

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.17

地质封存二氧化碳沿断层泄漏数值模拟研究

张志雄¹, 谢健¹, 戚继红¹, 胡立堂², 张可霓³, 吴礼舟¹

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;
3. 劳伦斯伯克利国家实验室, 美国加州 伯克利 94720)

摘要:安全性和封存效果是二氧化碳(CO₂)地质封存(GCS)最受关注的问题,其中以断层/裂缝引起的场地不确定性因素较为复杂。利用储层多相流模拟软件 TOUGH2/ECO2N,研究了不同情境下注入深部咸水层中的 CO₂ 沿断层发生泄漏的时间、速率、泄漏量等特征。通过 15 个场地尺度的模型结果分析表明,CO₂ 注入方案、断层性质(发育位置、产状、几何形态、内部结构)、系统内岩层的组合形态对 CO₂ 泄漏均有影响。相同储存环境和断层发育条件下,CO₂ 注入速率从 1.59 kg/s 增加至 6.34 kg/s,CO₂ 泄漏时间提前 3 706 d,泄漏量在 20 a 后增加至注入总量的 32.43%。断层发育位置对 CO₂ 封存影响极为显著,本次研究,距注入井 100 m 位置的断层可造成 CO₂ 的泄漏量在 20 a 后高达总注入量的 63.39%。相同条件下,倾斜/窄小的断层比垂直/宽厚的断层对 CO₂ 及储层咸水的泄漏影响更小。断层渗透率增加一倍,可导致 CO₂ 泄漏量增加 2.11%,泄漏速率约提高 0.006~0.01 kg/s。

关键词: CO₂ 地质封存(GCS);咸水层;CO₂ 泄漏;断层;TOUGH2

中图分类号: P642.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0109-08

Numerical simulation of CO₂ leakage along faults from geologic carbon dioxide sequestration

ZHANG Zhixiong¹, XIE Jian¹, QI Jihong¹, HU Litang², ZHANG Keni³, WU Lizhou¹

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)

Abstract: Safety and storage performance are the most attracting issues for geological CO₂ storage (GCS), in which the site uncertainties caused by faults/fractures are complex. Based on the reservoir multiphase flow simulator TOUGH2/ECO2N, the time, the CO₂ leakage rate and the amount of leakage from the deep saline aquifer along the fault were studied under various conditions. The results of 15 site-scale models show that the CO₂ injection scheme, fault properties (location, occurrence, geometry, and structure) and the combination of rock formations in the system have effects on CO₂ leakage. Under the same reservoir environment and fault occurrence conditions, the CO₂ injection rate increases from 1.59 kg/s to 6.34 kg/s, the CO₂ leakage occurs 3 706 days earlier and the leakage amount increases by 32.43% in 20 years. The effect of fault location on CO₂ storage is significant. In this study, a fault located at 100 m from the injection well will cause the CO₂ leakage to be as high as 63.39% of the injection after 20 years. Under the same conditions, the inclination/narrow faults have less effect on the leakage of CO₂ and brine than the vertical/thick faults. An increase in

收稿日期: 2017-07-29; 修订日期: 2017-09-10

基金项目: 国家能源应用技术研究及工程示范项目(NY20111102-1);多源同汇地下水流系统水动力弥散混合特征沙槽模型研究(41402223)

第一作者: 张志雄(1995-),男,研究生,主要从事地下水数值模拟研究。E-mail:1599644726@qq.com

通讯作者: 谢健(1978-),男,博士,主要从事地下多相流数值模拟方面的研究工作。E-mail:ljfok@sina.cn

the fault permeability by one time can lead to the leakage of CO_2 to increase by 2.11% and the leakage rate to increase by 0.006 ~ 0.01 kg/s.

Keywords: geological CO_2 storage (GCS); saline aquifer; leakage; fault; TOUGH2

利用深部咸水层进行 CO_2 地质封存 (GCS) 被认为是实现大规模减排、缓解温室气体效应最具前景的技术之一^[1]。随着近年 GCS 工程在全球的不断推进和实施,其安全性和泄漏风险愈来愈引起人们重视。由于含水层不似废弃油气田,未有储气“经历”,因此其盖层(隔水层)完整性和地层垂向组合特征是否满足 GCS 密封性要求未得到充分验证。断层作为影响储层地质条件复杂性的重要不确定性因素,对 GCS 工程的安全性、封存效果具有至关重要的影响^[2]。断层及其破碎带往往是结构复杂的非均质系统^[3],GCS 场地如果存在穿透主要储层和盖层的断层, CO_2 极有可能沿着断层破碎带迁移至浅部地层甚至泄漏至地表。这不仅降低储层的封存能力,而且可能导致上覆含水层污染、激活断层等环境地质效应^[4]。

