

doi:10.3799/dqkx.2012.033

鄂尔多斯盆地山西组地下咸水 CO₂ 溶解能力

胡丽莎, 常 春, 于青春

中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083

摘要: 实施 CO₂ 的地质储存是目前公认的减缓全球变暖的有效途径之一. 潜在的储存场所包括衰竭的油气藏、深部不可开采煤层及深部咸水层. 其中, 深部咸水层储存潜力最大. 在发挥作用的诸多机理中, 溶解埋存具有埋存量、作用时间较长以及安全性高的特点. 在评价深部咸水含水层 CO₂ 溶解储存潜力时, 溶解度是一个关键参数. 提出了测定咸水含水层地层水 CO₂ 溶解度的方法, 并将其实际应用于鄂尔多斯盆地山西组地层水. 鄂尔多斯盆地是我国重要的能源基地, CO₂ 排放量大, 排放浓度高. 采集了野外实地水样, 进行了化学成分分析, 并人工合成该水样; 测定了 40~80 °C、8~12 MPa 条件下 CO₂ 在该水样中的溶解度, 其结果可为评价鄂尔多斯盆地深部咸水含水层埋存能力提供依据.

关键词: 地质储存; 鄂尔多斯盆地; 溶解能力; 地下水; 水文地质学.

中图分类号: X143

文章编号: 1000-2383(2012)02-0301-06

收稿日期: 2011-06-20

CO₂ Solubility in Shanxi Formation Water of Ordos Basin

HU Li-sha, CHANG Chun, YU Qing-chun

School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Geological storage is one of the most effective means to reduce the anthropogenic greenhouse gas emissions to mitigate the worsening global warming. Depleted oil-gas reservoirs, coal seams and deep saline aquifers are potential sites for CO₂ geological storage of which saline aquifer has the greatest potential for sequestration. Among the many effective mechanisms, dissolving storage is characterized by large storage capacity, long action time and high safety. When evaluating the storage capacity of a deep saline aquifer, CO₂ solubility becomes a key parameter. In this paper, an experimental method is proposed and used to measure the CO₂ solubility in Shanxi Formation water. Ordos Basin is an important energy base for China which releases a lot of high concentration CO₂. Studies show CO₂ geological storage is possible in Ordos Basin since its Shanxi Formation forms many source-reservoir-cap assemblages, and it is of great importance both in theory and practice to probe into CO₂ solubility in Shanxi Formation water of Ordos Basin. In this paper, chemical composition of Shanxi Formation water collected from the Ordos Basin were analyzed. CO₂ solubilities in the artificial synthetic Shanxi Formation water were measured at 40–80 °C, 8–12 MPa pressure. The results can be used for the evaluation of the CO₂ storage capacity in deep saline aquifer of Ordos Basin.

Key words: geological storage; Ordos basin; solubility; groundwater; hydrogeology.

自工业革命以来, 由于人类对化石燃料的过度依赖, 导致工业生产和人类生活过程中产生的温室气体日益增多, 温室效应正在严重威胁着人类的生存环境. 据 IPCC(政府间气候变化专门委员会)2007 年第四次报告显示, 在众多温室气体中, CO₂ 对温室效应的贡献最大. 1970 年至 2004 年间, 全球 CO₂ 的排放量从 210 亿 t 增加到 380 亿 t, 增加了约 80%(图 1). 全球变暖已经引起了一系列的环境地质问题, 如气温

升高、冰川融化、海平面上涨、极端天气现象以及由此导致的生态系统破坏、粮食减产、病虫害肆虐等.

实施 CO₂ 地质储存是目前大多数科学家公认的减少 CO₂ 排放量的有效方法之一. 根据国际能源署(IEA)以及政府间气候变化专业委员会(IPCC)的评估, 在可能实施二氧化碳地质储存的场所中, 深部咸水含水层储存潜力最大. 沈平平和廖新维(2009)阐述了 CO₂ 的 3 种主要捕集方式: (1) 自由

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40772208); 中央高校基本科研业务基金(No. 2011YYL147).

