

赵天沛, 于春野, 刘方圆, 等. 海域咸水层二氧化碳地质封存效率因子研究——以东海西湖凹陷碎屑岩储层为例[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(3): 25-34.

ZHAO Tianpei, YU Chunye, LIU Fangyuan, et al. Research on efficiency of CO₂ geological storage in saline aquifers in clastic rock reservoirs in Xihu Sag, East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(3): 25-34.

海域咸水层二氧化碳地质封存效率因子研究

——以东海西湖凹陷碎屑岩储层为例

赵天沛, 于春野*, 刘方圆, 李久娣, 严曙梅

(中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司, 上海 200120)

摘要: 中国海域咸水层二氧化碳地质封存潜力巨大。但目前已有的效率因子取值差异大, 使得有效封存量难以落实。为进一步提高有效封存量估算的准确性及区域适用性, 本文通过系统梳理影响效率因子的关键因素, 对比优选出普遍适用的效率因子计算方法。综合运用地震、钻井、测井及岩芯分析数据, 采用统计学方法进行参数优化, 以此提高计算的精度及准确性, 并基于不同数据基础给出一套效率因子筛选计算流程。以东海西湖凹陷碎屑岩咸水层为例, 分析结果表明, 东海西湖凹陷中新统玉泉组及龙井组咸水层为碎屑岩沉积, 砂体厚度大且发育多套储盖组合。其中, 三角洲平原心滩优势沉积微相对二氧化碳地质封存最为有利, 玉泉组效率因子为 6.9%, 相较于龙井组高 2.9%。应用效率因子估算东海西湖凹陷玉泉组和龙井组咸水层有效封存量为 8.2 亿 t, 西部斜坡带玉泉组封存潜力最大, 为东海西湖凹陷二氧化碳地质封存首选封存场址, 可作为二氧化碳地质封存先行试验区。

关键词: 海域二氧化碳封存; 咸水层; 效率因子; 有效封存量; 封存场址优选

中图分类号: P744.4, P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2025.024

0 引言

国际社会普遍认为, 人类活动排放的二氧化碳是导致全球气候变化的主要原因^[1]。近年来, 中国积极投身全球气候治理, 提出“2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和”的目标^[2-3]。二氧化碳捕集利用及封存技术(CCUS)为实现“双碳”目标的有效途径, 其中, 二氧化碳地质封存是实现二氧化碳减排的有效手段。地质封存通常是指将捕集到的二氧化碳注入到深层地质构造中, 从而实现与大气

层的永久隔离^[4]。目前, 适宜地质封存的介质类型较多, 咸水层封存潜力最大^[5]。相较于陆域, 海域咸水层具有封存潜力大、安全性高、环境影响小、封存周期长等优点^[6]。在进行海域咸水层地质封存选址时, 咸水层封存潜力的准确估算至关重要, 在估算封存潜力时, 效率因子取值精度将直接影响估算结果。目前, 已公开发表的效率因子研究方法中, 效率因子取值差异较大, 估算得到的封存潜力相差几十倍甚至上百倍, 这对工程实施带来巨大挑战^[7]。为了相对准确估算有效封存量, 本文通过系统梳理二氧化碳地质封存关键影响因素, 优选出普遍适用的效率因子计算方法, 通过对计算参数取值优化, 提高效率因子的精度, 并基于不同数据基础给出一套效率因子筛选计算流程。

本文以东海西湖凹陷碎屑岩咸水层为例, 因其具有封存潜力大、断层发育程度低、储盖组合有利的特点, 为东海二氧化碳地质封存有利远景区之一。但目前对咸水层二氧化碳地质封存规模不够明确,

收稿日期: 2025-01-22

资助项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目“东海西湖凹陷 CO₂ 地质封存技术研究”(P22175)

第一作者: 赵天沛(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气开发地质、石油工程、地球物理方面的研究工作。E-mail: zhaotp.shhy@sinopec.com

* 通讯作者: 于春野(1996—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海域油气开发地质方面的研究工作。E-mail: yuchunye.shhy@sinopec.com

无有效封存量估算方法。通过本研究明确东海西湖凹陷碎屑岩咸水层不同优势沉积微相的封存效率因子,并对东海西湖凹陷咸水层二氧化碳有效封存潜力进行评价,最终优选东海西湖凹陷碎屑岩咸水层二氧化碳地质封存先行试验区。

1 二氧化碳封存效率因子计算方法研究

目前,效率因子的研究方法有数理统计分析、数值模拟、解析公式法等,不同研究方法效率因子的取值变化范围为 1%~18%^[8]。相关二氧化碳地质封存研究机构及个人基于对封存效率因子的不同认识总结归纳为 5 类具有代表性的研究方法,分别为美国能源部(USDOE)、碳封存领导人论坛(CSLF)、美国地质调查局(USGS)、国际能源署(IEA)以及相关领域学者研究方法。本次研究通过系统梳理效率因子的关键影响要素,并在此基础上对比分析各研究方法的异同点,优选出具有综合性及普遍适用性的效率因子研究方法。

1.1 二氧化碳地质封存效率因子影响因素

二氧化碳地质封存效率因子定义为储层中可封存的二氧化碳的有效体积与总孔隙体积的比值^[8]。影响地质封存的关键因素主要有目标区封存规模、边界类型、地质条件、流体因素及渗流特征等。

(1)封存规模 目前依据评价精度由低至高将地质封存潜力划分为区域级(E)、盆地级(D)、目标区级(C)、场地级(B)、灌注级(A)5 个评价尺度^[9](图 1a)。对于目标区级及以上评价尺度(C—E),由于评价规模大,地质条件为效率因子主要影响因素,该阶段主要以初步明确研究区的二氧化碳有效封存体积为主要目标。对于场地级评价尺度(B),除考虑地质条件外,需要进一步考虑流体因素及渗流特征对二氧化碳地质封存的共同影响,该阶段主要以明确各影响因素的综合影响为主要目标。为了进一步提高计算的准确性,往往需要借助数值模拟或其他手段研究得出。不考虑工程因素的影响,该评价尺度下的有效封存潜力基本等同于灌注级(A)地质封存潜力。