研究地质封存 CO_2 及其储层咸水在注入和封存阶段沿断层迁移泄漏的主要特征和受控因素是极为必要的。然而,目前国内外关于这一课题的研究还十分有限。Pruess^[5-7]研究了 CO_2 泄漏过程中的物理化学作用。郑菲等^[8]对苏北盆地 CO_2 地质封存泄漏风险的全局敏感性分析,发现与毛细压力有关的断层参数对断层中 CO_2 总量的影响最大。董华松等^[9]重点关注了 GCS 泄漏监测技术的发展。崔振东等^[4,10-11]研究了 CO_2 泄漏的风险及后果,指出泄漏可导致浅部淡水资源被污染、生态系统和人类健康受威胁,还有可能激活断层。总体来看,国内学者多数停留在介绍、综述国外研究成果和理论,缺少这一课题的专门定量研究^[12]。

本研究运用多相流达西定律,分析储层流体渗流的影响因素。在此基础上利用储层多相流模拟软件 TOUGH2/ECO2N 建立一系列场地泄漏模型,旨在揭示和阐明 GCS 流体沿断层泄漏的主要机理或规律,评估断层对 GCS 泄漏的可能影响,为场地评估和封存效果研究提供理论依据。

1 理论分析

CO_2 注入到含水层中会引起 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 混合系统多种复杂的物理化学耦合作用,其中最主要的是多组分多相流体的渗流过程,这可用多相流达西定律进行描述^[13]。向含水层中注入 CO_2 会引起孔隙压力的抬升,这必然会改变储层流体所受的压力梯度。而系统毛细

压力和流体黏度的变化也会导致流体流动性的变化。如果 CO_2 所在含水层被断层切割且断层导水,则储层流体在压力梯度和密度差引起的浮力作用下必然沿断层发生迁移,进而突破盖层进入上覆含水层。 CO_2 与咸水在含水层乃至断层中的迁移扩散的过程^[1,14]:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^K dV_n = \int_{\Gamma_n} F^K n d\Gamma_n + \int_{V_n} q^K dV_n \quad (1)$$

$$M^K = \Phi \sum S_\beta \rho_\beta X_\beta^K \quad (2)$$

$$F_\beta = -\rho_\beta \frac{k k_{r\beta}}{\mu_\beta} (\nabla P_\beta - \rho_\beta g) \quad (3)$$

式中: t ——注入时间;

V_n ——流动系统的体积;

M ——单位体积的质量或能量;

K ——组分;

F ——质量通量;

n ——表面单元 $d\Gamma_n$ 的法向矢量;

q ——质量或能量源汇项;

ϕ ——孔隙度;

S ——饱和度;

β ——相态(气相或液相);

ρ ——密度;

X ——质量分数;

k ——岩体固有渗透率;

k_r ——相对渗透率;

μ ——黏度;

∇P ——压力梯度;

g ——重力加速度。

由式(3)可知,在相同的储层环境下,增大 CO_2 注入速率,系统内气相相对渗透率及压力梯度 ∇P_β 均增大,这会导致 F_β 也增大,即泄漏速率及泄漏量增大;断层发育位置距离注入井越近,相同注入压力条件下断层中的压力梯度 ∇P_β 越大,因此泄漏速率及泄漏量也增大;断层倾角越小,泄漏途径增长,因此系统内压力梯度 ∇P_β 减小,泄漏速率及泄漏量也因此减小;断层断距的变动可改变断层两盘的连通性,若因断距使两盘的连通性增大,也就相当于 k 增大,因此泄漏速率及泄漏量也增大;对于断层厚度的改变,断层单位宽度上的 F_β 不变,但厚度增大后,泄漏量会增多;增大断层渗透性,显然泄漏速率及泄漏量都增大。

2 模型说明及模拟方案

2.1 地质模型及网格剖分

选取一套砂岩泥岩互层的地层为模型研究场地,包括3层泥岩和3层砂岩(图1),以砂岩3为目标储层,泥岩2为主盖层。模型水平方向以注入井为中心,径向延伸1 000 m,地层模拟段埋深1 000~1 220 m。基础模型断层发育位置距注入井300 m,断层垂直。

另外设置了一组研究倾斜断层的模型,模型水平径向范围为900 m,地层埋深1 000~1 200 m。所有模型均采用矩形网格剖分,网格大小0.5~50 m不等,于注入井和断层附近加密,加密区网格水平间距为0.3~1.0 m。为了更好地刻画断层,将断层带分成渗透性较高的破碎强烈带和渗透性较小的断层破碎影响带,而且在研究断层渗透性的模型中还将断层分成上下1区和2区(图2)。

