

doi:10.3799/dqkx.2016.056

使用水力屏障控制单一倾斜储层中 CO₂ 羽的迁移

赵锐锐, 成建梅*

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 在单一倾斜含水层中封存 CO₂ 时, 在浮力作用下, CO₂ 会向地层上升一侧快速运移, 不利于封存安全. 可在倾斜地层的上升一侧, 距离 CO₂ 注入井一定位置设置注水井, 创造水力屏障, 以阻止 CO₂ 向上移动. 建立了数值模型来探讨这一方法的有效性, 分析注水位置、距离、速度等因素的影响. 结果表明注水形成的水力屏障能有效阻挡 CO₂ 羽的向上迁移, 且能促进 CO₂ 溶解, 抽水能显著降低地层压力. 为了确保能完全阻挡 CO₂ 运移, 需要注水长度大于 CO₂ 羽的厚度, 甚至是在全部储层注水. 注水速度是影响水力屏障效果的关键因素. 注水距离越近阻挡效果越好. 可以在 CO₂ 羽即将到达之前注水, 以减少注水量和能源消耗.

关键词: 深部含水层; CO₂ 地质封存; 注水; 抽水; 地层压力; 地下水; 环境地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2016)04-0675-08

收稿日期: 2015-09-08

Using Hydraulic Barrier Control CO₂ Plume Migration in Sloping Reservoir

Zhao Ruirui, Cheng Jianmei*

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: CO₂ will rapidly migrate toward the up-tilt direction of the formation under buoyancy when CO₂ is stored in the sloping aquifers. This phenomenon is not conducive to the storage security. In this paper, we are proposed setting water injection wells at a certain distance from the CO₂ injection well in the up-tilt direction of the formation. Then hydraulic barrier is created to retard upward CO₂ migration. The numerical model is set up to investigate the effectiveness of this approach, and to analyze the effects of some factors, for instance, the injection position, the injection distance and the injection rate. The results show that the hydraulic barrier caused by injecting water can effectively retard upward CO₂ migration and enhance CO₂ dissolution. Pumping water can significantly reduce the formation pressure. To ensure that CO₂ is completely retarded, the length of the injection water needs to be greater than the thickness of the CO₂ plume, even injecting water through all thickness of the formation. The rate of the injection water is the key factor affecting the effectiveness of the hydraulic barrier. The effectiveness is better when the injection water well is closer to the CO₂ injection well. The water can be injected just before the arrival of CO₂ plume to reduce the amount of injected water and energy consumption.

Key words: deep aquifer; CO₂ geological storage; injecting water; pumping water; formation pressure; groundwater; environmental geology.

0 引言

由人类活动排放的 CO₂ 被认为是造成全球变暖的主要原因. 将排放源处的 CO₂ 收集起来注入到深部咸含水层中进行封存, 是减少大气中 CO₂ 浓度的有

效措施之一 (Bachu, 2003; IPCC, 2005; 李小春等, 2006; 房琦等, 2014; 杨国栋等, 2014). 深部咸含水层结构复杂, CO₂ 储层有可能是单一倾斜的地层 (Deng *et al.*, 2012), 如美国 Frio 原位试验场 CO₂ 储层的倾角为 16° (Doughty *et al.*, 2008), 鄂尔多斯盆地 CO₂ 地

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41172217, 41402212); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. CUGL140814).

作者简介: 赵锐锐 (1984-), 男, 讲师, 主要从事 CO₂ 地质封存和地下水数值模拟技术方面的研究工作. E-mail: rr.zhao@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 成建梅, E-mail: jmcheng@cug.edu.cn

引用格式: 赵锐锐, 成建梅, 2016. 使用水力屏障控制单一倾斜储层中 CO₂ 羽的迁移. 地球科学, 41(4): 675-682.

质封存示范场地石千峰组储层的倾角为 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ (靖晶等, 2014)。CO₂ 注入到倾斜地层后, 由于超临界态 CO₂ 比卤水轻, 在浮力作用下, CO₂ 会以较快的速度沿地层向上延伸的一侧运动 (Pruess and Nordbotten, 2011; Sung *et al.*, 2014), 从而有可能运移到浅部地层中 (IPCC, 2005; Zhao *et al.*, 2012), 导致浅层地下水受到污染甚至逃逸; 此外, CO₂ 的快速运移会经历更大的地层空间, 增加了 CO₂ 通过井孔或断层泄漏的风险 (Nordbotten *et al.*, 2009)。

Réveillère *et al.* (2012) 提出可以通过向盖层上方的含水层中注水来创造一个水力屏障, 阻止 CO₂ 通过垂直通道泄漏。笔者提出在单一倾斜地层的一侧, 距离 CO₂ 注入井一定位置设置注水井, 创造水力屏障, 以阻止 CO₂ 向上移动。使用多相流数值模拟软件 TOUGH2-MP/ECO2N 建立数值模型来探讨这一方法的有效性, 分析注水位置、距离、速度等因素的影响, 考察注水带来的地层压力提升及考虑设置抽水井等问题。

