

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/279539933>

# Estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity in saline aquifers in west of South China Sea

**Article** in *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics* · April 2010

CITATIONS

10

READS

252

6 authors, including:



**Zhang Liang**

China University of Petroleum (East China)

154 PUBLICATIONS 3,702 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Shaoran Ren**

China University of Petroleum, East China

238 PUBLICATIONS 5,705 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

文章编号: 1000-7598 (2010) 04-1238-05

# 南海西部盐水层 CO<sub>2</sub> 埋存潜力评估

张 亮<sup>1</sup>, 任韶然<sup>1</sup>, 王瑞和<sup>1</sup>, 易 平<sup>2</sup>, 米洪刚<sup>2</sup>, 李俊廷<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 石油工程学院, 东营 257061; 2. 中海油湛江分公司勘探开发部, 湛江 524000)

**摘 要:** 南海西部东方 1-1、崖城 13-1 和乐东等气田具有 CO<sub>2</sub> 含量高的特点, 每年从生产出的天然气中分离出大量的 CO<sub>2</sub>。为了减少 CO<sub>2</sub> 在大气中的排放, 考虑在莺歌海地区选择合适的盐水层埋存体, 拟进行 CO<sub>2</sub> 地质埋存示范工程。根据 CO<sub>2</sub> 在盐水层中的各种埋存机理, 并考虑盐水层构造特征对 CO<sub>2</sub> 运移分布的影响, 提出了一种较为准确的 CO<sub>2</sub> 埋存潜力评估方法, 并利用此方法对筛选出的 5 个备选盐水层进行了评估。评估结果表明, 各盐水层埋存潜力巨大, 都远远大于示范工程期限内预计的 CO<sub>2</sub> 埋存总量, 并可把这些盐水层作为将来海南省及临近广东省人为 CO<sub>2</sub> 的埋存场所。

**关 键 词:** 二氧化碳; 埋存潜力; 盐水层; 天然气; 南海

中图分类号: X 7

文献标识码: A

## Estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity in saline aquifers in west of South China Sea

ZHANG Liang<sup>1</sup>, REN Shao-ran<sup>1</sup>, WANG Rui-he<sup>1</sup>, YI Ping<sup>2</sup>, MI Hong-gang<sup>2</sup>, LI Jun-ting<sup>2</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huagdong), Dongying 257061, China;

2. Department of Exploration and Development, Zhanjiang Branch Company of China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang 524000, China)

**Abstract:** Many natural gas fields discovered in the west of South China Sea, such as DF1-1, YC13-1 and Ledong, are associated with high concentration of CO<sub>2</sub>. Considerable amounts of CO<sub>2</sub> has to be separated from natural gas stream during the development of these gas fields each year. In order to reduce the emission of CO<sub>2</sub> into the atmosphere, geological storage of CO<sub>2</sub> in deep saline aquifers has been considered. This study is aimed at selecting saline aquifers in the Yinggehai region, intending to carry out a CO<sub>2</sub> storage demonstration project. Five candidate aquifers are selected and their capacities of CO<sub>2</sub> storage are estimated based on an accurate method which considers various mechanisms of CO<sub>2</sub> storage in aquifers as well as the influence of aquifer structural features on CO<sub>2</sub> migration and distribution. The assessment results show that all five aquifers are good candidates for CO<sub>2</sub> storage with high storage potential to store all the CO<sub>2</sub> expected during the demonstration project, and also can provide storage sites for the man-made CO<sub>2</sub> in Hainan and Guangdong provinces in the near future.