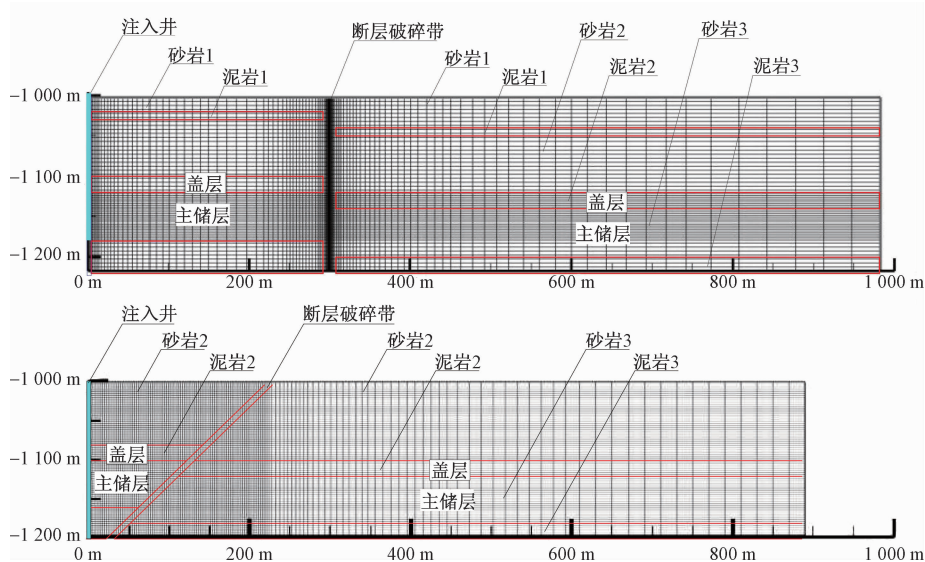


图1 地质概念模型及网格剖分图

Fig. 1 Geological model and grid design

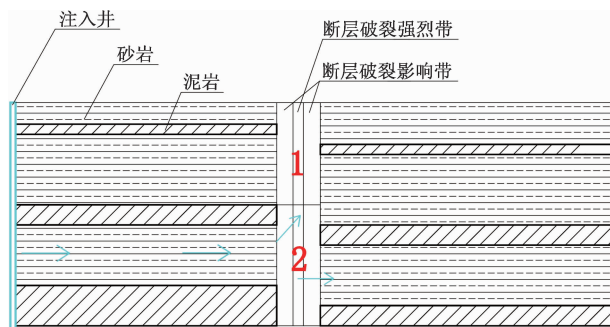


图2 断层带分区刻画示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the zonation of faults

2.2 模型方案及参数设置

为揭示可能影响GCS泄漏的断层特征和注入方式,设计了6个方案总共15个模拟进行研究。方案I、II、III、IV、V、VI是分别用于探讨注入速率、断层位置、断层倾角、断层断距、断层带厚度及断层渗透性对泄漏的影响,各模拟方案及参数设置,见表1。为了方便对照,表中基础模型(编号1)有重复。

模型中储层及盖层的参数是参考神华CCS项目

的主要储层刘家沟组及上部泥岩层设置的,其它参数则是在储层及盖层的基础上设计的;断层的倾角设置成90°(研究倾角的除外),这主要是为了方便刻画模型;切穿深部地层的断裂倾角一般较大,因此在方案III中设置了大于45°的三个倾角;对于注入速率3.17 kg/s是参考神华项目的 10×10^4 t/a设置。概念模型中各地质单元的水文地质参数具体设置见表2。

2.3 模型边界条件与初始条件

模型右侧侧向边界设置为常压边界,以保证含水层水平方向的开放(无限含水层),设置成常压边界是将边界上的网格体积设置成超大体积(10^{51} m^3)实现的。每个模型的左侧边界分成三段,上下两段都设置成无渗流边界,渗透率设成很低(10^{-20} m^2);中段设置成常压边界,保证 CO_2 能正常注进储层,只需把渗透率设置成比储层的渗透率略大。

模型中各地层温度假设为42.5℃,模拟过程不考虑非等温效应。模型顶部压强参考神华CCS场地取12.0 MPa,利用重力平衡计算得出模型的初始压力分布。盐度也参考神华的刘家沟组咸水层取0.03%。各地层中的初始 CO_2 质量分数为0。

