



煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室

State key laboratory of coal mine disaster dynamics and control

SKL-CMD



重庆大学  
CHONGQING UNIVERSITY



第十八届全国渗流力学学术会议

2025年8月21-23日，廊坊

# 页岩多尺度数字岩心构建与微纳尺度气水两相流动数值模拟

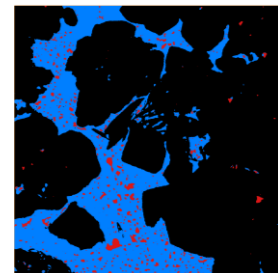
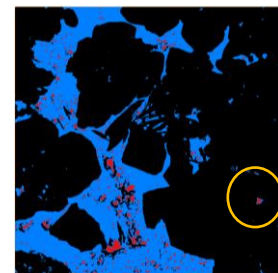
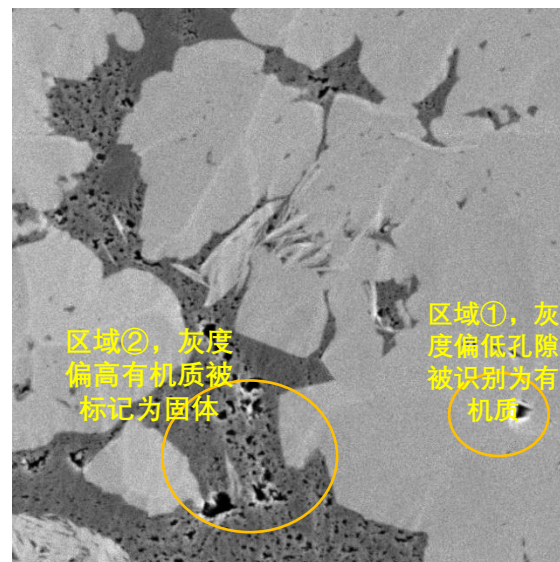
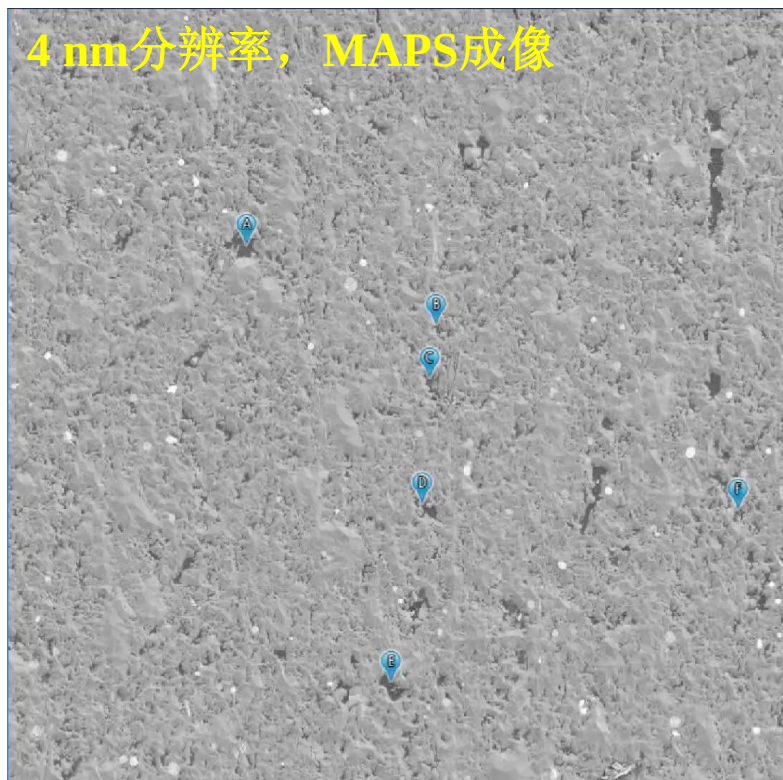
秦朝中，王志伟，荣健淇，史博文

重庆大学

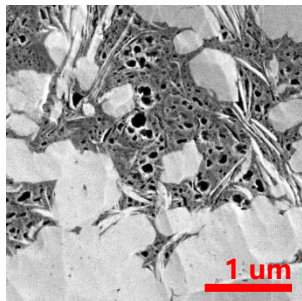
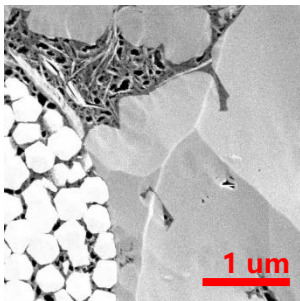
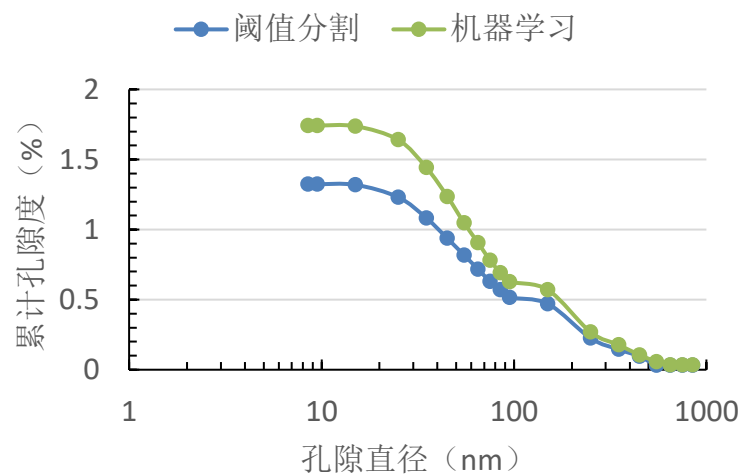
- 1. 页岩多尺度孔隙结构与连通性**
- 2. 页岩多尺度数字岩心构建**
- 3. 微纳尺度气水两相流动**
- 4. 结论与展望**

# 页岩多尺度孔隙结构与连通性：各种表征手段

## 多重成像与图像分析技术：

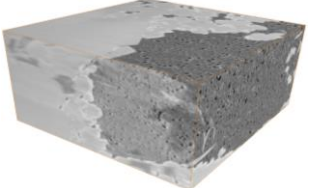
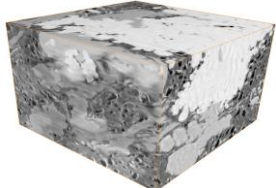
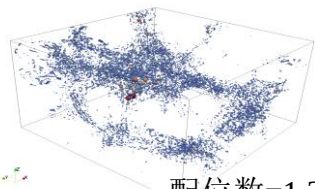
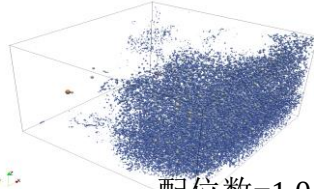
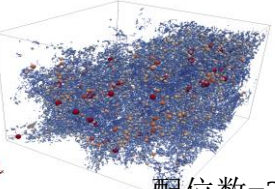
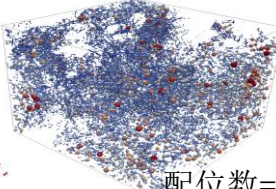
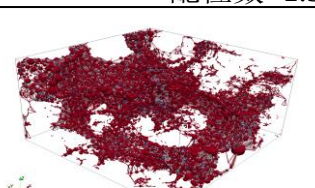
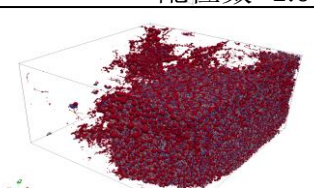
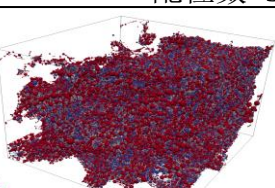
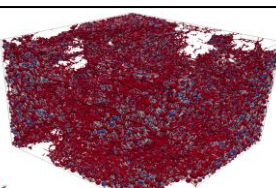