1 数值模型

1.1 模拟软件简介

TOUGH2 是一个非恒温多组分多相流体及热量运输模拟代码, 由美国劳伦斯柏克利国家实验室开发, 可模拟一维、二维、三维孔隙和裂隙介质中多组分多相流 (Pruess *et al.*, 2012), 被广泛应用于地热工程、核废料处置、CO₂ 地质处置、环境评价和修复以及饱和非饱和带模拟 (Pruess and García, 2002; 施小清等, 2009)。Pruess and Spycher (2007) 针对深部咸含水层中 CO₂ 的地质封存, 开发了专门的模块——ECO2N (Pruess and Spycher, 2007)。其并行版本 TOUGH2-MP 主要用于大规模数值模型计算 (Zhang *et al.*, 2008; Birkholzer and Zhou,

2009; Yamamoto *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2010)。

1.2 模型建立

建立了一个假想的 CO₂ 注入到单一倾斜储层的三维模型 (图 1)。模型 X 方向的范围为 $-15 \sim 15$ km, Y 方向的范围为 $-10 \sim 10$ km, 采用分辨率为 $100 \sim 1\,000$ m 的矩形网格进行剖分, 二维网格总数为 4 441 个。垂向上, 地层总厚度为 360 m, 包括 60 m 的盖层、250 m 的储层和储层下部 50 m 的地层, 盖层剖分为 2 个模拟层, 储层的网格分辨率为 10 m, 储层下面的 50 m 地层划分为 1 个模拟层。地层整体沿 X 方向倾斜, 倾角约为 5° 。整个三维网格包含 132 809 个网格和 382 149 个链接 (图 1)。

假定储层和盖层都是均质的, 一般需要储层有较高的渗透率和孔隙度, 以满足注入性和储存容量的要求, 笔者参考国内外已有的工程实例 (Michael *et al.*, 2010), 储层的水平渗透率和孔隙度分别设定为 $100 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 和 0.15; 盖层应有较低的渗透率 (10^{-18} m^2 或更低) (de Coninck and Benson, 2014), 以阻止 CO₂ 向地层上部迁移, 故给定盖层的渗透率为 $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, 其孔隙度也给定一个较低值 0.1。假定地层水平和垂直渗透率的比值为 10, 压缩率为 $4.5 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ 。相对渗透率函数使用 van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) 和 Corey 模型 (Corey, 1954), 毛细压力函数使用 van Genuchten 模型, 相关参数见表 1。其他岩层参数采用一般情况下的常规取值 (Pruess and García, 2002; Zhou *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2012)。

CO₂ 注入井设置在模型中心, CO₂ 通过储层底部注入, 注入深度约 2 000 m, 注入长度为 20 m, 注入速度为 95.1 kg/s (3 Mt/a), 注入时间为 50 a。假定地层处于初始静水压力平衡状态, 地温梯度为 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 地层水中 NaCl 的质量分数为 5%。模型四周为无流量边界, 上下边界为恒定压力边界, 允许

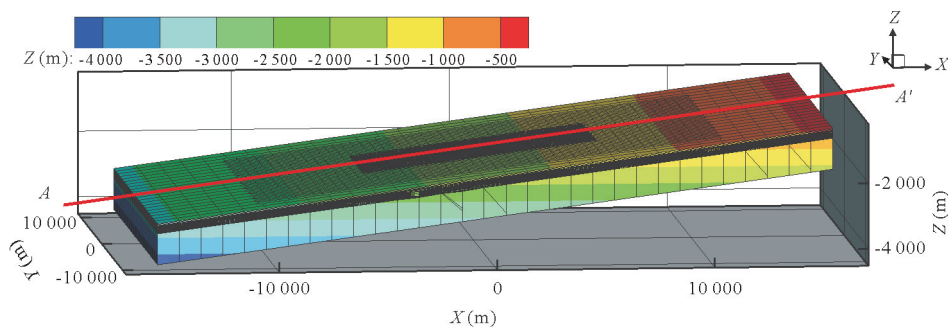


图 1 模型三维视图

Fig.1 The three-dimensional view of the model

表 1 模型主要参数取值

Table 1 The values of main model parameters

地层	$K_h (10^{-15} \text{ m}^2)$	K_h/K_v	$\alpha^{-1} (\text{MPa})$	$\beta (10^{-10} \text{ Pa}^{-1})$	S_{rw}	S_{rg}	m
盖层	0.001	10	5.00	4.5	0.40	0.15	0.457
储层	100	10	0.02	4.5	0.30	0.15	0.457

注: K_h 为水平渗透率; K_h/K_v 为水平和垂直渗透率的比值; α^{-1} 为毛细进入压力; β 为压缩率; S_{rw} 为最大残余水饱和度; S_{rg} 为最大残余气饱和度; m 为相对渗透率函数中的指数.

