

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.11.026

层状非均质性对 CO₂ 在盖层中 迁移泄漏规律的影响

高 帅^{1,2}, 魏 宁¹, 李小春¹, 雷宏武¹, 刘明泽¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘 要: 盖层密封性能对 CO₂ 地质封存工程的容量、经济性、安全性具有重要影响。盖层岩石具有明显的层状非均质特点, 而这种层状非均质特点直接影响 CO₂ 在盖层中的迁移与泄漏过程, 从而影响盖层的密封性能。现有研究考虑了各向同性的非均质性对盖层密封性能的影响, 但并未针对层状非均质性盖层展开相应的研究。建立了考虑孔隙度、渗透率和毛管压力参数变化关系的均质、非层状非均质和层状非均质 3 种盖层地质模型, 并采用 TOUGH2 对统一边界条件的不同地质模型开展了数值模拟对比研究, 分析了 CO₂ 进入盖层、盖层内迁移和穿透盖层而形成缓慢泄漏的全过程。模拟结果表明: 3 种模型中, 自由态 CO₂ 饱和度分布与孔隙度、渗透率的分布基本一致; 与均值模型相比, 非层状非均质性会加速 CO₂ 在盖层中的迁移, 而层状非均质性将会阻碍 CO₂ 在盖层中的迁移, 增加穿透时间; 与均质模型和非层状非均质模型相比, 层状非均质模型将会大大降低 CO₂ 的穿透盖层以后的泄漏速率和泄漏总量。针对建模和数值模拟过程中遇到的问题, 提出了盖层地质建模过程中的一些局限性。其结果为更加客观和定量地评价 CO₂ 在盖层内迁移规律及泄漏量奠定了一定的基础。

关 键 词: CO₂ 地质封存; 盖层; 层状非均质性; 迁移; 数值模拟

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017)11 - 3287 - 08

Effect of layered heterogeneity on CO₂ migration and leakage mechanism in the cap rock

GAO Shuai^{1,2}, WEI Ning¹, LI Xiao-chun¹, LEI Hong-wu¹, LIU Ming-ze¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: The sealing ability of cap rock has a critical influence on the storage capacity, economy, and security in CO₂ geological storage project. Due to the obvious characteristic of layered heterogeneity of the cap rock, it directly affects the migration and leakage process of CO₂ in the cap rock. As a result, the cap rock sealing ability is also affected. Currently, the effect of isotropic heterogeneity on the sealing ability of cap rock was studied in the literature. However, the effect of layered heterogeneity has not been investigated yet. In this study, the homogeneous, non-layered heterogeneous and layered heterogeneous models were separately established by considering the different spatial distribution of porosity, permeability and capillary pressure of cap rock. Under consistent CO₂ injection conditions, numerical simulations were conducted using these three models to comparatively study the whole leaking process of CO₂ entering, migrating and breakthrough all over the cap rock by using TOUGH2. Results revealed that the distributions of free CO₂ saturation in the cap rock agreed with the spatial distributions of porosity and permeability among the models. In contrast with the homogeneous model, non-layered heterogeneity accelerated the CO₂ migration, whereas layered heterogeneity slowed down CO₂ migration in the cap rock, and increased the period of CO₂ breaking through the cap rock. Compared with the homogeneous and non-layered heterogeneous models, layered heterogeneous model greatly decreased the leakage rate and total leakage amount of CO₂ after the breakthrough of CO₂. At last, limitations on the geological modelling were addressed. Hence, the research results provide helpful guidance for more objective and quantificational evaluation on CO₂ migration and leakage through the cap rock.

收稿日期: 2016-12-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项课题 (No. XDA07040300); 中科院青年创新促进会支持 (No.20140015)

This work was supported by the Chinese Academy of Sciences, Strategic Priority Research Program (XDA07040300) and the Youth Innovation Promotion Association, CAS (20140013).

第一作者简介: 高帅, 男, 1988 年生, 在站博士后, 主要从事 CO₂ 地质封存中盖层密封性能的试验和数值模拟方面的研究工作。

E-mail: gsmengqi@163.com

通讯作者: 魏宁, 男, 1978 年生, 研究员, 主要从事 CO₂ 地质封存方面的研究工作。E-mail: nwei@whrsm.ac.cn

Keywords: CO₂ geological sequestration; cap rock; layered heterogeneity; migration; numerical simulation

1 引言

CO₂地质封存是大规模CO₂减排的重要手段。封存工程的安全性和风险是CO₂地质封存的关键问题^[1-2]。CO₂会否穿透盖层泄漏,并对浅部地下水、地下资源、土壤、城市、大气层产生何种程度的影响是封存工程安全性的核心^[1,3]。其中,CO₂如何穿透盖层并持续泄漏是场地安全性评价的核心之一。