作者简介: 胡丽莎(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事 CO₂ 地质储存研究. E-mail: lisahu1986@163.com

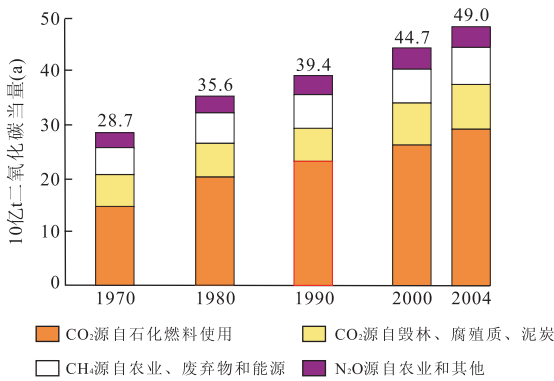


图 1 1970—2004 年期间全球人为温室气体排放量

Fig. 1 Global anthropogenic greenhouse gas emissions during 1970 to 2004

CO₂, 主要是超临界状态(物理捕集);(2)溶解在地下水中(水力捕集);(3)与岩石反应生成碳酸盐沉淀以矿物形式埋存(矿物捕集). 在储存的前期阶段, 物理捕集是主要的捕集机制. 随着时间的推移, 水力捕集和矿物捕集成为 CO₂ 长期储存的主要方式. 李小春等(2006)利用溶解度法计算的中国咸水含水层 CO₂ 储存容量约为 $1.435\ 05 \times 10^{11}$ t, 相当于中国大陆地区 2003 年 CO₂ 排放总量的 40.5 倍, 其中鄂尔多斯盆地的储量约为 73.17×10^8 t.

鄂尔多斯盆地是一个多种资源能源富集的大型沉积盆地, 也是我国区域性的大型能源化工规划基地, 目前已设立了 5 个能源基地规划区, 已建和在建的有多个大型煤化工项目(任相坤等, 2010). 据预计所有在建项目投产后, 每年将排放大约 $4\ 000 \times 10^4$ t 浓度高于 80% 的 CO₂. 已有研究表明, 鄂尔多斯盆地属于整体沉降, 盆地内部地质构造不发育, 地震活动少且拥有多套储盖层组合, 初步判断具有封存 CO₂ 的潜力. 其中二叠系山西组位于地下 2 232~2 316 m, 岩性为中—细砂岩、泥岩互层夹数层煤层, 具有良好的储盖层组合, 满足 CO₂ 在深部咸水含水层的储存要求. 因此对鄂尔多斯盆地山西组的 CO₂ 地质储存能力的研究具有重要的实际意义.

Li *et al.* (2005) 提出了 CO₂ 溶解储存容量的计算公式:

$$S_{CO_2} = aAh\eta nR\rho_w M_{CO_2}, \quad (1)$$

其中: a 为可用于储存 CO₂ 的咸水含水层平面分布范围占总盆地的比例; A 为分区面积(m²); h 为沉积层厚度(m); η 为含水层厚度占总沉积层的比例; n 为孔隙度; R 为地层水中 CO₂ 溶解度(mol/kg); ρ_w 为储存深度条件下饱和 CO₂ 的咸水密度(kg/m³); M 为 CO₂ 的摩尔质量.

由公式(1)可知, CO₂ 的溶解度是计算含水层 CO₂ 溶解储存量的关键参数. 其值是由压力、温度以及地层水共同决定的. 目前国内外很多学者通过不同的方法研究不同温度压力条件下 CO₂ 的溶解度.