表 1 模型方案及断层参数设置

Table 1 Model schemes and associated fault parameters

方案 编号	研究 内容	模型 编号	$V/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	ζ/m	$\alpha/^\circ$	d/m	λ/m	K_{1x}, K_{1y} /mD	K_{1z} /mD	K_{2x}, K_{2y} /mD	K_{2z} /mD
I	注入 速率	3	1.585	300	90	20	10	20	30	30	40
		1	3.17	300	90	20	10	20	30	30	40
		2	6.34	300	90	20	10	20	30	30	40
II	断层 位置	4	3.17	100	90	20	10	20	30	30	40
		1	3.17	300	90	20	10	20	30	30	40
		5	3.17	500	90	20	10	20	30	30	40
III	断层 倾角	6	3.17	100	45	20	10	353.6	353.6	353.6	353.6
		7	3.17	100	60	20	10	250	433	250	433
		8	3.17	100	90	20	10	100	500	100	500
IV	断层 断距	9	3.17	300	90	-20	10	20	30	30	40
		1	3.17	300	90	20	10	20	30	30	40
		10	3.17	300	90	40	10	20	30	30	40
V	断层 带厚度	1	3.17	300	90	20	10	20	30	30	40
		11	3.17	300	90	20	15	20	30	30	40
		12	3.17	300	90	20	20	20	30	30	40
VI	断层带渗透性	1	3.17	300	90	20	10	20	30	30	40
		13	3.17	300	90	20	10	40	60	60	80
		14	3.17	300	90	20	10	40/20	60/30	60/30	80/40
		15	3.17	300	90	20	10	20/40	30/60	30/60	40/80

注:表中 V 为 CO_2 注入速率; ζ 为断层距注入井的距离; α 为断层倾角; d 为断层断距; λ 为断层破碎带厚度; K_{1x}, K_{1y} 为断层破碎影响带水平方向渗透率; K_{1z} 为断层破碎影响带垂直方向渗透率; K_{2x}, K_{2y} 为断层破碎强烈带水平方向渗透率; K_{2z} 为断层破碎强烈带垂直方向渗透率。

表 2 概念模型的各地质单元物性参数设置一览表

Table 2 Physical properties of the geological units in the models

地质 单元	d_1 /m	d_2 /m	$n/\%$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	K_x, K_y /mD	K_z /mD	P_0 /kPa	m	S_{lr}	S_{gr}
砂岩 1	40	10	20	2 400	15	1.5	7.66	0.50	0.30	0.05
泥岩 1	10	5	8	2 600	1.21×10^{-3}	1.21×10^{-4}	50.00	0.40	0.22	0.22
砂岩 2	70	25	20	2 400	15	1.5	13.51	0.50	0.30	0.05
泥岩 2	20	10	8	2 600	1.16×10^{-3}	1.16×10^{-4}	66.67	0.40	0.22	0.22
砂岩 3	60	30	18	2 400	9.4	0.94	14.71	0.45	0.30	0.05
泥岩 3	40	10	8	2 600	1.11×10^{-3}	1.11×10^{-4}	100	0.40	0.22	0.22

注:表中 d_1 为主模型各地质单元厚度; d_2 为辅助模型各地质单元厚度; n 为孔隙度; ρ 为密度; K_x, K_y 为水平方向渗透率; K_z 为垂直方向渗透率; P_0 为进气毛细压力; m 为孔隙分布指数; S_{lr} 为残余液相饱和度; S_{gr} 为残余气相饱和度。

3 模型结果及分析

3.1 泄漏时间

文中以有 CO_2 通过盖层底部断层位置的时刻为开始泄漏时间,是表征 CO_2 在储层中迁移速率的一个变量。文中储层及流体的性质都一致,所以 CO_2 从注入到泄漏的时间长短,主要取决于压力梯度 ∇P_β 的大小和断层位置的远近。表 3 为 6 组模拟方案的泄漏时间列表,可见注入速率、断层位置及断层倾角对泄漏时间的影响最大,其次是断层带的渗透性,而断层的断距、厚度对其影响不大。注入速率由 1.585 kg/s 增大到 6.34 kg/s,泄漏时间提前了 3 853 d;断层位置由 500 m 减至 100 m,泄漏时间由 9 821 d 提前至 277 d;

断层倾角由 45° 增至 90° ,泄漏时间由 132 d 提前至 91 d,突破模型顶部时间提前了 360 d;断层渗透性放大一倍后,虽然开始泄漏时差别不大,但突破模型顶部时间提前了 3 782 d;但考虑到断层上下部分渗透性不同时,发现其泄漏时间是由两部分共同决定的,但并不是对等关系。

3.2 泄漏速率

泄漏速率不同于泄漏时间,它表征的是单位时间泄漏量的多少。图 3 为各组模型的地下水及 CO_2 泄漏速率曲线。需要注意的是讨论泄漏速率皆为 Z 向的。注入速率对 CO_2 及地下水的泄漏速率的影响显著(图 3a),注入速率由 1.585 kg/s 抬高至 6.34 kg/s, CO_2 的泄漏速率加快了 0.07 ~ 0.075 kg/s,地下水的

