



计算 CO₂ 在油藏的埋存量时两个关键系数的确定

陈艳芳, 廖新维, 赵宏军, 赵晓亮

中国石油大学(北京)石油天然气工程学院, 北京 102249

摘要 在 CO₂ 理论埋存量计算过程中, 以溶解形式存在的 CO₂ 埋存量占总埋存量的很大部分, 计算这部分埋存量时最关键的 2 个参数是 CO₂ 在油、水中的溶解系数 C_{os} 和 C_{ws} 。研究了 CO₂ 埋存量计算公式中涉及的溶解系数确定方法。确定了溶解度的计算模型, 得到不同油藏条件下 CO₂ 在油和水中的溶解系数的值; 将其应用到埋存量计算公式中, 得到不同油藏条件下 CO₂ 的埋存量。评估了国内某油田 CO₂ 理论埋存潜力和有效埋存潜力, 并与基于类比法计算所得的结果进行比较, 表明本计算方法正确可靠。

关键词 CO₂ 埋存; 理论埋存量; 有效埋存量; 溶解系数; 埋存潜力

中图分类号 TE321

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)01-0098-04

Determination Two Key Dissolution Coefficients in Calculation of CO₂ Storage Capacity

CHEN Yanfang, LIAO Xinwei, ZHAO Hongjun, ZHAO Xiaoliang

Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract CO₂ sequestration in the reservoir is an important way to reduce the CO₂ emission. Many studies at home and abroad are concerned with the CO₂ storage capacity and its calculation has a practical significance for China's CO₂ emission reduction targets. The correction formula for CO₂ storage and the determination of the dissolution coefficients in the formula are analyzed in this paper. The capacity of CO₂ storage is mostly in the form of dissolved CO₂, which should be carefully considered, and the calculation of this part of the capacity of CO₂ storage is closely related to two parameters, that is, the dissolution coefficients C_{ws} and C_{os} . The solubility calculation models developed by Zhenhao Duan and Haitao Xue were improved to obtain the dissolution coefficient C_{ws} and C_{os} . Then, the dissolution coefficients were applied to a revised method of calculating the CO₂ storage capacity under different conditions of oil reservoirs. The determination of CO₂ dissolution coefficients C_{ws} and C_{os} leads to a more accurate calculation of the CO₂ storage capacity in oil reservoirs. Finally, the theoretical and effective CO₂ storage capacity in a domestic Oilfield are compared with the evaluation results obtained by the analogy. The result shows that the calculation method is reliable.

Keywords CO₂ storage; theoretical storage capacity; effective storage capacity; dissolution coefficient; storage potential

0 引言

CO₂ 减排是全球共同关心的问题, 而 CO₂ 在油藏中的埋存是减少 CO₂ 排放的有效途径之一。CO₂ 在油藏中的埋存量可分为理论埋存量、有效埋存量、实际埋存量、匹配埋存量 4 个等级^[1]。其中理论埋存量指地质系统所能接受的 CO₂ 埋存的物理极限量, 即 CO₂ 完全充填在储层孔隙空间中, 并以最大的饱和度溶解在地层流体中; 理论埋存量是 CO₂ 埋存评价的基础。美国能源部 (USDOE)、欧盟委员会 (European

Commission) 及碳埋存领导人论坛 (The Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF) 等组织的相关研究人员对 CO₂ 在已衰竭油藏的理论埋存潜力计算方法进行了深入研究。其中, CSLF 提出的计算方法更能表达理论埋存量的含义。沈平等^[2]对 CSLF 提出的埋存量计算方法进行了修正, 在修正公式中充分考虑了 CO₂ 溶解问题。修正公式中, CO₂ 的理论埋存量包含 3 部分, 即部分埋存在构造孔隙空间 (包含束缚孔隙空间) 中、部分溶解在水中、部分溶解在原油中。CO₂ 以溶解形式存在的

收稿日期: 2009-12-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2006CB705801); 2007 年度教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目

作者简介: 陈艳芳, 硕士研究生, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: guitar840418@yahoo.com.cn; 廖新维 (通信作者), 教授, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: xinwei@cup.edu.cn



埋存量比重较大,不可忽略,而计算这部分埋存量最关键的 2 个参数是溶解系数 C_{ws} 和 C_{os} 。Duan 等^[3]提出的 CO_2 溶解度理论预测模型预测精度高(预测值与实验值的相对误差 $<7\%$),适用范围大,是目前使用最广泛的 CO_2 在盐水中的溶解度模型。薛海涛等^[4]提出的 CO_2 在原油中的溶解度模型综合考虑了影响气体溶解的各种因素,经过多次检验,该模型的计算结果与实验结果具有很好的一致性,其应用范围较广。