CO₂在盖层中的泄漏方式有很多,如通过断层或裂隙体系发生泄漏、通过废弃井泄漏以及通过盖层孔隙以渗流或分子扩散的形式泄漏等。对于完整性较好、断层或裂隙不发育的盖层,CO₂主要以渗流或分子扩散的形式泄漏。当储层流体压力超过盖层内部最大连通孔径的毛管压力(突破压)与上部地层流体压力之和,且不导致盖层压裂时,CO₂会在完整盖层内迁移并穿透盖层发生缓慢泄漏^[4-6]。世界上多个CO₂地质封存项目中均出现了CO₂穿透盖层发生泄漏的情况,如美国Western Colorado^[7]驱油项目、澳大利亚Otway^[8]项目和意大利的Laterra^[9]项目等。在这些泄漏案例中,均监测到了CO₂通过盖层孔隙发生泄漏的情况。因此,明确储层流体超压情况下,CO₂在盖层中迁移-泄漏的演化规律显得非常重要。

影响CO₂在盖层中迁移和泄漏的因素很多,外部作用主要是储层流体压力随CO₂注入逐步升高,从而增加了CO₂泄漏的风险^[10-11]。现有研究表明,盖层对CO₂的密封性能不仅与孔隙度、渗透率和毛管压力等参数的大小有关,还与它们在盖层中的非均质性分布有着重要关系^[10-13]。已有基于完全随机和空间相关随机理论的数值模拟结果显示,盖层孔隙度、渗透率、毛管压力等参数的分布特征或非均质性显著改变了CO₂在盖层中的迁移及泄漏规律^[10,14]。

层状非均质性是盖层岩石(沉积类)在沉积过程中形成的重要特征^[15],主要表现为岩石的属性,如:孔隙度、渗透率、毛管压力等参数,在水平和垂直两个方向上具有不同的空间相关性。因此,本文考虑层状非均质建模将有助于更准确地掌握CO₂在盖层中的迁移-泄漏规律,将会为盖层安全评价提供更可靠的评价结果。

2 非均质建模方法

非均质建模主要包含:非均质性质、参数设定和数值实现3个部分。

2.1 非均质性质

非均质建模需要利用随机模型建立孔隙度、渗透率等参数的空间分布。在地层沉积形成过程中,渗透参数在空间位置上通常具有一定的连续性,因此,模型建立过程中,需要考虑空间任意两点渗透参数之间的关联性。

前人研究表明,对数正态分布能够较好地表征地层孔隙度、渗透率等参数分布特征^[16-17]。Haldar等^[16]考虑相关距离的地层参数对数分布公式如下:

$$\zeta_n(x_i) = \exp\left\{\mu_{\ln \zeta_n(x)} + \sigma_{\ln \zeta_n(x)} \cdot G_i(x)\right\} \quad (1)$$

式中: ζ_n 为随机系数; x 为所要计算的 ζ_n 的空间位置; $G_i(x)$ 为符合标准正态分布的随机场;随机分布序列 $\ln \zeta_n$ 的数学期望值 $\mu_{\ln \zeta_n}$ 和标准差 $\sigma_{\ln \zeta_n}$ 可以通过下式计算得出:

$$\sigma_{\ln \zeta_n}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{\zeta_n}^2}{\mu_{\zeta_n}^2}\right) = \ln(1 + CV_{\zeta_n}^2) \quad (2)$$

$$\mu_{\ln \zeta_n} = \ln \zeta_n - \frac{1}{2} \sigma_{\ln \zeta_n}^2 \quad (3)$$

式中: μ_{ζ_n} 和 σ_{ζ_n} 分别为随机分布序列 ζ_n 的数学期望值和标准差; CV_{ζ_n} 为变异系数。

空间任意两点之间的关联性取决于模型选取的衰减方程^[15,18],以指数形式表达衰减方程为

$$\rho_{\zeta}(\delta) = \exp\left(-\frac{\tau}{\delta}\right) \quad (4)$$

式中: $\rho_{\zeta}(\delta)$ 为表示空间任意两点之间相关性的衰减系数; τ 为空间任意两点之间的距离; δ 为相关距离。将相关矩阵 ρ_{ζ} 利用Cholesky分解方法分解成下三角矩阵和上三角矩阵。

$$L \cdot L^T = \rho_{\zeta} \quad (5)$$

式中: L 为下三角矩阵。计算得到下三角矩阵后,通过下式得到考虑相关距离的标准正态分布场。

$$G_i = \sum_{j=1}^i L_{ij} \cdot Z_j, i=1,2,3,\dots,n \quad (6)$$

式中: Z_j 为独立的标准正态分布序列。

上述对数正态分布序列中,水平和垂向选取的相关距离相同,即渗透率在各个方向上具有相同的衰减规律。

沉积体系在不同方向上具有明显不同的空间相关性质,采用相关距离描述时表现为在不同方向上的相关距离不同。对于二维问题,水平方向 X 与垂直方向 Z 上的相关距离不同,可以对空间任意两点之间相关性的衰减方程 $\rho_{\zeta}(\delta)$ 作如下修正:

$$\rho_{\zeta}(\delta) = \exp \left[-\sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\delta_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{\delta_z}\right)^2} \right] \quad (7)$$