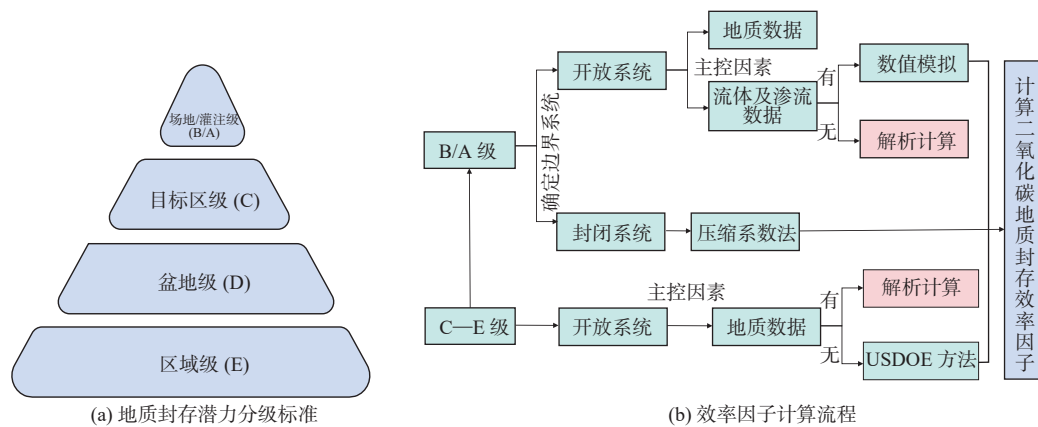


图 1 二氧化碳地质封存效率因子评价规模分类标准及计算流程

Fig.1 Classification criteria and calculation process for evaluating the efficiency of CO₂ geological storage

(2)边界系统 边界系统可分为开放系统和封闭系统^[10]。目前,效率因子研究主要以开放边界系统为主,对于开放系统,由于咸水层面积大,在二氧化碳注入过程中,压力向外扩散,会对二氧化碳地质封存效率产生直接影响^[11]。对于封闭系统,效率因子与临界压力和最小应力相关,相比于开放系统,其压力无法向外扩散,会极大降低封存效率。当注入压力达到最小应力时,会在最小应力垂直平面上产生裂缝,进而影响二氧化碳封存效率。ZHOU 等^[12]基于流体及岩石的压缩性,计算封闭系统的效率因子为 0.08%~0.75%,同时,综合分析

认为,压力每增加 1 MPa,效率因子增加 0.1%,封闭系统的效率因子远远低于开放系统。

(3)地质条件 沉积环境决定了储层的岩性、面积、厚度和非均质性等因素。针对沉积环境的影响,GORECKI 等^[13-14]基于数理统计和蒙特卡洛数值模拟研究表明,效率因子因沉积环境和岩性而异,其中,碎屑岩储层最高,石灰岩储层最低。OKWEN 等^[15-16]通过类比分析方法研究沉积环境对效率因子的影响,结果表明,河流三角洲碎屑岩储层的效率因子最高。

(4)流体因素 咸水层温度、压力和盐度等性质

的变化会影响二氧化碳与地层水的密度和黏度,进而影响二氧化碳的流动性及所受的浮力,对二氧化碳封存效率产生影响^[8]。SPAN 等^[17]研究表明,流体黏度和密度的增加,会导致二氧化碳在羽流过程中发生横向迁移,进而提高二氧化碳封存效率。BRENNAN 等^[18]分析了盐度对封存效率的影响,盐度的影响主要表现在 2 个方面,一方面是地层水的密度随盐度的增加而增加,另一方面是盐度会降低二氧化碳在地层水中的溶解度,从而影响二氧化碳地质封存效率。

(5)相渗特征 主要表现为束缚水饱和度和流体相渗关系对效率因子的影响。在二氧化碳注入

阶段,束缚水饱和度与相渗相关,OKWEN 等^[16]基于实验方法研究表明,效率因子随二氧化碳相对渗透率的增加而降低。KOPP 等^[19]通过数值模拟的方法,计算得到不同相渗关系下效率因子取值为 5%~18%。

1.2 二氧化碳效率因子研究方法比选

基于效率因子影响因素,本研究分别从评价方法、地质条件、封存机理、主控因素、边界系统及适用规模等方面对各研究方法进行比选,明确各研究方法产生差异的主要原因并确定其适用性,如表 1 所示。

表 1 不同封存效率因子研究方法对比

Table 1 Comparison of research methods for different storage efficiency

计算方法	封存机理	效率因子	主控因素	效率因子取值/%	评价方法	边界类型	适用规模
USDOE	2007 构造、束缚、 2010 溶解、矿化封存	$E = E_A \times E_h \times E_\phi \times E_V \times E_d$	无	1~4	体积法	开放边界	目标区级
			岩性	1.2~4.1			
CSLF	2007 束缚、溶解封存	C_c	相渗特征	基于数值模拟	体积法	开放系统	目标区级
USGS	2010 构造、束缚封存	B_{SE} 、 Ri_{SE}	封存机理	构造机理 10~60 束缚机理 1~15	体积法	开放系统	目标区级
	2013		渗透率	1.4~22.0			
IEA	2009 构造、束缚、 溶解、矿化封存	$E_E = E_{geol} \times E_V \times E_d$	沉积环境、岩性	1.9~3.3	体积法	开放系统	场地级
ZHOU 等	2008 岩石及流体压缩性	$E_E = (\beta_P + \beta_w) \times \Delta P$	压缩性、压力	0.08~0.75	压缩系数法	封闭系统	场地级
沈平等	2009 束缚、溶解封存	C_{er} 、 C_{ed}	封存机理	—	封存机理表征法	开放系统	盆地级

