

# 二氧化碳地质封存联合深部咸水开采技术进展

李琦, 魏亚妮

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** CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存 (CCUS) 技术具有很大的发展前景, 而 CO<sub>2</sub> 地质封存联合深部咸水开采技术 (简称 CO<sub>2</sub> 驱水技术, CO<sub>2</sub>-EWR) 作为一种新型的 CCUS 技术, 可在实现 CO<sub>2</sub> 深度减排的同时缓解水资源紧缺现状, 对于以煤为主要能源结构的中国来说, 是一种确保国家能源安全的双赢选择。根据中国含水层系统类型, 中国陆地可大致划分为 3 个 CO<sub>2</sub>-EWR 利用分区, 考虑到该技术的研发程度及成本预测, 西部地区的煤电煤化工企业具有早期机会, 因此本文主要针对西部地区煤化工企业 (一区) 展开分析与评价。概述了 CO<sub>2</sub>-EWR 技术的概念、意义及研究现状, 探讨了其技术链条中各要素技术, 展望了 CO<sub>2</sub>-EWR 技术的前景及重要发展方向。

**关键词** CO<sub>2</sub>-EWR; 西部地区; 咸水淡化; 能源安全; CCUS

**中图分类号** X701.7

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.27.010

## Progress in Combination of CO<sub>2</sub> Geological Storage and Deep Saline Water Recovery

LI Qi, WEI Yani

State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering; Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

**Abstract** CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage (CCUS) shows very a charming development prospect in China. CO<sub>2</sub> geological storage combined with deep saline water recovery (CO<sub>2</sub>-EWR), as a new CCUS technology which not only achieves deep emission reduction, but also alleviates the water shortage situation, is no doubt a win-win choice ensuring national energy security for China's energy structure with coal. China mainland can be partitioned into three potential CO<sub>2</sub>-EWR zones mainly according to the different types of aquifer system. Considering Research and Development (R & D) maturity and cost prediction of the technology, coal power and coal chemical enterprises in the western region has an early opportunity, so analysis and evaluation mainly focus on coal chemical industry in the western China (Zone One) in this study. CO<sub>2</sub>-EWR technical elements in the full chain technology are discussed on the basis of outline of CO<sub>2</sub>-EWR concept, significance and overview of latest research, and finally CO<sub>2</sub>-EWR technology development and important implementation direction are pointed out.

**Keywords** CO<sub>2</sub>-EWR; western China; saline water desalinization; energy security; CCUS

### 0 引言

以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体的大量排放已引起一系列环境和生态问题, 减少 CO<sub>2</sub> 排放成为人类共同关注的热点问题。欧美国家及日本的经验表明, 地下封存可能是处置 CO<sub>2</sub> 的有效措施之一<sup>[1]</sup>, 适合作为 CO<sub>2</sub> 封存的地质储层主要有枯竭的

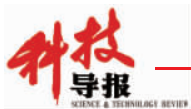
油气田、深部咸水含水层和不具开采价值的煤层。深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质封存 (简称 CO<sub>2</sub> 咸水层封存) 的研究始于 20 世纪 90 年代, 因其分布广、储量大、安全性好, 被认为是最具有发展前景的封存方式。

中国陆地及大陆架分布有大量的沉积盆地, 分布面积广、

收稿日期: 2013-05-13; 修回日期: 2013-07-26

基金项目: 中国科学院百人计划 (0931061C01); 国家自然科学基金面上项目 (41274111)

作者简介: 李琦, 研究员, 研究方向为酸气回注和 CO<sub>2</sub> 地质封存与利用, 电子信箱:qli@whrsm.ac.cn; 魏亚妮 (通信作者), 助理工程师, 研究方向为 CO<sub>2</sub> 咸水层封存和利用, 电子信箱:weiyani2006@126.com



沉积厚度大,可用于 CO<sub>2</sub> 封存的咸水含水层体积大。李小春等<sup>[2]</sup>借助 GIS,利用溶解度法计算出中国大陆 24 个主要沉积盆地 1~3km 深度内 CO<sub>2</sub> 的封存容量达 1.44×10<sup>14</sup>t。其中,华北平原大部,四川盆地北部、东部和南部,以及准噶尔盆地东南部都是可供将来优先考虑的 CO<sub>2</sub> 咸水层封存地区。