式中： Δx 、 Δz 分别为空间两点之间的水平和垂向距离； δ_x 、 δ_z 分别为水平和垂向的相关距离。

2.2 参数设定

2.2.1 孔隙度

地层沉积过程中，岩石孔隙度与渗透率具有较好的相关性，Kozeny-Carman^[19]模型已被证明是能够很好地反映两者之间相关关系的经验公式，其具体形式为

$$k = \frac{\phi^3}{S(1-\phi)^2} \quad (8)$$

式中： k 为岩石渗透率； ϕ 为岩石孔隙度； S 为与岩石比表面积有关的系数。

2.2.2 相对渗透率

本研究中，储层和盖层选取不同的相对渗透率模型。储层选取的相对渗透率模型为 Corey^[20]模型，其表达式为

$$k_{ri} = \hat{S}^4 \quad (9)$$

$$k_{rg} = \left(1 - \hat{S}\right)^2 \left(1 - \hat{S}^2\right) \quad (10)$$

式中： k_{rg} 为气相相对渗透率； $\hat{S} = (S_1 - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr})$ ； k_{ri} 为液相相对渗透率； S_1 为液相饱和度； S_{lr} 为液相残余饱和度； S_{gr} 为气相残余饱和度。

Bennion 等^[21]针对页岩、石膏等低渗岩石开展了相对渗透率曲线测试发现，在低渗岩石中，气体相对渗透率随饱和度的变化规律与砂岩有着明显的不同：对于盖层等低渗岩石，在饱和水状态下，当气体开始侵入并且饱和度较低时，气相相对渗透率仍然具有明显的变化。因此，盖层的相对渗透率模型选取 Grant^[22]模型，其表达式为

$$k_{ri} = \hat{S}^4 \quad (11)$$

$$k_{rg} = 1 - k_{ri} \quad (12)$$

2.2.3 毛管压力

储盖层的毛管压力曲线均采用 Van Genuchten (VG)^[23]模型，其表达式为

$$P_{cap} = -P_0 \left([S^*]^{-1/\lambda} - 1 \right)^{1-\lambda} \quad (13)$$

$$-P_{max} \leq P_{cap} \leq 0 \quad (14)$$

式中： $S^* = (S_1 - S_{lr})(S_{ls} - S_{lr})$ ； P_{cap} 为岩石孔隙毛管

压力； P_0 为岩石进气值； λ 为与岩石孔隙特征有关的参数。

2.3 数值实现

非均质参数分布在 TOUGH2/ECO2N 软件基础上进行数值实现。TOUGH2 是由美国劳伦斯-伯克利国家重点实验室开发的模拟孔隙或裂隙介质（含裂隙）中多相、多组分及非等温的流体及热量运输的数值模拟软件^[24]。ECO2N 是 TOUGH2 的一个模块，专门进行 CO₂ 地质封存中的流体数值模拟。

在 TOUGH2 输入文件的 ROCKS 数据块中，会针对每种岩石材料赋予初始值。以渗透率为例：为了实现非均质性特点，在 ELEM 数据块中，可以为每个单元赋予一个渗透率修改因子，对初始绝对渗透率进行修改。其表达式为

$$k'_n = k_n \xi_n \quad (15)$$

式中： k_n 为第 n 个网格的初始绝对渗透率； k'_n 为经过修改因子修改后的第 n 个网格的绝对渗透率； ξ_n 为赋予第 n 个网格的渗透率修改因子。对渗透率修改因子赋值后，TOUGH2 会自动对毛管压力进行修改，其表达式为

$$P'_{cap,n} = P_{cap,n} / \sqrt{\xi_n} \quad (16)$$

式中： $P_{cap,n}$ 为第 n 个网格的初始毛管压力； $P'_{cap,n}$ 为经过修改因子修改后的第 n 个网格的毛管压力。

3 案例分析

为了更好地对比非均质性及层状非均质性对 CO₂ 在盖层中迁移规律的影响，本文采用了下列 3 种模型进行对比分析。

Case1：均值模型；Case2：非层状非均质模型（各个方向上的空间相关长度一致）；Case3：层状非均质模型（水平和垂直方向上具有不同的空间相关长度）。

上述 3 种模型平均孔隙度、平均渗透率和平均毛管压力一致，但其空间分布不同。3 种模型的初始条件、边界条件和注入条件均相同。为了便于模拟结果的分析对比和结果呈现，采用二维平面模型模拟 CO₂ 注入。

3.1 模型范围

CO₂ 地质封存中，储层埋深要求大于 800 m^[1]，一般位于 1 000 ~ 3 000 m。本研究中，假设储层埋深为 1 500 m，水平向（X）距离为 200 m，垂向（Z）距离为 26 m。采用均匀网格，网格尺寸为 1.0 m × 1.0 m，网格数共计 5 200 个。最底部一层网格作为

CO₂地质封存的储层，其他 25 层网格为盖层。

3.2 初始条件与边界条件

TOUGH2/ECO2N 模块主变量包括静水压力、含盐度、CO₂质量分数和温度，需要针对 4 个主变量定义模型的初始条件。

假设地层静水压力系数为 1，则储层初始水压力为 15 MPa。一般条件下，盖层内的矿化捕获的贡献相对结构捕获和溶解捕获贡献较小，同时，本研究重点在于地质模型对流动状态的影响，由此模拟中未考虑矿化过程。模型含盐度设置为 0.05。储层网格 CO₂质量分数设为 0.99，并将网格体积设置为无穷大 (1.0×50 m³)，从而实现 CO₂定压注入边界