本文对 CO_2 在盐水、原油中的溶解度系数计算模型进行改进,并将得出的溶解系数计算模型应用到 CO_2 在油藏中埋存量的理论计算公式中。

1 埋存量计算方法

CSLF 提出的计算方法^[1]基本假设条件为: CO_2 被注入到衰竭油藏中直到地层压力恢复到原始储层压力,即油气的采出所让出的空间都用于 CO_2 的埋存。具体计算公式为

$$M_{CO_2,t} = \rho_{CO_2,r} \cdot [R_f \cdot OOIP \cdot B_o - V_{iw} + V_{pw}] \quad (1)$$

或

$$M_{CO_2,t} = \rho_{CO_2,r} \cdot [R_f \cdot A \cdot h \cdot \phi \cdot (1 - S_{wi}) / 10^6 - V_{iw} + V_{pw}] \quad (2)$$

其中, $M_{CO_2,t}$ 为已衰竭油藏的理论埋存量, Mt; $\rho_{CO_2,r}$ 为 CO_2 在油藏条件下的密度, kg/m^3 ; $OOIP$ 为原油的原始地质储量, $10^9 m^3$; R_f 为原油的采收率, %; B_o 为原油体积系数, m^3/m^3 ; A 为油藏面积, km^2 ; h 为油藏厚度, m; ϕ 为油藏孔隙度, %; S_{wi} 为油藏束缚水饱和度, %; V_{iw} 为注入油藏的水量, $10^9 m^3$; V_{pw} 为从油藏产出水, $10^9 m^3$ 。

CSLF 提出的计算方法没有考虑 CO_2 在水和原油中的溶解问题,如果考虑到溶解圈闭机理,式(2)可改为^[2]

$$M_{CO_2,t} = \rho_{CO_2,r} \cdot [R_f \cdot A \cdot h \cdot \phi \cdot (1 - S_{wi}) / 10^6 - V_{iw} + V_{pw} + C_{ws} \cdot (A \cdot h \cdot \phi \cdot S_{wi} / 10^6 + V_{iw} - V_{pw}) + C_{os} \cdot (1 - R_f) \cdot A \cdot h \cdot \phi \cdot (1 - S_{wi}) / 10^6] \quad (3)$$

其中, C_{ws} 为 CO_2 在水中溶解系数, m^3/m^3 ; C_{os} 为 CO_2 在原油中溶解系数, m^3/m^3 。

式(3)中, CO_2 的理论埋存量包含 3 部分,即部分埋存在构造孔隙空间(包含束缚孔隙空间)中、部分溶解在水中、部分溶解在原油中。

用原油的原始地质储量 $OOIP$ 和原油采收率 E_R 表示,式(3)变为

$$M_t = \frac{\rho_{CO_2,r}}{10^9} \left\{ E_R \cdot OOIP_m \cdot B_o / \rho_{or} - V_{iw} + V_{pw} + C_{os} \cdot (1 - E_R) \cdot OOIP_m \cdot B_o / \rho_{or} + C_{ws} \cdot \left[\frac{OOIP_m \cdot B_o \cdot S_{wi}}{\rho_o \cdot (1 - S_{wi})} + V_{iw} - V_{pw} \right] \right\} \quad (4)$$

式中, M_t 为 CO_2 在油藏中的理论埋存量, Mt; ρ_{or} 为油藏条件下的原油密度, kg/m^3 ; $OOIP_m$ 为原油的原始地质储量, t。

一般地, $V_{iw} = V_{pw}$, 式(4)可变为

$$M_t = \frac{\rho_{CO_2,r}}{10^9} \cdot E_R \cdot \frac{OOIP \cdot B_o}{\rho_{or}} + \frac{\rho_{H_2O}}{10^9} \cdot C_{ws} \cdot \left[\frac{OOIP \cdot B_o \cdot S_{wi}}{\rho_{or} \cdot (1 - S_{wi})} \right] +$$

$$\frac{\rho_{CO_2,r}}{10^9} \cdot C_{os} \cdot (1 - E_R) \cdot \frac{OOIP \cdot B_o}{\rho_{or}} \quad (5)$$