对于传统的 CO<sub>2</sub> 咸水封存项目,大规模的 CO<sub>2</sub> 注入会导致地层压力提升、咸水取代<sup>[34]</sup>。压力的增加使得上覆盖层产生破裂或断层重新活动,从而引发 CO<sub>2</sub> 的泄漏<sup>[5]</sup>;咸水取代会对原有的地下水系统产生影响,可能导致地层深部的高浓度咸水向浅层水体迁移,引起浅层水体的污染。因此,CO<sub>2</sub> 地质封存联合深部咸水开采技术(简称 CO<sub>2</sub> 驱水技术 CO<sub>2</sub>-EWR)值得关注与研究(图 1)。该技术是指将 CO<sub>2</sub> 注入深部咸水层或卤水层,驱替高附加值液体矿产资源(例如锂盐、钾盐、溴素等)或开采深部水资源,同时实现 CO<sub>2</sub> 深度减排和长期封存的一种新型 CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存(CO<sub>2</sub> Capture, Utilization and Storage, CCUS)过程<sup>[5]</sup>。该技术一方面可通过合理的开采井位控制和采水量控制释放储层压力,达到安全稳定大规模封存 CO<sub>2</sub> 的目的;另一方面采收的低矿化度咸水经过处理后可用于西部缺水地区或东部地面沉降较严重地区的生活饮水或工农业发展用水,采收的高矿化度咸水或卤水可以进行矿化利用萃取高附加值化工产品(如轻质碳酸镁等)<sup>[9]</sup>或提取各种重要的液体矿产资源(如钾盐、锂盐、溴素等)。

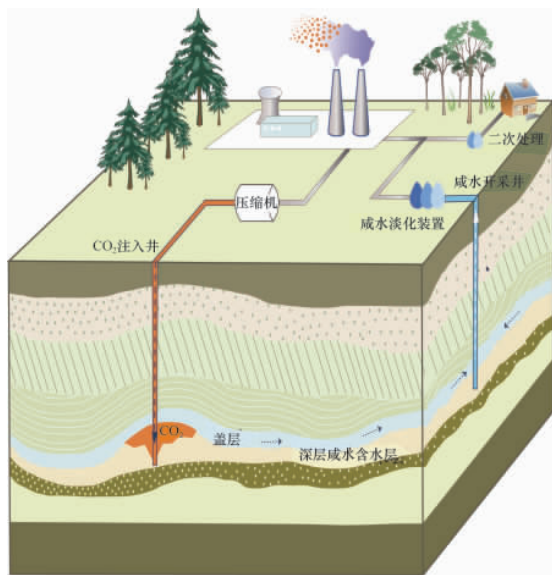


图 1 CO<sub>2</sub>-EWR 技术示意  
Fig. 1 Schematic of CO<sub>2</sub>-EWR technology

对于 CO<sub>2</sub>-EWR 技术,目前全球还没有运行的示范性工程,明确采用和正在考虑采用 CO<sub>2</sub>-EWR 技术的全球 CCUS 工程有数个。国内外专家已开展一系列关于 CO<sub>2</sub>-EWR 技术

的研究。Kobos 等<sup>[7]</sup>认为抽取地下的咸水,一方面可以释放地层压力,另一方面抽取的咸水经脱盐处理后,可用于发电站的冷却水;同时还针对美国西南部 Morrison (1)、Morrison (2) 以及 Fruitland 3 种含水层咸水的处理费用进行了详细分析。Davidson 等<sup>[8]</sup>针对美国部分地区人口剧增、工农业发展、地下水资源过度开采的现状,提出在 CO<sub>2</sub> 地质封存的同时开发利用深层咸水以解决面临的水资源危机。Buscheck 等<sup>[9]</sup>提出了“CO<sub>2</sub> 储层主动管理”(Active CO<sub>2</sub> Reservoir Management) 的概念,指出在 CO<sub>2</sub> 注入时抽取咸水,可以释放储层压力,控制 CO<sub>2</sub> 晕的迁移,抽取出的咸水可用做发电厂或地热能的冷却水。Wolery 等<sup>[10]</sup>对反渗透处理咸水的费用进行了分析,并得出利用储层压力时,处理费用将为传统海水处理费用的一半。李义连等<sup>[12]</sup>以江汉盆地潜江凹陷为例,提出采用边抽卤水边注 CO<sub>2</sub> 的模式可有效缓解注入过程中的储层压力积累和盐岩沉淀问题,并使 CO<sub>2</sub> 的溶解量和矿物捕集量明显增加,实现资源和地下空间最大化利用,收获经济和环保的双重效益。

