

# CO<sub>2</sub>地质封存技术及其同位素在咸水层的化学行为研究进展

刘子剑<sup>1</sup>, 张楠<sup>2</sup>, 张凤君<sup>1</sup>

1. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130021
2. 香港科技大学土木及环境工程学院, 香港 999077

**摘要** 深部咸水层是CO<sub>2</sub>地质封存的主要封存地, 因所处地质背景和在地质历史过程中经历的地球化学环境不同, 其地球化学行为也各不相同。本文综述地质封存空间与封存量、地质封存类型、同位素标记CO<sub>2</sub>在咸水层的化学行为的研究进展。分析表明, 目前关于CO<sub>2</sub>地质封存的研究在现象实验、模拟和现场实验方面都取得了初步进展, 但对CO<sub>2</sub>注入地下后的行为过程仍有很多未解决的理论和技術难题; CO<sub>2</sub>地质封存监测方法的选择主要取决于具体的场地条件和场地的风险情况, 未来技术发展主要集中于封存场地评价与储层响应监测技术。

**关键词** CO<sub>2</sub>的捕获和封存; 地质封存; 深部咸水层; 同位素

**中图分类号** X741

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.019

## A review on CO<sub>2</sub> geological storage technologies and chemical behaviors of isotope in salty water layer

LIU Zijian<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>, ZHANG Fengjun<sup>1</sup>

1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China
2. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China

**Abstract** Deep saline aquifer is a major geological storage site for CO<sub>2</sub>. The geochemical behaviors of deep saline aquifers differ each other due to their different geological backgrounds and geochemical environments in their geological histories. This paper reviews the research progresses on geological storage space and storage capacity, types of geological storage and chemical behaviors of isotope-labeled CO<sub>2</sub> in saltwater layer. It is shown that though current researches on CO<sub>2</sub> geological storage have made progresses in phenomenon experiments, simulations and field experiments, many theoretical and technical problems of the behaviors of CO<sub>2</sub> after injecting underground remain unresolved. The choice of monitoring methods for CO<sub>2</sub> geological storage mainly depends on the specific site condition and risk profile. Future technological developments may focus on the evaluation of storage site and monitoring technologies of reservoir response.

**Keywords** capture and storage of CO<sub>2</sub>; geological storage; deep saline aquifer; isotopes

随着现代工业的发展, 全球有80%的能源来自煤炭、石油和天然气等化石能源。水电和核能虽然成本较低, 但环境条件严重限制了其发展的规模, 短时间内很难成为重要的能

源来源<sup>[1-3]</sup>。此外, 风能、太阳能和生物质能等新能源虽然环保前景喜人, 但受成本和技术等客观因素制约, 取代传统化石能源的研究仍处于起步阶段, 距离实现大规模商业化开发

收稿日期: 2014-10-23; 修回日期: 2015-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472214); 中国地质调查局地质调查工作项目(12120113006300)

作者简介: 刘子剑, 硕士研究生, 研究方向为环境工程, 电子信箱: lzj1991@sohu.com; 张凤君(通信作者), 教授, 研究方向为二氧化碳地质储存与资源化, 电子信箱: zhangfengjun@jlu.edu.cn

引用格式: 刘子剑, 张楠, 张凤君. CO<sub>2</sub>地质封存技术及其同位素在咸水层的化学行为研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 108-113.

尚需很长时间<sup>[4,5]</sup>。因此,发展可靠技术、减少化石燃料使用所产生的温室气体排放是当前解决环境与资源问题的重要思路,碳捕集与封存(CCS)技术也由此应运而生。当前全球气候变暖情况已经越来越严重,工业排放的CO<sub>2</sub>被认为是导致气候变暖的主要原因。面对日益紧迫的环境问题,CCS技术不仅能将CO<sub>2</sub>封存于地下或海底,还能实现CO<sub>2</sub>资源的利用,被看作是最具发展前景的解决方案之一<sup>[6-8]</sup>。

CO<sub>2</sub>通常被封存在地下的咸水层中,由于所处地质背景和在地质历史过程中经历的地球化学环境不同,不同咸水层CO<sub>2</sub>注入后的地球化学行为也各不相同<sup>[9]</sup>。研究咸水层CO<sub>2</sub>-水-岩作用同位素地球化学行为,可为识别和量化时间尺度上咸水层储层CO<sub>2</sub>的不同捕获过程提供直接有力的证据,进一步为揭示CO<sub>2</sub>-水-岩作用的地球化学反应机理拓宽研究思路。本文综述CO<sub>2</sub>地质封存技术及其同位素在咸水层的化学行为研究进展。