## 机器学习的图像分割技术是必须的！

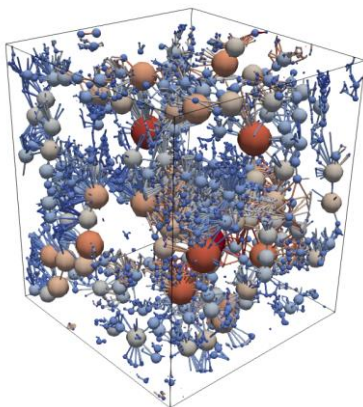


# 页岩多尺度孔隙结构与连通性：各种表征手段

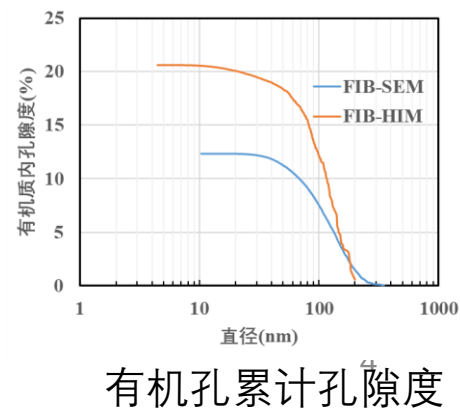
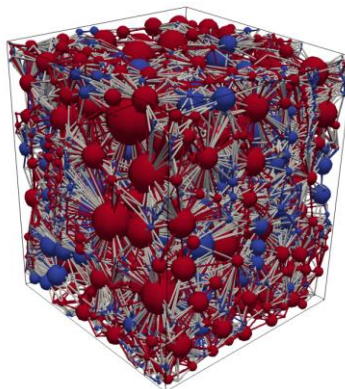
## 多重成像与图像分析技术：

|      | 海绵状有机孔                                                                                       | 海绵状有机孔                                                                                        | 蜂窝状有机孔                                                                                         | 混合有机孔                                                                                          |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 原始图像 |             |             |             |             |
| 单重孔网 | <br>配位数=1.3 | <br>配位数=1.0 | <br>配位数=3.1 | <br>配位数=2.2 |
| 双重孔网 |             |             |             |             |

单重孔网(配位数=3.6)



双重孔网(配位数=11)



10/12/202

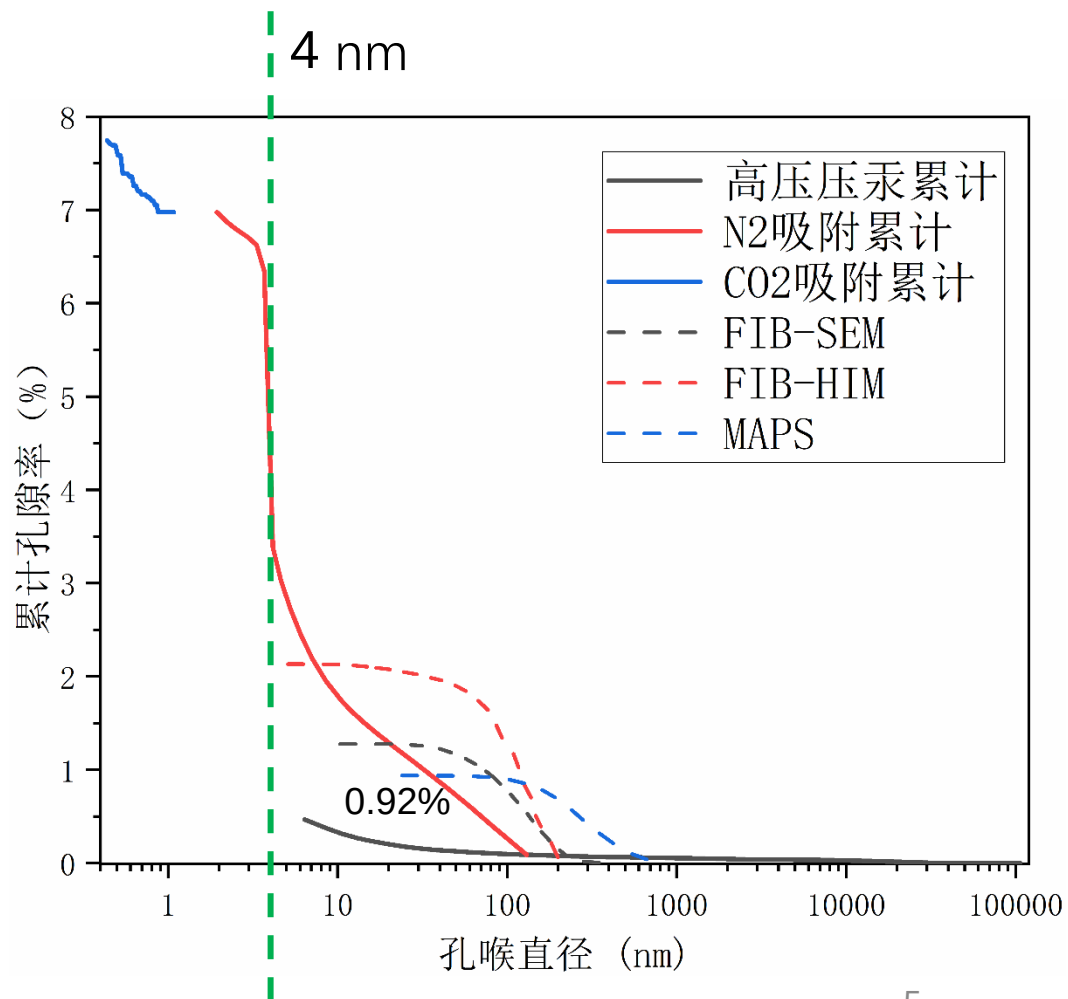
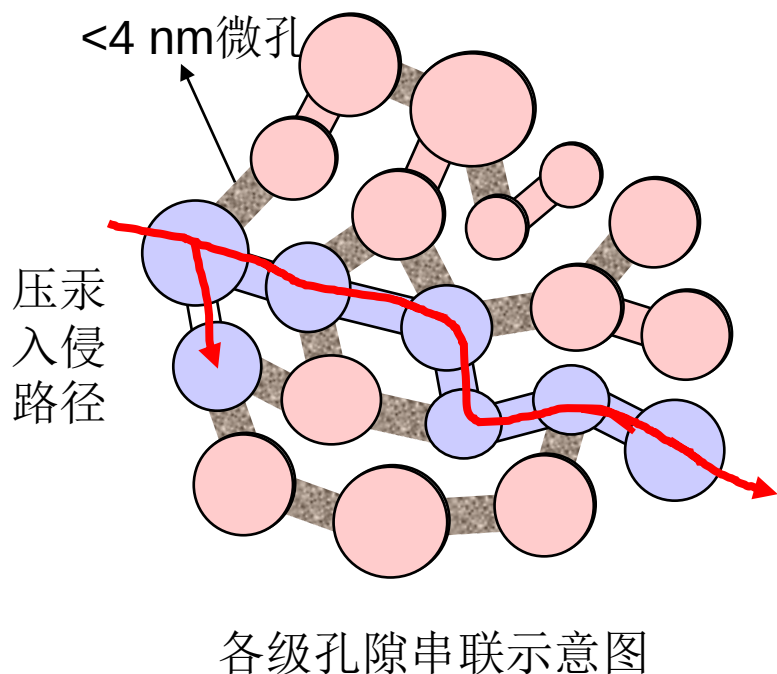
有机孔累计孔隙度