注:本表中适用规模分类采用国内分类标准;USDOE 引用文献[8, 20, 26],CSLF 引用文献[8, 25],USGS 引用文献[8, 22, 26],IEA 引用文献[8, 25, 26],ZHOU 等引用文献[8, 12],沈平等引用文献[24]。

(1)评价方法 目前主要有体积法、压缩系数法和封存机理表征法。其中,体积法为主流评价方法,美国能源部(USDOE)、碳封存领导人论坛(CSLF)、美国地质调查局(USGS)、国际能源署(IEA)均是采用体积法评价效率因子^[20-23]。压缩系数法更适用于封闭系统,ZHOU 等^[12]采用该方法评价效率因子。对于封存机理表征法主要以沈平等^[24]为代表,效率因子基于不同封存机理给定。

(2)地质条件 差异性主要体现在圈闭对二氧化碳地质封存的影响。圈闭是形成油气藏的必要条件之一,但在二氧化碳地质封存领域,以 USDOE 为代表的研究方法认为对于盖层封闭性良好的封存箱体,二氧化碳地质封存不受圈闭的影响,而 CSLF 和 USGS 更侧重于圈闭对二氧化碳的封存^[25]。

(3)封存机理 开放系统咸水层二氧化碳地质封存机理主要为构造、束缚、溶解和矿化封存 4 种。其中,将 4 种封存机理全部考虑在内的主要为 USDOE 方法^[26]。在二氧化碳注入初期,二氧化碳主

要以物理封存过程为主,封存机理为构造和束缚封存,USGS 方法^[23]则主要考虑物理封存过程。在长时间尺度下,二氧化碳地质封存主要以束缚和溶解封存为主,CSLF 以及沈平等^[24-25]的研究方法则考虑长时间尺度下二氧化碳封存。封闭系统区别于开放系统,主要封存机理为岩石和流体的压缩性。

(4)主控因素 影响效率因子的主控因素主要为岩性、物性、相渗特征以及封存机理 4 个方面。以岩性为主控因素,主要为 USDOE(2010 年)和 IEA 方法,分别针对不同岩性(碎屑岩、白云岩、灰岩)计算效率因子^[26]。CSLF 方法^[25]认为相渗特征为影响效率因子的主控因素,但目前针对咸水层并未给出效率因子取值。USGS(2010 年)和沈平等^[23-24]的方法针对不同封存机理分别计算效率因子。USGS(2013 年)对原计算方法予以改进,给出不同物性条件的效率因子取值^[23]。

(5)边界系统 除 ZHOU 等^[12]的研究方法适用

于封闭系统,其余方法均是针对开放边界系统计算效率因子。

(6)适用规模 主要以目标区及以上评价规模为主。除 IEA 和 ZHOU 等的方法适用于特定场地级,其余方法均适用于目标区级及以上评价规模^[25]。目前,尚未有适用于灌注级封存规模的计算方法。

综合分析各研究方法的适用性与局限性,USDOE 给定的效率因子计算方法综合考虑因素最为全面。该方法具有使用范围广、流程简单、适用性强的优势,能够满足不同评价尺度、地质条件下的有效封存潜力评估需求。

1.3 二氧化碳封存效率因子取值方法研究

综合对比,C—E 级效率因子以地质条件为主要影响因素,在评价该尺度封存潜力时,建议采用 USDOE 的方法进行计算,其封存效率因子 E 的计算公式为^[26]:

$$E = E_A \times E_h \times E_\phi \times E_V \times E_d \quad (1)$$

式中: E_A 为目标区适合二氧化碳封存的面积占比,无量纲;

E_h 为目标区适合二氧化碳封存有效厚度的占比,无量纲;

E_ϕ 为总孔隙度中有效孔隙度占比,无量纲;

E_V 为宏观驱替效率,无量纲;

E_d 为微观驱替效率,无量纲。

E_A 的取值受沉积环境的影响,不同目标区的 E_A 取值差异极大; E_h 的取值则受目标区储层有效厚度的影响; E_ϕ 受储层物性的影响; E_V 受储层非均质性、有效厚度、流体性质等宏观因素的综合影响; E_d 的值主要受相渗特征的影响。

对于地质参数,USDOE 及 IEA 分别基于不同数据库给出各参数的近似取值(表 2)。该近似值代表了不同岩性和沉积体系的取值,最大值和最小值分别代表每个参数的合理高值和低值。

表 2 USDOE 和 IEA 地质参数取值

Table 2 Geological parameter value of USDOE and IEA

地质参数	USDOE	IEA
$E_{An/At}$	0.2~0.8	—
$E_{hn/hg}$	0.2~0.75	0.21~0.76
$E_{\phi e/\phi_{tot}}$	0.6~0.95	0.64~0.77

注:表格数据引用文献[8]。

对于地质参数的取值,上述取值虽可以代表全球不同岩性及沉积环境的近似值,但由于取值区间

范围大,应用过程中仍存在不确定性。在目标区实际资料有限的情况下,可通过进一步优化参数取值,降低不确定性。因此,本次研究基于已优选出的计算方法,综合运用地震、钻井、测井及岩芯分析数据,采用统计学计算方法进行参数优化,以此提高效率因子计算准确性及区域适用性。

对于 E_A 的取值,主要基于研究区地震资料,通过地震属性区分优势储层确定该参数取值;对于 E_h 的取值,主要通过目标区已钻井数据,采用统计学加权平均计算方法进行计算(公式 2);对于地质参数 E_ϕ 取值方法与 E_h 相同,基于测井解释数据加权平均计算得到。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中: E 为最终参数取值;

n 为目标区井总数;

E_i 为第 i 口井的参数取值;

h_i 为第 i 口井的储层厚度。

目前,驱替效率取值主要通过数值模拟给出,无法通过计算直接得到。USDOE(2010 年)通过对数概率分布蒙特卡洛抽样方法,基于正态分布函数优化取值,给出不同岩性在不同置信区间(P_{10} 、 P_{50} 、 P_{90})下的驱替效率项的值(表 3),可用于 C—E 级评价规模效率因子驱替效率项取值。