由式(5)可进一步计算有效埋存量

$$M_e = M_t C_e \quad (6)$$

其中, C_e 为受各因素综合影响的有效埋存系数,通常取 $C_e = 0.25$ ^[5-9]。

式(5)中, C_{ws} 和 C_{os} 是 2 个非常重要的计算参数,目前尚未见到研究 CO_2 埋存量计算参数 C_{ws} 和 C_{os} 方面的报道。

2 C_{ws} 的确定

Duan 等^[3]提出的溶解度模型适用条件为:温度范围 273~533K,压力范围 0~200MPa,离子强度范围 0~4.3m,求解方法主要是以气液平衡方程 $\mu_{CO_2}^l = \mu_{CO_2}^v$ 为基础。经过化简和变形得到

$$\ln \frac{y_{CO_2} P}{m_{CO_2}} = \frac{\mu_{CO_2}^{(0)}}{RT} - \ln \varphi_{CO_2} + \sum_c 2\lambda_{CO_2-c} m_c + \sum_a 2\lambda_{CO_2-a} m_a + \sum_c \sum_a \xi_{CO_2-c-a} m_c m_a \quad (7)$$

式中, y_{CO_2} 可由下式求得:

$$\begin{cases} y_{CO_2} = (P - P_{H_2O}) / P \\ P_{H_2O} = \frac{P_c T}{T_c} [1 + c_1(-t)^{1.9} + c_2 t + c_3 t^2 + c_4 t^3 + c_5 t^4] \\ t = (T - T_c) / T_c \end{cases} \quad (8)$$

其中,取水的临界温度 $T_c = 647.29K$,水的临界压力 $P_c = 22.085 MPa$ 。式(8)中多项式的系数 c_i 分别取值为 $c_1 = -38.640844$, $c_2 = 5.8948420$, $c_3 = 59.876516$, $c_4 = 26.654627$, $c_5 = 10.637097$ 。

$\mu_{CO_2}^{(0)} / RT$ 为无因次标准化学势, λ_{CO_2-Na} 为二级交互系数, $\xi_{CO_2-Cl-Na}$ 为三级交互系数,这 3 个参数都是温度和压力的函数,函数关系式可表示为

$$Par(T, P) = c_1 + c_2 T + c_3 / T + c_4 T^2 + c_5 / (630 - T) + c_6 P + c_7 P \ln T + c_8 P / T + c_9 P / (630 - T) + c_{10} P^2 / (630 - T)^2 + c_{11} T \ln P \quad (9)$$

表 1 为 $\mu_{CO_2}^{(0)} / (RT)$, λ_{CO_2-Na} 和 $\xi_{CO_2-Cl-Na}$ 函数表达式中对应 T - P 系数 c_i 的取值。

$\ln \varphi_{CO_2}$ 可由下式求得:

$$\ln \varphi_{CO_2}(T, P) = Z - 1 - \ln Z + \frac{a_1 + a_2 / T_r^2 + a_3 / T_r^3}{V_r} + \frac{a_4 + a_5 / T_r^2 + a_6 / T_r^3}{2V_r^2} + \frac{a_7 + a_8 / T_r^2 + a_9 / T_r^3}{4V_r^4} + \frac{a_{10} + a_{11} / T_r^2 + a_{12} / T_r^3}{5V_r^5} + \frac{a_{13}}{2T_r^3 a_{15}} \cdot \left[a_{14} + 1 - \left(a_{14} + 1 + \frac{a_{15}}{V_r^2} \right) \cdot \exp \left(- \frac{a_{15}}{V_r^2} \right) \right] \quad (10)$$

其中, $P_r = P / P_c$; $T_r = T / T_c$; $Z = P_r V_r / T_r$; V_r 值由下式确定:

$$\frac{P_r V_r}{T_r} = 1 + \frac{a_1 + a_2 / T_r^2 + a_3 / T_r^3}{V_r} + \frac{a_4 + a_5 / T_r^2 + a_6 / T_r^3}{V_r^2} + \frac{a_7 + a_8 / T_r^2 + a_9 / T_r^3}{V_r^4} + \frac{a_{10} + a_{11} / T_r^2 + a_{12} / T_r^3}{V_r^5} + \frac{a_{13}}{T_r^3 V_r^2} \left(a_{14} + \frac{a_{15}}{V_r^2} \right) \exp \left(- \frac{a_{15}}{V_r^2} \right) \quad (11)$$