条件。盖层网格 CO₂初始质量分数为 0。不考虑 CO₂注入对温度的影响，将模型设置为恒温模型，温度设为 50 。

模型底部和顶部设置为定压力边界条件 (第 1 类边界条件)，模型沿 X 方向两端边界设置为零流量边界 (第 2 类边界条件)。

3.3 地层参数设置

为了研究 CO₂突破并进入盖层，直至穿透盖层过程中的 CO₂迁移-泄漏规律，将储层压力设置为 22.5 MPa (约为初始静水压力的 1.5 倍)。模型各项地层参数设置见表 1。参数参考 Bennion 等^[21]所测得的页岩低渗岩石相对渗透率和毛管张力数据。

表 1 算例中储盖层模型的基本参数

Table 1 Parameters of geological formation for case studies

储盖层	压力 / MPa	温度 /	渗透率平均值 / m ²	进气值 / Pa	岩石密度 / (g/cm ³)	相对渗透率曲线			毛管压力曲线			
						S _{lr}	S _{gr}	λ	S _{lr}	P ₀ / Pa	P _{max} / Pa	S _{ls}
储层	22.5	50.0	1.0×10 ⁻¹⁴	1.0×10 ⁴	2.40	0.3	0.05	0.457	0.20	1.0×10 ⁴	1.0×10 ⁷	0.999
盖层	15.0	50.0	1.0×10 ⁻¹⁸	1.0×10 ⁷	2.40	0.6	0.05	0.457	0.55	1.0×10 ⁷	1.0×10 ⁸	0.999

3.4 渗透率、孔隙度非均质设置

渗透率修改因子的数学期望即修改因子的平均值，设置为 1.0，则非均质模型中盖层绝对渗透率的平均值为 1.0×10⁻¹⁸ m² (1 μD)。

变异系数反映非均质程度的大小。研究表明^[25]，如果孔隙介质渗透率分布的变异系数 CV<0.5，该孔隙介质可以看作均质；当变异系数 CV>1.0 时，该孔隙介质具有程度较高的非均质性。本研究中渗透率修改因子的变异系数设置为 0.8。

由于沉积环境的不连续性，地层在沉积形成过程中呈现出明显的分层现象。从大量泥岩或泥灰岩露头观察发现，其分层现象明显，高孔、高渗带与低孔、低渗带呈层状交替分布，如图 1 所示。地层的这种分层特征可以通过在水平和垂直方向上设置不同的相关距离实现。在非层状非均质模型 (Case 2) 中，水平向和垂向相关距离均设置为 20 m；而在层状非均质模型 (Case 3) 中，水平向相关距离设置为 20 m，垂向相关距离设置为 2 m。

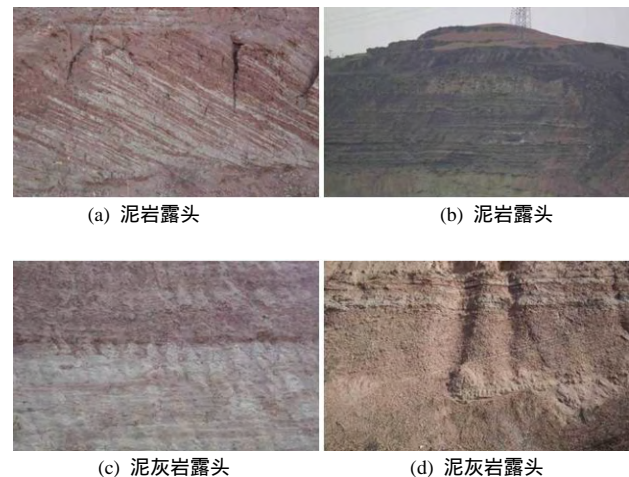


图 1 中国鄂尔多斯地区部分泥岩、泥灰岩地层露头
Fig.1 Stratum outcrops of mudstone and marlstone in Ordos, China

3 种模型中，渗透率平均值相同、而分布不同，根据渗透率随机分布确定孔隙度、毛管压力的分布。模型非均质参数、渗透率和孔隙度参数设定如表 2 所示。

表 2 关键非均质参数取值

Table 2 Values of parameters in heterogeneous models

模型	数学期望值 μ _m	变异系数 CV	横向相关距离 δ _h / m	垂向相关距离 δ _v / m	Carman-Kozeny 模型 S / m ²	最大渗透率 / m ²	最小渗透率 / m ²	最大孔隙度	最小孔隙度
Case 2	1.0	0.8	20	20	3.5×10 ¹⁵	1.04×10 ⁻¹⁷	3.64×10 ⁻²⁰	0.139	0.023
Case 3	1.0	0.8	20	2	3.5×10 ¹⁵	1.11×10 ⁻¹⁷	2.76×10 ⁻²⁰	0.142	0.021