表 3 不同模拟方案 CO₂ 泄漏时间对比

Table 3 Comparison of the time at which CO₂ leaks for various modeling schemes

方案编号	模型编号	控制变量	初始泄漏时间/d	突破顶部时间/d	备注
I (注入速率)	3	1.585 kg/s	5 310	15 302	注入速率越大,泄漏时间越早
	1	3.17 kg/s	2 812	9 178	
	2	6.34 kg/s	1 457	5 187	
II (断层位置)	4	100 m	277	1 862	断层位置越远,泄漏时间越晚
	1	300 m	2 812	9 178	
	5	500 m	9 821	> 15 000	
III (断层倾角)	6	45°	132	700	断层倾角越大,泄漏时间越早
	7	60°	119	481	
	8	90°	91	340	
IV (断层断距)	9	-20 m	2 844	9 983	
	1	20 m	2 812	> 11 000	
	10	40 m	2 771	10 579	
V (断层带厚度)	1	10 m	2 812	9 178	
	11	15 m	2 893	13 179	
	12	20 m	2 958	9 180	
VI (断层渗透性)	1	K _x , K _y	2 812	9 178	断层带渗透性越大,泄漏时间越早。
	13	2K _x , 2K _y	2 826	5 306	
	14	K _x , K _y	2 810	6 296	
		2K _x , 2K _y			
	15	2K _x , 2K _y	2 828	7 328	
		K _x , K _y			

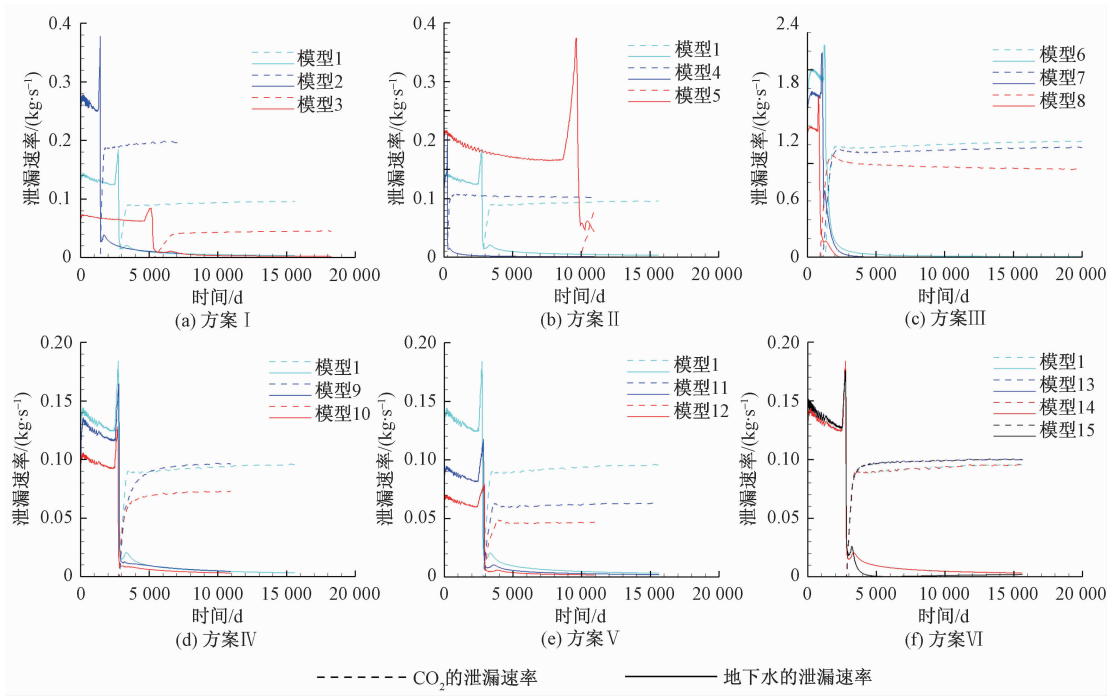


图 3 地下水及 CO₂ 的泄漏速率与时间的关系

Fig. 3 Leakage rate of CO₂ and groundwater

泄漏速率加快了 0.18 ~ 0.20 kg/s。断层位置的远近对 CO₂ 泄漏速率影响较大,距注入井 500 m 位置的 CO₂ 泄漏速率相对于 100 m 的加快了 0.09 ~ 0.16 kg/s;但其对地下水的影响更大,这主要是因为地下水

密度更大,而且 CO₂ 驱替地下水是一个积累的过程,断层位置越远地下水泄漏量越大。图 3c 中可见,断层倾角越大泄漏速率偏小,90°倾角相对于 45°倾角,CO₂ 泄漏速率小了 0.18 ~ 0.34 kg/s。图 3d 中的规律不够

显著,应该是断距的大小会影响 Z 向和 R 向的泄漏量大小的比例。断层带厚度的影响很显著,厚度越窄速率越快。断层厚度由20 m减为10 m,地下水速率增加了0.065 ~ 0.112 kg/s, CO_2 泄漏速率增加了0.048 ~ 0.054 kg/s。图3f四个曲线差别不大,断层渗透性提升一倍, CO_2 泄漏速率提高了约0.005 kg/s。

