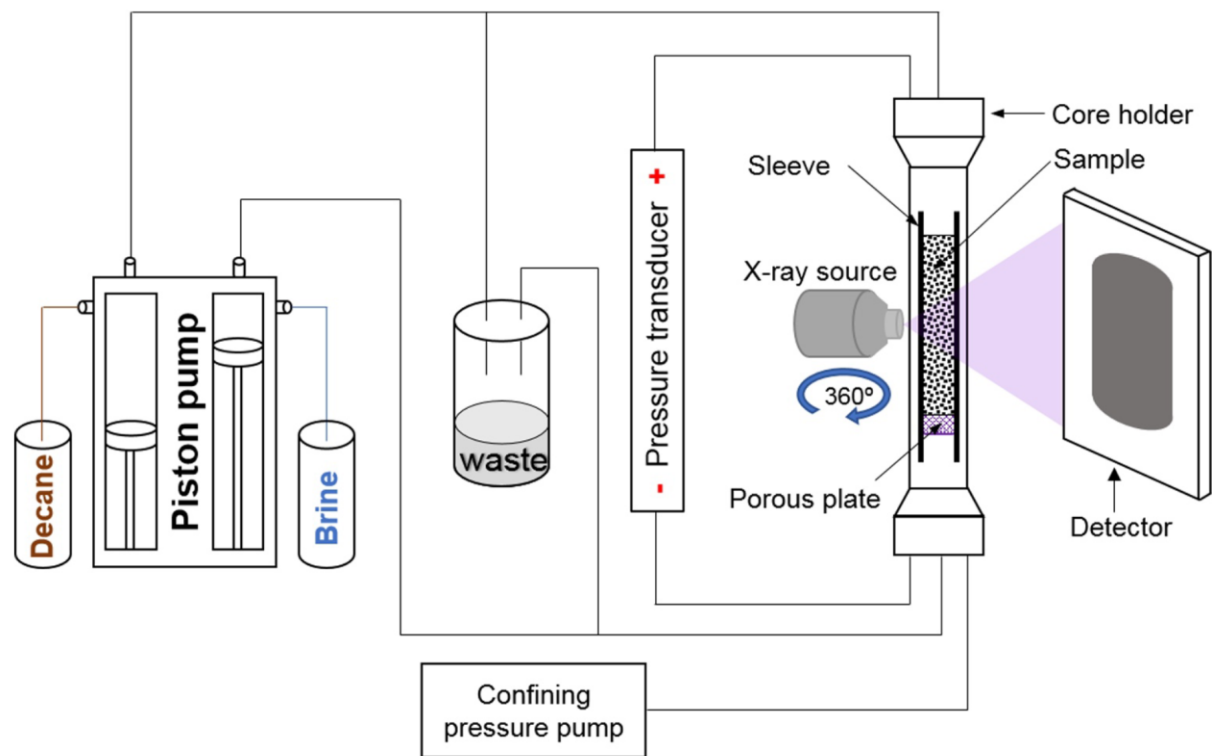


基于侵入压力精细表征的微孔孔径



- 将孔径分布与相关长度结合

侵入压力图谱



● 侵入压力图谱