根据上述非均质参数设置，得到的渗透率非均质分布如图 2 所示。

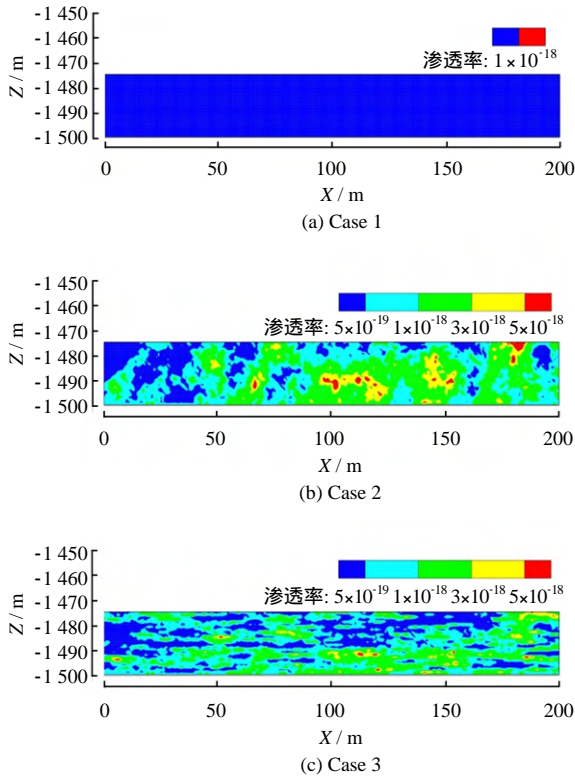


图 2 渗透率分布对比

Fig.2 Permeability comparison among three models

根据 Carman-Kozeny 孔隙度-渗透率关系模型和上述渗透率分布^[16, 26]，得到两种非均质模型孔隙度分布如图 3 所示。

4 分析结果与讨论

3 种模型均采用定压注入方式，注入压力为 22.5 MPa。为了研究 CO₂ 进入盖层、穿透整个盖层以及穿透盖层以后的迁移-泄漏全过程的演化规律，模拟运行 100 a，并针对 CO₂ 饱和度、CO₂ 晕分布前缘、CO₂ 迁移速度和泄漏速率等参数对 3 种模型进行了分析对比。

4.1 垂向迁移距离

CO₂ 在地质封存中主要以自由态(超临界状态)存在于岩石孔隙中，其饱和度分布能较好地反映 CO₂ 在储盖层中的迁移状况。其中 CO₂ 晕前缘随时间变化反映了 CO₂ 沿垂向迁移的快慢，如图 4 所示。本研究中，将 CO₂ 晕前缘定义为其饱和度大于等于 0.5%。

由曲线可以看出，Case 1、Case 2 和 Case 3 3 种模型中，自由态 CO₂ 到达盖层顶部的时间分别为 15、10、20 a。由此可见，CO₂ 在非层状非均质

模型中垂向迁移速率最快，均质模型次之，在层状非均质模型中垂向迁移速率最慢。前人的数值模拟研究中，对非均质的设置通常不具有分层特性^[14]，与本研究中 Case 2 情形相似。Case 1 和 Case 2 的对比结果与前人关于非均质性将会促进 CO₂ 迁移这一结论一致。

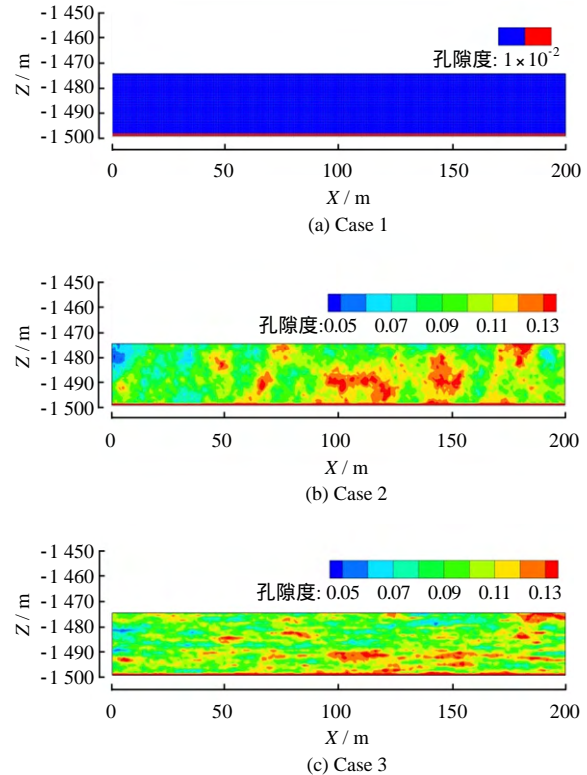


图 3 孔隙度分布对比

Fig.3 Porosity distributions in three models

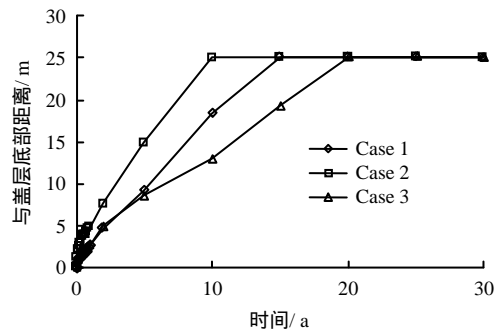


图 4 自由态 CO₂ 前缘距盖层底部距离随时间变化曲线
Fig.4 Distance between free CO₂ front and the bottom line