Wiebe and Gaddy(1939, 1940)研究了 12~40 °C, 以及 50、75、100 °C, 压力最高 700 atm (1 atm=101 325 Pa)时 CO₂ 在纯水中的溶解度; Ellis and Golding(1963)通过实验测得了 175~335 °C 时 CO₂ 在纯水以及 NaCl 溶液(浓度分别为 0.5, 1, 2 mol/L)中的溶解度; Liu *et al.* (2011)的研究给出了 CO₂ 在 NaCl、KCl、CaCl₂ 及其混合物中的溶解度; Teng and Yamasaki(1998)以合成海水为研究对象, 研究了在 0~20 °C、6.44~29.49 MPa 条件下 CO₂ 在合成海水中的溶解度; Portier and Rochelle(2005)给出了不同温度压力内(0~300 °C, $1 \times 10^5 \sim 300 \times 10^5$ Pa) CO₂ 在纯水、NaCl 以及人工合成 Utsira 地层水中的溶解度值, 并实际运用到 Sleipher 项目中; Duan and Sun(2003)以液相粒子相互作用理论以及气相状态方程为基础, 建立了一个热力学模型, 很好地模拟了 0~260 °C, 0~200 MPa 条件下 CO₂ 在 0~4 m 深度 NaCl 溶液中的溶解度; Darwish and Hilal(2010)则以 Setschenov 模型为基础, 提出了一个新的模型, 用来模拟 27~227 °C、5~200 MPa 条件下 CO₂ 在 H₂O-NaCl 体系中的溶解度.

目前国内外对 CO₂ 溶解度的研究大多数都以纯水及各种盐溶液为研究对象, 针对具体地层水中 CO₂ 溶解度的研究较少, 尤其缺乏针对我国各地层水的 CO₂ 溶解能力研究. 本文以鄂尔多斯盆地山西组地层水为研究对象, 在对该地下水进行化学成分分析后, 人工合成该水样, 测试不同温度压力条件下 CO₂ 在其中的溶解度.

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验所用 CO₂ 纯度为 99.95%, 由北京如原如泉公司提供. NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂、NaHCO₃、NaOH、HCl 均为北京试剂厂分析纯试剂.

1.2 实验条件

根据曾荣树等(2004)提出适宜 CO₂ 地质储存的地热梯度(25~35 °C/km)、压力梯度(10.5 MPa/km)、埋存深度(>800 m)以及侯光才和张茂省等

(2008)对鄂尔多斯盆地地热梯度研究结果(25~30 °C/km),本文将研究范围确定为 40~80 °C、8~12 MPa.

1.3 实验装置及过程

实验采用如图 2 所示的装置. 装置主体部分为高温高压反应釜, 釜内为容积 600 mL 的钛合金容器, 是本次实验的主要反应场所, 实验中人工合成山西组地下水就放置在该容器中, 容器接有温度和压力传感器, 可随时观察或控制釜内的温度及压力; 反应容器的外层为加热保温层, 可按照设定温度加热保温; 反应釜的上部为转速可调的磁力搅拌器, 通过电机带动搅拌棒将溶液与 CO₂ 充分混合均匀. 实验时, CO₂ 通过制冷系统液化后经柱塞泵高压注入反应釜内, 达到设定压力.

实验水样采自鄂尔多斯盆地榆林市大柳塔附近, 具体位置如图 3 阴影所示:

实验前, 首先依据地下水标准检验方法的 DZ/T0064-1993, 对野外采集的鄂尔多斯盆地山西组地层水进行化学成分分析, 结果见表 1. 根据分析结果, 采用分析纯试剂 NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂、NaHCO₃ 人工配制溶液, 用量如表 2 所示, 使之与鄂尔多斯盆地山西组地下水化学成分一致.