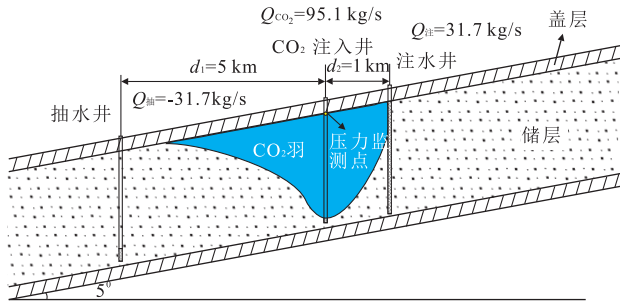


图 2 模型示意

Fig.2 The sketch of the model

地层水流动.

注水井设置在 CO₂ 注入井右侧(即地层上升一侧)1 km 处,水以 31.7 kg/s(1 Mt/a)的速度通过全部储层注入 50 a.CO₂ 注入结束后,地层压力逐渐下降,CO₂ 向地层上部运移的驱动力降低,故考虑降低注水速度为 10 kg/s.由于注水会造成地层压力进一步提升,故考虑在注入井左侧设置抽水井,通过抽水降低压力(Buscheck *et al.*, 2012; Court *et al.*, 2012).抽水井距离 CO₂ 注入井 5 km,为了防止将 CO₂ 抽出,抽水位置设在储层底部,抽水速度与注

水速度相等,抽水从 CO₂ 注入开始,持续 50 a.设置 CO₂ 注入井正上方储层和盖层的分界点为地层压力监测点(图 2).

笔者利用建立的模型考察注水形成的水力屏障阻止 CO₂ 迁移的效果,评估注水位置、距离、速度等因素的影响,及分析抽水对降低地层压力的作用(表 2).

2 结果及分析

2.1 注水效果

CO₂ 注入会造成地层压力上升,并驱动 CO₂ 侧向迁移.尽管注水会在一定程度上抑制 CO₂ 迁移,但由于 CO₂ 注入速度大于注水速度,即驱动力更大,CO₂ 仍有向右运移的趋势.当 CO₂ 羽到达注水处时,其侧向运移受到阻挡(图 3a),尽管在 CO₂ 注入结束后降低了注水速度,注水仍发挥了很明显的阻挡作用(图 3b).同时,在注入的新鲜水外缘溶解的 CO₂ 质量分数较高(图 3c),表明注水促进了 CO₂ 溶解(Leonenko and Keith, 2008).此外,注水会造成地层压力进一步提升,而抽水能降低地层压力,50a

表 2 不同注水方案中的参数设置

Table 2 The parameter values used in the different injection scenarios

方案编号	注水位置	注水距离(km)	注水速度(kg/s)	停止注入 CO ₂ 后注水速度(kg/s)	抽水速度(kg/s)
Base case	全部储层	1	31.7	10	31.7
Case 1a	储层上部 100 m				
Case 1b	储层上部 40 m				
Case 1c	储层上部 20 m				
Case 2a		2			
Case 2b		3			
Case 2c		5			
Case 3a			10.0		
Case 3b			5.0		
Case 3c			1.0		
Case 4a				5	
Case 4b				1	
Case 5a					10.0
Case 5b					5.0
Case 5c					0(不抽水)

注:空白处与 Base case 设置相同.