4.2 迁移路径

图 5 所示为自由态 CO₂ 在盖层中的饱和度随时间变化云图。通过云图可以明显地看出，CO₂ 饱和度分布与孔隙度、渗透率的分布基本一致。图 5(a) 显示，CO₂ 在均质模型中呈均匀、整体向上迁移，而在非均质模型中，CO₂ 饱和度随孔隙度、渗透率

呈现非均质分布。需要指出的是，图 5(b)显示，在非层状非均质模型中，CO₂ 呈指状或片状突破迁移；图 5(c)显示，在层状非均质模型中，CO₂ 呈水平条带状突破迁移，各水平条带之间通过指状区域连通。

此外，通过 CO₂ 饱和度云图也可以明显地看出，自由态 CO₂ 在非层状非均质模型中迁移最快，在层状非均质模型中迁移最慢。

基于前人的研究成果，笔者认为，促进 CO₂ 迁移的条件通常包括以下两点。一是 CO₂ 在压力驱动条件下更易进入具有较高孔隙度、渗透率和较低进气值的区域。本研究中自由态 CO₂ 饱和度分布与孔隙度、渗透率分布基本一致，可以很好地证明这一点；二是模型内部各高孔、高渗区域具有良好的连通性，较易形成 CO₂ 迁移的优势迁移路径或优势路

径。

基于优势路径原理，对本研究中的 3 种模型进行对比。在均值模型中，孔隙度和渗透率均匀分布，不存在优势路径。非均质模型中考虑了空间不同位置之间孔隙度和渗透率的相关性，从而使得模型中具有明显的高渗区和低渗区。此外，在非层状非均质模型中，高渗区之间连通的几率更大；在层状非均质模型中，条带状的高渗区之间被条带状的低渗区隔断，降低了各高渗区相互连通的几率，从而使得优势路径较少。

综上可以判断，与均质模型相比，非层状非均质模型具有更有利的优势路径，从而加速了 CO₂ 的迁移；而层状非均质模型拥有更少的优势路径，阻碍了 CO₂ 的迁移。

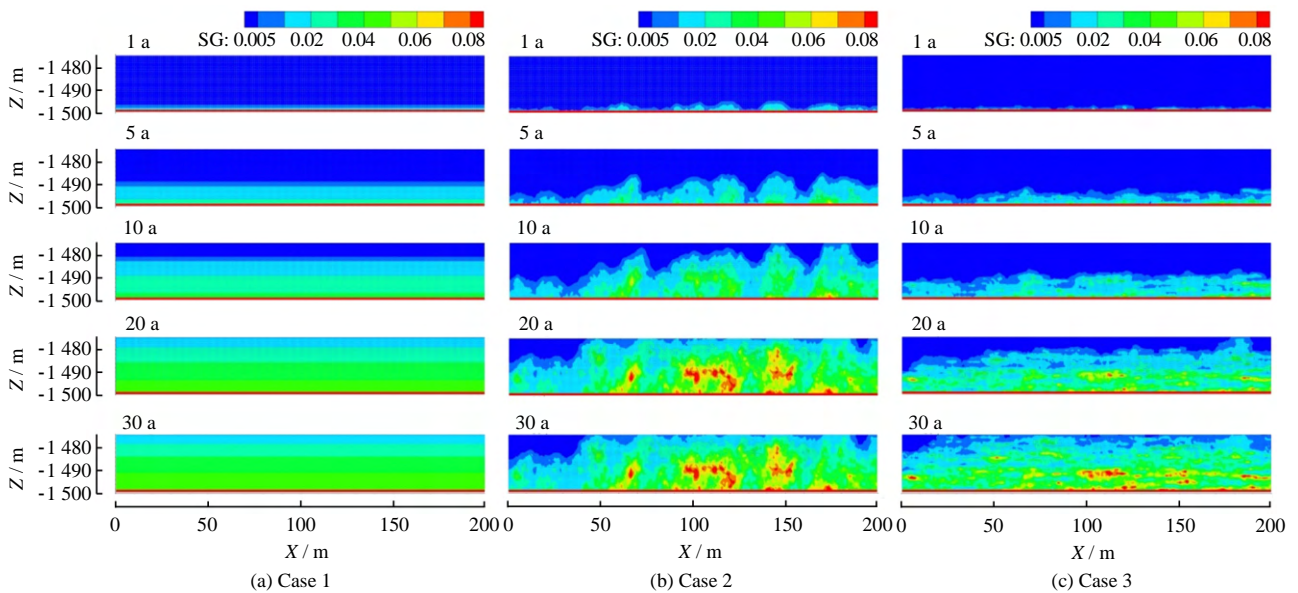


图 5 不同时间盖层内 CO₂ 饱和度分布图

Fig.5 Variation of CO₂ saturation in the cap rock with time

4.3 泄漏速率

本研究中设置了较高的注入压力和较长的注入时间，使得 CO₂ 最终穿透整个盖层发生了泄漏。图 6 所示为穿透盖层泄漏至上覆地层的 CO₂ 质量曲线。

由图可看出，在层状非均质模型中，CO₂ 穿透时间最晚，且无论是自由态 CO₂，还是溶解态 CO₂，都明显少于均质盖层和非层状非均质盖层。由此可知，非均质模型的分层特性不仅减缓了 CO₂ 在盖层中的迁移速度，还降低了整体泄漏速率和泄漏总量，其主要是由于层状特性减少了优势路径的数量，增加了 CO₂ 沿主要优势路径的迁移距离所致。此外，均质与非层状非均质模型相比，尽管后者 CO₂ 在盖层内部的迁移速度更快，但当 CO₂ 穿透盖层发生泄漏以后，前者的泄漏速率略高于后者。

