

中国沉积盆地深部 CO₂ 地质封存联合咸水 开采容量评估

李琦, 魏亚妮, 刘桂臻

(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, 武汉 430071)

摘要: CO₂ 地质封存联合深部咸水开采 (CO₂ 驱水技术, CO₂-EWR) 的新型 CCUS (CO₂ 捕集、利用和封存) 技术是一种促进西部发展、加强我国能源安全的双赢选择。我国陆地及大陆架分布有大量的沉积盆地, 可用于 CO₂ 封存的咸水层体积巨大, 而可靠合理地评估 CO₂ 封存容量及其驱水量是封存场址选择的重要前提。现采用国际上较为通用的金字塔评价方法评估了我国 25 个主要沉积盆地的 CO₂ 封存容量, 并根据沉积及涌水量特征, 选择三个典型盆地建立算例模型, 根据各盆地与算例模型的体积比推算出其潜在驱水量。研究结果表明, 中国 25 个主要沉积盆地深部咸水层 CO₂ 封存容量约为 $1.191.95 \times 10^8$ t, 相当于中国大陆地区 2010 年 CO₂ 排放总量的 14.31 倍, 潜在驱水量约为 40.90×10^8 t, 大约能够使 10 个上规模的煤化工企业正常运行 20 年。其中西部地区沉积盆地分布面积广, 可驱替出的水资源量大, 能够很大程度上缓解该区能源生产所造成的水资源短缺危机。

关键词: CO₂-EWR; 西部地区; 封存容量; 深部咸水; 驱水量; CCUS

中图分类号: X701.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0093-04

Assessment of CO₂ Storage Capacity and Saline Water Development in Sedimentary Basins of China

LI Qi, WEI Yan ni, LIU Gui zhen

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering (SKLGME), Institute of Rock and Soil Mechanics (IRSM), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: CO₂ geological storage and deep saline water recovery (CO₂ Enhanced Water Recovery, CO₂-EWR) system, as a new CCUS (CO₂ capture, utilization, and storage) technology, is a win-win choice for enhancement of China's energy security and promotion of western development. A large number of sedimentary basins are distributed in the mainland and continental shelf of China, which have a large volume of saline aquifers for storage of CO₂. The reliable and reasonable assessment of CO₂ storage capacity and water recovery is an important prerequisite for storage site selection. In this paper, the universal pyramid method is adopted to assess the CO₂ storage capacity for 25 major sedimentary basins. Three typical sedimentary basins are chosen to develop example models to determine the potential water recovery quantity using the volume ratio between basins and the example models based on the deposition and inflow characteristics. The results show that the total storage capacity of CO₂ in the deep saline aquifers of 25 major sedimentary basins is about $1.191.95 \times 10^8$ t, which is equal to 14.31 times of the total CO₂ emission of China in 2010. The potential water recovery is about 40.90×10^8 t, which is enough for 10 coal chemical enterprises with 20 years of operation. The sedimentary basin has a large distribution in the western region of China and the water resources recovery quantity is abundant which can alleviate the water resources shortage problem during the production process and utilization of energy.

Key words: CO₂-EWR; western China; storage capacity; deep saline water; water resources recovery; CCUS

1 研究背景

CO₂ 深部咸水层封存被认为是 CCS(二氧化碳捕集与封

存) 技术中最有效及最具有深度减排潜力的选项之一。据国际能源署(IEA)和政府间气候专门委员会(IPCC)评估报告, 全球咸水层 CO₂ 封存量可达 400~10 000 Gt^[1]。但是, 由于

收稿日期: 2013-02-18 修回日期: 2013-03-29 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1309.007.html>

基金项目: 中科院百人计划项目“SO₂/CO₂ 联合地质封存”(0931061C01); 中澳二氧化碳地质封存项目一期(CAGS-I)(2010/Y131031B01)

作者简介: 李琦(1972), 男, 山东青州人, 研究员, 博士, 主要从事酸气回注和 CO₂ 地质封存与利用方面的研究工作。E-mail: qli@whrsm.ac.cn