**Key words:** carbon dioxide; storage capacity; saline aquifer; natural gas; South China Sea

## 1 前 言

随着 2005 年 2 月 16 日《京都议定书》的生效, CO<sub>2</sub> 等温室气体在大气中的排放将受到法律、经济及道义上越来越多的制约, 许多国家都在致力于研究永久处置 CO<sub>2</sub> 的方法。将 CO<sub>2</sub> 直接注入到地层中进行地质埋存是一种技术可行、环境安全的方案。早在 1996 年, 挪威国家石油公司就将 Sleipner 气田开采出的天然气(含 9.5% CO<sub>2</sub>)中分离出的 CO<sub>2</sub> 以 1×10<sup>6</sup> t/a 的速度注入到气藏上方 800 m 深的

Utsira 砂岩盐水层中。这是世界上第 1 个工业规模的 CO<sub>2</sub> 地质埋存工程<sup>[1-4]</sup>。我国于 2002 年 8 月 30 日签订了《京都议定书》, 在这一方面的工作也受到重视。目前, 国内关于 CO<sub>2</sub> 地质埋存的研究才刚刚起步<sup>[5-8]</sup>。

南海西部东方 1-1、崖城 13-1 和乐东等气田具有 CO<sub>2</sub> 含量高的特点, 每年从天然气中分离出大量的 CO<sub>2</sub>, 大都排放到大气中。近年来地质埋存作为一种减少 CO<sub>2</sub> 排放、缓解温室效应的有效措施受到了广泛关注。本研究的目的是在南海西部莺歌海附

收稿日期: 2008-10-07

基金项目: 中海油科技攻关项目(No. Z2007SLZJ-FN0295); 国家 973 项目(No. 2006CB705805)。

第一作者简介: 张亮, 男, 1983 年生, 博士生, 主要从事 CO<sub>2</sub> 地质埋存方面的研究工作。E-mail: zhangliangk@163.com

近筛选 CO<sub>2</sub> 盐水层埋存体, 拟进行 CO<sub>2</sub> 地质埋存示范工程。根据现场资料, 在东方 1-1 气田周围筛选出 5 个盐水层, 并从构造特征、储盖层特征、流体性质、温压容积特性等方面对盐水层进行了比较详细的评估, 其中盐水层 CO<sub>2</sub> 埋存潜力计算是评估工作的重要一步。

从安全的角度考虑, 筛选出的盐水层埋存潜力要远大于工程期限内埋存的 CO<sub>2</sub> 总量。一般地, 在详细地注入方案设计之前的盐水层筛选评估阶段, 是不进行数值模拟研究的, 因此, 这需要一个较为准确的评估方法来评估盐水层的埋存潜力。圈闭体积法和溶解度法主要用于区域性(盆地级别)的盐水层埋存潜力评估, 评估结果主要用于决策, 常因没有储层资料或计算方便, 地质参数采用平均值。对于具体的埋存工程, 由于受到 CO<sub>2</sub> 气源的限制, 可供埋存的地质体数量有限, 但能提供较为详细的地质资料, 因此, 可根据这些资料进行更为准确的埋存潜力评估。

## 2 CO<sub>2</sub> 在盐水层中的埋存机制

实际工程中, CO<sub>2</sub> 注入位置一般选择在盐水层的低部位, 注入的 CO<sub>2</sub> 由于密度较轻, 会上浮至盖层下部, 并沿盖层下部向高部位流动。由于盐水层岩石颗粒表面存在吸附作用和毛管力, CO<sub>2</sub> 运移过后的地层中会圈闭一部分残余的 CO<sub>2</sub> 气体。当 CO<sub>2</sub> 遇到圈闭构造时, 会在里面不断聚集, 填满后发生溢流并向更高部位流去直到稳定。整个运移过程中, 会有部分 CO<sub>2</sub> 溶解在途经区域的残余水中。CO<sub>2</sub> 分布稳定后, 通过对流和扩散不断向地层水中溶解, 并最终分布到盐水层的其他区域。此外, 溶解的 CO<sub>2</sub> 可与地层水中及岩石颗粒表面的矿物成分发生化学反应, 生成固态的碳酸盐沉淀和可溶解的水化络合盐<sup>[9-12]</sup>。

因此, CO<sub>2</sub> 在盐水层中的圈闭机制可分为 4 种:

(1) 构造圈闭; (2) 残余饱和度圈闭; (3) 溶解圈闭; (4) 矿物圈闭。其中, 构造圈闭是处置 CO<sub>2</sub> 最重要的方式, 溶解圈闭是一个漫长的过程, 矿物圈闭能达到永久封存 CO<sub>2</sub> 的目的, 具有很好的发展前景。