CO<sub>2</sub>-EWR 对中国的意义可根据中国内陆主要沉积盆地含水层系统的类型大致分为 3 大类,如图 2<sup>[5]</sup>所示。

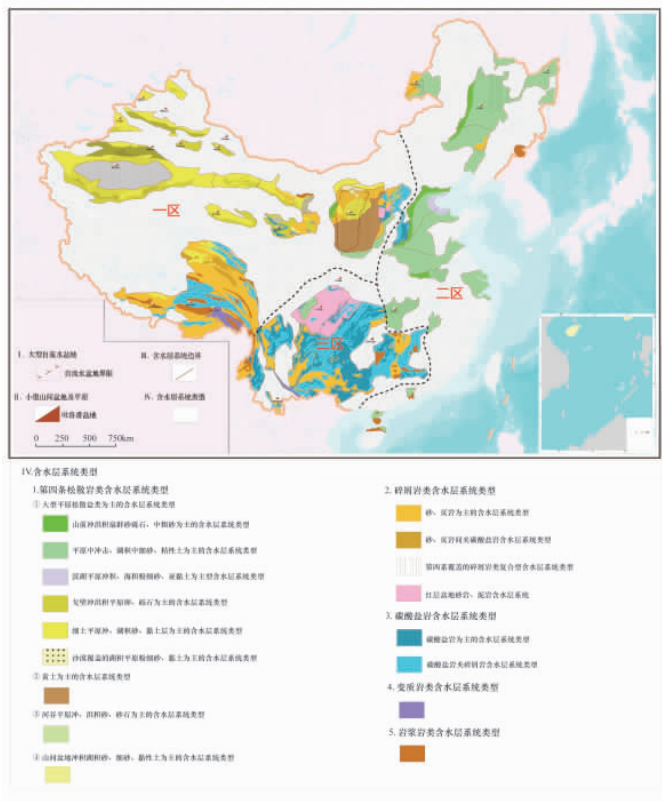


图 2 中国主要含水层系统类型和 CO<sub>2</sub>-EWR 分区  
Fig. 2 Major aquifers in China mainland and regional planning of CO<sub>2</sub>-EWR

中国西部地区(一区)是主要以冲、湖积砂、细砂、黏性土为主的含水层系统类型,煤、石油、天然气等化石能源富集,使各种煤化工企业和油气工业应运而生,而 CO<sub>2</sub> 的高浓度排放以及大量的工业需水成为这些企业发展的严重障碍,因此

CO<sub>2</sub>地质封存联合采水的新思路对于新疆、内蒙古等油气生产行业和煤化工产业发展较快而又缺水的地域具有很大的应用潜力;中国东部地区(二区)是主要以砂砾石、中粗砂为主的松散岩类含水层系统,过度抽取地下水已引起华北,苏州,无锡,常州等地区严重的地面沉降,地下水开采深度逐年增加,开采深层咸水并加以淡化利用对于缓解这一人为地质问题有一定的应用前景,同时东部发达地区的碳排放强度高,深部咸水层封存是主要的选择之一<sup>[13]</sup>;中国南部地区(三区)是以碳酸盐岩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形成了富集的卤水资源地,如四川盆地或湖北省的江汉盆地,利用CO<sub>2</sub>驱替出高矿化度咸水或卤水资源,并加以综合开发,不仅可解国民经济发展的紧缺战略资源之急,还可产生明显的经济效益和社会效益<sup>[12,14,15]</sup>。

由此可见,CO<sub>2</sub>-EWR技术是一种符合中国国情,具有创新资质的CCUS技术,但是,考虑到CO<sub>2</sub>-EWR技术目前的研究程度及成本预测,其短期内在中国尚无法大规模普及发展,但是对于中国中西部地区的煤电、煤化工企业而言,碳减排与水资源短缺的双重压力使该技术具有早期发展机会。本文主要针对西部地区的煤化工企业展开分析与评价。

### 1 CO<sub>2</sub>-EWR 技术分析

CO<sub>2</sub>-EWR技术根据流程可细分为4大模块(图3):(1)煤化工企业;(2)CO<sub>2</sub>捕集;(3)CO<sub>2</sub>封存与采水;(4)咸水处理。对这样一个多模块系统的整体进行评价,就需要对模块以及模块之间存在的关系进行分析。