表 3 不同岩相驱替效率取值表

Table 3 The values of displacement efficiency in different lithofacies

	置信区间/%	碎屑岩	白云岩	灰岩
$E_{v \rightarrow d} = E_V \times E_d$	P_{10}	7.4	16	10
	P_{50}	14	21	15
	P_{90}	24	26	21
$E(\text{USDOE})$	P_{10}	0.51	0.64	0.4
	P_{50}	2	2.2	1.5
	P_{90}	5.4	5.5	4.1

注:表格数据引用文献[8]。

基于上述研究基础,本次研究根据不同数据基础给出一套效率因子筛选计算流程,如图 1b 所示。若为封闭系统,建议直接采用压缩系数法计算效率因子。若为开放系统,对于 C—E 级封存规模,在已知地质数据的基础上,建议采用解析计算方法对效率因子进行计算;若地质数据未知,则可根据目标区岩性选择效率因子取值(表 3);对于 B/A 级封存

规模, 在已知实际地质数据、流体数据和渗流数据的情况下, 建议采用数值模拟法进行精细取值研究, 在流体数据和渗流数据未知的情况下, 建议采用解析公式法对效率因子进行计算。

2 区域地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部, 整体呈 NNE 向展布, 构造位置位于东海陆架盆地东部的浙东坳陷。西湖凹陷在断陷及挤压反转的作用下, 平面上表现为“东西分带”的特点, 自西向东划分为西部斜坡带、三潭深凹、中央背斜带及东部断阶带 4 个构造单元^[27](图 2a)。

2.1 咸水层特征

西湖凹陷咸水层主要位于中新统的玉泉组和龙井组。根据矿化度划分, 咸水的矿化度为 3~10 g/L, 盐水的矿化度为 10~50 g/L。西湖凹陷玉泉组和龙井组均已达到咸水级别以上, 其中, 玉泉组水型为高矿化度氯化钙型水, 矿化度大于 19 g/L, 达到盐水级别; 龙井组为重碳酸钠水型, 矿化度大于 6 g/L。玉泉组和龙井组咸水层具有矿化度高、水型好的优势^[28-29]。

2.2 沉积背景

古新世时期, 在海侵的作用下, 东海陆架盆地形成“南海北陆”沉积格局。进入始新世时期, 由于海水向北侵入, 北部西湖凹陷表现为三角洲-潮坪的海陆过渡相沉积环境, 其物源主要来自西侧海礁凸起、渔山凸起及东侧的钓鱼岛隆褶带。在渐新世沉积时期, 西湖凹陷地层呈不整合接触, 主要由湖泊、河流、湖泊三角洲沉积体系组成。在中新世时期, 西湖凹陷玉泉组和龙井组主要以河流-湖泊的陆相沉积环境为主, 其中三角洲沉积体系主要发育于西部斜坡带(图 3)^[28]。

2.3 储盖组合特征

东海西湖凹陷咸水层为碎屑岩储层, 埋深为 1 000~3 000 m。受沉积体系的影响, 中新统发育多套储盖组合(图 2b), 且砂体展布范围大。玉泉组储层厚度为 50~500 m, 盖层厚度为 50~500 m; 龙井组储层厚度为 50~320 m, 盖层厚度为 10~120 m。玉泉组整体储层物性要优于龙井组(图 4)。咸水层

主要为中高孔中高渗储层, 储层孔隙度>15%, 渗透率> $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 玉泉组上覆地层厚度>1 500 m, 盖层泥岩厚度>50 m, 且盖层分布稳定, 可形成良好的二氧化碳封存箱体。综上所述, 西湖凹陷咸水层具有埋深浅、封存条件优越、封存潜力大等优点, 可以作为二氧化碳地质封存优势区。

3 碎屑岩咸水层封存效率因子研究

东海西湖凹陷评价规模为目标区级(C), 该评价尺度下, 效率因子的主要影响因素为地质条件, 且主要受沉积环境的影响。因此, 本次研究通过识别西湖凹陷优势沉积微相, 形成一套适用于不同层系下咸水层优势沉积微相的封存效率因子取值表。

中新统玉泉组和龙井组沉积亚相主要为三角洲平原、三角洲前缘及前三角洲沉积体系。其中, 三角洲平原优势沉积微相为心滩沉积, 三角洲前缘优势沉积微相为边滩沉积, 前三角洲优势沉积微相为远砂坝沉积。

基于上文所给出的参数优化方法, 对东海西湖凹陷不同优势沉积微相地质参数进行计算。对于驱替效率相的取值, 由于无已知数据, 选定碎屑岩储层 P_{50} 的值作为本研究取值。应用公式(1)分别计算玉泉组和龙井组不同层系优势沉积微相的封存效率因子, 计算结果如表 4 所示。

计算结果表明, 东海西湖凹陷咸水层三角洲平原心滩优势沉积微相对二氧化碳地质封存最为有利, 其次为三角洲前缘边滩优势微相。从封存层系角度可知, 玉泉组优势沉积微相比龙井组更适宜二氧化碳地质封存, 玉泉组心滩微相封存效率因子为 6.9%, 相较于龙井组高 2.9%。在进行东海西湖凹陷二氧化碳地质封存时, 优先选择玉泉组三角洲平原心滩优势沉积微相进行二氧化碳地质封存。