通讯作者: 魏亚妮(1986), 女, 陕西兴平人, 硕士, 主要从事 CO₂ 咸水层封存和利用方面研究。E-mail: weiyani2006@126.com

目前单纯的咸水封存是一种纯粹的巨额资金投入行为,不带来直接的经济效益^[2],而考虑到 CO₂ 封存成本及安全性问题,CO₂ 驱水技术(CO₂-EWR: CO₂ Enhanced Water Recovery)值得关注与研究。该技术是指将 CO₂ 注入深度 800 m 以下,矿化度(TDS) > 10 g/L 的深部咸水/卤水层,驱替地下深部的高附加值液体矿产资源(例如,锂盐、钾盐、溴素等)或深部水资源,加以综合开发和利用的一种新型 CCUS 技术^[3]。目前,国内外专家做了一些关于此方面的初步研究^[4-8],澳大利亚在建的 Gorgon CCS 项目是 CO₂-EWR 在全球的首个示范性工程。该项目计划利用 8~9 口注入井注射天然气处理过程中分离出的 CO₂,4 口抽水井管理储层压力,目前项目处于建设期,预计 2015 年开始运行。澳大利亚西部正在设计的 Collie South West Hub CCS 项目,也有做抽水的考虑。

我国是世界上主要的能源消费国,也是主要的煤炭消费国,CO₂ 排放巨大^[2],同时由能源生产造成的水资源供需矛盾突出。IEA 发布的 2012 年度旗舰报告《世界能源展望 2012》中分析了能源生产对水资源的需求将快速增长,水资源的可用性将成为能源行业的制约性因素。报告中指出,与 2010 年相比,2035 年中国由能源生产导致的水资源消耗将增长 83%,其中主要的水资源消耗部门是煤炭的生产和消费,水资源的消费主要发生在干旱缺水的中国西部地区。因此,水资源已成为煤炭开发和消费可行性与经济性的不可忽视的限制因素。

CO₂-EWR 技术一方面缓解了全球变暖的进程,降低了储层压力,使 CO₂ 达到安全稳定大规模封存,另一方面开采出的咸水经过处理后用于工农业生产及生活饮用,解决近年来我国面临的各种水资源短缺问题。尽管表面上看,该技术的成本较单纯的 CCS 偏高,但其带来的直接和间接经济效益不可估量。根据 Wolery 等人的研究成果,开采出的咸水若利用储层压力进行反渗透处理,成本几乎为海水淡化的一半,且随着工业水价的不断上涨,该技术所带来的附加效益完全可以抵消咸水的开采及处理成本,有一定的经济可行性。而且对于咸水的反渗透处理技术,在油气行业已经积累了丰富的经验,产生二次污染的几率很小,因此该方法有一定的技术可行性。由此看来,CO₂-EWR 系统无疑是一种促进西部发展,加强我国能源安全的双赢选择,也是一种魅力十足的 CCUS 技术选项^[3]。

面临减排与能源生产中水资源短缺的双重压力,开展 CO₂-EWR 系统研究十分必要,而可靠合理地评估 CO₂ 封存容量及其驱水量是封存场址选择的重要前提。为此,本文采用国际上较为通用的金字塔评价方法评估了中国各主要盆地深部咸水层的 CO₂ 封存容量,并结合 3 个典型算例模型,根据体积比推算出各盆地的潜在驱水量,以便为下一步靶区研究奠定基础。

2 评价方法

2.1 封存容量计算方法

中国陆地及大陆架分布有大量的沉积盆地,分布面积广,沉积厚度大,可用于 CO₂ 封存的咸水层体积大^[9]。本文计算选取中国 25 个主要沉积盆地的参数资料进行评估。

对深部咸水层 CO₂ 封存容量的计算研究最早开始于 20 世纪 90 年代,由于深部咸水层的全球封存潜力最大,技术方法不唯一,因此预测封存量的范围跨度很大^[10]。由于资料有限,本文采用北美和欧洲等国比较通用的金字塔估算方法中的有效封存容量公式^[11]对各个盆地的 CO₂ 封存容量进行评估,计算公式如下:

$$M = a \times A \times h \times n \times \rho \times S_{eff} \quad (1)$$

式中: M 为有效封存容量(kg); a 为可用于封存 CO₂ 的咸水层平面分布范围占总盆地的比例,参考相关文献,取值为 0.01; A 为分区面积(m²); h 为咸水层的平均厚度(m),在具有详细地质资料的沉积盆地内利用实际咸水层厚度,其他沉积盆地则取沉积层厚度的 0.1 倍^[9]; n 为孔隙度(%),对无资料的沉积盆地取经验值 0.20; ρ 为 CO₂ 的平均密度,一般取 700 kg/m³; S_{eff} 指储层可以被占据的百分数,陆地上的 CO₂ 应该封存在圈闭中,以保证 CO₂ 和其他用于提供饮用水的储层不接触。在 1996 年的欧盟报告中,建议假设 3% 的咸水层是圈闭的^[12],因此本文计算采用 3% 作为经验参数。

2.2 驱水量计算方法

由于我国盆地类型复杂多变,若对其分别建立模型计算驱水量,则工作量巨大。因此本文根据我国含水层系统类型,选取 3 个典型盆地建立算例模型模拟驱水量,然后将 25 个主要沉积盆地大致划分为对应的 3 类,根据各盆地与算例模型的体积比计算各盆地的潜在驱水量。