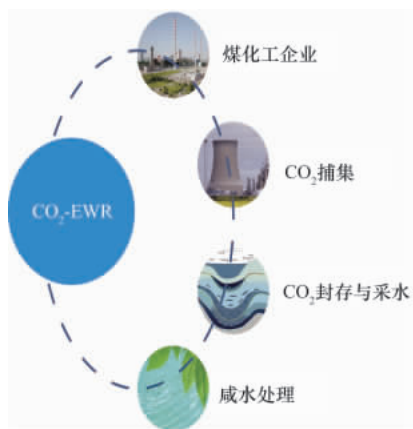


图3 CO<sub>2</sub>-EWR技术链条  
Fig. 3 Technical elements of CO<sub>2</sub>-EWR

- (1) 煤化工企业。水质指标、CO<sub>2</sub>的排放量、产品需水量、缺水额度情况等。
- (2) CO<sub>2</sub>捕集。CO<sub>2</sub>捕集技术、费用等。
- (3) CO<sub>2</sub>封存与采水。封存条件、CO<sub>2</sub>注入速率、迁移规律、单位CO<sub>2</sub>置换咸水量、采水井与注入井的距离、采水条件下储层压力状态变化等。

(4) 咸水处理。处理方法、回收率、处理成本、废液处理等。

#### 1.1 煤化工企业

煤化工企业是高污染、高耗水的行业,真正上规模的煤化工企业,2000~3000t/h的供水量是必不可少的。一般而言,煤化工企业需水水质为工业新鲜水,但目前还没有一个具体的水质标准,不同工业根据自己的需要制定本行业的用水水质指标。表1<sup>[6]</sup>统计了煤化工企业部分产品的需水量及CO<sub>2</sub>的排放量情况,合成氨的需水量最大,其次为煤的间接液化和直接液化,而利用煤间接液化生产液体燃料时CO<sub>2</sub>的排放相对最高。

表1 典型煤化工企业产品需水及CO<sub>2</sub>排放情况  
Table 1 Water demand and CO<sub>2</sub> emission of coal chemical industry in China

产品	需水量/(t·t <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 排放量/(t·t <sup>-1</sup> )
合成氨	21.60	4.04
甲醇	8.50	3.16
二甲醚	7.20	4.44
液体燃料(煤直接液化)	12.00	2.90
液体燃料(煤间接液化)	13.00	7.22

以上数据显示,煤化工企业对水资源的需求非常巨大。而对于煤炭资源比较富集的新疆地区,2009年工业用水仅占总用水量的1.9%,2011年工业用水配额仅增加到2.4%,新兴的煤化工企业不得不面临无水可调的窘境。五大煤炭开发和加工基地(准东、吐哈、伊犁、库拜及和丰—克拉玛依)中,准东、吐哈以及和丰—克拉玛依出现严重的水资源短缺问题(图4)。水资源已经成为制约西部发展,尤其是煤化工发展的主要瓶颈。

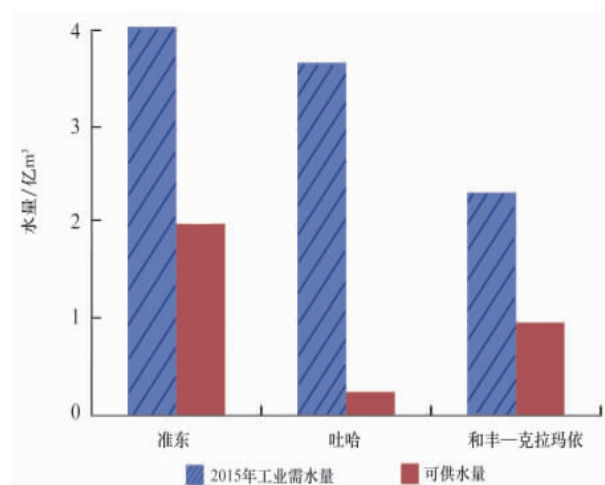
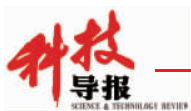


图4 新疆三大缺水煤化工基地2015年水资源供需情况  
Fig. 4 Water supply and demand situation in three major coal chemical industry regions in Xinjiang in 2015



CO<sub>2</sub>-EWR 技术是解决西部地区缺水问题且同时实现 CO<sub>2</sub> 深度减排的一种新型对偶解决方案。未来几年,随着国内对煤化工产品需求的增加,CO<sub>2</sub> 的集中排放会进一步凸显,且水资源的短缺必将成为其发展的最不利因素之一。而中国煤炭资源大多处于水资源较为短缺、生态环境较为脆弱的西部地区,这就凸显 JCO<sub>2</sub>-EWR 技术在中国 CCUS 规划中的区域特殊性和行业重要性。