4 二氧化碳封存潜力评价

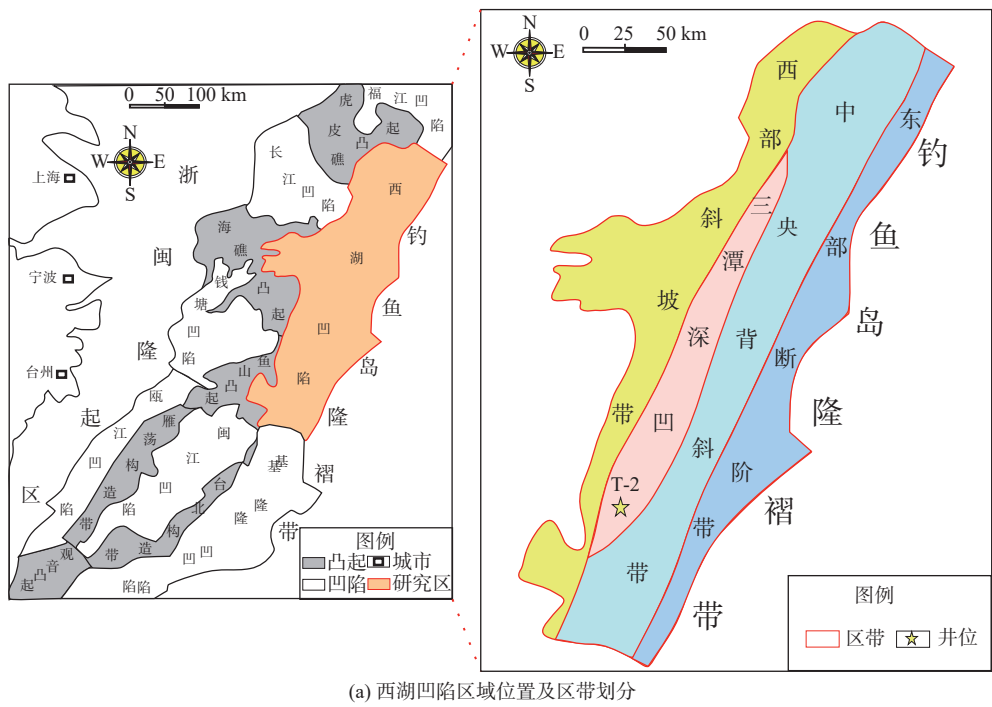
4.1 计算方法

本文计算东海西湖凹陷有效封存量采用体积法进行计算, 计算公式为:

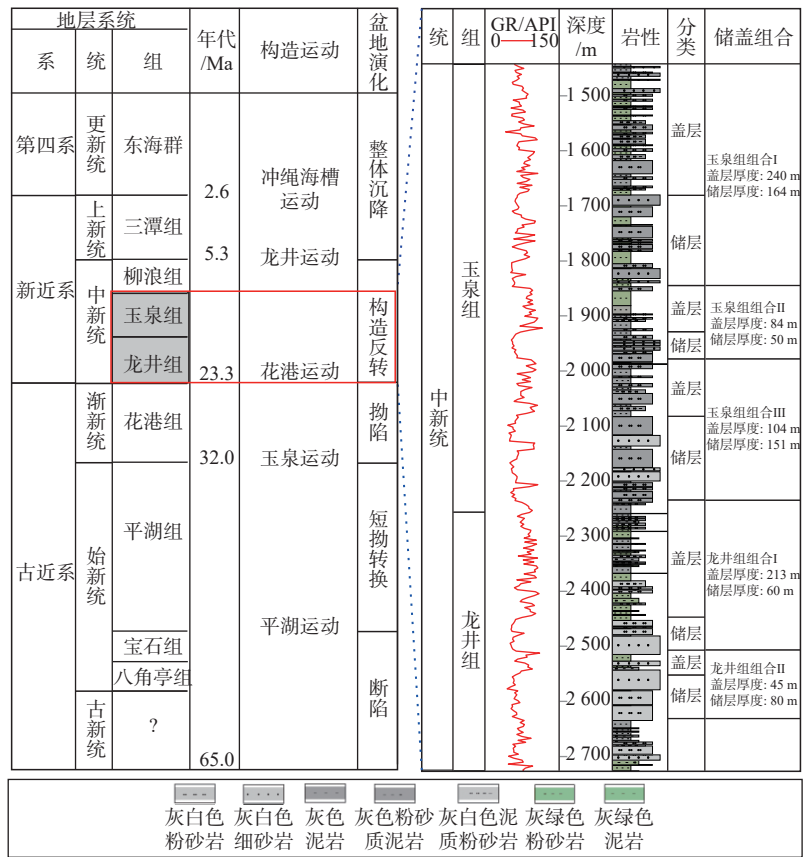
$$M_{\text{CO}_2} = A \times h \times \phi \times \rho_{\text{CO}_2} \times E \quad (3)$$

式中: M_{CO_2} 为二氧化碳有效封存量, t;

A 为研究区面积, m^2 ;



(a) 西湖凹陷区域位置及区带划分



(b) 构造演化及地层综合柱状图

据文献 [28] 修改

图 2 西湖凹陷区带划分及构造演化

Fig.2 Division of structural belts (a) and tectono-stratigraphic evolution (b) of the Xihu Sag

h 为储层厚度, m;

ϕ 为储层有效孔隙度, %;

ρ 为超临界二氧化碳在储层条件下的密度, t/m^3 ;