2.2.1 算例模型的建立

我国内陆主要沉积盆地含水层系统类型大致分为三类,见图 1^[3,13]。西部地区(一区)主要是以冲、湖积砂、细砂、黏性土为主的含水层系统类型,含水层涌水量相对较小;东部地区(二区)主要是以砂砾石、中粗砂为主的松散岩类含水层系统,含水层水量充沛;南部地区(三区)是以碳酸盐类为主或夹杂碎屑岩的含水层系统,裂隙富集和孔隙赋存的控矿机制使其卤水资源较为富集^[14,15]。根据上述三类特征,西部、东部以及南部地区分别选取准噶尔盆地、苏北盆地以及江汉盆地作为典型盆地建立算例模型。

模型东西长 21.5 km,南北宽 10.5 km,储层厚度 100 m,采用单注单采的抽注模式,见图 2。规定 CO₂ 的注入速率为 100 万 t/a(相当于 31.71 kg/s),注入井与抽水井间距为 5 km,以基本保证系统运行年限达 20 年,抽水井根据 3 个典型盆地的地层及涌水量特征,设置不同的开采速率。同时假定模型中 CO₂ 的封存深度均为 800 m 以下,且保持一致,表 1 列出各典型盆地的主要参数取值。

需要强调的是,各盆地有效封存体积(与参数 a 、 S_{eff} 有关)大小千差万别,故进行模型体积选取时,使小于该体积的盆地个数与大于该体积的盆地个数均占 50%,加之方便剖分,因此有了如上边界长、宽、高的设置;模型中边界条件设置统一假定四周边界为封闭边界,上下边界为零流量边界。

经模拟发现,准噶尔盆地以 6 000 t/d 的速率开采,其允许开采年限为 42.30 年;苏北盆地 12 000 t/d 的开采速率对应年限为 29.10 年;江汉盆地 10 000 t/d 的开采速率对应年限为 27.6 年。

2.2.2 驱水量的计算

参考我国 25 个主要沉积盆地的地层及涌水量特征,将



图1 中国内陆主要沉积盆地含水层系统及 CO₂ EWR 技术线路分区

Fig. 1 The aquifer systems of major sedimentary basins in China and regional planning of CO₂ EWR

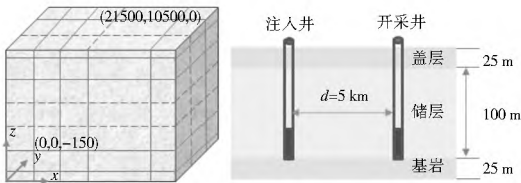


图2 评价数值模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of numerical model

表1 模型主要参数取值一览^[15]

Table 1 Values of major parameters in the model

分区	渗透率 /(10 ⁻¹⁵ m ²)	孔隙 度(%)	含盐 量(%)	初始温度 (℃)	初始压力 /MPa	开采速率/ (kg·s ⁻¹)
准噶尔盆地	59	13	0.6	62.5	22	70
苏北盆地	530	23	2.6	62.5	22	138.89
江汉盆地	212	18	8.0	62.5	22	115.74

其大致划分归类到对应的三类典型盆地中, 根据各盆地与对应算例模型的体积比计算驱水量。

$$V/V^* = t/t^* \quad (2)$$

式中: V 、 V^* 分别表示沉积盆地可封存 CO₂ 的体积与算例模型体积, 其中 $V = a \times A \times h \times S_{eff}$, 各符号意义同前; t 、 t^* 分别表示沉积盆地与算例模型的允许开采时间。根据上式计算出允许开采时间后, 结合对应开采速率便可计算出各盆地的驱水量。

3 计算结果

根据各盆地地质、水文等资料, 利用式(1)、式(2) 计算各主要沉积盆地咸水层的 CO₂ 封存容量及对应驱水量, 见表 2。

表2 中国主要沉积盆地深部咸水层潜在 CO₂ 封存容量及驱水量评价结果

Table 2 The evaluation results of potential CO₂ storage capacity and water recovery capacity in deep saline aquifers of major sedimentary basins in China