## 3 盐水层 CO<sub>2</sub> 埋存潜力评估方法

根据 CO<sub>2</sub> 在盐水层中的运移、圈闭过程, 可将盐水层划分为 3 个区域: 残余饱和度圈闭控制区、构造圈闭控制区和溶解度圈闭控制区。本评估中引入容量系数  $C^{[10]}$ , 表示圈闭控制区内可用于埋存

CO<sub>2</sub> 的孔隙体积分数, 包括 CO<sub>2</sub> 气体部分 ( $C^{CO_2}$ ) 和在地层水中的溶解部分 ( $C^{water}$ ), 表达式如下:

$$C = C^{CO_2} + C^{water} = S_g + S_w X_w^{CO_2} \rho_w / \rho_{CO_2} \quad (1)$$

式中:  $S_g$  为圈闭控制区内 CO<sub>2</sub> 气体饱和度, 构造圈闭控制区内可取较大值, 溶解圈闭控制区内取值为 0;  $S_w$  为圈闭控制区内残余水饱和度,  $(1-S_g)$ ;  $X_w^{CO_2}$  为 CO<sub>2</sub> 在盐水中的溶解度, 质量分数;  $\rho_{CO_2}$  为地层条件下的 CO<sub>2</sub> 密度 ( $kg/m^3$ );  $\rho_w$  为地层水密度 ( $kg/m^3$ )。

根据盐水层的构造特征, 对各圈闭控制区划分体积比例, 为计算方便, 将残余饱和度圈闭控制区体积比例系数折合成构造圈闭控制区的体积比例系数。利用体积比例系数对各圈闭控制区的容量系数加权, 然后相加, 得到整个盐水层的有效容量系数  $C_{eff}$ , 表达式如下:

$$C_{eff} = (a+b)(S_g^{struc} + S_w^{struc} X_w^{CO_2} \rho_w / \rho_{CO_2}) + c X_w^{CO_2} \rho_w / \rho_{CO_2} \quad (2)$$

则盐水层 CO<sub>2</sub> 埋存潜力计算方法如下:

$$M_{CO_2} = AD\phi\rho_{CO_2}(C_{eff} + m) \times 10^{-3} \quad (3)$$

盐水层中有效孔隙体积的利用率 ( $u$ ) 和盐水层的存储效率 ( $h$ ) 分别为

$$u = Q_{CO_2} / M_{CO_2}, h = C_{eff} u \quad (4)$$

式中:  $C_{eff}$  为整个盐水层的有效容量系数;  $S_g^{struc}$  为构造圈闭控制区内 CO<sub>2</sub> 气体饱和度;  $S_w^{struc}$  为构造圈闭控制区内残余水饱和度,  $(1-S_g^{struc})$ ;  $a$  为构造圈闭控制区体积比例系数;  $b$  为残余饱和度圈闭控制区折合成构造圈闭控制区后的体积比例系数;  $c$  为溶解圈闭控制区体积比例系数;  $M_{CO_2}$  为盐水层 CO<sub>2</sub> 埋存容量 ( $10^6 t$ );  $A$  为盐水层覆盖面积 ( $km^2$ );  $D$  为盐水层厚度 ( $m$ );  $\phi$  为孔隙度;  $m$  为矿物圈闭系数;  $Q_{CO_2}$  为工程期限内要埋存的 CO<sub>2</sub> 总量 ( $10^6 t$ )。

值得一提的是, 当  $b=0$ ,  $c=0$ ,  $m=0$ ,  $S_w^{struc} = S_w$  或 0 时, 式 (3) 相当于圈闭体积法 (Hendriks, 1994 年)。对于单个盐水层构造  $a=1$ ; 对于盆地构造  $a=k_1 k_2$ , 其中  $k_1$  为盐水层平面分布范围占总盆地的比例 (一般取 0.01);  $k_2$  为构造圈闭面积占盐水层的比例 (一般取 0.02) <sup>[13]</sup>。