## 1 地质封存空间与封存量

CCS技术是指将CO<sub>2</sub>从相关排放燃烧源捕获并分离出来,输送到油气田、海洋等包括深部咸水层、枯竭油气藏和不可采煤层的地点进行长期封存,从而阻止或显著减少温室气体排放,减轻对地球气候影响的技术<sup>[10-12]</sup>。这是一项新兴的、具有大规模减排潜力的技术,有望实现化石能源燃烧产生CO<sub>2</sub>的近零排放<sup>[12]</sup>。

目前,处于研究阶段的封存场所主要有深度含盐水层、枯竭或开采到后期的油气田、不可采的贫瘠煤层和海洋<sup>[13-15]</sup>。根据联合国政府间气候变化委员会(IPCC)的调查,CCS技术应用能将全球CO<sub>2</sub>排放量减少20%~40%,并对减缓气候变化产生积极的影响<sup>[16,17]</sup>。中国的CCS研究刚刚起步,但政府支持力度很大,同时科研机构、高等院校及一些大型企业均开展了相关研究和示范项目(表1)<sup>[18]</sup>。

表1 中国CCS示范项目

Table 1 Demonstrative CCS projects at home

项目名称	投资单位	类型	运行年份	封存能力/(t·a <sup>-1</sup> )
吉林油田CO <sub>2</sub> 驱注采项目	中国石油	封存	2008	1.09×10 <sup>5</sup> ~1.46×10 <sup>5</sup>
神化集团CCS示范工程	神化集团	封存	2010	10×10 <sup>4</sup>
大庆油田先导试验	中国石油	驱油	1990	—
辽河油田先导试验	中国石油	驱油	2001	—
重庆合川双槐树电厂CCS示范工程	中电投	捕捉	2010	1×10 <sup>4</sup>
华能北京热电厂CCS示范工程	中国华能集团公司	捕捉	2009	3000
华能石洞口第二电厂CCS示范工程	中国华能集团公司	捕捉	2009	1.2×10 <sup>5</sup>

注:“—”表示数据未见报道。

CO<sub>2</sub>煤层可储量包括利用CO<sub>2</sub>-ECBM(二氧化碳煤层气强化采收技术)储层的CO<sub>2</sub>和开采煤层气后煤所能储存的CO<sub>2</sub>量。利用CO<sub>2</sub>-ECBM技术进行煤层气开采时可储存在煤层中的CO<sub>2</sub>量可用式(1)<sup>[9]</sup>计算。

$$S_{\text{CO}_2} = \alpha \rho_{\text{CO}_2} \sum_{i=1}^{68} \sum_{j=1}^{10} G_i \frac{C_{ij}}{C_i} RF_{ij} ER_{ij} \quad (1)$$

式中,  $S_{\text{CO}_2}$  为CO<sub>2</sub>的可储量, kg;  $\alpha$  为可采煤层气区分布面积占煤层总分布面积的比例, 参考欧美的经验, 取 $\alpha=10\%$ ;  $\rho_{\text{CO}_2}$  为标准压力和温度条件下的CO<sub>2</sub>密度, 取 $\rho_{\text{CO}_2}=1.977 \text{ kg/m}^3$ ;  $G_i$  为第*i*评价区的煤层气资源量, m<sup>3</sup>;  $C_i$  为第*i*评价区的煤炭资源量, t;  $C_{ij}$  为第*i*评价区第*j*种煤阶的煤炭资源量, t;  $RF_{ij}$  为第*i*评价区第*j*种煤阶煤中利用CO<sub>2</sub>-ECBM技术煤层气的可采系数;  $ER_{ij}$  为第*i*评价区第*j*阶煤的CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>置换比例。

封存量的计算基于一套计算深度、温度和压力条件下某一体积沉积岩中可用封存量的简单算法, 然而将其应用于某一特定地区或场地时却极其复杂<sup>[20,21]</sup>。当捕获机制多样、各种捕获机制开始生效的时间尺度不同、CO<sub>2</sub>以多种物理状态存在时, 其计算尤显复杂<sup>[22]</sup>。地质环境、岩性和储层储集性能的高度变化, 降低了封存量计算的可信度, 封存量计算存在不确定性。不同水平的估算需要来自多种学科的大量数据, 并

将其综合以获得有意义的结果<sup>[23]</sup>。局域尺度最精确的计算方法是通过构建地质模型进行储层模拟, 现实封存量评价中考虑地质和工程方面的一系列技术限制, 如储层品位(孔隙率、渗透性)、盖层条件、封存深度、压力和应力场、储层和圈闭孔隙空间、有否其他利用价值(如油气、煤、水、地热能、矿产)等, 计算可达一定精度且更具现实意义<sup>[24]</sup>。

李小春等<sup>[25]</sup>在收集地质和石油勘探等资料的基础上, 进行了中国深部咸水含水层CO<sub>2</sub>封存优先区域选择研究, 初步评价结果表明, 中国咸水层CO<sub>2</sub>封存量达144 Gt, 约为2003年中国大陆地区CO<sub>2</sub>排放量的40.5倍。华北平原大部, 四川盆地北部、东部和南部, 准噶尔盆地东南部都是将来优先考虑的CO<sub>2</sub>含水层封存地区。东南沿海和华南大部, 应考虑利用近海沉积盆地内的咸水含水层封存CO<sub>2</sub>。