3.3 CO_2 羽体分布及泄漏量

CO_2 发生泄漏后,泄漏量的大小可以用于评判 CO_2 封存效果及封存安全性。有学者认为, CO_2 的泄漏量不应该超过注入总量的1%^[9]。图4为六个方案10a或20a后的 CO_2 羽体分布,水平方向为 R 向,垂直方向为 Z 向(深度),注入井位置在图的左侧。泄漏量的大小可大致通过 CO_2 羽分布范围大小来作比较,但为了更加精确的分析,图中右侧有注明储层残余 CO_2 的比例。注入总量是注入速率与注入时间的乘积,基础模型的 CO_2 注入总量为 $1.99 \times 10^6 \text{ t}$ 。图中可见 CO_2 羽体在储层中因密度小呈现“漏斗”状,而在上部砂岩

层因迁移先后呈现“倒漏斗”状。

综合10a或20a的 CO_2 分布和储层残余 CO_2 发现,注入速率、断层位置对 CO_2 泄漏量影响最大。注入速率(图4a)为1.585 kg/s时,储层残余 CO_2 占注入总量的81.97%;速率增大一倍后,残余 CO_2 为60.40%;速率增大3倍后,残余 CO_2 为49.54%,泄漏量增多32.43%。断层位置(图4b)为100 m, CO_2 泄漏量高达注入量63.39%;而在模型5(断层位置500 m)中还未发生泄漏。模型倾角由 45° 增大至 90° ,泄漏量相比增大了1.95%。图4d可见,断层右盘越靠下,泄漏量越大,当断距为40 m时,泄漏量高达注入量的43.46%。断层带厚度越大,泄漏量越大,厚度20 m相对于10 m的情况,泄漏量增大了5.26%(图4e)。断层渗透性越强,泄漏的越多,渗透率加倍后,泄漏量增加了2.11%(图4f);当考虑到断层上下部分渗透性不同时,发现其泄漏量是由两部分共同决定的,但并不是对等关系。

