



Numerical Simulation of the Impact of High-Velocity Ocean Currents on CO₂ Leakage in Shallow Saline Aquifers

Hao Weng, Dayong Wang*

Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China

Email address:

972858957@qq.com (Hao Weng), wangdy@dlut.edu.cn (Dayong Wang)

*Corresponding author

To cite this article:

Hao Weng, Dayong Wang. (2025). Numerical Simulation of the Impact of High-Velocity Ocean Currents on CO₂ Leakage in Shallow Saline Aquifers. *Science Discovery*, 13(1), 6-15. <https://doi.org/10.11648/j.sd.20251301.12>

Received: 22 February 2025; **Accepted:** 13 March 2025; **Published:** 21 March 2025

Abstract: Offshore CO₂ storage in shallow saline aquifers presents significant potential due to its operational feasibility and large storage capacity. However, the natural or anthropogenic damage to the caprock integrity may trigger submarine CO₂ leakage. High-velocity ocean currents accelerate the dissolution and dispersion of leaked CO₂ in seawater, while current understanding in this field remains limited. This study establishes a seawater-CO₂ dissolution-dispersion numerical model based on shallow marine environments, in order to quantify how high-velocity currents affect CO₂ dispersion paths and the trend of concentration variations. Simulations reveal that at typical leakage rates (17.0-60.0 kg/day), high-velocity currents (0.20-0.405 m/s) expand the horizontal spread of dissolved CO₂ at different water depths by up to 45 m within 2 minutes, approximately 9 times wider than low-velocity situations (0.05 m/s). Simultaneously, rapid dilution occurs: while the peak concentration of CO₂ bubbles in high-velocity currents exhibit 1.37 times higher than low-velocity scenarios, dissolved CO₂ concentration stabilizes at merely 24.80% of the latter. The results indicate that high-velocity currents complicate the monitoring efforts of CO₂ leakage. These findings provide critical insights for predicting impacts of CO₂ leakage and optimizing monitoring strategies in shallow marine CO₂ storage projects.

Keywords: CO₂ Leakage, CO₂ Storage, Numerical Simulation, Extreme Ocean Current Environment, Safety Analysis

高速洋流对浅海咸水层CO₂封存泄漏影响的数值模拟

翁昊, 王大勇*

大连理工大学能源与动力学院海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 大连, 中国

邮箱

972858957@qq.com (翁昊), wangdy@dlut.edu.cn (王大勇)

摘要: 浅海CO₂咸水层封存可操作性强且封存量, 具有良好的应用前景。但天然或人为导致的盖层完整性破坏会导致CO₂海底泄漏, 在浅海海底的高速洋流作用下加剧泄漏CO₂在海水中的溶解与扩散。目前, 对高速洋流的具体影响程度和范围缺少充分认识。本研究根据浅海环境特征建立浅海咸水层泄漏CO₂在海水中的溶解-扩散模型, 数值模拟了高速洋流对泄漏CO₂波及范围、浓度变化及泄漏量的影响程度。结果表明: 通常泄漏速率范围内(17.0~60.0 kg/天), 相比低速洋流(0.05 m/s), 高速洋流(0.20~0.405 m/s)可以显著加剧溶解CO₂在不同水深下扩散范围: 泄漏2分钟内, 溶解CO₂最远水平扩散距离约达45 m, 是低速洋流下近9倍。而溶解CO₂在高速洋流冲刷下急剧稀释, 加大了监测难度: 当溶解CO₂在海水中的浓度达到稳定时, 后者在海水中的CO₂气流浓度可达到前者1.37倍, 但海水中溶解CO₂的浓度是后者的24.80%。本研究为浅海CO₂咸水层封存泄漏波及范围与影响程度预测提供理论依据, 并为实地泄漏监测提供参考价值。

关键词: CO₂泄漏, CO₂封存, 数值模拟, 极端洋流环境, 安全性分析

1. 引言

海底咸水层分布广泛, 是实现二氧化碳 (CO₂) 大规模封存的理想场所[1-3]。其中, 浅海咸水层靠近工业区与居民生活区, CO₂运输成本更低, 且实施CO₂海底封存的可操作性更强, 已成为CO₂海底碳封存的重要目标[4-7]。咸水层的盖层完整性对CO₂封存安全至关重要, 地质结构的潜在缺陷 (未知裂隙), 海洋工程的遗留设备 (废弃井) 或者人为操作事故 (密封失误或储层压差过大导致盖层裂缝) 都会引发咸水层内CO₂经海底向浅海泄漏[8]。泄漏CO₂进入海水, 在浮力和海底洋流作用下运移, 形成高浓度CO₂气泡羽流。大部分CO₂运移至海面, 随后进入大气造成污染。剩余CO₂溶解到海水中并持续扩散, 最终造成海水酸化, 破坏海洋环境[9, 10]。由于浅海封存场地通常靠近工业区与居民生活区[4, 5], 泄漏导致的危害将会比深海水域更快更明显。