当  $a=0$ ,  $b=0$ ,  $m=0$  时, 式 (3) 相当于溶解度法。对于单个盐水层构造  $c=1$ ; 对于盆地构造  $c=k_3 k_4$ , 其中  $k_3$  为盐水层平面分布范围占总盆地的比例 (一般取 0.01) <sup>[14-15]</sup>;  $k_4$  为水层厚度占总厚

的比例（一般取 0.075~0.1）<sup>[16]</sup>。可见，此方法也适合于盆地级别的 CO<sub>2</sub> 埋存潜力评估。

4 南海西部盐水层 CO<sub>2</sub> 埋存潜力评估

4.1 埋存盐水层

莺歌海盆地位于海南岛以西，是一个发育于南海北部被动大陆边缘的中生代转换伸展盆地，呈北西向延伸。盆内自西向东可分为莺西斜坡带、中央拗陷带和莺东斜坡带等 3 个一级构造单元；其中，中央拗带可进一步划分为临高构造带和中央带底辟构造带 2 个二级构造单元（图 1）。

1979 年，我国开始对南海西部进行油气勘探，钻探出很多 CO<sub>2</sub> 气井（赖万忠，1994 年）。20 世纪 90 年代，在莺歌海盆地中央底辟构造带北部发现了东方 1-1 气田。进入 21 世纪后，在底辟构造带东方 1-1 气田周围开展了细致的研究工作，根据目前的研究程度，在气田周围和海南岛附近筛选出 5 个

可供 CO<sub>2</sub> 埋存的盐水层（图 2），分别为：NHW-1、NHW-2、NHW-3、NHW-4、NHW-5 构造。各盐水层的地质概况如表 1。

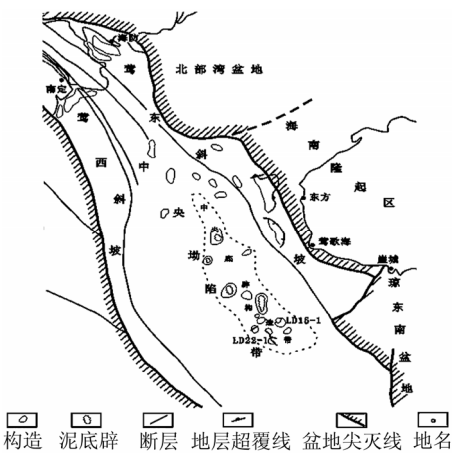


图1 莺歌海盆地构造区划图  
Fig.1 Tectonic map of Yinggehai Basin

表 1 东方 1-1 气田周围盐水层地质概况  
Table 1 Geological summary of candidate aquifers around DF1-1 gas field

地质参数	NHW-1	NHW-2	NHW-3	NHW-4	NHW-5
圈闭类型	岩性体	岩性体	岩性体	岩性体	岩性体
封闭性	侧封未落实	较好	一般	较好	一般
有无断层	无	无	无	无	有
埋深/m	1 270~1 560	1 458~2 026	2 812~3 770	2 340~2 466	2 000~2 700
面积/km <sup>2</sup>	115~340	32~44.1	107~259	65.6~171.3	257
厚度/m	100~180	56~135	315~803	85	150~200
孔隙度/%	18.4~40.3	19.3~22.6	22（浅层）	21	10~25
渗透率/mD	6.9~220	1.6~11.9	55~607（浅层）	22	10~100
非均质性	较强	较强	较弱（浅层）	较弱	较弱
流体类型	水层	水层为主	水层	水层	水层
总矿物度/ppm		38 632		40 642	19 676
地层温度/℃		82~101		112	94.1
地层压力/MPa		14.2~19.6	53.5~69.1（异常高压）	23.3~24.0	24.5
沉积相	盆底扇复合体	滩坝、边滩	浊积扇、盆底扇	滨海相	滨海相
岩性	泥质粉砂岩	粉砂岩	浊积砂体	石英砂岩	粉砂、细砂岩
盖层岩性	泥岩、砂质泥岩	泥岩、粉砂质泥岩	泥岩、粉砂质泥岩	泥岩、粉砂质泥岩	泥岩、粉砂质泥岩
盖层单层泥岩	35.5~70	57~103		100~251	106~432.5
最大厚度/m	（直接覆盖储层）	（直接覆盖储层）	57		