名称	CO ₂ 封存容量 /(10 ⁸ t)	潜在驱水量 /(10 ⁸ t)
准噶尔盆地	44.36	2.02
塔里木盆地	446.88	13.20
吐哈盆地(吐鲁番)	15.42	0.51
鄂尔多斯盆地	43.31	1.71
柴达木盆地	104.83	2.38
酒泉、民乐诸盆地	5.59	0.17
沁水、临汾诸盆地	1.13	0.04
海拉尔盆地	6.70	0.39
松辽盆地	20.75	1.67
二连盆地	11.47	0.71
渤海湾盆地(华北、辽宁、海域)	65.52	2.20
北黄海盆地	4.41	0.18
南黄海盆地	49.25	1.99
东海盆地	126.00	5.08
台西盆地	15.12	0.61
台西南盆地	21.42	0.86
珠江口盆地	71.00	2.49
北部湾盆地	11.25	0.53
苏北盆地	16.91	0.59
南襄盆地	5.36	0.17
四川盆地	90.72	2.89
江汉盆地	9.53	0.34
洞庭湖盆地	5.04	0.16

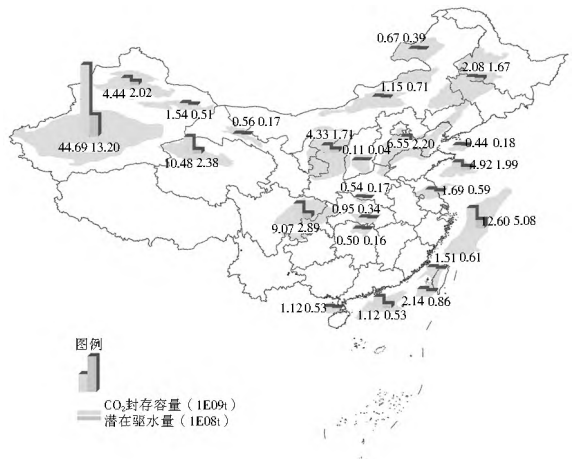


图3 中国主要沉积盆地 CO₂ 封存容量及潜在驱水量柱状分布图

Fig. 3 The histograms of CO₂ storage capacity and water recovery capacity in major sedimentary basins in China

可以看出, 中国 25 个主要沉积盆地深部咸水层 CO₂ 封存容量约为 $1\ 191.95 \times 10^8$ t, 潜在驱水量约为 40.90×10^8 t。其中一区的封存容量及驱水量分别为 661.53×10^8 t 和 20.02×10^8 t, 约占总封存容量及驱水量的 55.49% 和 48.96%; 二区的封存容量及驱水量分别为 419.78×10^8 t 和 17.31×10^8 t, 所占比例约为 35.22% 和 42.33%; 三区的封存容量及驱水量分别为 110.64×10^8 t 和 3.56×10^8 t, 所占

比例约为 9.28% 和 8.71%，见图 4。西部地区(一区)的塔里木盆地、准噶尔盆地以及柴达木盆地由于分布范围较广，可驱替出的咸水资源量较大，而该区煤炭等资源相对富集，这恰好缓解了能源生产所造成的水资源短缺危机。

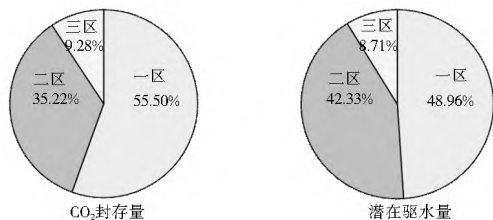


图 4 CO₂ 封存量及潜在驱水量饼图

Fig. 4 The pie charts of CO₂ storage capacity and water recovery capacity

4 结论

中国 25 个主要沉积盆地深部咸水层 CO₂ 封存容量约为 1 191.95 × 10⁸ t，相当于中国大陆地区 2010 年 CO₂ 排放总量的 14.31 倍，潜在驱水量约为 40.90 × 10⁸ t，大约能够使 10 个上规模的煤化工企业正常运行 20 年。其中，西部地区由于盆地分布范围较广，可驱替出的咸水资源量较大，约占总驱水量的 48.96%，而该区石油、天然气及煤炭等资源相对富集，这恰好缓解了能源生产所造成的水资源短缺危机。

本次研究由于资料有限，且以沉积盆地为单位对全国范围内的咸水层 CO₂ 封存容量及潜在驱水量进行评价，因此精度相对较低。今后应以构造单元为基础，结合实际地层结构及参数，建立模型，更加合理的评估封存容量及潜在驱水量。

参考文献 (References):

[1] 段海燕, 王雷. 我国石油工业二氧化碳地质封存研究[J]. 石油钻采工艺, 2009, (1): 121-124. (DUAN Haiyan, WANG Lei. Study on the Carbon Dioxide Geological Storage in Petroleum Industry in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, (1): 121-124. (in Chinese))

[2] 谢和平, 刘虹, 吴刚. 中国未来二氧化碳减排技术应向 CCU 方向发展[J]. 中国能源, 2012, (10): 15-18. (XIE He ping, LIU Hong, WU Gang. CO₂ Emission Reduction Technology Development for China's Future Should be in the Direction of CCUS [J]. Energy of China, 2012, (10): 15-18. (in Chinese))

[3] Li Q., Wei Y. N., Liu G. Z., et al. Feasibility of the Combination of CO₂ Geological Storage and Saline Water Development in Sedimentary Basins of China[J]. Energy Procedia, 2013. Doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.357.