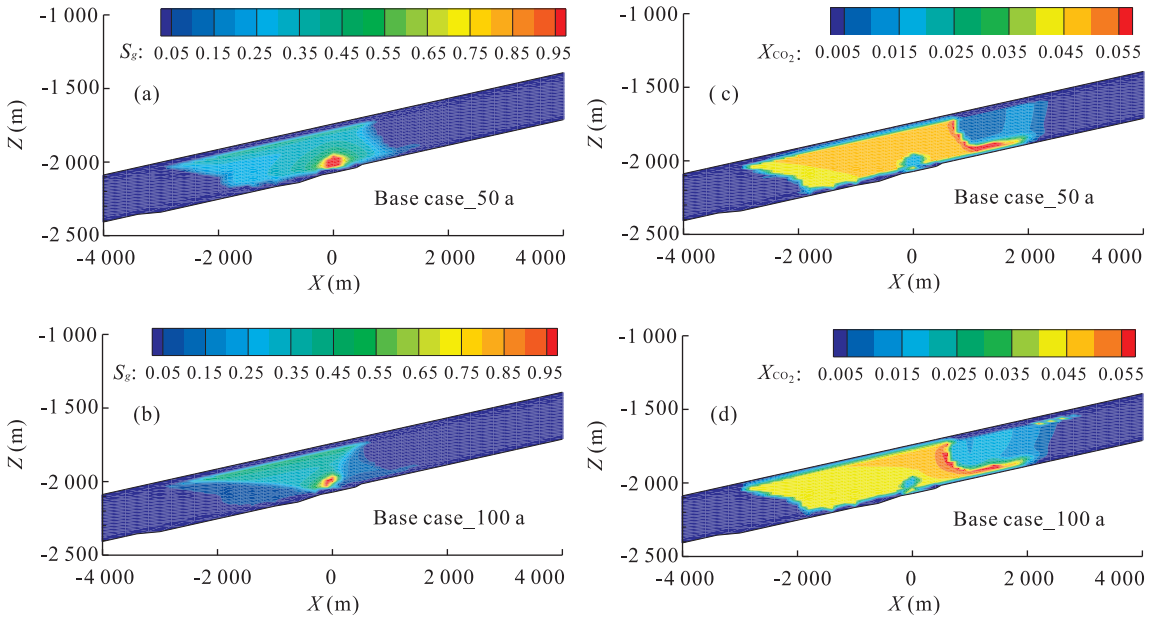


图 3 Base case 中 A-A'剖面 CO₂ 饱和度和溶解的质量分数在不同时间的分布情况

Fig.3 The distribution of CO₂ gas saturation and dissolved CO₂ mass fraction along the A-A' cross section at different times for the Base case

剖面位置见图 1; S_g 代表 CO₂ 饱和度; X_{CO₂} 代表 CO₂ 溶解的质量分数

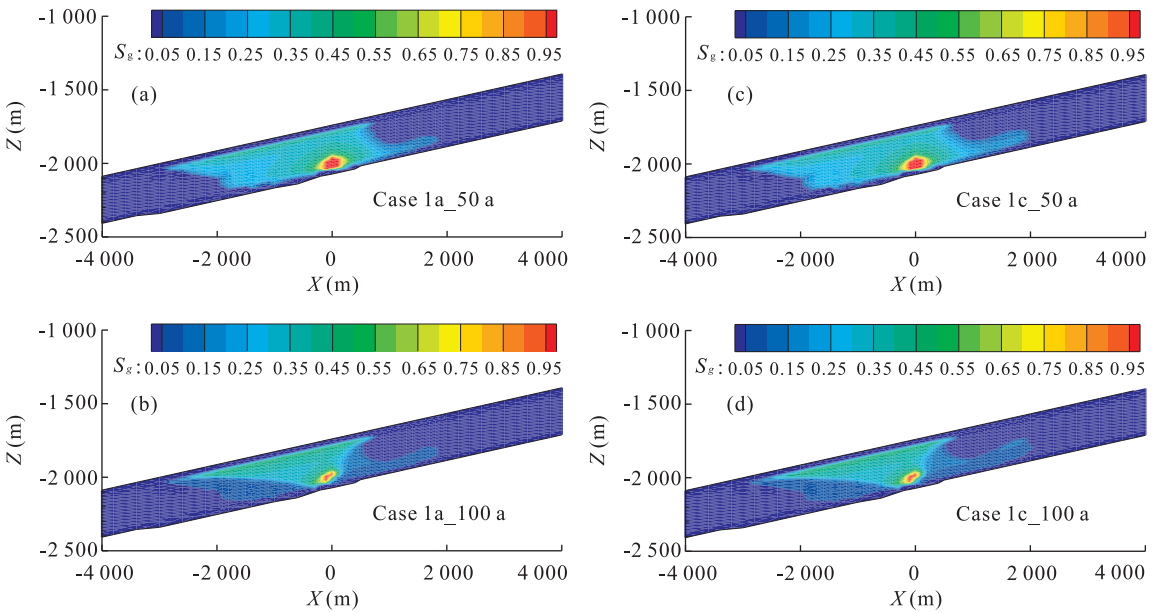


图 4 Case 1a 和 Case 1c 中 A-A'剖面 CO₂ 饱和度在不同时间的分布情况

Fig.4 The distribution of CO₂ gas saturation along the A-A' cross section at different times for the Cases 1a and 1c

剖面位置见图 1; S_g 代表 CO₂ 饱和度

时地层的最大压力提升达到了 9.1 MPa.

2.2 注水位置的影响

由于在浮力作用下, CO₂ 羽会向储层上部运移, 而运移到储层上部的 CO₂ 会在盖层阻挡下侧向扩散, 即在远离注入井位置 CO₂ 羽主要存在于储层

上部, 故 Case 1a~ Case 1c 中设置仅在储层上部注水. 结果显示, 当仅在储层上部某段长度注水时, 形成的水力屏障阻止了储层上部 CO₂ 运动, 但仍有少量 CO₂ 从储层下部通过了 1 km 处设置的水力屏障 (图 4a 和 4c). 主要原因是由于 CO₂ 注入速度较大,