E 为封存效率因子, %。

对于海上油气田, 由于单井开发成本高、钻井数量少以及可用资料有限, 储层面积主要结合地震

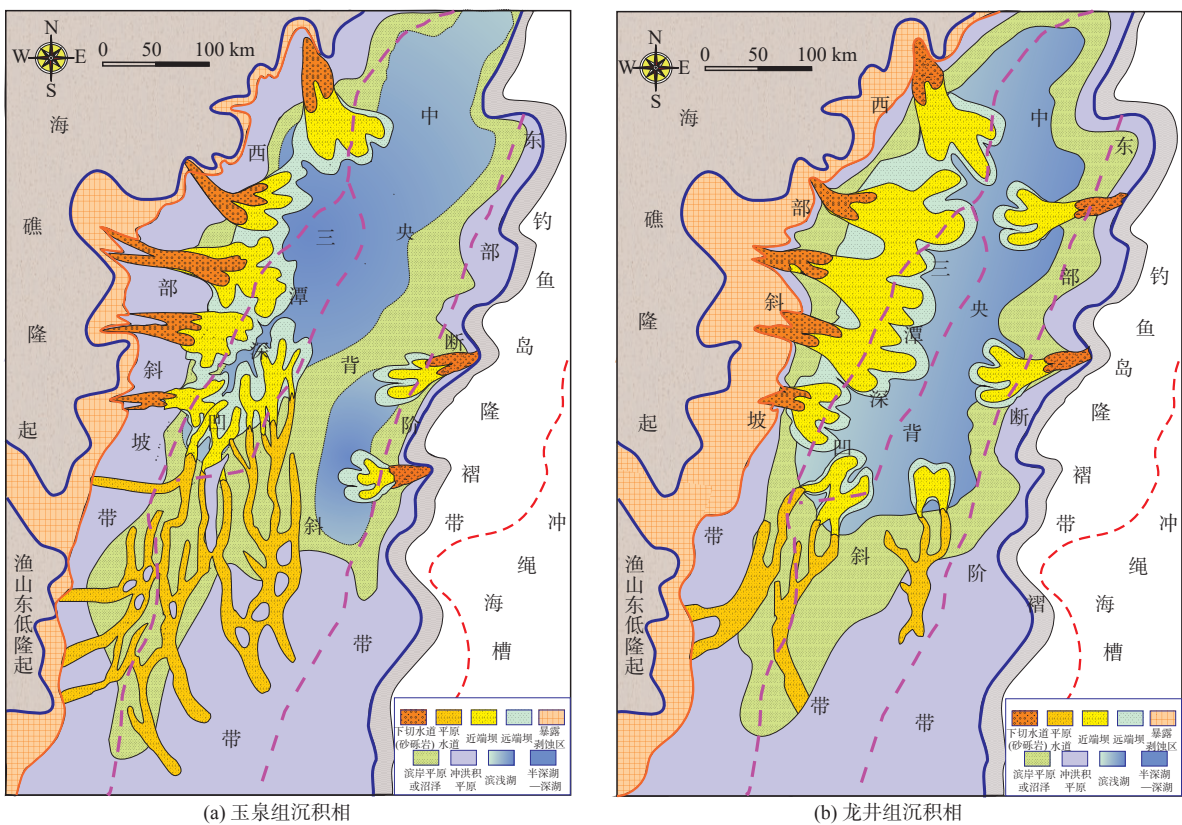


图 3 主要封存目标层沉积相

Fig.3 Sedimentary facies of the main sequestration target layer

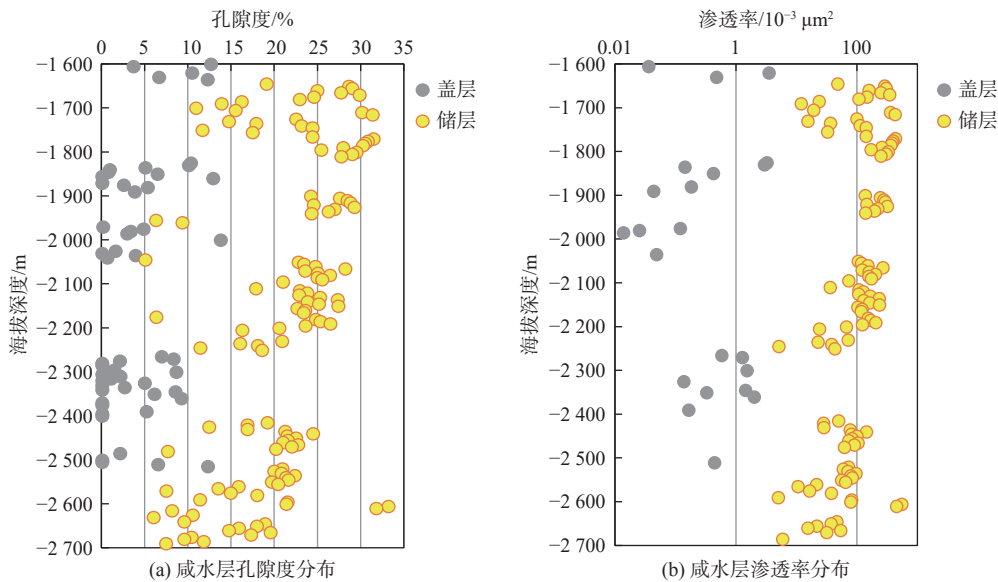


图 4 西湖凹陷咸水层储层物性特征

Fig.4 Main physical properties of reservoir in Xihu Sag

及沉积相带展布特征进行确定; 储层厚度以实钻井剖面为依据, 基于井震结合方法取平均值; 储层的孔隙度以实钻井测井解释数据为依据, 通过加权平均取值方法进行取值; 二氧化碳密度根据地层温度和压力利用插值法计算求取, 对于无井区域相关参数可通过与临井参数类比得到。

4.2 计算结果

东海西湖凹陷二氧化碳地质封存有效封存潜力评价(表 5)结果表明, 东海西湖凹陷玉泉组和龙井组咸水层优势沉积微相二氧化碳有效封存量为 8.2 亿 t, 其中, 西部斜坡带封存潜力最大, 西部斜坡

表 4 玉泉组和龙井组优势沉积微相二氧化碳封存效率因子

Table 4 Storage efficiency coefficients of dominant sedimentary microfacies in the Yuquan and Longjing formations

层系	沉积亚相	优势微相	E_A	E_h	E_ϕ	$E/\%$
玉泉组	三角洲平原	心滩	0.75	0.63	0.77	6.90
	三角洲前缘	边滩	0.68	0.56	0.69	3.71
	前三角洲	远砂坝	0.34	0.41	0.31	1.14
龙井组	三角洲平原	心滩	0.69	0.61	0.68	4.00
	三角洲前缘	边滩	0.62	0.47	0.57	2.33
	前三角洲	远砂坝	0.21	0.33	0.26	0.25

带玉泉组二氧化碳有效封存量为 3.5 亿 t, 占比为 42.7%。

表 5 西湖凹陷咸水层二氧化碳有效封存量及丰度计算结果

Table 5 Estimation on the effective capacity and sequestration abundance in saline aquifers of the Xihu Sag