实验开始时, 在釜内加入 2/3 体积的水样, 设定适当温度开始加热, 同时用柱塞泵向高压釜内通入 CO₂ 直到釜内压力达到要求. 打开磁力搅拌器, 将 CO₂ 与水样充分混合. 保持压力与温度不变, 使整个系统运行 24 h, 确保系统达到平衡状态. 系统平衡后, 用取样器从釜中取出一定量饱和 CO₂ 的水样. 由于 CO₂ 溶解度会随温度压力的改变而发生变化, 当水样从高压釜中被取出时, 温度压力的降低, 使溶解在水样中的 CO₂ 部分逸出. 为减少 CO₂ 逸出造成的误差, 采用图 2 中所示取样器, 该取样器由两部分

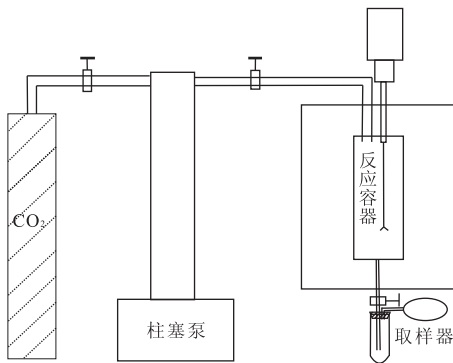


图 2 实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of the apparatus

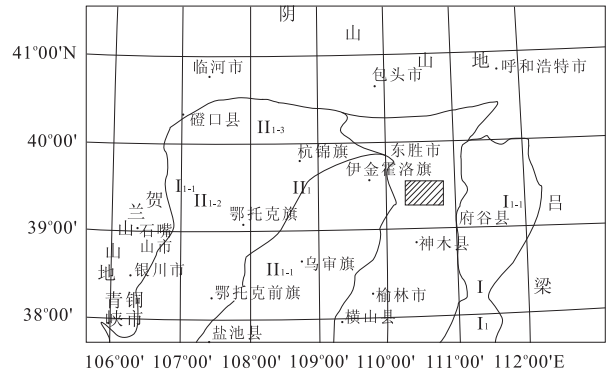


图 3 样品采集位置

Fig. 3 Sample collecting position

组成: 具塞刻度试管和气体取样袋, 当其与高压釜连接时, 整个体系为封闭状态. 具塞刻度试管体积较

表 1 鄂尔多斯盆地山西组地下水化学成分

Table 1 Chemical composition of Shanxi Formation groundwater in Ordos basin

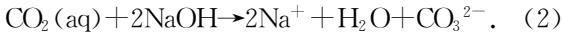
项目	ρ_B (mg · L ⁻¹)	C_B (mmol · L ⁻¹)
pH	6.90	
K ⁺	67.80	1.734
Na ⁺	2 405.00	104.565
Ca ²⁺	888.50	22.168
Mg ²⁺	32.79	1.349
NH ₄ ⁺	<0.01	<0.001
Al ³⁺	<0.02	—
Cl ⁻	5 151.49	145.317
SO ₄ ²⁻	29.10	0.303
HCO ₃ ⁻	642.01	10.521

表 2 人工合成鄂尔多斯盆地山西组地下水实际用量

Table 2 Recipe for synthetic Shanxi Formation groundwater in Ordos basin

试剂	级别	质量(g)
NaCl	分析纯	5.501 6
KCl	分析纯	0.126 7
CaCl ₂	分析纯	2.459 8
MgCl ₂	分析纯	0.128 3
NaHCO ₃	分析纯	0.883 8

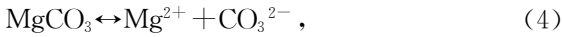
小并且阻隔了样品与空气的接触, 通过其取样前后的体积差, 计算稀释因子 F ; 气体取样袋则能够收集暂时从水样中逃逸的 CO₂. 取样时先在取样器中加入一定量 1 mol/L 的 NaOH 溶液, 随后再从釜中取出适量饱和 CO₂ 的水样, 此时 NaOH 将吸收所有 CO₂ 气体(包括暂时逃逸至取样袋中 CO₂) 并转化为 CO₃²⁻:



取样时,记录取样前后的溶液体积分别为 P 、 M ,根据二者的差值计算稀释因子 F :

$$F = \frac{M}{M - P}. \quad (3)$$

取样后,饱和 CO_2 的水样与 NaOH 溶液发生化学反应,溶液中出现沉淀.根据溶液成分以及相关化学反应方程式:



依照室温下各难溶物的溶度积(华东理工大学化学系,2003)计算各难溶物析出沉淀时的最小浓度,以 MgCO_3 的计算为例:

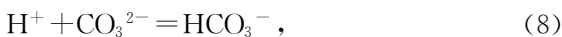
$$K_{\text{sp}} = [\text{Mg}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = [\text{Mg}^{2+}]^2 = 2.6 \times 10^{-5}.$$

由上式可得 $[\text{Mg}^{2+}] = 5.10 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$.

即当溶液中 $[\text{Mg}^{2+}] \geq 5.10 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 时, MgCO_3 开始沉淀(以溶液中的 CO_3^{2-} 离子足以使 Mg^{2+} 沉淀为前提).已知原水样 Mg^{2+} 浓度为 $1.35 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$,小于 $5.10 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$,故水样不生成 MgCO_3 沉淀.稀释后, Mg^{2+} 浓度减小,沉淀反应不发生.

同理,经计算, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 开始沉淀时 Mg^{2+} 的最小浓度为 $1.65 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$,小于原水样中 Mg^{2+} 浓度,故生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀; CaCO_3 开始沉淀时 Ca^{2+} 离子浓度为 $9.32 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$,小于原水样中 Ca^{2+} 离子浓度 (0.2216 mol/L),可以生成 CaCO_3 沉淀,故取样后溶液中的沉淀为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 ,且沉淀完全.

取出的样品经过滤后,采用双指示剂滴定法分析上清液碱度.为减少操作时水样与空气接触造成的误差,过滤及滴定过程需在 5 min 内完成.用 0.1 mol/L 的盐酸溶液作滴定剂来滴定 1 mL 样品,滴定过程中分别用酚酞和甲基橙作为指示剂,达到两个滴定终点: $\text{pH} \approx 8.0$ 时达到第 1 个终点,此时溶液中 OH^- 被中和, CO_3^{2-} 与 H^+ 反应生成 HCO_3^- ; $\text{pH} \approx 4.3$ 时达到第 2 个终点,此时溶液中所有的溶解态碳被完全中和,发生如下反应:



达到各滴定终点时消耗 HCl 的体积分别记为 V_1 、 V_2 ,则溶液中 OH^- 和 CO_3^{2-} 的浓度分别为:

$$[\text{OH}^-] = \frac{C_{\text{HCl}} \times (V_1 - V_2)}{V_0}, \quad (10)$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{C_{\text{HCl}} \times V_2}{V_0}. \quad (11)$$

其中 V_0 为滴定时所用样品体积,计算结果以 mol/L 为单位.

通过实验分析计算得到上清液中 CO_3^{2-} 的浓度,这代表了溶解在水样中的一部分 CO_2 ,前文中提到取样后溶液中生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 沉淀,可见,沉淀中包含了一部分溶解 CO_2 .将计算得到的上清液中 CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 离子结合的 CO_3^{2-} 相加,得到发生(2)反应的所有 CO_2 ,再通过(12)式计算,即得到水样中 CO_2 的溶解度 S ,计算结果以 $\text{g}/100 \text{ g}$ 水样为单位,即:

$$S = [\text{CO}_3^{2-}] \times F \times 440. \quad (12)$$

2 结果与讨论

实验测得了不同温度压力下 CO_2 在水样中的溶解度,结果如表 3 所示.

从图 4a 中可以看出,在所有实验温度范围内 CO_2 在实验水样中的溶解度随压力的增加而增大.