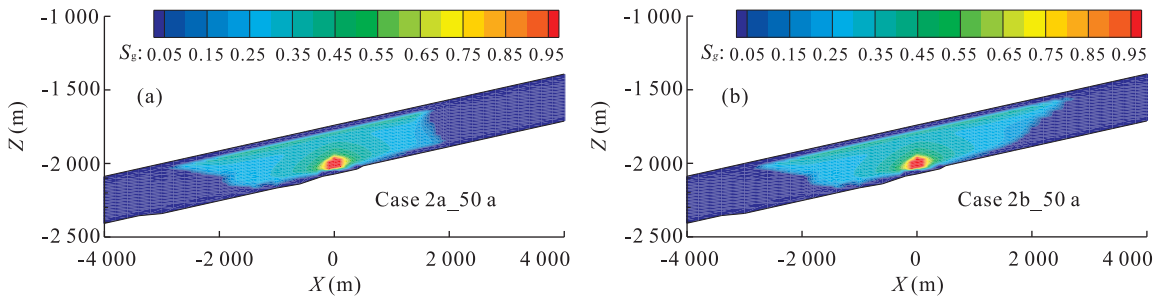


图 5 Case 2a 和 Case 2b 中 A-A' 剖面 CO₂ 饱和度在 50 a 时的分布情况

Fig.5 The distribution of CO₂ gas saturation along the A-A' cross section at 50 years for the Cases 2a and 2b
剖面位置见图 1; S_g 代表 CO₂ 饱和度

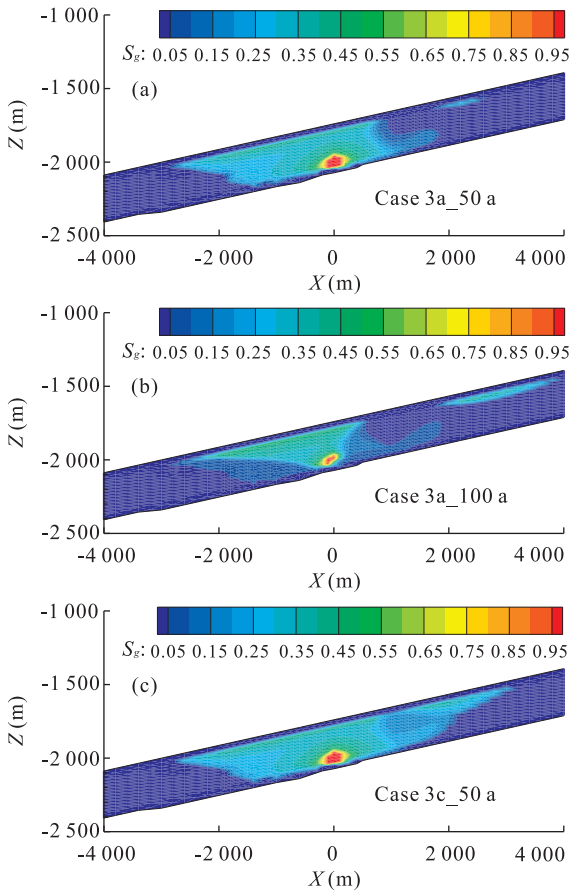


图 6 Case 3a 和 Case 3c 中 A-A' 剖面 CO₂ 饱和度在不同时间的分布情况

Fig.6 The distribution of CO₂ gas saturation along the A-A' cross section at different times for the Cases 3a and 3c
剖面位置见图 1; S_g 代表 CO₂ 饱和度

剖面位置见图 1; S_g 代表 CO₂ 饱和度

注入井周围 CO₂ 侧向扩散明显, 50 a 时储层下部的 CO₂ 羽运移到了 1 km 处, 而储层下部没有水注入, 上部水注入的影响范围有限, CO₂ 在压力作用下继续向右侧运动。

水的持续注入使得通过水力屏障的部分 CO₂

溶解, 故随着时间增加, 水力屏障右侧 CO₂ 饱和度逐渐降低(图 4b 和 4d)。如果增加水的注入速度, 有可能使得水力屏障周围的 CO₂ 完全溶解。上述结果表明仅在储层上部某段长度注水可能并不能完全阻挡 CO₂ 羽的向上运移, 储层上部注水段的长度越大, 阻挡 CO₂ 的效果越好。为了确保能完全阻挡 CO₂ 运移, 需要储层上部的注水长度大于 CO₂ 羽的厚度, 甚至是在全部储层注水。

2.3 注水距离的影响

50 a 时, Case 2a 中 CO₂ 羽在 2 km 注水点处受到阻挡(图 5a), 而在 Case 2b 和 Case 2c 中, 注水对 CO₂ 羽运移影响很小(图 5b)。明显地, 在设定的注水速度条件下, 随着注水距离的增加, 注水对 CO₂ 羽的阻挡作用逐渐减弱。仅当 CO₂ 到达注水点时, 注水才有显著的效果。这表明注水距离越近效果越好, 此外, 暗示笔者在确定了注水距离的情况下, 可以提前预测 CO₂ 羽的运移, 或者在注水井中监测 CO₂ 到达(即注水井可以作为监测井), 在超临界 CO₂ 羽到达注水点前开始注水(初始注水速度可能较大), 这样可能减少注入水量及能源消耗, 同时发挥较好的阻挡作用。