### 1.2 CO<sub>2</sub> 捕集

CO<sub>2</sub> 在运输和封存时需要以较高的纯度存在,而在大多数情况下工业尾气中的 CO<sub>2</sub> 的浓度不能达到这个要求,所以必须从尾气中将 CO<sub>2</sub> 分离出来,这一过程称为 CO<sub>2</sub> 的捕集<sup>[7]</sup>。碳捕获与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)整个技术环节的运行费用及能耗主要集中在捕集过程。目前捕集技术主要有 3 种:燃烧前捕集、燃烧后捕集以及富氧燃烧。不同捕集技术有各自适合的捕集方法,主要有溶剂吸收法、膜分离技术、变压吸附法和低温分馏法等<sup>[8]</sup>。

煤化工行业具有捕集成本较低的优势,由于其工艺流程的特点,产生的 CO<sub>2</sub> 浓度远高于电厂烟道废气,其捕集成本大大低于电厂<sup>[9]</sup>。美国北达科他州的大平原煤制天然气厂采用物理吸收法中的 Rectisol 工艺,使用低温甲醇做物理溶剂,依据 CO<sub>2</sub> 溶解度,对其进行分离捕集。

中国已有上千家煤转化工厂(煤化工),与煤转化领域结合可能是在中国发展 CCS 的一大特点<sup>[7]</sup>。因此,对煤化工企业而言,碳捕集技术有待进一步研发和利用。

### 1.3 CO<sub>2</sub> 封存与采水

CO<sub>2</sub> 地质封存主要集中在 800m 以下咸水含水层,此时 CO<sub>2</sub> 处于超临界状态,兼具气体的高扩散性、低黏度性及液体的强溶解性。出于保护淡水资源方面的考虑,含水层的矿化度应大于 10g/L<sup>[9]</sup>。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,符合上述封存条件的咸水含水层体积大。表 2 以西部新疆地区为例,列出了主要沉积盆地的基本特征,可以看出,各盆地的面积和厚度均较大,尽管地层中存在特殊的不同构造、地层岩性可能对封存产生不确定性影响,但整体有效封存体积仍较可观,可实现 CO<sub>2</sub> 的规模化封存。

表 2 新疆地区主要沉积盆地特征

Table 2 Characteristics of major sedimentary basins in Xinjiang, China

盆地名称	面积/km <sup>2</sup>	厚度/m	周长/km	地层年代
准噶尔盆地	158240	12000~13000	25.387	C-P, T-N
塔里木盆地	596600	17000~21000	41.057	P, T <sub>3</sub> -N
吐哈盆地	55810	8000~9000	19.798	C-P, T-N

注: C, 石炭系; P, 二叠系; T, 三叠系; T<sub>3</sub>, 三叠系上统; N, 上第三系。  
Notes: C, Carboniferous; P, Permian; T, Triassic; T<sub>3</sub> Upper Triassic; N, Neogene.

CO<sub>2</sub>-EWR 技术各环节中,封存技术研究最为薄弱。目前主要面临以下技术难点:(1) 缺少明确的封存选址标准和场地勘察技术。目前,中国还没有出台明确的、量化的场地选择标准,且场地信息的获取技术虽然已存在于石油天然气行业中,但仍需要验证其在 CO<sub>2</sub> 封存中的实用性;(2) 缺少研究场地力学稳定性的评价方法。中国所处的欧亚板块受周围板块的挤压,构造活动比较频繁,断层密度较大,封存地层的长期力学稳定性问题比欧美国家更为重要,涉及长期地球化学过程与背景构造活动影响的力学稳定性评价研究需要加强;(3) 需进一步开发 CO<sub>2</sub> 泄漏的应急补救措施。针对 CO<sub>2</sub> 泄漏的各种途径可以采取不同的补救措施,这些补救措施技术主要来自油气开采行业,在中国有多个示范工程项目的实践经验,但仍需进一步开发针对 CO<sub>2</sub> 泄漏的修复措施,特别是针对地层缺陷的封堵修复技术<sup>[17]</sup>。

对于 CO<sub>2</sub>-EWR 技术,如何达到在 CO<sub>2</sub> 安全封存的同时驱出最大水量,是该技术首先关注的焦点问题。由于地下环境的复杂性和未知性,数学模型和数值模拟在评估和模拟 CO<sub>2</sub> 的运移规律及 CO<sub>2</sub> 的驱水过程发挥着重要作用。近年来,国内外研究者相继开发了不同的数值模拟程序对 CO<sub>2</sub> 地质封存进行模拟分析,如 TOUGH2、NUFT、STOMP 等室内数值代码以及 ECLIPSE 和 CMG-GEM 等油藏工程商业软件。