刘延锋等<sup>[5]</sup>根据中国各含油气盆地天然气勘探资料和天然气资源评估结果, 对中国天然气田CO<sub>2</sub>封存量进行了初步评估。结果表明, 中国主要的含油气盆地气田可以封存CO<sub>2</sub>约30.4 Gt, 其中陆地区约占78.1%, 大陆架区约占21.9%, 相当于2002年全国CO<sub>2</sub>排放总量的9.2倍。各含气盆地中以鄂尔多斯盆地封存容量最大, 其次为四川盆地、塔里木盆地和柴达木盆地, 4者约占陆地封存容量的78%。而李小春等<sup>[26]</sup>根

据中国煤炭和煤层气勘探资料、不同性质煤的储量分布及CO<sub>2</sub>与C的置换比例,对中国主要含煤层气区深度300~1500 m范围内煤层CO<sub>2</sub>封存量进行初步评价。结果表明,利用CO<sub>2</sub>-ECBM技术可封存CO<sub>2</sub>约12.0 Gt,相当于2002年全国CO<sub>2</sub>排放量的3.6倍。

## 2 地质封存类型

### 2.1 油田和气田

随着对产油层和产气层地质概况的深入了解,CO<sub>2</sub>已被科学证实可以储存在废弃的油田和气田中,其封存深度一般在800 m以下,此时的储层温度和压力可以使CO<sub>2</sub>保持在超临界状态而得到大规模封存<sup>[27]</sup>。另外,将CO<sub>2</sub>回注到油气采收比较困难的油气田能大幅度提高油气田采收率,提高资源的利用程度,并可相应地延长油井生产寿命<sup>[28]</sup>。统计数据表明,利用全球衰竭的油气田封存CO<sub>2</sub>的质量约为923 Gt,相当于全球燃烧化石燃料的发电厂排放125年CO<sub>2</sub><sup>[29]</sup>。

### 2.2 不含碳氢化合物的圈闭结构

不含碳氢化合物的圈闭具有和含气层、含油层和煤层类似的结构,因此可以利用这种地质层封存大量的CO<sub>2</sub>。不含碳氢化合物的圈闭结构可以聚集封存的CO<sub>2</sub>并能阻止其移动,使CO<sub>2</sub>可以固定在不含碳氢化合物的圈闭中<sup>[30]</sup>。

### 2.3 深度蓄水盐层——底水

含盐水层的圈闭构造比油田和气田更普遍,并且其中可能有一些适于储存CO<sub>2</sub>的巨大储气构造,盐层的面积分布比较广泛<sup>[31]</sup>,所以利用此类机构封存难度较低,是一种容易推广的可行性方案,但储存时必须充分了解含盐水层的各种性质和地质结构安全。

### 2.4 海洋地质封存

海洋地质封存是指用管道或者船舶运输将CO<sub>2</sub>储存在深海的海洋水或深海海床上的封存技术,可分为溶解型和湖泊型两种海洋封存<sup>[32]</sup>。溶解型海洋封存是将CO<sub>2</sub>输送到深海中,使其自然溶解并成为自然界碳循环的一部分;湖泊型海洋封存是将CO<sub>2</sub>注入到地下3000 m的深海中,由于CO<sub>2</sub>的密度大于海水,会在海底形成液态CO<sub>2</sub>湖,从而延缓CO<sub>2</sub>释放到环境中。但由于海洋封存技术还不够完善,对海洋中的环境和生物存在较大风险<sup>[33,34]</sup>,因此,该技术无法大规模广泛使用。

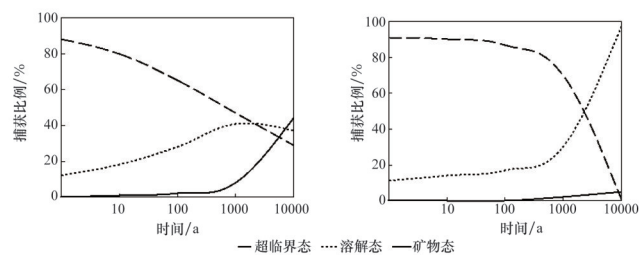
## 3 同位素标记CO<sub>2</sub>在咸水层的化学行为

CO<sub>2</sub>通常被储存在深部咸水含水层中,其储存方法主要有超临界流体被地下岩石储存、溶解在地下水中、与含水层矿物发生反应被固定3种<sup>[35]</sup>。因此,深部咸水含水层的CO<sub>2</sub>地质储存是CO<sub>2</sub>在地层中与水和岩石之间长期复杂的物理、化学作用过程。在咸水层中储存CO<sub>2</sub>有很多参数需要确定,其中包括动态模拟以及试验场所地质评估、风险评价、经济性评价参数等。近年来,热流体-岩体系中同位素分馏动力学和分馏系数的测定逐渐成为实验地球化学研究的新方向。因此,研究咸水层CO<sub>2</sub>-水-岩作用同位素地球化学行为,可