表 3 人工合成山西组水样 CO_2 溶解度数据

Table 3 Solubility of CO_2 in synthetic Shanxi Formation water

$p(\text{MPa})$	$t(^{\circ}\text{C})$	CO_2 溶解度($\text{g}/100 \text{ g}$ 水样)
8	40	4.132 5
8	50	3.766 0
8	60	3.467 2
8	70	2.802 4
8	80	2.923 4
9	40	4.458 2
9	50	3.824 0
9	60	3.613 7
9	70	3.273 2
9	80	3.109 9
10	40	4.908 8
10	50	3.884 8
10	60	3.832 8
10	70	3.654 2
10	80	3.459 7
11	40	5.145 4
11	50	4.094 6
11	60	3.919 1
11	70	3.685 9
11	80	3.342 7
12	40	5.094 8
12	50	4.305 4
12	60	4.052 0
12	70	3.637 9
12	80	3.438 2

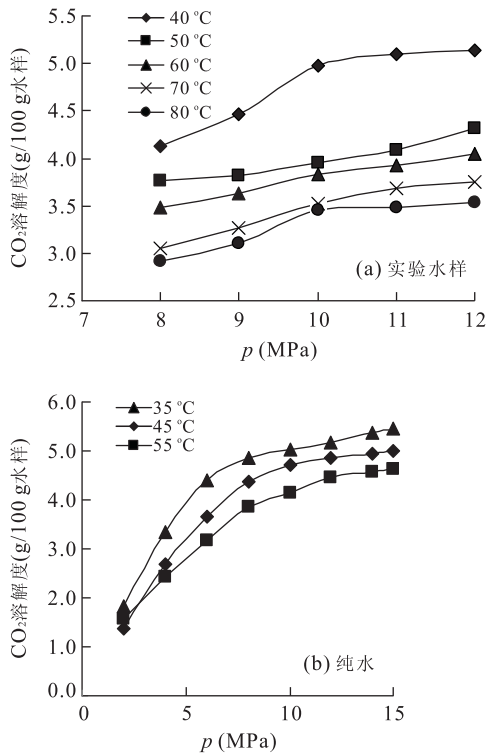


图 4 CO₂ 在实验水样(a)和纯水(b)中的溶解度随压力的变化
 Fig. 4 CO₂ solubility in experimental water (a) and pure water (b) at different pressures

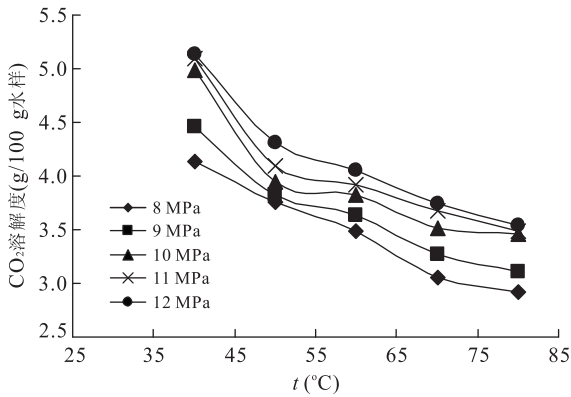


图 5 CO₂ 在实验水样中的溶解度随温度的变化
 Fig. 5 CO₂ solubility in experimental water at different pressures

压力较低时,CO₂ 溶解度随压力变化较大;而当压力较高时,CO₂ 溶解度随压力的变化不明显.图 4b 数据来自 Liu *et al.* (2011)的文献数据,显示了不同温度下 CO₂ 在纯水的溶解度与压力变化的关系.比较图 4a 与图 4b 可知,CO₂ 在实验水样中的溶解度随压力的变化与其在纯水中的变化相似.