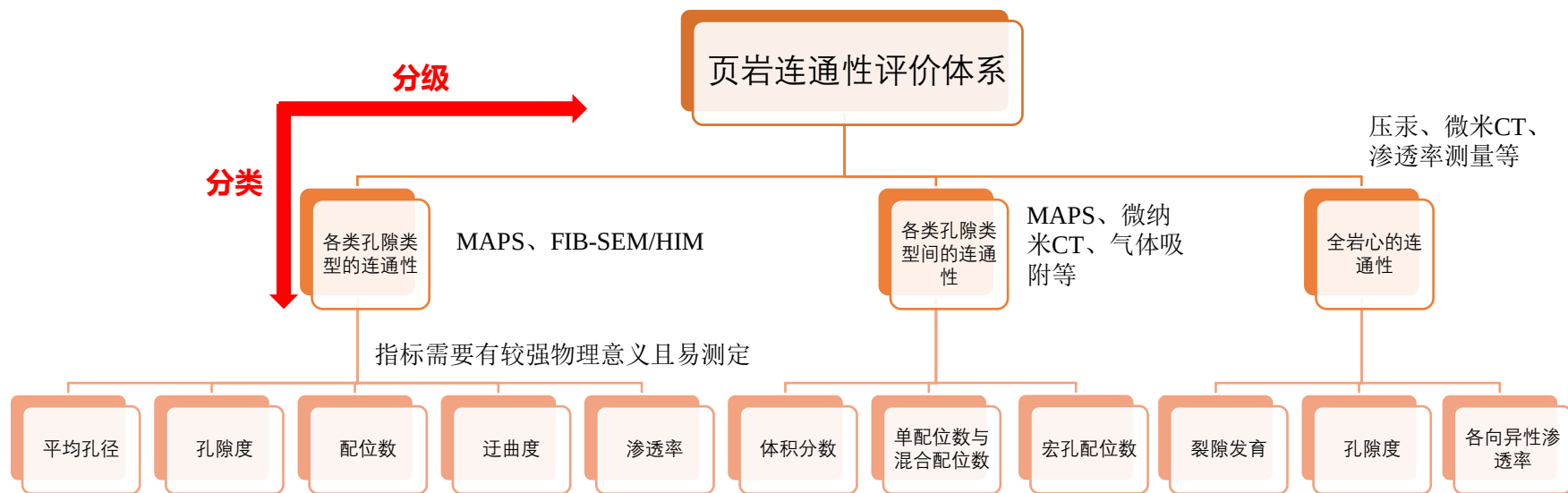
# 页岩多尺度孔隙结构与连通性：各种表征手段

## 流体注入法：

高压压汞、低温气体吸附、自发渗吸+核磁、武德合金注入等



# 页岩多尺度孔隙结构与连通性：连通性



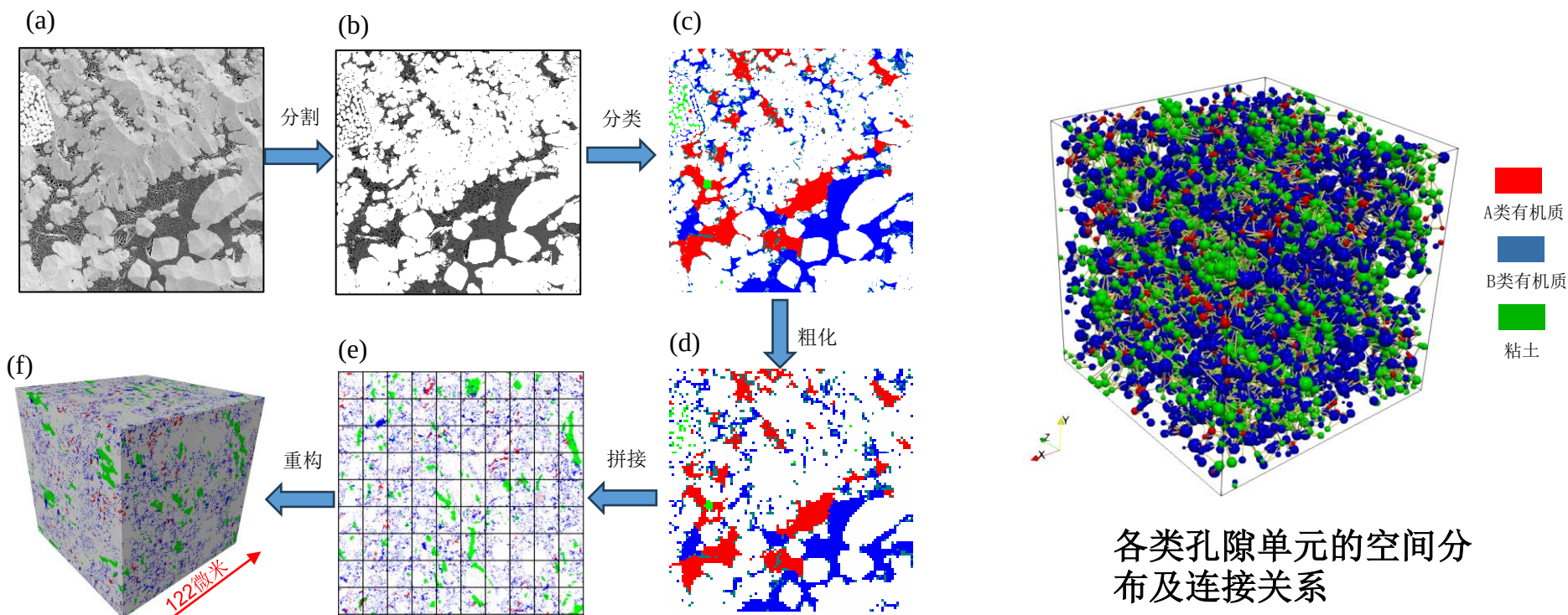
## 小结:

- ❑ 多重成像可以直观看到多尺度孔隙结构，但是单一成像中视域与分辨率互相制约
- ❑ 流体注入可以获得多尺度孔径分布，但是无法提供空间分布特征
- ❑ 现有连通性评价方法主要依靠静态评价，需要引入流动性指标，特别是揭示多尺度孔隙结构是如何影响与控制流动性