评价单元	层系	优势微相面积/ km^2	有效封存量/ 10^6 t	有效封存丰度/ $(10^4 \text{ t}/\text{km}^2)$
西部斜坡带	玉泉组	8674	351.3	4.05
	龙井组	9936	116.6	1.17
三潭深凹	玉泉组	2485	44.2	1.78
	龙井组	1988	11.8	0.59
中央背斜带	玉泉组	6748	133.6	1.98
	龙井组	7461	48.4	0.65
东部断阶带	玉泉组	6322	83.4	1.32
	龙井组	5690	31.4	0.55

为进一步优选有利封存区, 本研究通过采用有效封存丰度即单位面积的有效封存量进行评价。在 4 个评价单元中, 西部斜坡带玉泉组二氧化碳有效封存丰度最高, 有效封存丰度可达 $4.05 \times 10^4 \text{ t}/\text{m}^2$, 相较龙井组高 $2.88 \times 10^4 \text{ t}/\text{m}^2$ 。同时, 西部斜坡带优势沉积微相主要以心滩沉积为主, 封存效率因子高。综合评价认为, 西部斜坡带玉泉组对二氧化碳地质封存最为有利, 可作为东海西湖凹陷二氧化碳地质封存先行试验区。

5 讨论

对于参数取值的不确定性, 主要体现在驱替效率项取值的不确定性。东海西湖凹陷玉泉组三角洲平原心滩优势沉积微相效率因子 P_{10} 的取值为 2.7%, P_{50} 的取值为 6.9%, P_{90} 的取值为 8.7%, 其中 P_{90} 的取值相较于 P_{10} 高 6.0%, 计算得到的封存量相差 3 倍。在本研究中, 效率因子的取值为置信区间 P_{50} 的取值, 与数值模拟吻合性较好, 该取值可代表东海西湖凹陷的效率因子。但对于不同区域、不同地质条件的研究区效率因子参数取值需跟据

实际情况进一步论证, 减少参数取值的不确定性。

相比于其他研究方法, 本研究中的二氧化碳效率因子计算方法的优势在于可操作性强, 在数据基础不足的情况下, 可提高有效封存潜力计算精度。但该方法也存在一定的不足之处, 主要体现在效率因子参数取值及封存潜力影响因素的不确定性。

二氧化碳封存潜力评价受诸多因素的影响, 本研究评价规模为目标区级(C), 地质因素是二氧化碳地质封存的主要影响因素。因此, 本研究主要考虑效率因子对于二氧化碳封存潜力的影响。但对于 B/A 级评价规模, 除地质因素外, 还需将工程因素(注入压力、注入速度、注入深度、井筒完整性等)的影响综合考虑其中, 以便于更全面地评估二氧化碳封存潜力。

6 结论

(1) 基于效率因子影响因素, 通过综合对比分析, 优选出普遍适用的效率因子计算方法。综合运用地震、钻井、测井及岩芯分析数据, 采用统计学方法对参数进行优化, 以此提高效率因子的准确性和区域适用性, 并基于不同数据基础给出一套效率因子筛选计算流程。

(2) 东海西湖凹陷咸水层为碎屑岩储层, 主要发育湖泊-三角洲沉积环境, 三角洲平原心滩优势微相相对二氧化碳地质封存最为有利, 效率因子最高。玉泉组和龙井组效率因子分别为 6.9% 和 4.0%, 相较于三角洲前缘边滩优势微相高 3.2% 和 1.8%。

(3) 基于优势沉积相带估算西湖凹陷玉泉组和龙井组咸水层优势沉积微相二氧化碳有效封存量为 8.2 亿 t, 西部斜坡带玉泉组有效封存丰度最高, 封存潜力最大, 可作为东海西湖凹陷二氧化碳地质封存先行试验区。

参考文献:

- [1] 潘佳佳, 李廉水. 中国工业二氧化碳排放的影响因素分析 [J].