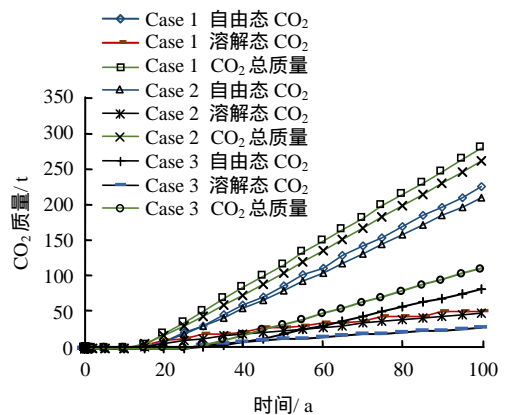


图 6 3 种模型中，穿透盖层泄漏至上覆地层的 CO₂ 质量随时间变化曲线

Fig.6 Curves of CO₂ leaking through the cap rock versus time in three models

运行至 100 a 时，模型已经达到稳定状态，经统计得到此时 3 种模型盖层顶部网格中 z 向年平均泄漏速率分别为：均质模型 16.08 t/(a·m²)、不具有分层特性的非均质模型 15.55 t/(a·m²)、具有分层特性的非均质模型 7.89 t/(a·m²)。图 7 所示为运行至 100 a 时，3 种模型盖层顶部网格 CO₂ 沿 z 向年平均流量曲线对比。由图可看出，非层状非均质模型比层状非均质模型泄漏点更多，分布更均匀，且泄漏速率更大。

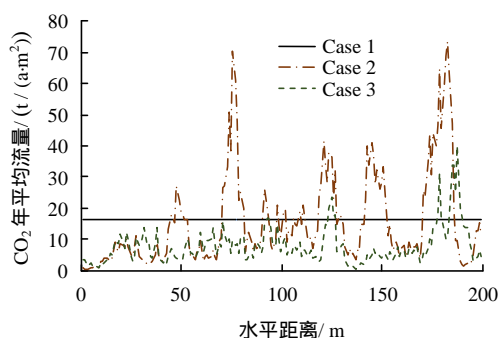


图 7 模型运行到 100 a 时，盖层顶部网格 CO₂ 年平均流量 (z 向) 曲线

Fig.7 Curves of CO₂ annual average flow rate (z direction) in the top grids when simulation runs to the 100th year

5 数值模拟的局限性

5.1 盖层地质描述

精确的地质建模对于模拟结果的正确性至关重要，目前地质建模主要依据地震、地质和测井资料的综合解释。由于地震和测井精度一般大于 50 m，而盖层厚度通常小于 50 m，很难通过地震资料对泥质盖层进行精确描述；此外，通过室内试验和露头得到的地质资料具有分散性、扰动性等特点，不能完全代表泥岩盖层的地质特点。因此，如何精确预测泥岩盖层地质特性成为盖层地质建模最基础和最重要问题。

5.2 相对渗透率曲线

低渗岩石相对渗透率的测量向来都是难点，由于缺乏充足的试验数据证明，目前还没有适用于低渗岩石的较权威的相对渗透率模型。研究者只能根据现场监测数据及为数不多的泥岩室内试验数据推断现有相对渗透率曲线中各参数的取值范围，近似表征低渗岩石的多相渗流特性。参数的不确定性，使得低渗岩石数值模拟的精度大大降低。

6 结 论

(1) 模拟结果对比表明：盖层孔隙度、渗透

率和毛管压力的非均质分布使 CO₂ 的迁移路径呈现明显的非均质性，且自由态 CO₂ 饱和度分布与高孔隙度、高渗透率的分布基本一致；非层状非均质模型加速了 CO₂ 在盖层中的迁移，层状非均质模型阻碍了 CO₂ 在盖层中的迁移；与均质模型和非层状非均质模型相比，层状非均质模型将会大大降低 CO₂ 的整体泄漏速率和泄漏总量。

(2) 盖层模拟还存在较多局限性，影响数值模拟的精度：目前还没有精确表征完整盖层地质特性的探测方法，给地质建模过程中对盖层的描述带来了很大的不确定性；低渗岩石的相对渗透率测试数据极少，相对渗透率模型中参数的取值难度较大。