进一步为揭示CO<sub>2</sub>-水-岩作用的地球化学反应机理拓宽研究思路,为识别时间尺度上咸水层储层CO<sub>2</sub>的不同捕获过程提供直接有力的证据。

在Weyburn项目<sup>[36,37]</sup>的流体地球化学监测中,Emberley等<sup>[37]</sup>、Cantucci等<sup>[37]</sup>观察到CO<sub>2</sub>注入后引起的咸水水化学组分和<sup>13</sup>C同位素的显著变化,结合地球化学模拟,识别出储层发生的主要反应为碳酸盐矿物的溶解,并预测了片钠铝石沉淀的生成。Kharaka等<sup>[38]</sup>在深部咸水层CO<sub>2</sub>穿透观测井中监测到 $\delta^{13}\text{CDIC}$ 和 $\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$ 同位素的变化,发现流体氧同位素 $\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$ 、 $\delta^{18}\text{OCO}_2$ 指标对于CO<sub>2</sub>-咸水-岩石反应具有较高的灵敏度,并计算出了CO<sub>2</sub>饱和度。Johnson等<sup>[39]</sup>通过实验证实了一般咸水层温度压力范围内 $\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$ 与 $\delta^{18}\text{OCO}_2$ 之间的快速分馏,肯定了其指示CO<sub>2</sub>饱和度的合理性。Assayag等<sup>[40]</sup>在Lamont-Doherty场地浅部含水层(埋深232~240 m)CO<sub>2</sub>注入试验中,通过检测水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和溶解无机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 及主要阳离子Ca、Mg、Na、K等,识别出储层地球化学响应的主要机理,并根据质量平衡原理计算了混合作用、碳酸盐岩和硅酸盐岩溶解、阳离子交换等反应进行的程度。JuskeHorita等<sup>[41]</sup>利用碳、氧同位素的分馏效应,得出白云石-咸水-CO<sub>2</sub>体系在100~250℃条件下方解石的白云石化的一般反应动力学方程。

根据IPCC报告,在深部含水层注入CO<sub>2</sub>后CO<sub>2</sub>的捕获形式主要为物理机制,在万年尺度上化学捕获机制(溶解捕获和矿物捕获)逐渐占主导地位( $\geq 50\%$ ),且时间尺度越大矿物捕获比例越大(时间尺度 $t=10000$  a,所占比例约40%(图1(a));Gilfillan等<sup>[42]</sup>利用惰性气体(<sup>3</sup>He,<sup>20</sup>Ne)和碳同位素(<sup>13</sup>C)研究天然CO<sub>2</sub>气田,结果表明,千年时间尺度上地层水中的CO<sub>2</sub>主要以溶解态存在,其中矿物态最多约为18%。Audigane等<sup>[43]</sup>通过建立CO<sub>2</sub>反应运移模型,得出CO<sub>2</sub>注入后储层中CO<sub>2</sub>捕获机制随时间的变化如图1(b)所示<sup>[44]</sup>。



(a) 修改自IPCC报告

(b) 修改自Audigane等(2007)

图1 不同捕获机制下CO<sub>2</sub>封存量所占比例随时间的变化

Fig. 1 Diagrams of CO<sub>2</sub> storage capacity changing with time for different trapping mechanisms

孟繁奇等<sup>[45]</sup>选取方解石为研究对象,探讨了方解石溶解现象成因及温度对方解石溶解程度的影响。研究表明,在含CO<sub>2</sub>的咸水中,方解石的溶解现象有溶蚀坑、溶蚀带和溶蚀晶锥3种;方解石在咸水中具有各向异性溶解的特点,其最大溶解度所对应的温度峰值可能出现在135~185℃。杨国

栋<sup>[46]</sup>利用 Toughreact 数值模拟软件建立了一维垂向模型,研究了盖层中不同绿泥石含量对 CO<sub>2</sub>-水-岩石相互作用的影响,发现当绿泥石体积分数为 9% 和 15% 时,盖层渗透率呈现先增大后减小趋势,产生自封闭现象,有利于 CO<sub>2</sub> 的封存。

#### 4 讨论

目前,关于 CO<sub>2</sub> 地质封存的研究在全世界刚刚开展,诸多研究在现象实验、模拟和现场实验方面都取得了初步进展,但对于 CO<sub>2</sub> 注入地下后的行为过程仍有很多没有解决的理论和难题。关于 CO<sub>2</sub> 地质封存监测方法研究和比较也已经开展了很多,监测方法的选择主要取决于具体的场地条件和场地的风险情况,未来技术发展主要集中于封存场地评价与储层响应监测技术。中国的 CO<sub>2</sub> 封存地质条件与国外不同,中国新生代盆地多分布陆相沉积,并且盆地断层多,力学稳定性较差,在中国开展 CO<sub>2</sub> 封存的研究有自己的特色和重点。