2.4 注水速度的影响

Case 3a 中, 50 a 时储层上部和下部均有少量 CO₂ 通过 1 km 处的水力屏障(图 6a), 100 年时通过水力屏障的 CO₂ 数量增加(图 6b)。Case 3b 和 Case 3c 中, 随着注水速度降低, 水力屏障的效果越来越差(图 6c)。这表明, 注水速度是影响水力屏障效果的关键因素, 注水速度越大效果越好。但同时应考虑到速度越大会消耗更多的水量及能源, 且会导致更高的地层压力, 不利于封存安全。因此, 需要根据实际情况确定合适的注水速度。

同理, CO₂ 注入结束后, 尽管注水速度可以降低, 但如果速度太低, CO₂ 羽会通过水力屏障。100 a

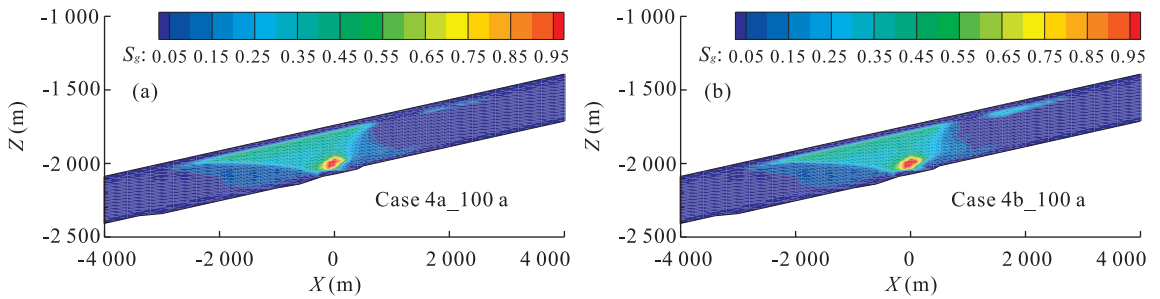


图 7 Case 4a 和 Case 4b 中 A-A' 剖面 CO_2 饱和度在 100 年时的分布情况

Fig.7 The distribution of CO_2 gas saturation along the A-A' cross section at 100 years for the Cases 4a and 4b
剖面位置见图 1; S_g 代表 CO_2 饱和度; X_{CO_2} 代表 CO_2 溶解的质量分数

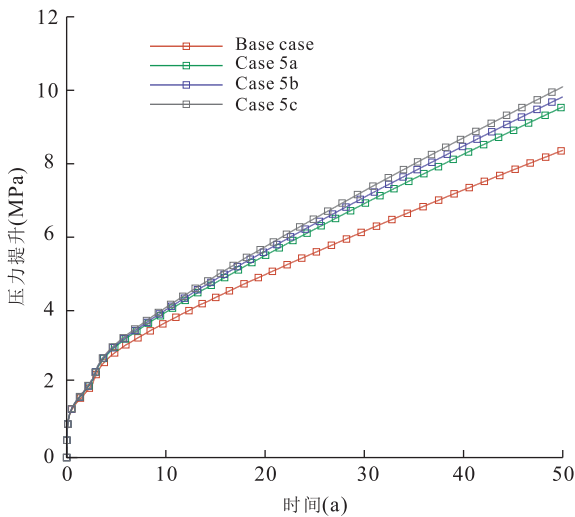


图 8 不同抽水速度下监测点的压力提升情况

Fig.8 The pressure buildup of the monitoring point at different injection rates

时, Case 4a 中有极少数 CO_2 运移到水力屏障右侧 (图 7a), Case 4b 中通过水力屏障的 CO_2 更多 (图 7b)。

2.5 抽水速度的影响

50 a 时, Base case 中监测点的压力提升为 8.37 MPa, Case 5a 和 Case 5b 中抽水速度降低, 监测点最大压力提升分别升高到 9.55 MPa 和 9.82 MPa (图 8)。相比 Case 5c 中不抽水的情况 (监测点最大压力提升为 10.10 MPa), 不同速度的抽水均能起到降低地层压力的作用, 且抽水速度越大, 降低地层压力的作用越显著。抽水井设置的主要障碍在于必须防止将 CO_2 抽出, 因此抽水井需要设置在储层底部且不能离 CO_2 注入井太近, 而抽水速度需要综合考虑地层的出水能力、能源消耗及抽出的卤水处理等问题。在全面分析上述问题的基础上, 确定合理有效的抽水方案。

2.6 综合评价

相比 CO_2 注入操作, 本方法中抽水和注水操作相对简单, 技术上是可行的。注水和抽水方案需要根据 CO_2 封存实际情况确定。抽水井主要起降低地层压力的作用, 但抽水井是一个人为通道, CO_2 可能通过抽水井发生泄漏, 因此, 一方面要做好非抽水段的密封工作, 另一方面可以开展监测工作 (如监测抽出水的化学成分), 一旦发生 CO_2 泄漏, 应停止抽水并实施封堵。实际封存场地需要开展 CO_2 通过抽水井泄漏的评估工作。如果 CO_2 注入速度和注水速度均不大, 且地层条件较好时, 可考虑不用设置抽水井。注水井和抽水井均可考虑作为 CO_2 封存工程中的监测井使用, 开展部分监测项目, 这样可能无需额外设置监测井。此外, 如果封存场地范围内存在废弃井孔, 且条件合适, 可以考虑作为注水井和抽水井使用, 这样可以节省钻井成本。抽水井抽出的地层水可以考虑作为注入水, 这样避免了卤水处理及新鲜水消耗的问题。本方法除了用于阻挡倾斜地层中 CO_2 羽的迁移外, 对其他为了控制 CO_2 羽运移的情况仍然适用。