计算时,CO₂的临界温度 $T_c=304.29\text{K}$, 临界压力 $P_c=7.4662\text{MPa}$,式(9),式(10)中涉及的常数取值如下:

$$\begin{aligned} a_1 &= 8.99288497 \times 10^{-2} & a_2 &= -4.94783127 \times 10^{-1} \\ a_3 &= 4.77922245 \times 10^{-2} & a_4 &= 1.03808883 \times 10^{-2} \\ a_5 &= -2.82516861 \times 10^{-2} & a_6 &= 9.49887563 \times 10^{-2} \\ a_7 &= 5.20600880 \times 10^{-4} & a_8 &= -2.93540971 \times 10^{-4} \\ a_9 &= -1.77265112 \times 10^{-3} & a_{10} &= -2.51101973 \times 10^{-5} \\ a_{11} &= 8.93353441 \times 10^{-5} & a_{12} &= 7.88998563 \times 10^{-5} \\ a_{13} &= -1.66727022 \times 10^{-2} & a_{14} &= 1.3980000 \\ a_{15} &= 2.9600000 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

表 1 交互作用参数

Table 1 Interaction parameters

T - P 系数	$\mu_{\text{CO}_2}^{(0)}/(RT)$	$\lambda_{\text{CO}_2-\text{Na}}$	$\xi_{\text{CO}_2-\text{Cl}-\text{Na}}$
c_1	28.94477060000	-0.41137058500	0.00033638972
c_2	-0.03545817680	0.00060763201	-0.00001982990
c_3	-4770.67077000000	97.53477080000	0.00000000000
c_4	0.00001027828	0.00000000000	0.00000000000
c_5	33.81260980000	0.00000000000	0.00000000000
c_6	0.00904037140	0.00000000000	0.00000000000
c_7	-0.00114934031	0.00000000000	0.00000000000
c_8	-0.30740572600	-0.02376224690	0.00212220830
c_9	-0.09073014860	0.01706562360	-0.00524873303
c_{10}	0.00093271339	0.00000000000	0.00000000000
c_{11}	0.00000000000	0.00000000000	0.00000000000

该方法需要注意的是牛顿迭代时 V_r 初值的求取。图 1 为在地层压力取 22.0MPa,地层温度取 366.15K,地层水的矿化度取 10g/L 的条件下,Matlab 软件编程实现的 V_r 值的变化趋势。由图 1 中虚线可看出, V_r 的真值位于 0.2 附近,这里 V_r 初值取为 0.2 进行迭代求解,进而可由公式 $C_{\text{ws}}=0.044m_{\text{CO}_2}$ 求得该条件下 C_{ws} 的值为 0.04952。

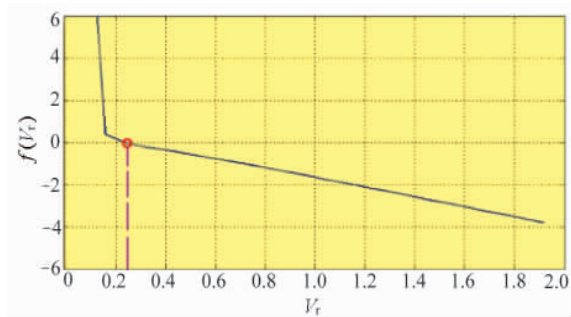


图 1 V_r 初值的确定

Fig. 1 Determination of the initial value V_r

由该溶解度模型所预测的结果是:CO₂在盐水中的溶解度随压力的增加而增加,随温度和盐度的增加 CO₂在水溶液中的溶解度减少,与实验室测量的溶解度变化趋势一致,结果相近,说明该模型有很好的适用性。

3 C_{os} 的确定

以薛海涛等^[4]提出的气体在地层原油中的溶解度模型为基础,推导溶解系数 C_{os} 。单组分 CO₂ 气体溶解度的理论模型为

$$C = \frac{KP}{1+\alpha KP} \cdot \frac{\rho_o x_T}{M_T} \cdot \frac{1}{B} \quad (12)$$

其中, ρ_o 、 x_T 和 M_T 为表征原油性质的参数;反应平衡系数 K 、二次作用系数 α 与温度有关。二次作用指气体分子与油中液态烃分子形成的加合物分子对气体还具有一定溶解能力,使油相的平衡浓度不因溶解气体而显著变小。