##### 4.1 更多关于封存体系物理化学性能的问题尚待解决

对咸水层中 CO<sub>2</sub> 封存的评价需要 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 盐-矿体系的高精度实验数据或压力-体积-温度组成 (PVT<sub>x</sub>) 性质模型。Hu 等<sup>[47]</sup>对温度 647 K 以内的 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl 体系的 PVT<sub>x</sub> 实验数据和热力学模型进行了评估,发现其中 2/3 的实验数据相互一致,但不能满足 CO<sub>2</sub> 封存评价的精度要求。饱和蒸汽相体积数据缺乏,只有少数关于三元流体的数据且不相一致;可用来检验 CO<sub>2</sub> 封存的密度预测模型的数据较少,虽有少数模型精度接近实验数据,但对于 CO<sub>2</sub> 封存模拟所要求 0.1% 的精度要求相差较远。

李德栋<sup>[48]</sup>提出了在 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl 体系水溶液中计算化学物种平衡耦合气液相平衡的热力学模型,建立了一个 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCO<sub>3</sub> 四元体系相平衡耦合化学平衡的热力学模型。该模型可计算碳酸钙方解石的溶解度、溶液中各化学物种的质量浓度、CO<sub>2</sub> 的体积分数、溶液 pH 值、碱度及气-液-固相平衡,相比以往模型计算结果更为可靠,并具有良好的预测性。今后进一步研究多元体系的物理化学性质是 CO<sub>2</sub> 地质封存数值模拟研究的基础。气-水-盐-矿作为最典型的地质体系仍存在大量问题需要深入研究。更多的气相组分、盐分和更多的矿物(碳酸盐、硅酸盐矿物等)仍需结合进来<sup>[49]</sup>。

##### 4.2 复杂反应运移过程的模拟有待进一步描述

由于 CO<sub>2</sub> 地质封存体系时空演化的复杂性,影响因素众多,数值模拟方法成为研究复杂反应运移过程的重要手段。以往的数值模拟方法基于多场耦合的理论模型,反应-一维迁移地球化学变化过程,开发了许多关于 CO<sub>2</sub> 地质封存地球化学模拟的数值程序,如 Toughreact、Nuft、Chrunch 和 Gem-Ghg 等。这些程序可耦合多相流动、热流、溶质运移及化学反应,描述多种水热和地球化学条件(温度、压力、水饱和度、离子强度等)下的地下热物理-化学过程,能够模拟 CO<sub>2</sub> 注入后与储层岩石矿物的反应,以及由此造成的孔隙率、渗透率变化。这些数值模型能在许多方面取得较一致的预测结果<sup>[50,51]</sup>。但依然存在某些不确定性,如:相关过程(非均质反应的动力

学)的复杂性考虑不足,目前的模拟无法完整预测 CO<sub>2</sub> 注入后的地球化学演化过程;模拟时常存在缺乏封存场地的详细的物理(水动力数据-孔隙率、渗透率、弥散系数、相对渗透率、毛管力关系等)和化学(岩石、流体样品,精确矿物组成、流体化学等)参数<sup>[52]</sup>;程序所采用的不同的多相流状态方程(水、CO<sub>2</sub>、混合、溶解)算法对预测结果影响较大,离散方法的影响也尚待评估<sup>[53]</sup>。

##### 4.3 地下深层流体和矿物的同位素动力学及热力学性能有待研究

同位素分馏动力学在识别和量化 CO<sub>2</sub> 不同捕获阶段及其反应机理方面起到了重要的指示作用。目前,文献报道多集中在储层流体的 <sup>18</sup>O 和 <sup>13</sup>C 同位素动力学研究,而相关的热力学分馏研究甚少。同时开展流体和矿物(如砂岩长石)的 <sup>18</sup>O 和 <sup>13</sup>C 同位素动力学分馏及热力学分馏的研究尚未见报道。此外,揭示 δ<sup>13</sup>C-δ<sup>18</sup>O 同位素组成的演变趋势,进而识别和量化 CO<sub>2</sub> 的不同阶段捕获过程,同时解析 <sup>13</sup>C-<sup>18</sup>O 同位素分馏系数与温度的响应关系,揭示稳定 <sup>13</sup>C-<sup>18</sup>O 同位素的热力学分馏机制的研究有待进一步开展。