本文运用 TOUGH2 软件针对西部某一煤化工地区建立三维模型(图 5),模型储层厚度 100m,上下盖层厚度均为 25m,埋深大于 800m,顶、底部边界为零流量边界,CO<sub>2</sub> 注入量为 1Mt/a,咸水开采率约为 60kg/s,CO<sub>2</sub> 注入时间为 50a。经模拟,开采约 46a 后,抽采井中出现自由态 CO<sub>2</sub>,若继续开采,则认为会发生泄漏,此时,咸水开采量约为 1.73×10<sup>8</sup>。

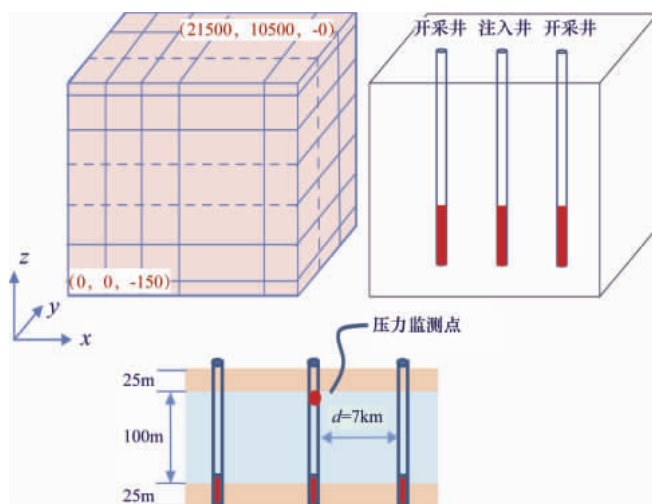


图 5 数值模型示意

Fig. 5 Schematic of numerical model

图 6 为无开采井, 一口开采井和两口开采井 3 种条件下盖层底部压力监测点处压力的变化情况。由图 6 可以看出, 开采井的设置明显降低了盖层下方的压力值, 减小了 CO<sub>2</sub> 泄漏的风险。

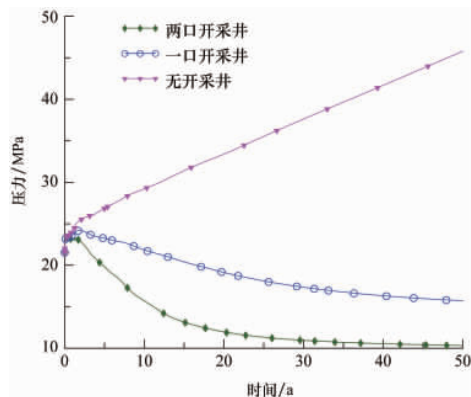


图 6 不同布井条件下监测点压力变化  
Fig. 6 Pressure change of monitoring point under different layout of wells

尽管在含水层具备充足水源补给条件下, 开采井数量越多, 开采量越大, 驱出的水量也越大, 但同时驱水时间也相应较短, 泄漏风险较大。这就需要对各种影响因素, 包括井数、开采量、井距、滤水管长度、位置等进行优化, 寻找最佳布井方案。

#### 1.4 咸水处理

咸水淡化方法主要有结晶法、反向电渗析法、蒸馏法、反渗透法以及离子交换法等, 其中反渗透法以设备简单、效益高、占地少、操作方便、能量消耗少等优点而被广泛应用。美国北达科他州的能源与环境研究中心 (EERC) 统计了不同咸水处理方法对应的矿化度范围 (图 7)<sup>[21]</sup>, 可以看出, 当矿化度介于 0~50g/L 时采用反渗透法较为合适, 而地下深层咸水水质大多处于该范围内, 故反渗透法成为深层咸水处理的最佳选择。

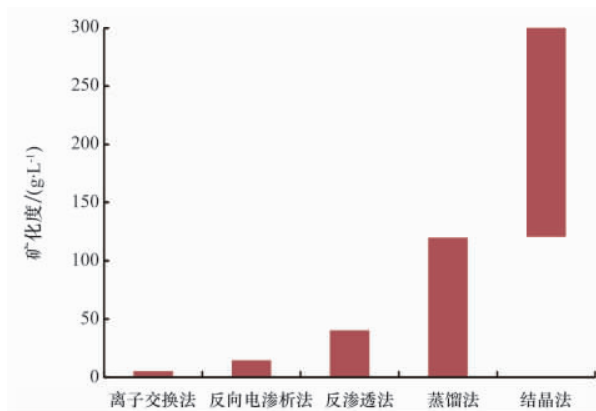


图 7 主要咸水淡化方法对应的矿化度分布  
Fig. 7 Salinity distribution associated with main water desalination methods