参 考 文 献

- [1] METZ B, DAVIDSON O, CONINCK H D, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[M]. New York: Cambridge University Press. 2005.
- [2] 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 等. 深部咸水层 CO₂ 地质储存地质安全性评价方法研究[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 786 - 790.
- [3] DIAO YU-Jie, ZHANG Sen-qi, GUO Jian-qiang, et al. Geological safety evaluation method for CO₂ geological storage in deep saline aquifer[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 786 - 790.
- [4] BIRKHOLZER J T, ZHOU Q L, TSANG C F. Large-scale impact of CO₂ storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, 3(2): 181 - 194.
- [5] SONG J, ZHANG D. Comprehensive review of caprock-sealing mechanisms for geologic carbon sequestration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(1): 9 - 22.
- [6] WOLLENWEBER J, ALLES S, BUSCH A, et al. Experimental investigation of the CO₂ sealing efficiency of caprocks[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4 (2): 231 - 241.
- [7] 魏宁, 李小春, 王颖, 等. 不同温压条件下泥质粉砂岩二氧化碳突破压的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 98 - 104.
- [8] WEI Ning, LI Xiao-chun, WANG Ying, et al. Experimental investigation on CO₂ breakthrough pressure of argillaceous siltstone under different pressures and temperatures conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*,

- 2014, 35(1): 98 - 104.
- [7] BOWKER K A, SHULER P J. Carbon-dioxide injection and resultant alteration of the weber sandstone, Rangely field, Colorado[J]. **AAPG Bulletin-American Association of Petroleum Geologists**, 1991, 75(9): 1489 - 1499.
- [8] STREIT J, WATSON M. Estimating rates of potential CO₂ loss from geological storage sites for risk and uncertainty analysis[J]. **Greenhouse Gas Control Technologies**, 2005, 2(1): 1309 - 1314.
- [9] PEARCE J M, BAKER J, BEAUBIEN S, et al. Natural CO₂ accumulations in Europe: Understanding long-term geological processes in CO₂ sequestration[C]//Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference. Oxford: Pergamon, 2003, 417 - 422.
- [10] WANG D Y, ZHAO M L, SONG Y C, et al. Influence of capillary pressure and injection rate as well as heterogeneous and anisotropic permeability on CO₂ transport and displacement efficiency in water-saturated porous media[J]. **Energy Procedia**, 2013, 37(Complete): 3945 - 3951.
- [11] DENG H L, STAUFFER P H, DAI Z X, et al. Simulation of industrial-scale CO₂ storage: Multi-scale heterogeneity and its impacts on storage capacity, injectivity and leakage[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2012, 10(9): 397 - 418.
- [12] LIU B, ZHANG Y. CO₂ modeling in a deep saline aquifer: A predictive uncertainty analysis using design of experiment[J]. **Environ. Sci. Technol.**, 2011, 45(8): 3504 - 3510.
- [13] DOUGHTY C. Modeling geologic storage of carbon dioxide: Comparison of non-hysteretic and hysteretic characteristic curves[J]. **Energy Conversion and Management**, 2007, 48(6): 1768 - 1781.
- [14] TIAN H L, PAN F, XU T F, et al. Impacts of hydrological heterogeneities on caprock mineral alteration and containment of CO₂ in geological storage sites[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2014, 24(5): 30 - 42.
- [15] GELHAR L W. Stochastic subsurface hydrology from theory to applications[J]. **Water Resources Research**, 1986, 22(9): 135 - 145.
- [16] HALDAR S, BABU G L S. Effect of soil spatial variability on the response of laterally loaded pile in undrained clay[J]. **Computers and Geotechnics**, 2008, 35(4): 537 - 547.
- [17] SRIVASTAVA A, BABU G L S, HALDAR S. Influence of spatial variability of permeability property on steady state seepage flow and slope stability analysis[J]. **Engineering Geology**, 2010, 110(3): 93 - 101.
- [18] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Flow through earth dams with spatially random permeability[C]//Proceedings of the 10th ASCE Engineering Mechanics Conference. Boulder: Engineering Mechanics, 2014.
- [19] HENDERSON N, BRÉTTAS J C, SACCO W F. A three-parameter Kozeny–Carman generalized equation for fractal porous media[J]. **Chemical Engineering Science**, 2010, 65(15): 4432 - 4442.
- [20] COREY A T. The Interrelation between gas and oil relative permeability[J]. **Producers Monthly**, 1954: 19.
- [21] BENNION D B, BACHU S. Drainage and imbibition relative permeability relationships for supercritical CO₂/brine and H₂S/brine systems in intergranular sandstone, carbonate, shale, and anhydrite rocks[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 2008, 11(3): 487 - 496.
- [22] GRANT M A. Permeability reduction factors at Wairakei[C]//AICHE - ASME Heat Transfer Conference. Salt Lake City: [s. n.], 1977.
- [23] GENUCHTEN M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44(44): 892 - 898.
- [24] PRUESS K, KARSTEN. ECO2N: A tough2 fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO₂[R]. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.
- [25] JENSEN J. Statistics for Petroleum Engineers and Geoscientists[M]. Amsterdam: Elsevier, 2005.
- [26] WEI N, GILL M, CRANDALL D, et al. CO₂ flooding properties of Liujiagou sandstone: Influence of sub-core scale structure heterogeneity[J]. **Greenhouse Gases- Science and Technology**, 2014, 4(3): 400 - 418.