图 5 描述了不同压力下 CO₂ 溶解度随温度的变化情况.从图中可以看出,在所有实验压力范围

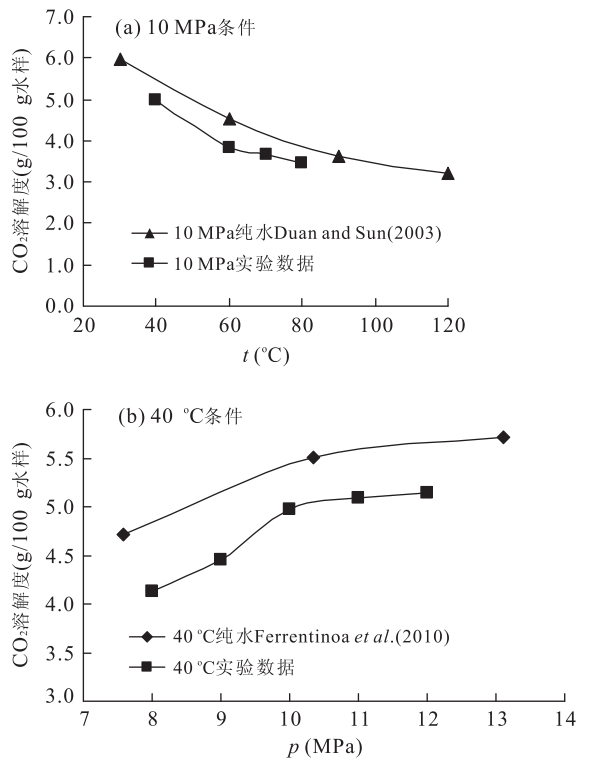


图 6 在 10 MPa(a)、40 °C (b)条件下 CO₂ 在纯水与实验水样中溶解度的比较
 Fig. 6 Comparison of CO₂ solubility in pure water and experimental water at 10 MPa (a) and 40 °C (b)

内,随温度的升高,CO₂ 的溶解度呈下降趋势.

比较图 4a 与图 5,同一压力下,溶解度随温度的变化较大,而同一温度下,溶解度随压力的变化较小,表明温度对 CO₂ 溶解度的影响要大于压力的影响.

图 6a 比较了 10 MPa 压力条件下,CO₂ 在纯水和实验水样中的溶解度差异.其中 CO₂ 在纯水中的溶解度数据来自 Duan and Sun(2003)的研究.图 6b 为 40 °C 时 CO₂ 在纯水和实验水样中溶解度的比较,其中 CO₂ 在纯水中的溶解度数据来自 Ferrentinoa *et al.* (2010)的研究.从图 6 中可以看出,CO₂ 在实验水样中的溶解度明显小于其在纯水中的溶解度.这种现象可以用盐析效应来解释,盐水中离子浓度较高,离子间相互作用较强,使得分子较难溶于水,从而导致了 CO₂ 溶解度的降低.

3 结语

本文以鄂尔多斯盆地山西组地下水为研究对象,通过实验测试得到了 40~80 °C、8~12 MPa 条件下,CO₂ 在地层水中的溶解度,得到以下结论:

(1) 实验条件下 CO_2 的溶解度为 2.80 ~ 5.14 g/100 g 水样; (2) 对溶解度随温度压力变化的分析结果表明, CO_2 在该水样中的溶解度随压力升高而升高, 随温度升高而降低, 且温度对 CO_2 溶解度的影响大于压力的影响; (3) 对相同条件下 CO_2 在实验水样中的溶解度与其在纯水中溶解度的差别比较分析表明, 实验条件下, CO_2 在实验水样中的溶解度小于相同条件下 CO_2 在纯水中的溶解度。