1. 页岩多尺度孔隙结构与连通性
2. 页岩多尺度数字岩心构建
3. 微纳尺度气水两相流动
4. 结论与展望

# 页岩多尺度数字岩心构建：基本流程

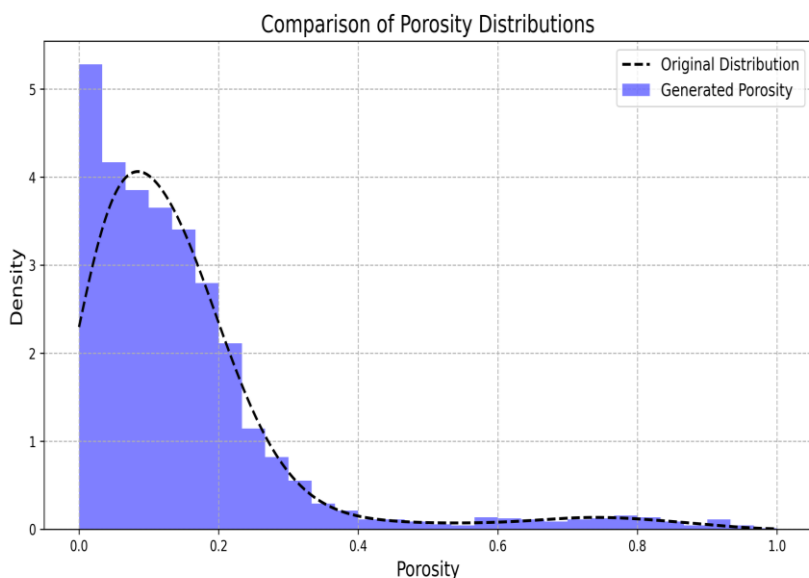
1. 在MAPS上，利用分水岭图像分割方法得到有机质单元和粘土单元分布
2. 利用有机质单元的面孔率对有机质单元进行分类（连通与不连通）
3. 将有机质分类信息跨尺度传递到粗化后的MAPS图像
4. 利用深度学习生成表征单元级数字岩心包括各类孔隙单元的含量及空间连接关系



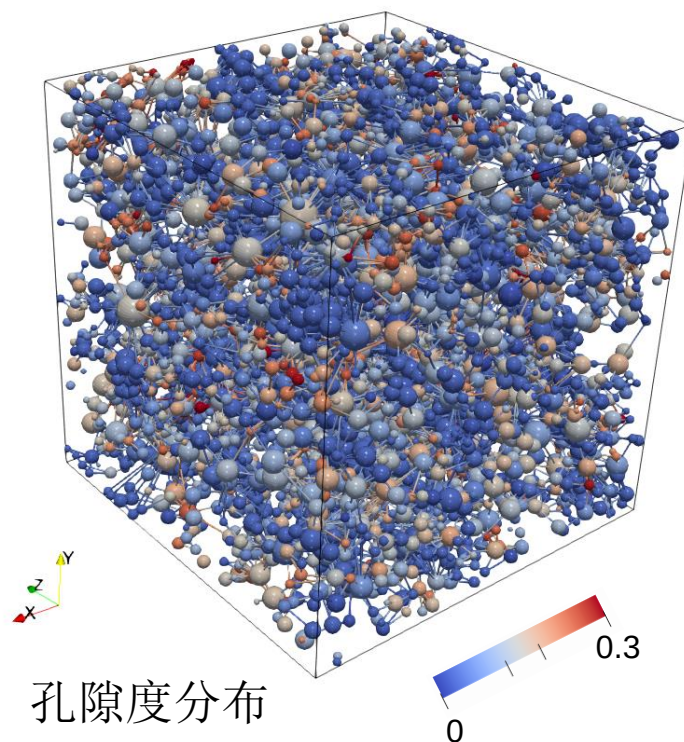


# 页岩多尺度数字岩心构建：基本流程

1. 在MAPS上，利用分水岭图像分割方法得到有机质单元和粘土单元分布
2. 利用有机质单元的面孔率对有机质单元进行分类（连通与不连通）
3. 将有机质分类信息跨尺度传递到粗化后的MAPS图像
4. 利用深度学习生成表征单元级数字岩心包括各类孔隙单元的含量及空间连接关系

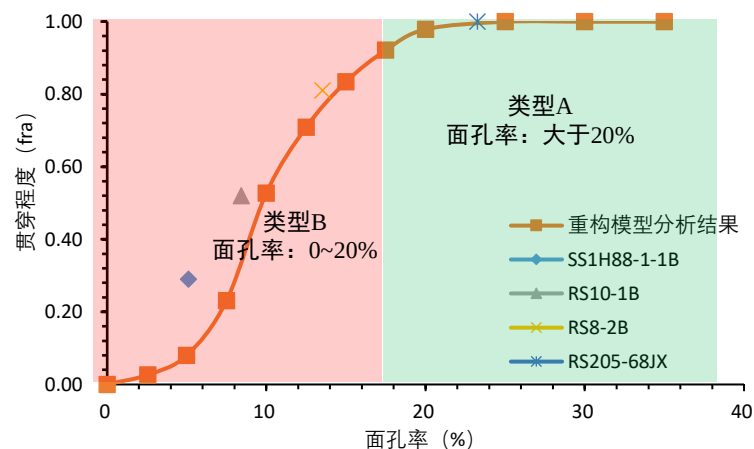
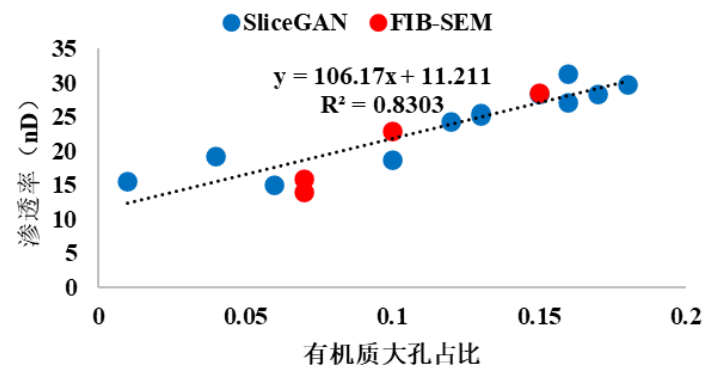
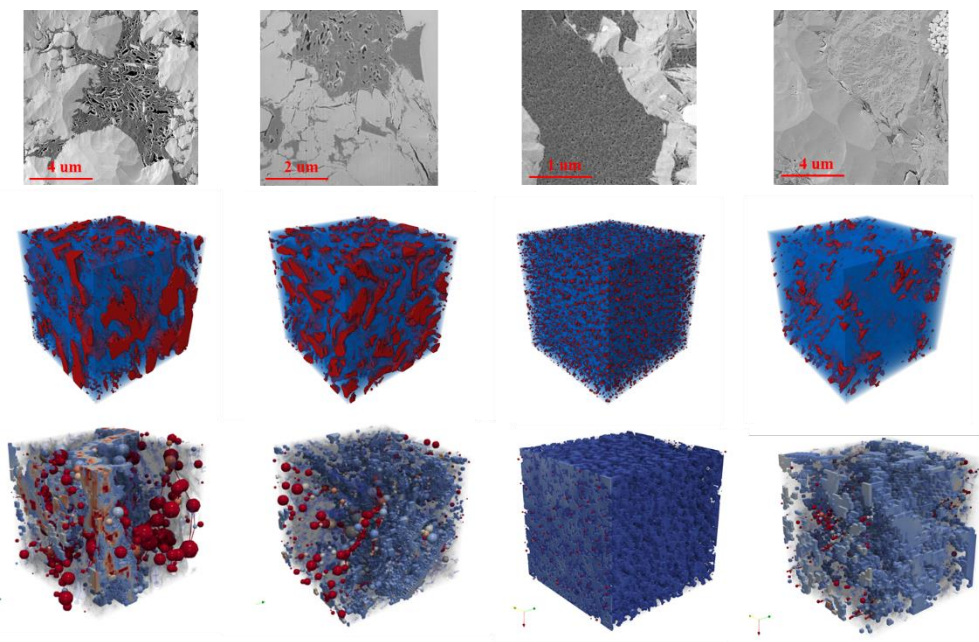