##### 4.4 咸水层水盐组对 CO<sub>2</sub>-水-岩的作用影响及动力学参数有待进一步确定

由于不同咸水层水盐组分会影响时间尺度上咸水层中的 CO<sub>2</sub>-水-岩相互作用机制,因此应针对不同类型的沉积储层开展相关研究。此外,在 CO<sub>2</sub>-水-岩相互作用过程中,各种矿物溶解沉淀的动力学问题及其对储层物性(孔隙度和渗透率)的影响的研究也仍需进一步开展。

#### 参考文献 (References)

- [1] De Coninck H, Stephens J, Metz B. Global learning on carbon capture and storage: A call for strong international cooperation on CCS demonstration[J]. Energy Policy, 2009, 37(6): 2161-2165.
- [2] 李小春, 方志明. 中国 CO<sub>2</sub> 地质埋存关联技术的现状[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2229-2239.  
Li Xiaochun, Fang Zhiming. Status quo of connection technologies of CO<sub>2</sub> geological storage in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2229-2239.
- [3] 李桂菊, 张军, 季路成. 美国未来零排放燃煤发电项目最新进展[J]. 中外能源, 2009, 14(5): 96-100.  
Li Guiju, Zhang Jun, Ji Lucheng. Progress in US zero-emission coal-fired power generation program[J]. Sino-global Energy, 2009, 14(5): 96-100.
- [4] Li X, Wei N, Liu Y, et al. CO<sub>2</sub> point emission and geological storage capacity in China[J]. Energy Proceed, 2009, 1(1): 2793-2800.
- [5] 刘延峰, 李小春, 方志明, 等. 中国天然气田 CO<sub>2</sub> 储存容量初步评估[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2277-2281.  
Liu Yanfeng, Li Xiaochun, Fang Zhiming, et al. Preliminary estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity in gas fields in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2277-2281.
- [6] 崔振东, 刘大安, 曾荣树, 等. 中国 CO<sub>2</sub> 地质封存与可持续发展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(3): 9-13.  
Cui Zhendong, Liu Daan, Zeng Rongshu, et al. Geological sequestration of CO<sub>2</sub> and China's sustainable development[J]. China Population,