References

- Darwish, N. A., Hilal, N., 2010. A simple model for the prediction of CO_2 solubility in H_2O -NaCl system at geological sequestration conditions. *Desalination*, 260(1-3): 114-118. doi:10.1016/j.desal.2010.04.056
- Department of Chemistry, East China University of Science and Technology, et al., 2003. Analytical chemistry. Higher Education Press, Beijing, 425 (in Chinese).
- Duan, Z. H., Sun, R., 2003. An improved model calculating CO_2 solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2 000 bar. *Chem. Geol.*, 193(3-4): 257-271. doi:10.1016/S0009-2541(02)00263-2
- Ellis, A. J., Golding, R. M., 1963. The solubility of carbon dioxide above 100 °C in water and in sodium chloride solutions. *American Journal of Science*, 261(1): 47-60. doi:10.2475/ajs.261.1.47
- Ferrentino, G., Barletta, D., Balaban, M. O., et al., 2010. Measurement and prediction of CO_2 solubility in sodium phosphate monobasic solutions for food treatment with high pressure carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 52(1): 142-150. doi:10.1016/j.supflu.2009.10.005
- Hou, G. C., Zhang, M. S., 2008. The survey and research on groundwater in Ordos basin. Geological Publishing House, Beijing, 85 (in Chinese).
- Li, X. C., Liu, Y. F., Bai, B., et al., 2006. Ranking and screening of CO_2 saline aquifer storage zones in China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(5): 963-968 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. C., Ohsumi, T., Koide, H., et al., 2005. Near-future perspective of CO_2 aquifer storage in Japan: site selection and capacity. *Energy*, 30(11-12): 2360-2369. doi:10.1016/j.energy.2004.08.026
- Liu, Y. H., Hou, M. Q., Yang, G. Y., et al., 2011. Solubility of CO_2 in aqueous solutions of NaCl, KCl, CaCl_2 and their mixed salts at different temperatures and pressures. *The Journal of Supercritical Fluids*, 56(2): 125-129. doi:10.1016/j.supflu.2010.12.003

- Ren, X. K., Cui, Y. J., Bu, X. P., et al., 2010. Analysis on CO_2 storage potentiality in Ordos basin. *Energy of China*, 32(1): 29-32 (in Chinese with English abstract).
- Shen, P. P., Liao, X. W., 2009. The technology of carbon dioxide stored in geological media and enhanced oil recovery. Petroleum Industry Press, Beijing, 39 (in Chinese).
- Teng, H., Yamasaki, A., 1998. Solubility of liquid CO_2 in synthetic sea water at temperatures from 278 K to 293 K and pressures from 6.44 MPa to 29.49 MPa, and densities of the corresponding aqueous solutions. *J. Chem. Eng. Data*, 43(1): 2-5. doi:10.1021/jc9700737
- Wiebe, R., Gaddy, V. L., 1939. The solubility in water of carbon dioxide at 50 °C, 75 °C and 100 °C, at pressures to 700 atmospheres. *J. Am. Chem. Soc.*, 61(2): 315-318. doi:10.1021/ja01871a025
- Wiebe, R., Gaddy, V. L., 1940. The solubility of carbon dioxide in water at various temperatures from 12 to 40 °C and at pressures to 500 atmospheres. *J. Am. Chem. Soc.*, 62(4): 815-817. doi:10.1021/ja01861a033
- Portier, S., Rochelle, C., 2005. Modeling CO_2 solubility in pure water and NaCl-type waters from 0 to 300 °C and from 1 to 300 bar; application to the Utsira Formation at Sleipner. *Chemical Geology*, 217(3-4): 187-199. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.12.007
- Zeng, R. S., Sun, S., Chen, D. Z., et al., 2004. Decrease carbon dioxide emission into the atmosphere-underground disposal of carbon dioxide. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 4: 196-200 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 华东理工大学化学系等, 2003. 分析化学. 北京: 高等教育出版社, 425.
- 侯光才, 张茂省, 2008. 鄂尔多斯盆地地下水勘查系统. 北京: 地质出版社, 85.
- 李小春, 刘延锋, 白冰, 等, 2006. 中国深部咸水含水层 CO_2 储存优先区域选择. 岩石力学与工程学报, 25(5): 963-968.
- 任相坤, 崔永君, 步学朋, 等, 2010. 鄂尔多斯盆地 CO_2 地质封存潜力分析. 中国能源, 32(1): 29-32.
- 沈平平, 廖新维, 2009. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术. 北京: 石油工业出版社, 39.
- 曾荣树, 孙枢, 陈代钊, 等, 2004. 减少二氧化碳向大气层的排放——二氧化碳地下储存研究. 中国科学基金, 4: 196-200.