10/12/2025

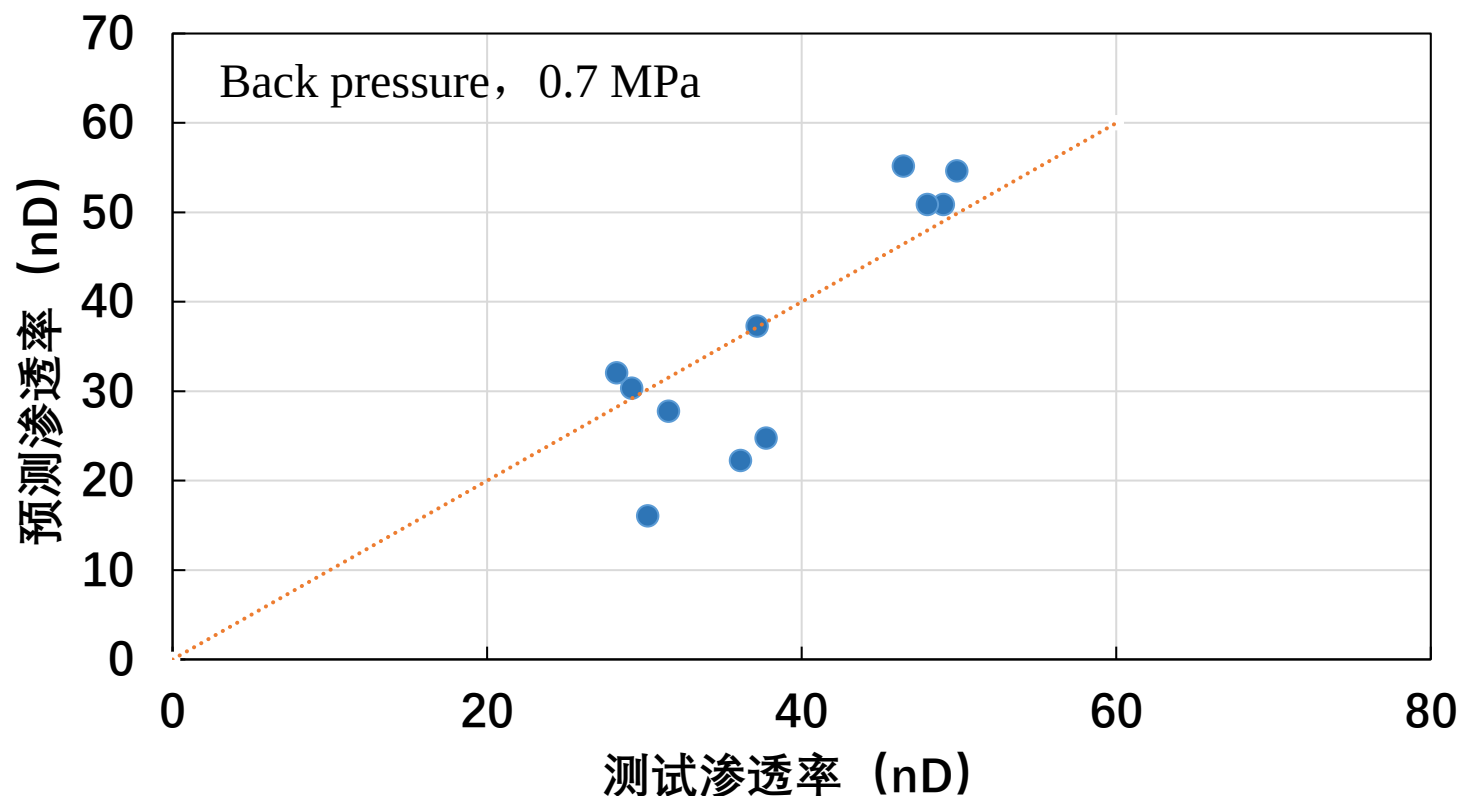


# 页岩多尺度数字岩心构建：有机质分类依据

基于FIB-SEM（4 nm分辨率）与深度学习三维重构，有机质可分辨孔隙<30%，其中可分辨孔隙面孔率>20%时，可连通，粘土可分辨孔隙度<5%，不连通，因此我们通过有机质可分辨孔隙将有机质分为A类有机质和B类有机质。