- 环境科学与技术, 2011, 34(4): 86-92.
- PAN J J, LI L S. Analysis of factors affecting industrial carbon dioxide emission in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(4): 86-92.
- [2] 郭建强, 文冬光, 张森琦, 等. 中国二氧化碳地质储存适宜性评价与示范工程 [M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- GUO J. Q, WEN D G, ZHANG S Q, et al. Evaluation and demonstration project of carbon dioxide geological storage suitability in China[M]. Beijing: Geology Press, 2014.
- [3] 刘国伟. 中国等 57 国将在 2030 年实现碳达峰各国携手迈向碳中和 [J]. 环境与生活, 2021(1): 8-23.
- LIU G W. China and 57 other countries to reach peak carbon by 2030, countries join hands to move toward carbon neutrality[J]. *Green Living*, 2021(1): 8-23
- [4] 陈建文, 王嘹亮, 王平康, 等. 中国海域沉积盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 98-114.
- CHEN J W, WANG L L, WANG P K, et al. Carbon dioxide geological storage potential in saline aquifer of sedimentary basins in China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(3): 98-114.
- [5] 李光, 刘建军, 刘强, 等. 二氧化碳地质封存研究进展综述 [J]. 湖南生态科学学报, 2016, 3(4): 41-48.
- LI G, LIU J J, LIU Q, et al. Review on geological storage of carbon dioxide[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2016, 3(4): 41-48.
- [6] 陈建文, 孙晶, 杨长清, 等. 东海陆架盆地新生界咸水层二氧化碳封存地质条件及封存前景 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 14-21.
- CHEN J W, SUN J, YANG C Q, et al. Geological conditions and prospects of carbon dioxide storage in the Cenozoic saline water layers of the East China Sea Shelf Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(10): 14-21.
- [7] 李阳, 王锐, 赵清民, 等. 含油气盆地咸水层二氧化碳封存潜力评价方法 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 424-430.
- LI Y, WANG R, ZHAO Q M, et al. A CO₂ storage potential evaluation method for saline aquifers in a petroliferous basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(2): 424-430.
- [8] STEFAN B. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 188-202.
- [9] 张森琦, 郭建强, 刁玉杰, 等. 规模化深部咸水含水层 CO₂ 地质储存选址方法研究 [J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1640-1651.
- ZHANG S Q, GUO J Q, DIAO Y J, et al. Research on site selection methods for large-scale geological storage of CO₂ in deep saline aquifers[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1640-1651.
- [10] SMITH D J, NOY D J, HOLLOWAY S, et al. The impact of boundary conditions on CO₂ storage capacity estimation in aquifers[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 4828-4834.
- [11] CHANG K W, HESSE M A, NICOT J. Dissipation of overpressure into ambient mudrocks during geological carbon dioxide storage[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 4457-4464.
- [12] ZHOU Q, BIRKHOIZER J T, TSANG C F, et al. A method for quick assessment of CO₂ storage capacity in closed and semi-closed saline formations[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2(4): 626-639.
- [13] GORECK C D, SORENSEN J A, BREMER J M, et al. Development of storage coefficients for determining the effective CO₂ storage resource in deep saline formations[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 2009; SPE-126444-MS.
- [14] FRAILEY S M, FINLEY R J. Classification of CO₂ geologic storage: resource and capacity[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 2623-2630.
- [15] OKWEN R T, STEWART M T, CUNNINGHAM J A. Analytical solution for estimating storage efficiency of geologic sequestration of CO₂[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(1): 102-107.
- [16] OKWEN R T, YANG F, FRAILEY S. Effect of geologic depositional environment on CO₂ storage efficiency[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 5247-5257.
- [17] SPAN P, WAGNER W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa[J]. *Journal of Physical & Chemical Reference Data*, 1996, 25(6): 1509-1596.
- [18] BRENNAN S T. The U. S. Geological Survey carbon dioxide storage efficiency value methodology: results and observations[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 5123-5129.
- [19] KOPP A, CLASS H, HELMIG R. Investigations of CO₂ storage capacity in deep saline aquifers. Part 1. Dimensional analysis of flow processes and reservoir characteristics[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, 3(3): 263-276.
- [20] SUNDQUIST E T, ACKERMAN K V, BLISS N B, et al. Carbon sequestration atlas of the United States and Canada[R]. United States Geological Survey, 2012.
- [21] GOODMAN A, BROMHAL G, STRAZISAR B, et al. Comparison of methods for geologic storage of carbon dioxide in saline formations[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 18: 329-342.
- [22] United States Geological Survey Geologic Carbon Dioxide Storage Resources Assessment Team. National assessment of geologic carbon dioxide storage resources-results[R]. Reston: United States Geological Survey, 2013.
- [23] BLONDES M S, BRENNAN S T, MERRILL M D, et al. National assessment of geologic carbon dioxide storage resources: methodology implementation [R]. Reston: United States Geological Survey, 2013.
- [24] 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 P P, LIAO X W, LIU Q J. Methodology for estimation of CO₂ storage capacity in reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(2): 216-220.
- [25] GOODMAN A, BROMHAL G, STRAZISAR B, et al. Comparison of methods for geologic storage of carbon dioxide in saline

- formations[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 18, 329-342.
- [26] GOODMAN A, HAKALA A, BROMHAL G, et al. U. S. DOE methodology for the development of geologic storage potential for carbon dioxide at the national and regional scale[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(4): 952-965.
- [27] 薛煜恒, 李坤, 尚娅敏, 等. 东海盆地西湖凹陷孔雀亭区断裂体系特征及控藏效应 [J]. 岩性油气藏, 2025, 37(1): 161-169.
- XUE Y H, LI K, SHANG Y M, et al. Characteristics and reservoir control effects of the fault system in Kongqueing area of Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(1): 161-169.
- [28] 赵勇, 李久娣, 杨鹏程, 等. 东海陆架盆地咸水层 CO₂ 封存地质条件适宜性评价 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 129-139.
- ZHAO Y, LI J D, YANG P C, et al. Evaluation on of geological suitability for CO₂ storage in salty aquifers in the East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 129-139.
- [29] 胡必规, 张韫. 东海盆地油田水文地球化学特征与油气聚集关系探讨 [J]. 海洋地质动态, 1988, 5: 16-19.
- HU B G, ZHANG Y. Relationship between hydrologic geochemistry and hydrocarbon accumulation in the East China Sea Basin[J]. Marine Geology Letters, 1988, 5: 16-19.

Research on efficiency of CO₂ geological storage in saline aquifers in clastic rock reservoirs in Xihu Sag, East China Sea

ZHAO Tianpei, YU Chunye*, LIU Fangyuan, LI Jiudi, YAN Shumei

(Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: Potential for geological carbon dioxide storage in saline aquifers in Chinese maritime territories is substantial. However, considerable disparities in storage efficiency complicated the determination of the effective storage capacity. To enhance the accuracy and regional applicability of effective storage capacity estimation, we reviewed the key factors influencing efficiency coefficients and identified globally applicable methods for the calculation. By integrating seismic, drilling, logging, and core data, we employed statistical techniques for parameter optimization, with which both precision and accuracy of the calculations were improved. Additionally, we proposed a workflow from selecting and calculating efficiency coefficients based on various data sources. The saline water in clastic rocks in the Xihu sag, East China Sea was studied as the case. Results show that saline water in the Yuquan Formation and Longjing Formation are characterized by rich sand bodies with large thickness and multiple sets of reservoir-caprock. Among them, delta plain channel bar deposits are favorable microfacies for CO₂ sequestration. Specifically, the storage efficiency of the Yuquan Formation is 6.9%, which is 2.9% higher than that of the Longjing Formation. Based on the storage efficiency, we estimated that the effective storage capacity of the saline aquifers in the Yuquan and Longjing formations in the Xihu Sag is approximately 820 million tons. The Yuquan Formation in the western slope zone exhibits the highest storage potential and could be the optimal place for CO₂ sequestration in the Xihu Sag, and can be also considered a good candidate of a pilot area for CO₂ sequestration.

Key words: marine carbon dioxide storage; saline aquifer; storage efficiency; effective storage capacity; optimal storage site