由于工业上常用地面油的溶解能力表示气体在地层原油中的溶解度,故有

$$C_o = \frac{KP}{1+\alpha KP} \cdot \frac{\rho_o x_T}{M_T} \quad (13)$$

其中, C_o 为单位体积地面原油在一定温度和压力下达到两相平衡时溶解气体的物质的量浓度, mol/cm³; ρ_o 为地面原油的标准密度, kg/m³; x_T 为原油中烃的重量分数,它是原油的常规分析数据,在试验中容易获得,在这里 $x_T=0.8534$; M_T 为原油中烃的平均分子量,烃的平均分子量可通过原油全烃气相色谱分析数据获得,这里 $M_T=215.36$; K 和 α 可由下式求得

$$\begin{cases} \ln K = \frac{773.24}{T} - 18.5898 \\ \alpha = 0.008286t - 0.7061 \end{cases} \quad (14)$$

在一定温度和压力下,达到两项平衡时单位体积地面原油溶解气体的体积 C_v 为

$$C_v = \frac{KP}{1+\alpha KP} \cdot \frac{\rho_o x_T}{M_T} \cdot \frac{44}{\rho_{\text{CO}_2}} \quad (15)$$

其中, ρ_{CO_2} 为 CO₂ 在地面条件下的标准密度, kg/m³。

CO₂ 在原油中的溶解系数 C_{os} 为

$$C_{\text{os}} = \frac{C_v \cdot \rho_{\text{CO}_2}}{\rho_o} = \frac{KP}{1+\alpha KP} \cdot \frac{44x_T}{M_T} \quad (16)$$

地层压力 $P=22.0\text{MPa}$,地层温度 $T=366.15\text{K}$ 点处,对实验值进行 Matlab 二维插值(interp2 函数)后的溶解度如图 2 所示。

由实验数据二维插值所得到的溶解度值与模型所得到的溶解度值相差不大,说明该溶解度计算模型的适用性较好。

4 实例分析

1) 中国适合 CO₂ 埋存的油藏概况。在中国某地区,共有 21 个油田区块可用于 CO₂ 碳的埋存,目前其原始地质储量 OOIP 为 1192.12Mt,最终原油采收率为 20.0%,平均地层压力为 22.0MPa,平均地层温度为 93℃(366.15K),CO₂ 和原油在油藏条件的密度分别为 750.0kg/m³ 和 865.0kg/m³;原油体积系数为 1.17,束缚水含水饱和度为 20.0%,采收率为 20.0%,有效埋存系数 C_e 通常取 0.25。

2) 理论埋存量和有效埋存量的计算。采用 C_{ws} 和 C_{os} 预测模型计算溶解系数,将计算的 $C_{\text{ws}}=0.04952$ 和 $C_{\text{os}}=0.24354$ 代入式(5),得到通过物质平衡法所计算的水驱后油藏中的 CO₂ 理论埋存量^[10-14]。计算得到以自由相存在的理论埋存量为 241.8694Mt,水溶解理论埋存量为 19.9618Mt;油溶解理论埋

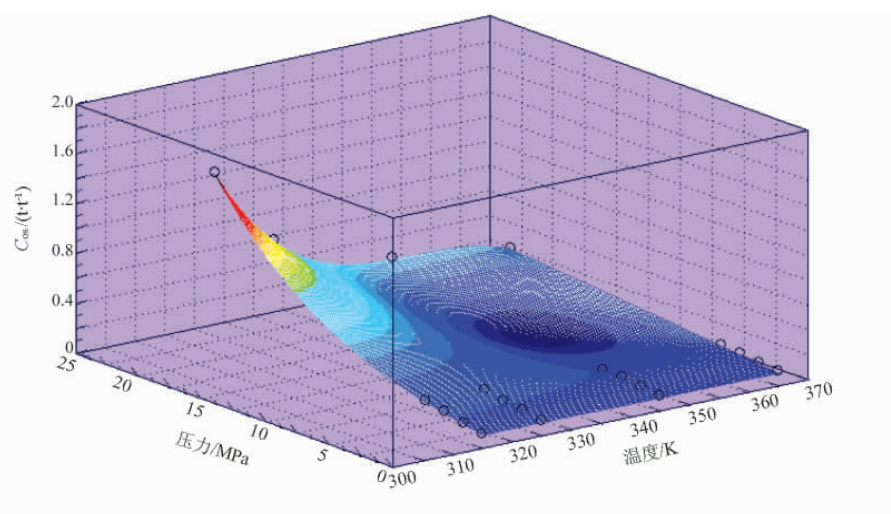


图2 进行 Matlab 二维插值后的溶解度

Fig. 2 Solubility of two-dimensional interpolation by Matlab

存量为 271.7479Mt,总 CO_2 理论埋存量为 533.5821Mt。同时计算水驱后油藏中的 CO_2 有效埋存量,计算所得到的有效埋存量 M_e 为 133.3955Mt。