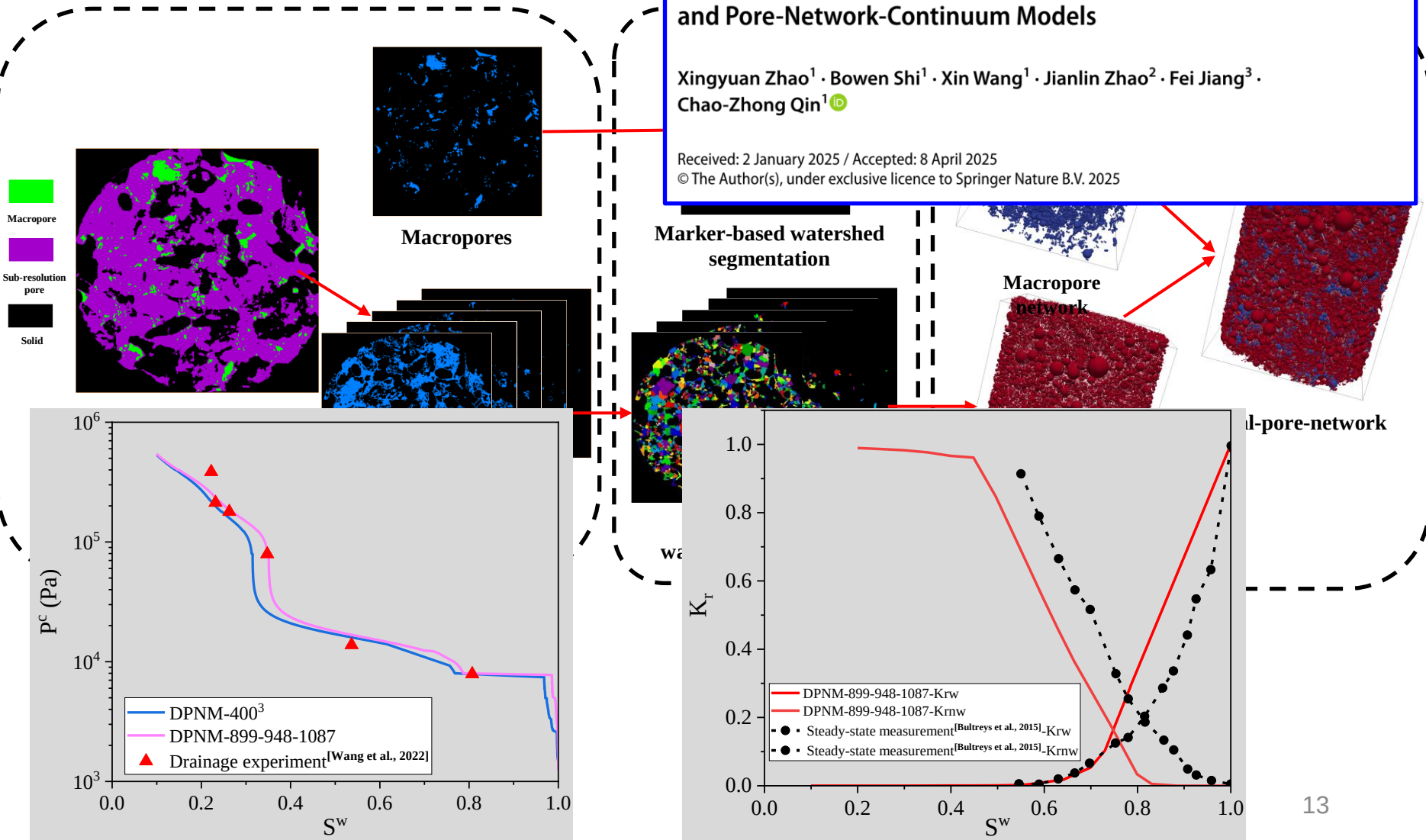
# 页岩多尺度数字岩心构建：渗透率预测



**基于构建的页岩多尺度数字岩心，利用多尺度孔隙网络模型预测的表观渗透率与实验测量有较好的匹配**

1. 页岩多尺度孔隙结构与连通性
2. 页岩多尺度数字岩心构建
3. 微纳尺度气水两相流动
4. 结论与展望

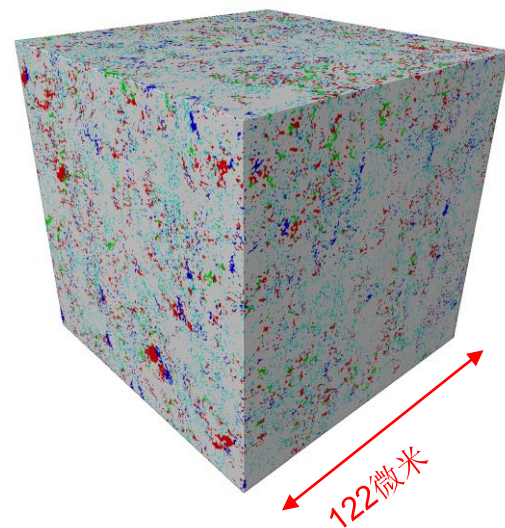
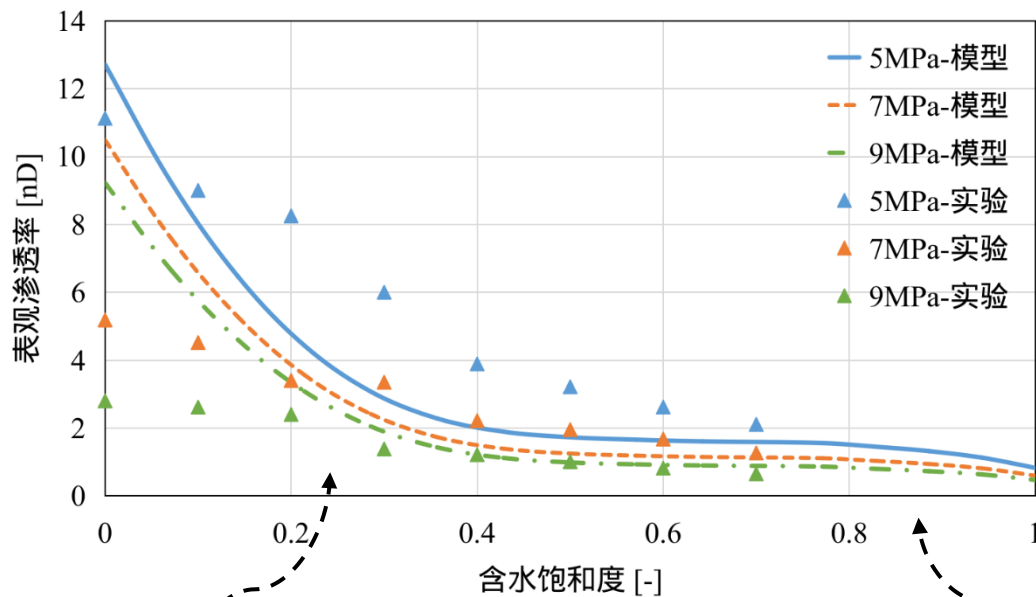
## 多尺度孔隙网络模型:





# 微纳尺度气水两相流动

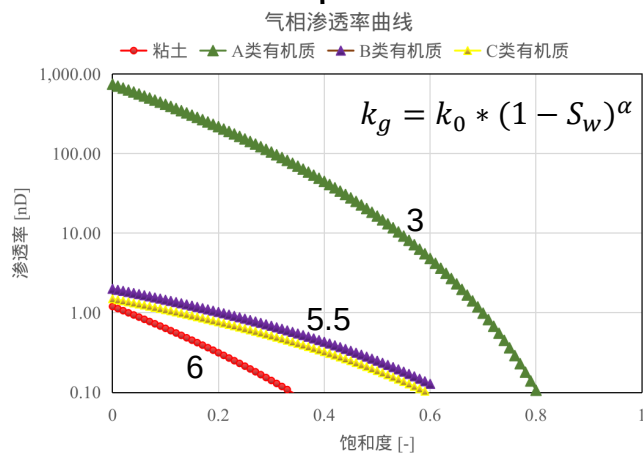
表观渗透率



压力衰减实验

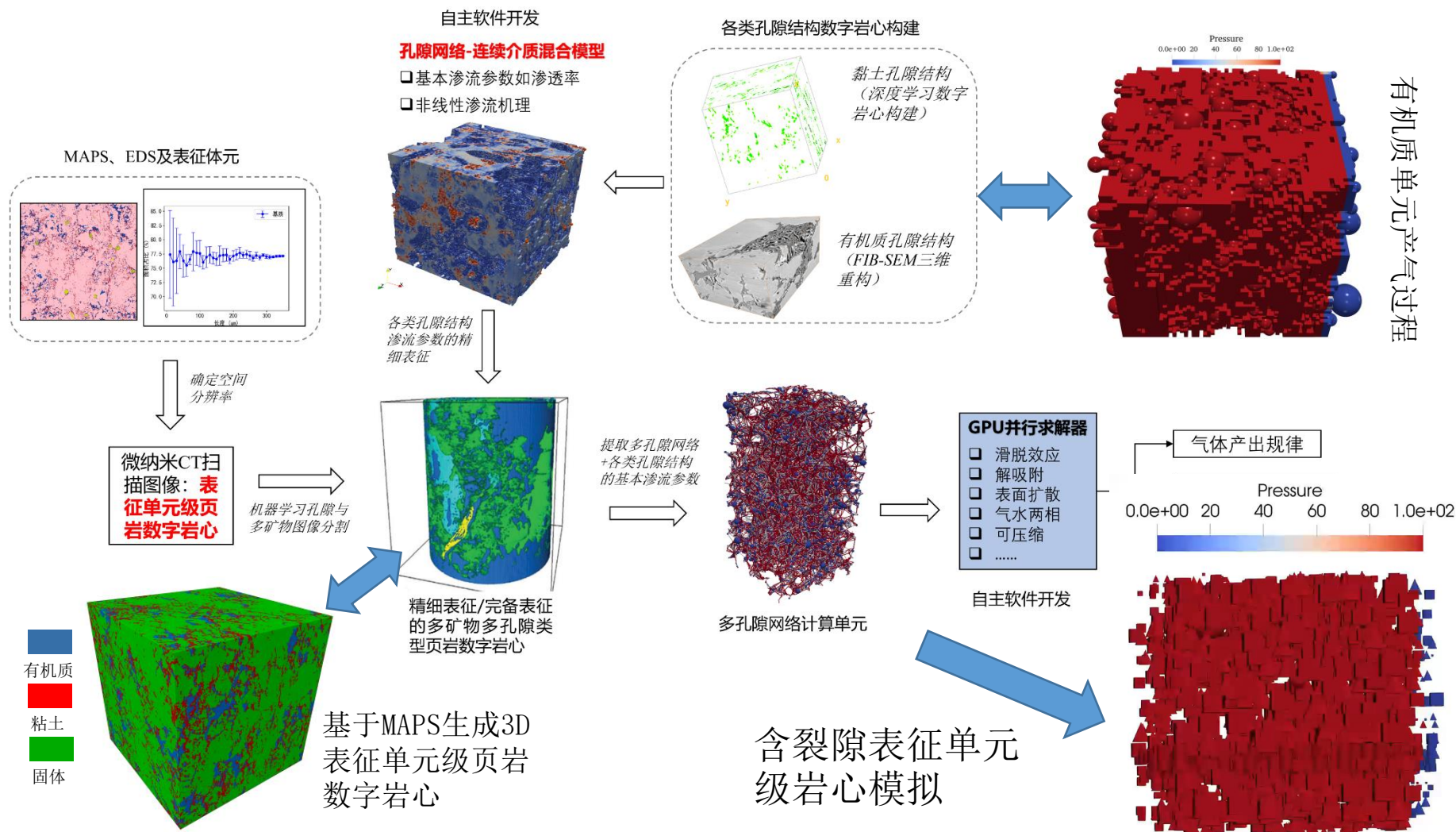


各类孔隙单元的孔渗参数升尺度



# 页岩多尺度数字岩心构建与微纳流动模拟

构建了跨尺度信息融合的页岩孔隙结构定量表征技术，建立了页岩多尺度数字岩心渗流模拟技术包括孔隙网络-连续介质模型和多重孔隙网络模型。



1. 页岩多尺度孔隙结构与连通性
2. 页岩多尺度数字岩心构建
3. 微纳尺度气水两相流动
4. 结论与展望

- [多重成像与流体注入法](#)是页岩多尺度孔隙结构表征的主要手段；
  - 基于[孔隙单元分类](#)和[深度学习三维重构](#)，我们可以利用MAPS图像构建表征单元级页岩多尺度数字岩心；
  - 我们建立了针对单相和准静态两相的[多尺度孔隙网络模型](#)；
  - 我们可以[较好地预测](#)页岩基质的单相与两相渗流参数。
- 
- ❖ 开展地层条件下的气水流动模拟研究；
  - ❖ 页岩岩心尺寸下的微裂缝/纹层表征及应力敏感性；
  - ❖ 储层条件下页岩全岩心的气体流动性研究。

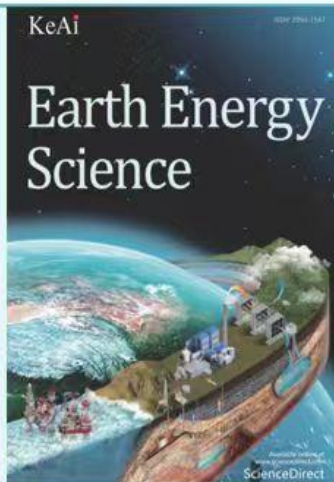


# A new open-access journal

<https://www.sciencedirect.com/journal/earth-energy-science>



## 地球能源科学 (英文) *Earth Energy Science*



主管单位：中华人民共和国教育部

主办单位：重庆大学 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室

ISSN: 2950-1547

刊期：季刊（创刊初期）

期刊定位：**能源领域世界一流科技期刊**。重点关注地球能源勘探、低碳开发、清洁利用、储能及碳封存等领域**基础性、前沿性和创新性**成果，服务国家“双碳”战略，集科学精神、科学知识、科学理念三者并重。

专业领域：矿产、油气、水合物、地热、储能、碳储

主  
编



卢义玉

重庆大学副校长，国家杰青、长江学者；主持973课题、教育部创新团队项目等40余项；获国家科技进步奖3项、省部级奖10项



Ranjith Pathegama Gamage

澳大利亚莫纳什大学教授，中国工程院外籍院士、澳大利亚工程院院士；发表论文540余篇，引用24709次，h-index 85



Derek Elsworth

美国宾州州立大学教授，中国工程院外籍院士、美国工程院院士；发表学术论文740余篇，引用23068次，h-index 74

### 特色

- 开放获取、免版面费、单盲评审
- 高起点新刊、聚焦地球能源前沿
- ScholarOne投稿系统
- ScienceDirect (Elsevier) 传播平台



官 网: <https://www.sciencedirect.com/journal/earth-energy-science>

邮 箱: [ees@cqu.edu.cn](mailto:ees@cqu.edu.cn)

Twitter: @Journal\_EES

**欢迎关注!! 欢迎投稿!! 欢迎加入!!**



煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室  
State key laboratory of coal mine disaster dynamics and control