Kobos 等<sup>[7]</sup>研究了美国西南部的 3 种咸水含水层, 依据含水层岩性、水化学组分, 使用反渗透处理的费用分别为 2.13、2.41、2.18 美元/m<sup>3</sup>。此结果假定泵的效率和电动机效率为 85%, 反渗透回收率为 75%, 水处理系统的容量因子为 0.85, 设备使用年限为 20a, 利率为 5%, 电费为 5 美分/kWh。

根据国家节水灌溉-杨凌工程技术研究中心数据, 目前中国海水淡化成本为 4~7RMB/m<sup>3</sup>, 相对海水淡化费用, 深层咸水淡化处理尽管稍显劣势, 但对于远离海水资源的西部地区, 高昂的运输成本势必增加海水淡化总体成本, 美国有资料认为, 远程调水超过 40km, 运输费用将超过海水淡化费用。

Wolery 等<sup>[10,11]</sup>将海水与深层咸水的处理工艺及费用进行对比, 发现深层咸水的处理较海水有明显优势。首先, 海水中除了一般的化学组分外, 还存在各种微生物和有机质, 因此在前期处理方面, 较深层咸水复杂; 其次, 深层咸水是由 CO<sub>2</sub> 驱替而来, 含水层中产生的强大压力可用于反渗透处理, 这就使得处理费用明显降低, 而海水淡化需要外部压力来进行反渗透处理。经计算, 若储层能够提供足够的压力用于反渗透, 规模为 2.27 万 m<sup>3</sup>/d 时, 深层咸水的处理费用为 32~40 美分/m<sup>3</sup>, 几乎为海水处理费用的一半, 而利用外部压力时, 处理费用为 60~80 美分/m<sup>3</sup>。

在西部地区, 即使在水资源相对丰富的昌吉、伊犁和乌鲁木齐等北疆地区, 到 2009 年, 用水指标已被各大煤电项目瓜分完毕, 新疆新兴的煤化工项目都面临无水可调的窘境。目前, 规划中的煤化工产业园部分占用的是生态与农业灌溉用水指标。因此对于水资源短缺的西部地区煤电煤化工企业而言, 成本问题在无水可调的困境面前已经显得微不足道。

目前, 国家发改委正在制订一系列有利于海水淡化产业发展的政策, 包括《海水淡化“十二五”规划》和鼓励发展海水淡化的产业政策, 一系列的补贴政策将陆续出台, 因此深层咸水淡化也将从中受益, 加之中国用水资源的日益紧缺, CO<sub>2</sub>-EWR 技术将会受到企业和政府的双重青睐。

## 2 结论

根据中国含水层系统类型, CO<sub>2</sub> 咸水层封存联合深部咸水开采 (CO<sub>2</sub>-EWR) 的思路可在不同地区含水层系统中得到应用, 使其发挥不同用途。

目前, 以煤为主的能源结构特点, 决定了中国 CCS 的发展主要是与煤转化领域的结合。而中国煤炭资源大多处于水资源较为短缺、生态环境较为脆弱的西部地区 (一区), 因此 CO<sub>2</sub>-EWR 技术无疑是一种颇具吸引力的 CCUS 选择。未来 CO<sub>2</sub>-EWR 的实施必将对内蒙、新疆等地的油气生产、煤化工企业产生积极的示范及引导作用。

尽管国内关于 CO<sub>2</sub>-EWR 技术的研究相对较少, 各个模块中仍存在一些问题需要研究解决, 但在全球气候变化、国家能源安全、区域经济高速发展以及水资源供需矛盾急速加剧的大背景下, 结合中国国情, CO<sub>2</sub>-EWR 技术的研究与应用也必将对东部京津唐、苏锡常等地面沉降严重地区 (二区) 以