本文开展的是理想模型研究, 实际 CO_2 封存场地的地质条件要复杂很多。针对本文提出的方法, 实际场地需要重点考虑以下 3 方面的问题:

(1) 实际 CO_2 封存场地的地层很可能不是向单一方向倾斜的, 因此, 需要详细查明地层条件, 并评估 CO_2 羽的优势迁移方向, 以此确定注水井的合理位置。此外, 为了提高该方法的有效性, 有可能需要设置多口注水井, 同时或分时段注水。

(2) 实际储层极可能是非均质的。在设置注水井和抽水井位置及注水和抽水速度时, 需充分考虑地层非均质性对 CO_2 羽运移及地层压力提升的影响。

(3) 尽管抽水可以抑制地层压力提升, 但注水始终会造成地层压力提升的范围进一步扩大, 从而使得

CO₂ 封存工程的风险性增加。比如,当 CO₂ 封存站点附近存在断层时,很可能不适宜采用本方法。因此,需详尽评估注水引起压力提升带来的潜在安全问题。

3 结论

(1)注水形成的水力屏障能有效阻挡 CO₂ 羽的向上迁移,此外,注水能促进 CO₂ 溶解,但会造成地层压力进一步提升。在地层倾斜下降一侧设置抽水井抽水能显著降低地层压力。

(2)仅在储层上部某段长度注水可能并不能完全阻挡 CO₂ 羽的向上运移,储层上部注水段的长度越大,阻挡 CO₂ 的效果越好。为了确保能完全阻挡 CO₂ 运移,需要储层上部的注水长度大于 CO₂ 羽的厚度,甚至是在全部储层注水。

(3)注水距离越近阻挡 CO₂ 运移的效果越好。在注水距离一定时,可以在 CO₂ 羽即将到达之前注水,以减少注水量和能源消耗。

(4)注水速度是影响水力屏障效果的关键因素。注水和抽水速度越大效果越好,但需要同时考虑封存安全、能源消耗、水处理等问题。实际应用中,需要根据具体情况确定合理的注水和抽水方案。

References

Bachu, S., 2003. Screening and Ranking of Sedimentary Basins for Sequestration of CO₂ in Geological Media in Response to Climate Change. *Environmental Geology*, 44(3): 277–289. doi: 10.1007/s00254-003-0762-9

Birkholzer, J. T., Zhou, Q., 2009. Basin-Scale Hydrogeologic Impacts of CO₂ Storage: Capacity and Regulatory Implications. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(6): 745–756. doi: 10.1016/j.ijggc.2009.07.002

Buscheck, T. A., Sun, Y., Chen, M., et al., 2012. Active CO₂ Reservoir Management for Carbon Storage: Analysis of Operational Strategies to Relieve Pressure Buildup and Improve Injectivity. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 6(1): 230–245. doi: 10.1016/j.ijggc.2011.11.007

Corey, A. T., 1954. The Interrelation between Gas and Oil Relative Permeabilities. *Producers Monthly*, 19(1): 38–41.

Court, B., Bandilla, K. W., Celia, M. A., et al., 2012. Initial Evaluation of Advantageous Synergies Associated with Simultaneous Brine Production and CO₂ Geological Sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 8(5): 90–100. doi: 10.1016/j.ijggc.2011.12.009

de Coninck, H., Benson, S. M., 2014. Carbon Dioxide Capture and Storage: Issues and Prospects. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1): 243–270. doi: 10.1146/annurev-environ-032112-095222

Deng, H., Stauffer, P. H., Dai, Z., et al., 2012. Simulation of Industrial-Scale CO₂ Storage: Multi-Scale Heterogeneity and Its Impacts on Storage Capacity, Injectivity and Leakage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10: 397–418. doi: 10.1016/j.ijggc.2012.07.003

Doughty, C., Freifeld, B. M., Trautz, R. C., 2008. Site Characterization for CO₂ Geologic Storage and Vice Versa: the Frio Brine Pilot, Texas, USA as a Case Study. *Environmental Geology*, 54(8): 1635–1656. doi: 10.1007/s00254-007-0942-0

Fang, Q., Li, Y. L., Cheng, P., et al., 2014. Enhancing CO₂ Injectivity in High-Salinity and Low-Permeability Aquifers: A Case Study of Jiangnan Basin, China. *Earth Science*, 39(11): 1675–1683.

IPCC, 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge.