# A new open-access journal

<https://www.sciencedirect.com/journal/earth-energy-science>

☐ Research article • Open access  
**A novel method for calculating the dynamic reserves of tight gas wells considering stress sensitivity**  
Chang-Hao Chen, Jing Luo, Jian Cao, Jing Liang, ... Tan-Yin Zhu  
Pages 1-8  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Dynamic tensile behaviour of rocks under confining pressure and high-rate loadings**  
Kai Liu, Chunjiang Zou, Jian Zhao  
Pages 9-21  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Experimental insights into frictional resistance and slip pattern of granite fractures and implications for thermoshearing prediction**  
Changlun Sun, Jeoung Seok Yoon, Ki-Bok Min, Li Zhuang  
Pages 22-37  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Challenges and development direction of deep fragmented soft coalbed methane in China**  
Yiyu Lu, Culin Zhao, Zhaolong Ge, Yunzhong Jia, ... Jianyu Mi  
Pages 38-64  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives**  
Qi Zhang, Xuguang Chen, Lubao Luan, Fei Shao, Xuelin Liu  
Pages 65-84  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Mathematical principle and engineering application of end-mining technology with non-pillar**  
Jianying Qiao, Zhiqiang Wang, Tinghao Li, Yun Zhao  
Pages 85-97  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Research status of creep-fatigue characteristics of salt rocks and stability of compressed air storage in salt caverns**  
Marion Fourmeau, Wen Liu, Zongze Li, Daniel Nellas, ... Wei Liu  
Pages 98-116  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Short communication • Open access  
**The benefits and challenges of well monitoring of Gulong shale oil**  
Yin Jia Chen, Han Yi Wang, Mukul Sharma  
Pages 120-122  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Experimental insights into the nucleation and propagation of hydraulic fractures in anthracite coalbed methane reservoirs**  
Saipeng Huang, Dameng Liu, Enrique Gomez-Rivas, Albert Griera, ... Yang Zhao  
Pages 123-143  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Quantum chemical calculation of the reactions between the side-chain active groups of coal and hydroxyl radical catalyzed by an external electric field**  
Yu Wang, Haitao Li, Rongyang Lou, Jiachen Wang, Minggao Yu  
Pages 144-158  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Review article • Open access  
**Development status and prospect of salt cavern energy storage technology**  
Jianfeng Liu, Jianliang Pei, Jinbing Wei, Jianxiang Yang, Huining Xu  
Pages 159-179  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Review article • Open access  
**A systematic review of Coda Wave Interferometry technique for evaluating rock behavior properties: From single to multiple perturbations**  
Jie Chen, Chao Zhu, Yuanxuan Pu, Yichao Rui, ... Derek B. Apel  
Pages 180-192  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Nitrogen injection for enhanced coal seam gas extraction (N<sub>2</sub>-ECGE): A simulation study**  
Feng Du, Yiyang Zhang, Kai Wang, Jiayin Sun, Yuanxuan Xu  
Pages 193-202  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Research on crack detection method for shallow-buried underground compressed air energy storage cavern based on improved mask R-CNN model**  
Nan Zhang, Xinrong Gao, Xingping Lai, Huicong Xu, ... Hongling Ma  
Pages 203-212  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Two-step numerical analysis of thermal stress in fractured granite under complex laboratory heating conditions**  
Dong-Joon Yoon, Changlun Sun, Li Zhuang  
Pages 213-227  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Impact of salinity on spontaneous emulsification near water/oil interfaces**  
Lifeng Yan, Amir Raouf, Senyou An  
Pages 228-241  
[View PDF](#) [Article preview](#)

☐ Research article • Open access  
**Predictive modeling of geophysical anomalies in the metasediments of Bugaji area, part of Malumfashi Schist Belt, North-Western Nigeria**  
Abdullah Musa Ali, Mubarak Muhammad  
Pages 242-255  
[View PDF](#) [Article preview](#)

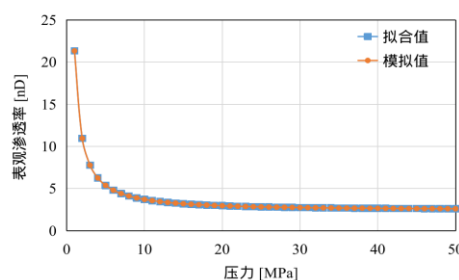
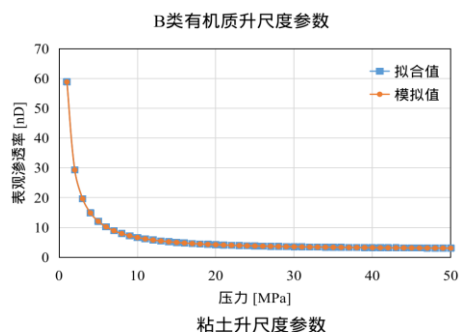
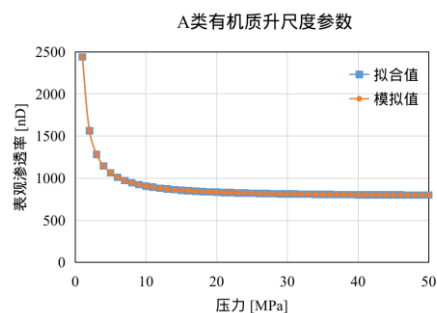
☐ Research article • Open access  
**Study on proppant flowback mechanism during post-fracturing stage based on CFD-DEM**  
Mingkun Lv, Tiankui Guo, Ming Chen, Yongzhan Liu, ... Zhanqing Qu  
Pages 256-269  
[View PDF](#) [Article preview](#)



Thank you for  
your attention!

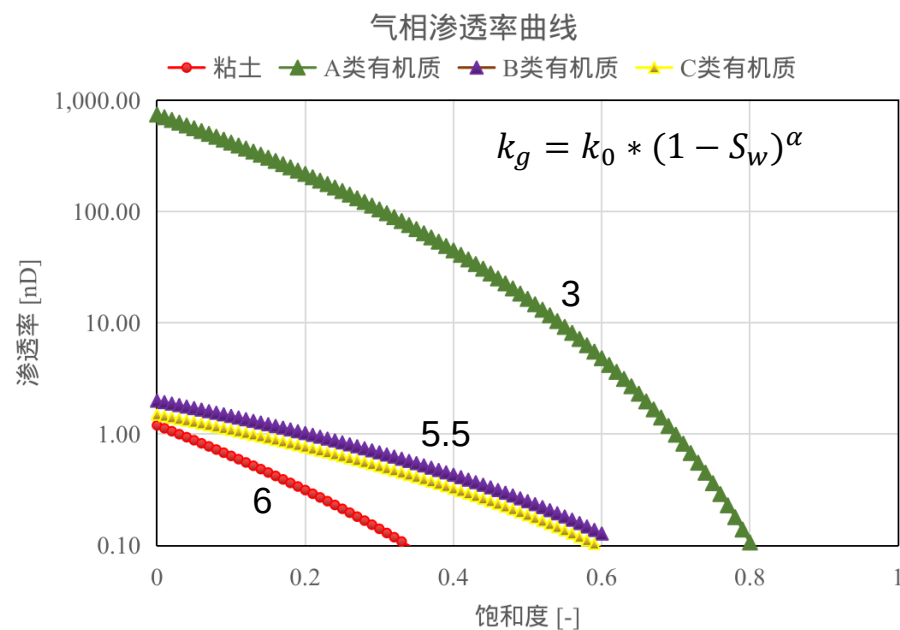
# 表征单元尺度-孔渗参数升级

针对各类孔隙单元，拟合出升尺度的孔渗参数如表观渗透率和气体相渗曲线，作为表征单元级页岩多尺度数字岩心模拟的关键输入参数



$$k_{a,om} = \frac{1}{\rho^g} \mu^g D_s n_{ad}^{max} \frac{K}{(1 + K p^g)^2} + (1 + \alpha_{om} K n) \left( 1 + \frac{4Kn}{1 + Kn} \right) K_{OM}$$

$$k_{a,clay} = (1 + \alpha_{clay} K n) \left( 1 + \frac{4Kn}{1 + Kn} \right) K_{clay}$$





- 基于FIB-SEM二维图像进行有机质单元的三维重构，重构的有机质孔隙结构与FIB-SEM图像的孔隙度和连通性保持较好的一致性，表明深度学习模型能够较好地通过页岩二维图像重构三维数字岩心