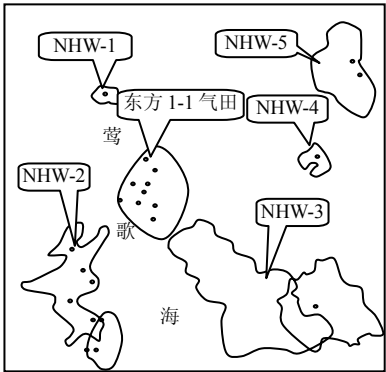


图2 东方 1-1 气田周围的备选盐水层  
Fig.2 Candidate aquifers around DF1-1 gas field

4.2 CO<sub>2</sub> 埋存潜力计算

本评估中，分别采用容量系数法、圈闭法、溶解度法计算盐水层的埋存潜力，其中圈闭法和溶解度法用于参照对比。计算参数取值如表 2。由于大部分盐水层中不存在 CO<sub>2</sub>，或只存在非常少量的 CO<sub>2</sub>，且对于计算结果影响很小，因此，对于盐水层中原始 CO<sub>2</sub> 气体饱和度不予以考虑。

从表 3 中可以看出，南海西部各盐水层的 CO<sub>2</sub> 埋存潜力都很大，远远大于南海气田伴生 CO<sub>2</sub> 埋存工程期限内预计的 CO<sub>2</sub> 埋存总量，有效孔隙体积的

利用率只有 0.08~3.86%; 同样的, Sleipner 示范工程中, Utsira 盐水层的 CO<sub>2</sub> 埋存潜力为  $2.7 \times 10^8$  t, 工程期限内 CO<sub>2</sub> 埋存总量为  $2.5 \times 10^7$  t, 有效孔隙体积的利用率也只有 9.26%<sup>[10]</sup>。因此, 盐水层的埋存潜力不会成为埋存实施的限制因素。

由于各盐水层的构造特征不同, 同时考虑工程实施, 使得 CO<sub>2</sub> 各种形式的圈闭量所占比例也不尽相同。对于构造起伏较大的盐水层, 构造圈闭所占比重较大; 对于构造起伏较小的单斜构造, 则 CO<sub>2</sub> 在运移过程中主要以残余饱和度和溶解形式圈闭。构造圈闭比重越大, 有效容量系数也就越大, 说明构造圈闭是一种非常重要的圈闭形式。虽然以溶解形式圈闭的 CO<sub>2</sub> 量所占比例不是很大, 但可以遍及整个水层, 且较为安全。

### 4.3 影响埋存潜力的因素

影响 CO<sub>2</sub> 在水层中存储量的因素很多, 驱替过程及地质条件的复杂性都会减少 CO<sub>2</sub> 的有效存储体积, 包括 CO<sub>2</sub>/地层水的相对渗透率、流度比、密度差异、储层的非均质性、构造特征、边界的密封性、局部和整体的压力约束条件、CO<sub>2</sub> 的纯度等。在实际操作中, 还可能会受到来自技术、经济、作业环境和对储层认识等方面的限制。此外, 埋存潜力计算结果的准确性与现场资料的数量及可靠程度也有

很大关系。

表2 CO<sub>2</sub>埋存潜力计算参数取值表  
Table 2 Parameter values for CO<sub>2</sub> storage capacity calculation