及南方地区(三区)的深层卤水资源开采产生深远的推广潜力。总之,CO<sub>2</sub>-EWR技术是一种符合中国国情的富有创新资质的CCUS技术。

### 参考文献 (References)

- [1] Bachu S, Adams J J. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO<sub>2</sub> in solution [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44 (20): 3151-3175.
- [2] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 储存优先区域选择[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 963-968.  
Li Xiaochun, Liu Yanfeng, Bai Bing, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 963-968.
- [3] Birkholzer J T, Zhou Q L. Basin-scale hydrogeologic impacts of CO<sub>2</sub> storage: Capacity and regulatory implications[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, 3(6): 745-756.
- [4] Birkholzer J T, Zhou Q L, Tsang C F. Large-scale impact of CO<sub>2</sub> 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] Li Q, Wei Y N, Liu G Z, et al. Feasibility of the combination of CO<sub>2</sub> geological storage and saline water development in sedimentary basins of China[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 4511-4517.
- [6] 谢和平, 谢凌志, 王昱飞, 等. 全球二氧化碳减排不应是CCS, 应是CCU[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2012, 44(4): 1-5.  
Xie Heping, Xie Lingzhi, Wang Yufei, et al. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2012, 44(4): 1-5.
- [7] Kobos P H, Cappelle M A, Krumhansl J L, et al. Combining power plant water needs and carbon dioxide storage using saline formations: Implications for carbon dioxide and water management policies [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(4): 899-910.
- [8] Davidson C L, Dooley J J, Dahowski R T. Assessing the impacts of future demand for saline groundwater on commercial deployment of CCS in the United States[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1949-1956.
- [9] Buscheck T A, Sun Y W, Chen M J, et al. Active CO<sub>2</sub> 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.
- [10] Bourcier W L, Wolery T J, Wolfe T, et al. A preliminary cost and engineering estimate for desalinating produced formation water associated with carbon dioxide capture and storage [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(5): 1319-1328.
- [11] 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]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 2269-2276.
- [12] 李义连, 房琦, 柯怡兵, 等. 高盐度卤水对 CO<sub>2</sub> 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, 37(2): 283-288.  
Li Yilian, Fang Qi, Ke Yibing, et al. *Earth Science-Journal of Chinese University of Geoscience*, 2012, 37(2): 283-288.
- [13] 李琦. 规模化咸水层 CO<sub>2</sub> 封存中环境与安全风险评价研究[C]. 第415次香山会议: 规模化二氧化碳咸水层封存的关键科学技术问题. 北京, 2011.  
Li Qi. Research on environmental impact and risk assessment of large scale CO<sub>2</sub> storage in saline aquifers[C]. The 415th Session of Xiangshan Science Conferences: Key S & T Issues for Large Scale CO<sub>2</sub> Sequestration in Saline Aquifers. Beijing, 2011.
- [14] 姜玲. CO<sub>2</sub> 地质储存对地下水的环境影响研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.  
Jiang Ling. Research on the environmental impact of carbon dioxide geological sequestration on groundwater[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [15] 谢和平, 王昱飞, 鞠杨, 等. 地球自然钾长石矿化 CO<sub>2</sub> 联产可溶性钾盐[J]. *科学通报*, 2012, 57(1): 1-6.  
Xie Heping, Wang Yufei, Ju Yang, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(1): 1-6.
- [16] 王永军, 王育霞, 闫冬. 发展新型煤化工所需基础条件分析 [J]. *西部煤化工*, 2009(1): 17-19.  
Wang Yongjun, Wang Yuxia, Yan Dong. *Western Coal Chemical Industry*, 2009(1): 17-19.
- [17] 气候组织. CCS 在中国: 现状、挑战和机遇[R]. 北京: 气候组织, 2010. Climate Group. CCS in China: Current status, challenges and opportunities[R]. Beijing: Climate Group, 2010.
- [18] Rackley S A. 碳捕获与封存[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
Rackley S A. *Carbon capture and storage*[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [19] 李阳丹. 煤化工行业将拉开碳减排技术序幕[EB/OL]. 2010-08-24 [2012-12-11]. <http://www.chinanews.com/stock/2010/08-24/2487724.shtml>.  
Li Yangdan. Coal chemical industry will kick off the carbon abatement technologies[EB/OL]. 2010-08-24 [2012-12-11]. <http://www.chinanews.com/stock/2010/08-24/2487724.shtml>.
- [20] 张森琦, 郭建强, 刁玉杰, 等. 规模化深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存选址方法研究[J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1640-1651.  
Zhang Senqi, Guo Jianqiang, Diao Yujie, et al. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1640-1651.
- [21] Klapperich R J, Cowan R M, Corecki C D, et al. IEAGHG investigation of extraction of formation water from CO<sub>2</sub> storage [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 2479-2486.

(责任编辑 王媛媛)

### 《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。