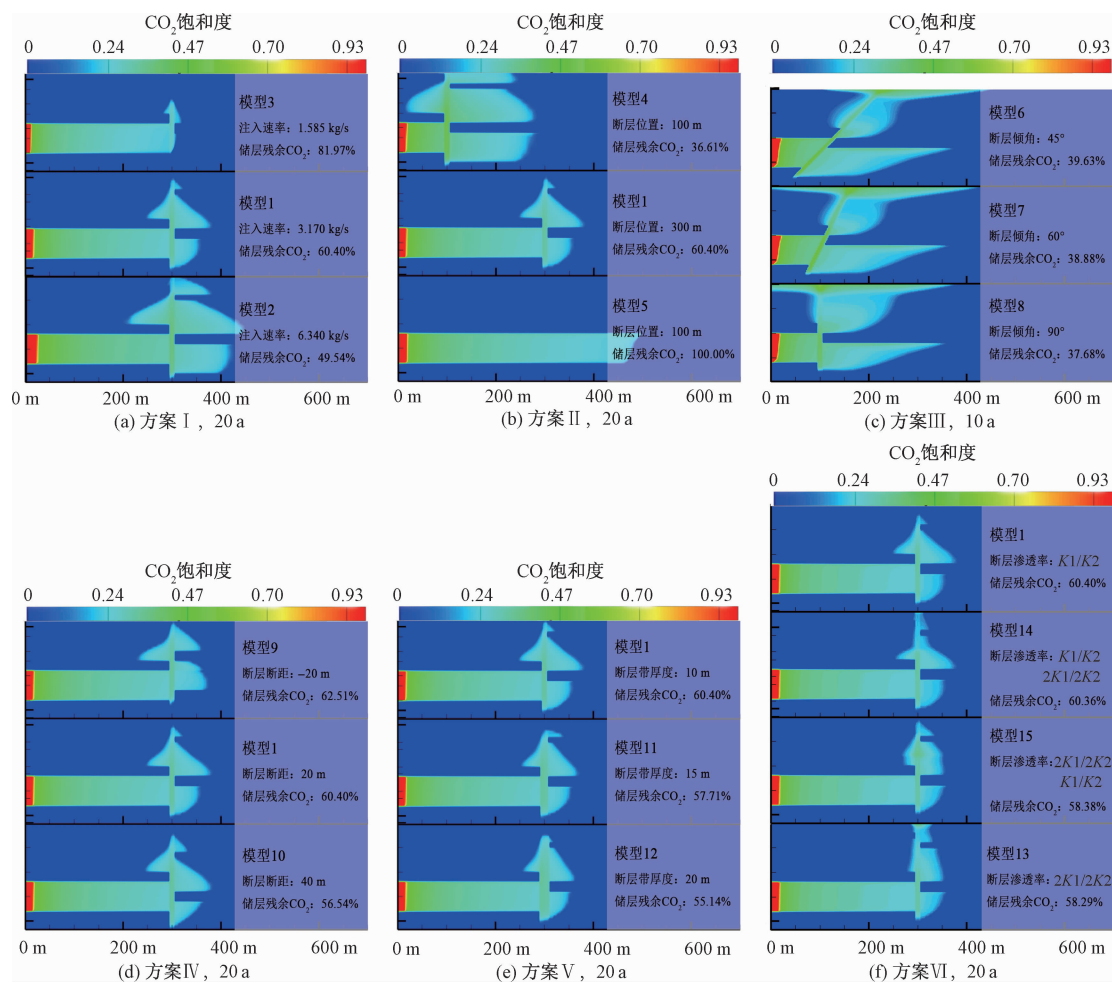


图4 不同模拟方案的 CO_2 羽分布图

Fig. 4 Comparison of the CO_2 plumes for different model schemes

3.4 结果分析

综合上述6个方案的模拟结果发现,研究注入速率、断层位置的I、II两个方案结果极其显著。在相同的储存环境下,增大CO₂注入速率,系统内气相相对渗透率及压力梯度 ∇P_{β} 均增大,这会导致泄漏速率及泄漏量增大;断层发育位置距离注入井越近,相同注入压力条件下断层中的压力梯度 ∇P_{β} 越大,因此泄漏速率及泄漏量也增大。

然而研究断层倾角、断距、厚度及渗透性的III、IV、V、VI 4个方案结果不是很显著。断层倾角越小,泄漏途径增长,因此系统内压力梯度 ∇P_{β} 减小,泄漏速率及泄漏量也因此减小;断层断距的变动可改变断层两盘的接触关系,极可能影响泄漏通道的连通性,若因断距使连通性增大,也就相当于 k 增大,因此泄漏速率及泄漏量也增大;对于断层厚度的改变,系统内压力梯度 ∇P_{β} 差别不大,导致断层单位宽度上的 F_{β} 变化很小,但厚度增大后,泄漏量会增多;增大断层渗透性,显然泄漏速率及泄漏量都增大。

4 结论

(1)6组模拟方案中,研究注入速率、断层位置的I、II 2个方案结果极其显著。注入速率由1.585 kg/s增大至6.34 kg/s,CO₂泄漏将提前3 853 d,泄漏量增多32.43%;断层距注入井的位置由500 m减小至100 m,CO₂泄漏将提前9 544 d,泄漏量增多63.39%。

(2)6组模拟方案中,研究断层倾角、断距、厚度及渗透性的III、IV、V、VI 4个方案结果较显著。断层倾角由45°增大至90°,CO₂泄漏将提前41 d,泄漏量增多1.95%;断层断距由-20 m增大至40 m,泄漏时间差别不大,但泄漏量增多5.97%;断层厚度由10 m增大到20 m,泄漏时间差别不大,但泄漏量增多5.26%;断层渗透性增大一倍,泄漏时间差别不大,但泄漏量增多2.11%;断层上下部分渗透性不同时,CO₂泄漏的影响是由两部分共同决定的,但并不是对等关系。

(3)模型结果分析表明,CO₂注入方案、断层性质(发育位置、产状、几何形态、内部结构)、系统内岩层的组合形态对CO₂泄漏均有影响。注入速率越大、断层位置越近、断层倾角越大、断层越厚、渗透性越高,CO₂泄漏的越早、泄漏量也越大。但断距对CO₂的泄漏主要受各岩层厚度及组合形态,与断距大小关系不大。在这些因素中,对CO₂泄漏影响最大的是注入速率和断层位置。

参考文献:

- [1] 谢健,张可霓,王永胜,等.鄂尔多斯深部咸水层CO₂地质封存效果评价[J].岩土力学,2016,37(1):166-174. [XIE J, ZHANG K N, WANG Y S, et al. Performance assessment of CO₂ geological storage in deep saline aquifers in Ordos Basin, China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 166-174. (in Chinese)]
- [2] Chuanhe Lu, Yunwei Sun, Thomas A, et al. Uncertainty quantification of CO₂ leakage through a fault with multiphase and nonisothermal effects [J]. Greenhouse Gases, 2012, 2(6): 445-459.
- [3] VIALLE S, DRUHAN JL, MAHER K. Multi-phase flow simulation of CO₂ leakage through a fractured caprock in response to mitigation strategies [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 44: 11-25.
- [4] 崔振东,刘大安,曾荣树,等. CO₂地质封存工程的潜在地质环境灾害风险及防范措施[J].地质论评,2011,57(5):700-706. [CUI Z D, LIU D A, ZENG R S, et al. Potential geological and environmental risks and its prevention measures for CO₂ geological storage projects [J]. Geological Review, 2011, 57(5): 700-706. (in Chinese)]
- [5] PRUESS K. Integrated modeling of CO₂ storage and leakage scenarios including transitions between super- and subcritical conditions, and phase change between liquid and gaseous CO₂ [J]. Greenhouse Gases, 2011, 1(3): 237-247.
- [6] PRUESS K. On CO₂ fluid flow and heat transfer behavior in the subsurface, following leakage from a geologic storage reservoir [J]. International Journal of Environmental Geology, 2008, 54(8): 1677-1686.
- [7] PRUESS K. Leakage of CO₂ from geologic storage: Role of secondary accumulation at shallow depth [J]. Greenhouse Gas Control, 2008, 2(1): 37-46.
- [8] 郑菲,施小清,吴吉春,等.苏北盆地盐城组咸水层CO₂地质封存泄漏风险的全局敏感性分析[J].高校地质学报,2012,18(2):232-238. [ZHENG F, SHI X Q, WU J C, et al. Global sensitivity analysis of leakage risk for CO₂ geological sequestration in the saline aquifer of Yancheng formation in Subei Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(2): 232-238. (in Chinese)]
- [9] 董华松,黄文辉. CO₂捕捉与地质封存及泄漏监测

- 技术现状与进展[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 123 - 128. [DONG H S, HUANG W H. Research of CO₂ capture, geological storage and leakage technologies[J]. Resources & Industries, 2010, 12(2): 123 - 128. (in Chinese)]
- [10] 李毅, 张可宽, 王笑雨. CO₂ 地质封存泄漏对浅层地下水影响的分析评价[J]. 工程勘察, 2014, 42(11): 44 - 50. [LI Y, ZHANG K N, WANG X Y. Assessment of the impact on shallow groundwater system by leakage of CO₂ geological storage [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(11): 44 - 50. (in Chinese)]
- [11] 田地, 马欣, 查良松, 等. 地质封存 CO₂ 泄漏对近地表陆地生态系统的影响综述[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 137 - 145. [TIAN D, MA X, ZHA L S, *et al.* Review of impact of CO₂ leakage from geologic storage on near-surface terrestrial ecological system. [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(2): 137 - 145. (in Chinese)]
- [12] 谢健, 魏宁, 吴礼舟, 等. CO₂ 地质封存泄漏研究进展[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 181 - 188. [XIE J, WEI N, WU L Z, *et al.* Progress in leakage study of geologic CO₂ storage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup1): 181 - 188. (in Chinese)]
- [13] ZHANG Keni, XU Yaqin, LING Lulu, *et al.* Numerical investigation for enhancing CO₂ injectivity in saline aquifers [J]. Energy Procedia, 2013, 37: 3347 - 3354.
- [14] Pruess K. ECO2N: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO₂ [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

责任编辑:张若琳

(上接第 108 页)

- [17] Kitaya Y, Shibuya T, Yoshida M, *et al.* Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO₂ level in a plant culture system [J]. Advances in Space Research, 2004, 34(7): 1466 - 1469.
- [18] Fisher J B, Baldocchi D D, Misson L, *et al.* What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California [J]. Tree Physiology, 2007, 27(4): 597 - 610.
- [19] 李妙伶, 周宏飞, 孙鹏飞. 准噶尔盆地南缘梭梭树干液流规律比较[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 101 - 108. [LI M L, ZHOU H F, SUN P F. Comparison of sap flow law of Haloxylon ammodendron in the southern margin of the Junggar Basin [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 101 - 108. (in Chinese)]
- [20] Schilling K E. Water table fluctuations under three riparian land covers, Iowa (USA) [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(18): 2415 - 2424.
- [21] Loheide S P. A method for estimating subdaily evapotranspiration of shallow groundwater using diurnal water table fluctuations [J]. Ecohydrology, 2008, 1(1): 59 - 66.
- [22] YIN L, ZHOU Y, HUANG J, *et al.* Interaction between groundwater and trees in an arid site: Potential impacts of climate variation and groundwater abstraction on trees [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 435 - 448.
- [23] 梁永超. 土壤通气性与植物根系代谢[J]. 土壤学进展, 1994, 22(3): 34 - 39. [LIANG Y C. Soil aeration and plant root system [J]. Progress in Soil Science, 1994, 22(3): 34 - 39. (in Chinese)]
- [24] LIU B, GUAN H, ZHAO W, *et al.* Groundwater facilitated water-use efficiency along a gradient of groundwater depth in arid northwestern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 235 - 241.
- [25] Elmore A J, Manning S J, Mustard J F, *et al.* Decline in alkali meadow vegetation cover in California: the effects of groundwater extraction and drought [J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(4): 770 - 779.

责任编辑:张若琳