而基于类比法^[2]计算得到的 CO_2 理论埋存量 M_t 为 520.203Mt,有效埋存量 M_e 在 24.3859~175.579Mt 之间。

通过对比两者的计算结果可知,改进后的理论埋存量计算方法和基于类比法的计算方法所得到的理论埋存量接近;计算所得到的有效埋存量介于基于类比法计算方法所得到的有效埋存量范围之间,两种计算方法结果较为一致。然而这只是 CO_2 在油藏中的埋存量估算值,更为精确的评价取决于其他一些参数的确定,例如 C_e 的确定,这需要针对具体油田的实际情况进行分析和参数确定^[15]。

5 结论

1) 考虑了溶解问题的 CO_2 理论埋存量计算公式, C_w 选用 Duan 等^[3]的预测模型, C_{os} 选用薛海涛等^[4]提出的计算模型。

2) 应用上述 2 个基本模型计算 CO_2 在油和水中的溶解系数,并将其代入理论埋存量计算公式中求得 CO_2 在油藏中的理论埋存量。所得结果与类比法计算方法所得到的结果相近,验证了该方法的可靠性、正确性。

3) 该方法可为国内油田 CO_2 埋存潜力评估提供理论参考。

参考文献 (References)

- [1] Bradshaw J, Bachu S, Bonijoly D, et al. A taskforce for review and development of standards with regards to storage capacity measurement [EB/OL]. http://www.cslforum.org/documents/TaskforceStorage_Capacity_Estimation_Version_2.pdf, 2005.
- [2] 沈平平, 廖新维, 刘庆杰. 二氧化碳在油藏中埋存量计算方法[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 216-220.
Shen Pingping, Liao Xinwei, Liu Qiuji. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(2): 216-220.
- [3] Duan Z H, Sun R. An improved model calculating CO_2 solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2000

bar[J]. *Chemical Geology*, 2003, 193: 257-271.

- [4] 薛海涛, 卢双舫, 付晓泰. 甲烷、二氧化碳和氮气在油相中溶解度的预测模型[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 58-63.
Xue Haitao, Lu Shuangfang, Fu Xiaotai. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(4): 58-63.
- [5] Bachu S, Shaw J. Evaluation of the CO_2 sequestration capacity in Alberta's oil and gas reservoirs at depletion and the effect of underlying aquifers[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2003, 42(9): 51-61.
- [6] Bachu S, Stewart S. Geological sequestration of anthropogenic carbon dioxide in the Western Canada sedimentary basin: Suitability analysis[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2002, 41(2): 32-40.
- [7] Bradshaw J, Bachu S, Bonijoly D, et al. Estimation of CO_2 storage capacity in geological media[DB/OL]. <http://www.cslforum.org/documents/PhaseIIReportStorageCapacityMeasurementTaskForce.pdf>, 2007.
- [8] Bradshaw J, Bachu S, Bonijoly D, et al. Comparison between methodologies recommended for estimation of CO_2 storage capacity in geological media [DB/OL]. <http://www.cslforum.org/documents/PhaseIIIReportStorageCapacityEstimationTaskForce0408.pdf>, 2008.
- [9] Stevens S H, Kuuskraa V A, Taber J J. Sequestration of CO_2 in depleted oil and gas fields: Barriers to overcome in implementation of CO_2 capture and storage (disused oil and gas fields)[R]. Washington DC: International Energy Agency, 1999.
- [10] Kovseck A R. Screening criteria for CO_2 storage in oil reservoirs[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2003, 20(7-8): 841-866.
- [11] Winter E M, Dergman P D. Availability of depleted oil and gas reservoirs for disposal of carbon dioxide in the United States [J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 34(6): 1177-1187.
- [12] Bachu S, Shaw J, Robert M. Estimation of oil recovery and CO_2 storage capacity in CO_2 -EOR incorporating the effect of underlying aquifers[C] //SPE /DOE Symposium on Improved Oil Recovery. Tulsa: Society of Petroleum Engineers, 2004: 89340-MS.
- [13] Bond L P L. Applications of carbon dioxide in enhanced oil recovery[J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 33(2): 579-586.
- [14] Paul G W, Lake L W, Gould T L. A simplified predictive model for CO_2 miscible flooding [C]//SPE/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Tulsa: Society of Petroleum Engineers, 1984: 13238-MS.
- [15] Hendriks C, Graus W, Bergen F. Global carbon dioxide storage potential and costs[M]. Utrecht: Ecofys, 2004.

(责任编辑 刘志远)