Jing, J., Yuan, Y. L., Yang, Y. L., et al., 2014. Influence of Strata Dip on CO₂ Geological Storage—A Case Study of Erdos CCS Project. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (6): 39–44 (in Chinese with English abstract).

Leonenko, Y., Keith, D. W., 2008. Reservoir Engineering to Accelerate the Dissolution of CO₂ Stored in Aquifers. *Environmental Science & Technology*, 42(8): 2742–2747. doi: 10.1021/es071578c

Li, X. C., Liu, Y. F., Bai, B., et al., 2006. Ranking and Screening of CO₂ Saline Aquifer Storage Zones in China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(5): 963–968 (in Chinese with English abstract).

Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., et al., 2010. Geological Storage of CO₂ in Saline Aquifers—A Review of the Experience from Existing Storage Operations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(4): 659–667. doi: 10.1016/j.ijggc.2009.12.011

Nordbotten, J. M., Kavetski, D., Celia, M. A., et al., 2009. Model for CO₂ Leakage Including Multiple Geological Layers and Multiple Leaky Wells. *Environmental Science & Technology*, 43(3): 743–749. doi: 10.1021/es801135v

Pruess, K., García, J., 2002. Multiphase Flow Dynamics during CO₂ Disposal into Saline Aquifers. *Environmental Geology*, 42(2–3): 282–295. doi: 10.1007/s00254-001-0498-3

Pruess, K., Nordbotten, J., 2011. Numerical Simulation Studies of the Long-Term Evolution of a CO₂ Plume in a

- Saline Aquifer with a Sloping Caprock. *Transport in Porous Media*, 90(1): 135–151. doi: 10.1007/s11242-011-9729-6
- Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G., 2012. TOUGH2 User's Guide, Version 2.1. Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley.
- Pruess, K., Spycher, N., 2007. ECO2N—A Fluid Property Module for the TOUGH2 Code for Studies of CO₂ Storage in Saline Aquifers. *Energy Conversion and Management*, 48(6): 1761–1767. doi: 10.1016/j.enconman.2007.01.016
- Réveillère, A., Rohmer, J., Manceau, J. C., 2012. Hydraulic Barrier Design and Applicability for Managing the Risk of CO₂ Leakage from Deep Saline Aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 9: 62–71. doi: 10.1016/j.ijggc.2012.02.016
- Shi, X. Q., Zhang, K. N., Wu, J. C., 2009. The History and Application of TOUGH2 Code. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (10): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- Sung, R. T., Li, M. H., Dong, J. J., et al., 2014. Numerical Assessment of CO₂ Geological Sequestration in Sloping and Layered Heterogeneous Formations; A Case Study from Taiwan. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 20: 168–179. doi: 10.1016/j.ijggc.2013.11.003
- van Genuchten, M. T., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892–898.
- Yamamoto, H., Zhang, K., Karasaki, K., et al., 2009. Numerical Investigation Concerning the Impact of CO₂ Geologic Storage on Regional Groundwater Flow. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(5): 586–599. doi: 10.1016/j.ijggc.2009.04.007
- Yang, G. D., Li, Y. L., Ma, X., et al., 2014. Effect of Chlorite on CO₂-Water Rock Interaction. *Earth Science*, 39(4): 462–472.
- Zhang, K., Wu, Y. S., Pruess, K., 2008. User's Guide for TOUGH2-MP-A Massively Parallel Version of the TOUGH2 Code. Report LBNL-315E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
- Zhao, R., Cheng, J., Zhang, K., 2012. CO₂ Plume Evolution and Pressure Buildup of Large-Scale CO₂ Injection into Saline Aquifers in Sanzhao Depression, Songliao Basin, China. *Transport in Porous Media*, 95(2): 407–424. doi: 10.1007/s11242-012-0052-7
- Zhou, Q., Birkholzer, J. T., Mehnert, E., et al., 2010. Modeling Basin- and Plume-Scale Processes of CO₂ Storage for Full-Scale Deployment. *Ground Water*, 48(4): 494–514. doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00657.x

附中文参考文献

- 房琦, 李义连, 程鹏, 等, 2014. 低渗卤水盆地提高 CO₂ 注入性的技术方法: 以江汉盆地为例. *地球科学*, 39(11): 1675–1683.
- 靖晶, 苑艺琳, 杨艳林, 等, 2014. 地层倾角对 CO₂ 地质封存的影响研究——以鄂尔多斯 CCS 工程为例. *工程勘察*, (6): 39–44.
- 李小春, 刘延锋, 白冰, 等, 2006. 中国深部咸水含水层 CO₂ 储存优先区域选择. *岩石力学与工程学报*, 25(5): 963–968.
- 施小清, 张可霓, 吴吉春, 2009. TOUGH2 软件的发展及应用. *工程勘察*, (10): 29–34.
- 杨国栋, 李义连, 马鑫, 等, 2014. 绿泥石对 CO₂-水-岩石相互作用的影响. *地球科学*, 39(4): 462–472.