- Resources and Environment, 2010, 20(3): 9-13.
- [7] 2050 中国能源和碳排放研究课题组. 2050 中国能源和碳排放报告——中国 2050 低碳发展情景研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. Chinese Energy and Carbon Emissions Research Group of 2050. Chinese energy and carbon emissions reporting of 2050: Low carbon development situation of China in 2050[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [8] Cook P J. Demonstration and deployment of carbon dioxide capture and storage in Australia[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 3859-3866.
- [9] Garcia B, Delaplace P, Rouchon V, et al. The CO<sub>2</sub>-vadose project: Numerical modeling to perform a geochemical monitoring methodology and baseline performance assessment for various geochemical variables (gas flux, gas composition, stable isotopes and noble gases) in the carbonate vadose zone[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 14: 247-258.
- [10] 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, 31(1): 121-122. Duan Haiyan, Wang Lei. Study on the carbon dioxide geological storage in petroleum industry in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(1): 121-122.
- [11] 张军, 李小春. 国际能源战略与新能源技术进展[M]. 北京: 科学出版社, 2008. Zhang Jun, Li Xiaochun. Review of international energy strategy and new energy technology[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [12] 葛复光, 卓金和. 二氧化碳捕获与封存技术经济评估[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2012, 6(45): 821-827. Ge Fuguang, Zhuo Jinhe. Techno-economic assessment of carbon capture and storage[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 6(45): 821-827.
- [13] Metz B, Davison O, De Coninck H, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[M]. UK: Cambridge University Press, 2005: 205-252, 342-360.
- [14] Papanikolaou N, Hobbs B L W, Gale J. IEA greenhouse gas R&D programme: Safe storage of CO<sub>2</sub>: Experience from the natural gas storage industry[C]. The 8th International Conference, Trondheim, Norway, June 19-22, 2006.
- [15] 张军, 李桂菊. 二氧化碳封存技术及研究现状[J]. 能源与环境, 2007(2): 33-35. Zhang Jun, Li Guiju. The review of carbon dioxide sequestration technology[J]. Energy and Environment, 2007(2): 33-35.
- [16] Bachu S, Bonijoly D, Bradshaw J, et al. CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: Methodology and gaps[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, 1: 430-443.
- [17] Hansson A, Bryngelsson M. Expert opinions on carbon dioxide capture and storage—A framing of uncertainties and possibilities[J]. Energy Policy, 2009(37): 2273-2282.
- [18] 于德龙, 吴明, 赵玲, 等. 碳捕捉与封存技术研究[J]. 当代化工, 2014, 43(4): 544-546, 579. Yu Delong, Wu Ming, Zhao Ling, et al. Research on carbon dioxide capture and storage technology[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(4): 544-546, 579.
- [19] Hendriks C, Graus W, Bergen F. Global carbon dioxide storage potential and cost[R]. Netherlands: ECOFYS, 2004.
- [20] 白冰, 李小春, 刘延锋, 等. 中国 CO<sub>2</sub> 集中排放源调查及其分布特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2918-2923. Bai Bing, Li Xiaochun, Liu Yanfeng, et al. Preliminary study on CO<sub>2</sub> industrial point sources and their distribution in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Suppl 1): 2918-2923.
- [21] 刘宇, 曹江, 朱声宝. 挑战全球气候变化—二氧化碳捕集与封存[J]. 前沿科学, 2010(1): 40-51. Liu Yu, Cao Jiang, Zhu Shengbao. Challenging climate change: Carbon dioxide capture and storage[J]. Frontier Science, 2010(1): 40-51.
- [22] 王勇英, 周建明. 浅谈二氧化碳捕获与封存技术[J]. 煤炭技术, 2011(3): 57-62. Wang Yongying, Zhou Jianming. Discussion on the carbon dioxide capture and storage technology[J]. Coal Quality Technology, 2011(3): 57-62.
- [23] 吴黎明, 潘卫国, 郭瑞堂, 等. 富氧燃烧技术的研究进展及分析[J]. 锅炉技术, 2011, 1(42): 36-38, 68. Wu Liming, Pan Weiguang, Guo Ruitang, et al. The research and analysis of oxygen combustion technology[J]. Boiler Technology, 2011, 1(42): 36-38, 68.
- [24] Vermeiren W, Gilson J P. Impact of zeolites on the petroleum and petrochemical industry[J]. Chemistry and Materials Science, 2009, 52(9): 1131-1161.
- [25] 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. Ranking and screening of CO<sub>2</sub> saline aquifer storage zones in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 963-968.
- [26] 李小春, 刘延锋, 白冰. 中国 CO<sub>2</sub> 煤层封存容量初步评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2947-2952. Li Xiaochun, Liu Yanfeng, Bai Bing. Preliminary estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity of coalbeds in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2947-2952.
- [27] 李宏军, 黄盛初. 中国 CCS 的发展前景及最新行动[J]. 中国煤炭, 2010(1): 13-17. Li Hongjun, Huang Shengchu. China's development potential & latest actions on CCS[J]. China Coal, 2010(1): 13-17.
- [28] Bouvar F, Priour A. Comparison of life cycle GHG emissions and energy consumption of combined electricity and H<sub>2</sub> production pathways with CCS: Selection of technologies with natural gas, coal and lignite as fuel for the European HYPOGEN programme[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 3779-3786.
- [29] IPCC. Intergovernmental panel on climate change (IPCC) special report: Carbon dioxide capture and storage[R]. Copenhagen: WMO, 2005.
- [30] Zhang H X, Li X C, Wei N. The major technology track and analysis about carbon dioxide capture and storage[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(3): 335-340.
- [31] Wollenweber J, Alles S, Busch A, et al. Experimental investigation of the CO<sub>2</sub> sealing efficiency of caprocks[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(2): 231-241.
- [32] Vilarrasa V, Olivella S, Carrera J. Geomechanical stability of the caprock during CO<sub>2</sub> sequestration in deep saline aquifers[J]. Energy Proceed 10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2011, 4: 5306-5313.
- [33] Rutqvist J, Birkholzer J T, Tsang C. Coupled reservoirgeomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO<sub>2</sub> injection in multilayered reservoir-caprock systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(2): 132-143.
- [34] Ambrose A. Quick-look assessments to identify optimal CO<sub>2</sub> EOR storage sites[J]. Environment Geology, 2008, 54: 1695-1706.
- [35] Gentzis T. Subsurface sequestration of carbon dioxide—An overview from an Alberta (Canada) perspective[J]. International Journal of Coal