[4] Buscheck T. A., Sun Y. W., Chen M. J., et al. Active CO₂ Reservoir Management for Carbon Storage: Analysis of Operational Strategies to Relieve Pressure Buildup and Improve Injectivity[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 6: 230-245.

[5] Davidson C. L., Doolley J. J., Dahowski R. T. Assessing the Impacts of Future Demand for Saline Groundwater on Commercial Deployment of CCS in the United States[J]. Greenhouse Gas Control Technologies, 2009, 1(1): 1949-1956.

[6] Kobos P. H., Cappelle M. A., Krumhansl J. L., et al. Combining Power Plant Water Needs and Carbon Dioxide Storage U-

sing Saline Formations: Implications for Carbon Dioxide and Water Management Policies[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(4): 899-910.

[7] Aines R. D., Wolery T. J., Bourcier W. L., et al. Fresh Water Generation From Aquifer-pressured Carbon Storage: Feasibility of Treating Saline Formation Waters[J]. Greenhouse Gas Control Technologies, 2011, 4: 2269-2276.

[8] Bergmo P., Grimstad A. A., Lindeberg E. Simultaneous CO₂ Injection and Water Production to Optimise Aquifer Storage Capacity[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(3S1): 555-564.

[9] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层 CO₂ 储存优先区域选择[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, (5): 963-968. (LI Xiaochun, LIU Yanfeng, BAI Bin, et al. Ranking and Screening of CO₂ Saline Aquifer Storage Zones in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, (5): 963-968. (in Chinese))

[10] 李琴, 李治平, 胡云鹏, 等. 深部盐水层 CO₂ 埋藏量计算方法研究与评价[J]. 特种油气藏, 2011, (5): 6-10. (LI Qin, LI Zhiping, HU Yunpeng, et al. Assessment of CO₂ Storage Calculation for Deep Saline Aquifers[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, (5): 6-10. (in Chinese))

[11] 巫润建, 李国敏, 黎明, 等. 松辽盆地咸水层埋存 CO₂ 储存容量初步估算[J]. 工程地质学报, 2009, (1): 100-104. (WU Runjian, LI Guomin, LI Ming, et al. Estimation of CO₂ Storage Capacity in Deep Saline Aquifer in Songliao Sedimentary Basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, (1): 100-104. (in Chinese))

[12] 江怀友, 沈平平, 李相方, 等. 世界地质储层二氧化碳理论埋存量评价技术研究[J]. 中外能源, 2008, (2): 93-99. (JIANG Huaiyou, SHEN Pingping, LI Xiangfang, et al. Study into Technologies for Estimating Theoretical Volume of CO₂ Stored Underground Worldwide [J]. Sinoglobal Energy, 2008, (2): 93-99. (in Chinese))

[13] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源与环境图集[G]. 北京: 中国地图出版社, 2004. (ZHANG Zonghu, LI Lierong, et al. The Atlas of Groundwater Resources and Environmental of China[G]. Beijing: China Map Publishing House, 2004. (in Chinese))

[14] 李义连, 房琦, 柯怡兵, 等. 高盐度卤水对 CO₂ 地质封存的影响: 以江汉盆地潜江凹陷为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, (2): 283-288. (LI Yilian, FANG Qi, KE Yibing, et al. Effect of High Salinity on CO₂ Geological Storage: A Case Study of Qianjiang Depression in Jianghan Basin[J]. Earth Science Journal of Chinese University of Geoscience, 2012, (2): 283-288. (in Chinese))

[15] 谢和平, 王昱飞, 鞠杨, 等. 地球自然钾长石矿化 CO₂ 联产可溶性钾盐[J]. 科学通报, 2012, (26): 2501-2506. (XIE He ping, WANG Yufei, JU Yang, et al. Simultaneous Mineralization of CO₂ and Recovery of Soluble Potassium Using Earth-abundant Potassium Feldspar [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, (26): 2501-2506. (in Chinese))

[16] 李国玉, 吕鸣岗. 中国含油气盆地地图集[G]. 北京: 石油工业出版社, 1988. (LI Guoyu, LYU Minggang. Atlas of China's Petroleum Basins[G]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988. (in Chinese))