参数	取值			备注
	容量系数法	圈闭法	溶解度法	
$A、D、\varphi、\rho_w、s$	现场地质资料			缺失时则参考附近盐水层
$\rho_{CO_2}$	查现有图版			不考虑 CO <sub>2</sub> 纯度影响
$S_g^{struc}$	0.8	0.8	0	参考数模文献 <sup>[17-18]</sup>
$S_w^{struc}$	0.2	0.2	1	
$S_{rg}$	0.3	0	0	
$X_w^{CO_2}$	查现有图版, 再由经验公式(5)校正 <sup>[19]</sup>			
$a$	专家评定, $0 < a < 1$	1	0	主要根据各盐水层构造特征而定
$b$	$b = 0.5 \times (1 - a)$	0	0	
$c$	$c = 1 - a - b$	0	1	
$m$	0	0	0	一般矿物圈闭量所占比重很小, 忽略

$$X_w^{CO_2} = X^{CO_2} (1.0 - 4.893s + 13.028s^2 - 18.712s^3) \quad (5)$$

式中:  $X^{CO_2}$  为 CO<sub>2</sub> 在纯水水中的溶解度, 质量分数;  $s$  为矿化度, 质量分数。

表3 CO<sub>2</sub>埋存潜力计算结果  
Table 3 Calculation results of CO<sub>2</sub> storage capacity

盐水层	容量系数法 (预计工程期限内 CO <sub>2</sub> 埋存总量为 $6.4 \times 10^6$ t)							圈闭法	溶解度法	备注
	$a$	$b$	$c$	$C_{eff}/\%$	$M_{CO_2}/10^6$ t	$u/\%$	$h/\%$	$M_{CO_2}/10^6$ t	$M_{CO_2}/10^6$ t	
NHW-1	0.20	0.15	0.65	34.33	329.55	1.94	0.67	783.54	85.09	单斜+小型背斜
NHW-2	0.40	0.11	0.49	46.58	165.71	3.86	1.80	291.32	33.66	构造+岩性
NHW-3	0.10	0.17	0.73	28.24	7 721.33	0.08	0.02	22 130.69	2 425.58	单斜岩性圈闭
NHW-4	0.08	0.17	0.75	27.30	292.28	2.19	0.60	875.73	95.20	单斜岩性圈闭
NHW-5	0.05	0.18	0.77	24.43	497.20	1.29	0.31	1659.19	153.78	单斜岩性圈闭

## 5 结 论

(1) 国内 CO<sub>2</sub> 地质埋存研究刚刚起步, 针对南海西部气田开发特点, 拟进行 CO<sub>2</sub> 地质埋存示范工程。针对埋存工程的盐水层埋存潜力评估方法, 目前国内还很少。

(2) 根据 CO<sub>2</sub> 在盐水层中的埋存机制, 提出了容量系数法来评估埋存潜力。该方法能反映出各种圈闭形式对埋存潜力的贡献及储层构造特征对埋存潜力的影响, 且可转化成溶解度法或圈闭体积法, 用于盆地级别的盐水层埋存潜力评估。

(3) NHW-1、NHW-2 盐水层构造圈闭所占比重较大, NHW-3、NHW-4、NHW-5 盐水层为起伏

较小的单斜构造, CO<sub>2</sub> 主要以残余饱和度和溶解形式圈闭在地层中, 孔隙体积利用率不高。

(4) 通过评估, 5 个盐水层的 CO<sub>2</sub> 埋存潜力在  $(1.66 \sim 77.21) \times 10^8$  t, 都远远大于南海气田伴生 CO<sub>2</sub> 埋存工程期限内预计的 CO<sub>2</sub> 埋存总量, 因此, 埋存潜力不会成为埋存实施的限制因素, 同时可将这些盐水层作为将来海南省及临近广东省人为 CO<sub>2</sub> 的埋存场所。

### 参 考 文 献

- [1] 周蒂. CO<sub>2</sub> 的地质存储—地质学的新课题[J]. 自然科学进展, 2005, 15(7): 782—787.  
ZHOU Di. CO<sub>2</sub> geological storage—New task of geology[J]. Progress of Natural Science, 2005, 15(7):