- Geology, 2000, 43(1): 287-305.
- [36] Emberley S, Hutcheon I, Shevalier M, et al. Monitoring of fluid-rock interaction and CO<sub>2</sub> storage through produced fluid sampling at the Weyburn CO<sub>2</sub>- injection enhanced oilrecovery site, Saskatchewan, Canada[J]. Applied Geochemistry, 2005, 20(6): 1131-1157.
- [37] Cantucci B, Montegrossi G, Vaselli O, et al. Geochemical modeling of CO<sub>2</sub> storage in deep reservoirs: The Weyburn Project (Canada) case study[J]. Chemical Geology, 2009, 265(1): 181-197.
- [38] Kharaka Y, Cole D, Thordsen J, et al. Gas-water-rock interactions in sedimentary basins: CO<sub>2</sub> sequestration in the Frio Formation, Texas, USA[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89(1): 183-186.
- [39] Johnson G, Mayer B. Oxygen isotope exchange between H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> at elevated CO<sub>2</sub> pressures: Implications for monitoring of geological CO<sub>2</sub> storage[J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(7): 1184-1191.
- [40] Assayag N, Matter J, Ader M, et al. Water-rock interactions during a CO<sub>2</sub> injection field-test: Implications on host rock dissolution and alteration effects[J]. Chemical Geology, 2009, 265(1): 227-235.
- [41] Oxygen H J. Carbon isotope fractionation in the system dolomite-water-CO<sub>2</sub> to elevated temperatures[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 129: 111-124.
- [42] Gilfillan S M V, Lollar B S, Holland G, et al. Solubility trapping in formation water as dominant CO<sub>2</sub> sink in natural gas fields[J]. Nature, 2009, 458(7238): 614-618.
- [43] Audigane P, Gaus I, Czernichowski-Lauriol I, et al. Two-dimensional reactive transport modeling of CO<sub>2</sub> injection in a saline aquifer at the sleipner site, north sea[J]. American Journal of Science, 2007, 307(7): 974-1008.
- [44] 李义曼, 庞忠和, 李捷, 等. 二氧化碳咸水层封存和利用[J]. 科技导报, 2012, 30(19): 70-79.  
Li Yiman, Pang Zhonghe, Li Jie, et al. CO<sub>2</sub> sequestration and utilization in deep saline aquifers[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(19): 70-79.
- [45] 孟繁奇, 李春柏, 刘立, 等. CO<sub>2</sub>-咸水-方解石相互作用实验[J]. 地质科技情报, 2013, 32(2): 171-176.  
Meng Fanqi, Li Chunbai, Liu Li, et al. Experiment of CO<sub>2</sub>-saline water-calcite interactions[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(2): 171-176.
- [46] 杨国栋, 李义连, 马鑫, 等. 绿泥石对CO<sub>2</sub>-水-岩石相互作用的影响[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2014, 39(4): 462-472.  
Yang Guodong, Li Yilian, Ma Xin, et al. Effect of chlorite on CO<sub>2</sub>-water-rock interaction[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(4): 462-472.
- [47] Hu J, Duan Z, Zhu C, et al. PVTx properties of the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl systems below 647 K: Assessment of experimental data and thermodynamic models[J]. Chemical Geology, 2007, 238: 249-267.
- [48] 李德栋. 气水岩矿体系相平衡及其在二氧化碳地质封存数值模拟中的应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.  
Li Dedong. The gas-water-rock system phase equilibrium applied in numerical simulation of CO<sub>2</sub> geological storage[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [49] Pruess K, Garcla J, Kovscek T, et al. Code intercomperison builds confidence in numerical simulation models for geologic disposal of CO<sub>2</sub> [J]. Energy, 2004, 29: 1431-1444.
- [50] Pruess K, Spycher N. ECO<sub>2</sub>N-A fluid Property module for the TOUGH2 code far studies of CO<sub>2</sub> storage in saline aquifers[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(6): 1761-1767.
- [51] Busch A, Alles S, Krooss B M, et al. Effects of physical sorption and chemical reactions of CO<sub>2</sub> in shaly caprocks[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 3229-3235.
- [52] Vilarrasa V, Bolster D, Olivella S, et al. Coupled hydromechanical modeling of CO<sub>2</sub> sequestration in deep saline aquifers[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(6): 910-919.
- [53] Duceillier A, Seyedi D, Foerster E. A coupled hydromechanical fault model for the study of the integrity and safety of geological storage of CO<sub>2</sub>[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 5138-5145.

(责任编辑 王媛媛)

## ·学术动态·



## 第14届全国肿瘤药理与化疗学术会议在沈阳召开

2015年4月24—27日,由中国工程院医药卫生学部、中国抗癌协会抗癌药物专业委员会、中国药理学会肿瘤药理专业委员会主办的2015医学前沿论坛暨第14届全国肿瘤药理与化疗学术会议在沈阳召开。

会议邀请中国工程院院士丁健作“精确医疗时代的抗肿瘤药物研发”报告,中国工程院院士甄永苏作“抗肿瘤抗体偶联药物(ADC)的研究进展与策略思考”报告,中国科学院上海生命科学研究院教授时玉舫作“Mesenchymal Stem Cells and Tumor Progression”报告、厦门大学生物医学研究院教授张晓坤作“核受体非基因型作用机制及其在药物开发中的应用”报告,美国梅奥医学中心教授 Tamas Ordog作“Mechanisms of disease persistence in gastrointestinal stromal tumors”报告。

目前,分子靶向抗肿瘤药物研究研发与治疗应用飞速发展,转化医学理念不断深入人心,个体化治疗应用日趋广泛。分子靶向治疗已成为临床肿瘤治疗中非常重要的组成部分。分子靶向治疗为肿瘤治疗带来了前所未有的革命性变化,但同时也出现了很多新问题。例如,分子靶向药物的耐药性,如何提高该类药物的临床获益度包括延长患者生命或无病生存期等,如何利用分子标志筛选合适治疗对象、监控疗效和毒性以及老药新用与药物再评价等,愈来愈受到广泛关注。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38620/16369119.html>。