- 782—787.
- [2] 张炜, 李义连. 二氧化碳储存技术的研究现状和展望[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(12): 950—953.  
ZHANG Wei, LI Yi-lian. Research status and prospects of carbon dioxide sequestration technique[J]. **Environmental Pollution & Control**, 2006, 28(12): 950—953.
- [3] 强薇, 李义连, 文冬光, 等. 温室性气体地质处置研究进展及其问题[J]. 地质科技情报, 2006, 25(2): 84—87.  
QIANG Wei, LI Yi-lian, WEN Dong-guang et al. Advances and Problems of Geological Disposal of Greenhouse Gases [J]. **Geological Science and Technology Information**, 2006, 25(2): 84—87.
- [4] 吕欣. 世界CO<sub>2</sub>隔离技术的最新动向[J]. 洁净煤技术, 2006, 12(1): 76—78.  
Lǚ Xin. Newest Development of CO<sub>2</sub> Sequestration in the World[J]. **Clean Coal Technology**, 2006, 12(1): 76—78.
- [5] 魏东, 马一太, 吕灿仁. 温室气体减排与21世纪我国的能源发展战略[J]. 能源技术, 2001, 23(2): 87—90.  
WEI Dong, MA Yi-tai, Lǚ Can-ren. Emission reduction of greenhouse gas and the strategy of the energy development in the 21st century[J]. **Energy Technology**, 2001, 23(2): 87—90.
- [6] 方改霞, 吴少杰. 目前我国温室气体CO<sub>2</sub>的排放及对策[J]. 工业安全与环保, 2003, 29(9): 18—20.  
FANG Gai-xia, WU Shao-jie. The emission and solution of greenhouse gas carbon dioxide in our country at present[J]. **Industrial Safety and Environmental Protection**, 2003, 29(9): 18—20.
- [7] 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—2233.  
LI Xiao-chun, FANG Zhi-ming. Status quo of connection technologies of CO<sub>2</sub> geological storage in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2229—2233.
- [8] 刘延锋, 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 Yan-feng, LI Xiao-chun, FANG Zhi-ming, 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.
- [9] NOH M, LAKE L W, BRYANT S L, et al. Implications of Coupling Fractional Flow and Geochemistry for CO<sub>2</sub> Injection in Aquifers[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 2007, 10(4): 406—414.
- [10] CHADWICK A, ARTS R, BERNSTONE C, et al. Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers: Observations and guidelines from the SACS and CO<sub>2</sub> STORE projects[M]. UK, Nottingham: British Geological Survey Occasional Publication, 2008: 15—30.
- [11] ENNIS-KING J, PATERSON L. Role of convective mixing in the long-term storage of carbon dioxide in deep saline formations[J]. **SPE Journal**, 2005, 10(3): 349—356.
- [12] LINDEBERG E, BERGMO P. The long-term fate of CO<sub>2</sub> injected into an aquifer[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Amsterdam: Pergamon Press, 2003: 489—494.
- [13] LGH Van der Meer. Investigation regarding the storage of carbon dioxide in aquifers in the Netherlands[J]. **Energy Conversion and Management**, 1992, 33(5-8): 611—618.
- [14] HENDRIKS C, GRAUS W, van BERGEN F. Global carbon dioxide storage potential and costs[R]. Amsterdam: Ecofy, 2004: 24—26.
- [15] KOIDE H, TAZAKI Y, NOGUCHI S, et al. Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs[J]. **Energy Conversion and Management**, 1992, 33(5—8): 619—626.
- [16] LI X, OHSUMIA T, KOIDER H, et al. Near-future perspective of CO<sub>2</sub> aquifer storage in Japan: site selection and capacity[J]. **Energy**, 2005, 30(11—12): 2360—2369.
- [17] MO S, AKERVOLL I. Modeling long-term CO<sub>2</sub> storage in aquifer with a black-oil reservoir simulator[C]//Proceedings of SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference 2005: Enhancing Environmental Performance. New York: Curran Associates Inc., 2006.
- [18] KUMAR A, OZAH R, NOH M, et al. Reservoir simulation of CO<sub>2</sub> storage in deep saline aquifers[J]. **SPE Journal**, 2005, 10(3): 336—348.
- [19] METZ B, DAVIDSON O, de CONINCK H, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[M]. New York: Cambridge University Press, 2005: 398—402.