目前, 研究人员通过浅海现场CO₂泄漏实验, 对CO₂运移过程中的相关物理现象进行了分析总结: Sellami等人在苏格兰QICS项目中, 以0.05 m/s洋流速度, 观测了泄漏CO₂气泡运动规律以及不同泄漏速率 (2.0-31.2 kg/天) 下溶解CO₂浓度变化情况, 强调了气泡密度与泄漏口数量对溶解过程的影响[11, 12]; Maeda等人进一步测得不同水深度的平均洋流速度不大于0.10 m/s, 并结合海底地形模拟了pH值变化规律[13]。Totland等人在挪威Oslo峡湾实验中, 在0.10 m/s洋流环境下监测了泄漏CO₂溶解浓度随海水深度以及溶解氧浓度的变化规律[14]。Gros等人在意大利Bottaro火山口的天然CO₂浅海泄漏场地, 在0.05 m/s洋流速度下, 监测并模拟了溶解CO₂在不同海水深度的变化规律以及空间扩散特征[15]。Flohr等人在北海Goldeneye场地的人为泄漏实验场地测量了不同泄漏速率下 (1.7-68.6 kg/天) 泄漏CO₂羽流浓度变化情况, 环境洋流速度不大于0.25 m/s[16]。在这些研究中, 实验观测数据及计算结果主要针对低速洋流环境。然而, 浅海海底洋流的实际速度在短时间内可能快速升高: 涨退潮时期, 浅海流域受到近岸河流的冲刷, 洋流速度会急剧提高[2, 17], 以QICS项目所在的Ardmucknish海湾为例, 在9-12 m水深范围, 其最高洋流速度可达0.405 m/s[18]。高速洋流会显著影响CO₂与海水的两相流动特征, 改变CO₂溶解-扩散过程, 进而影响其对海洋环境的作用强度和范围。相比较于低速洋流泄漏实验, 高速洋流CO₂泄漏实验目前仍然十分受限。一方面, 根据国际上对海洋环境保护的要求[19], 近海海底CO₂泄漏实验只能在可控条件下开展; 另一方面, 当洋流速度提高时, 溶解CO₂扩散范围加剧但浓度稀释, 现场测量难度大幅提升, 且监测设备易遭受海底杂物干扰, 导致测量失准[20]。

泄漏CO₂气泡在上浮过程中破裂耦合并持续溶解扩散, 同时与水平洋流混合构成两相对流[21], 这个质量运移过程受洋流速度、泄漏速度, 与湍流的耦合影响, 物理特征复杂。作为实验研究的重要替代方法, 数值模拟也被应用于浅海CO₂泄漏研究: Pham等人基于QICS实验, 在0.03-0.07 m/s洋流速度下模拟计算了泄漏CO₂在60秒内的扩散范围和溶解浓度[22]。Dewar等人基于欧拉模型开发了海水-CO₂两相流动物理化学模拟器[12, 21], 计算了QICS项

目 (0.05 m/s洋流) 以及北海 (最大0.10 m/s洋流) 等实验场地溶解CO₂浓度、pH值的变化趋势以及气泡运动特征。尽管数值模拟不受实验研究条件与国际公约限制, 但对高速洋流条件下的数值模拟研究依然匮乏。目前亟需高速洋流下CO₂浅海海底泄漏溶解扩散演化规律以及危害范围的研究工作以深入科学理解。

本研究采用海水-CO₂两相流溶解-扩散模型, 结合浅海环境特征数值模拟了高速洋流条件下泄漏CO₂的时空演化规律, 评估对浅海海洋环境的影响程度, 为CO₂浅海咸水层封存泄漏的波及范围与实地泄漏预测提供一定理论依据与参考价值。

2. 海水-CO₂气泡两相流溶解传质模型

2.1. 控制方程

CO₂气泡羽流泄漏到海水中涉及到两相对流-传质过程以及气泡间耦合破裂的运动特征, 当泄漏速度显著高于洋流速度时, 还需考虑湍流和涡旋对CO₂溶解过程的影响。为了简化分析, 做了以下假设:

- (1) 海水与CO₂均为不可压缩流体, 基本物性参数为常数;
- (2) 海水中初始溶解CO₂浓度含量极低, 对CO₂溶解过程的影响可合理忽略[22];
- (3) 海水与CO₂气流温差对两相流动过程影响可忽略不计, 流动过程不考虑温度场与热传导[23];

本模型基于有限体积法软件Ansys Fluent进行搭建并求解计算, 质量守恒方程可以描述为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{v}_g) = \dot{m}_{lg} - \dot{m}_{gl} \quad (1)$$

下标 g 和 l 分别代表气相的CO₂与液相的海水; ρ 为流体密度, 单位kg/m³; $\bar{v}$ 为各流体速度; $\dot{m}_{lg}$ 为两相流体间传质的质量项; α 为体积分数, 并满足如下情况:

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (2)$$

动量方程采用Eulerian-Eulerian多相流模型, 分别计算CO₂气流与海水连续相的Navier-Stokes方程, 以气相为例, 其公式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \bar{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{v}_g \bar{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \bar{g} + \bar{R}_{lg} + \dot{m}_{lg} \bar{v}_{lg} - \dot{m}_{gl} \bar{v}_{gl} + \bar{F}_{lift,g} \quad (3)$$

其中 p 为各相流体所受压力; $\bar{\tau}_g$ 为应力应变张量; $\bar{R}_{lg}$ 为流体运移所受阻力[22], $\bar{F}_{lift,g}$ 为作用于两相交界面间的浮升力[24], 二者计算公式如下:

$$\bar{R}_{lg} = \frac{3\alpha_g \alpha_l C_D Re \mu_l}{4d_g^2} (\bar{v}_l - \bar{v}_g) \quad (4)$$

$$\bar{F}_{lift,g} = -C_l \rho_l \alpha_g (\bar{v}_l - \bar{v}_g) \times (\nabla \cdot \bar{v}_l) \quad (5)$$

其中, $Re = \rho_g v_g d_g / \mu_l$, d_g 为CO₂气泡直径, μ_l 为海水动力粘度。上述提及的浮升力与阻力使得不断上浮的CO₂气泡外形产生明显变化, 并进一步影响两相流体界面力[11]。本研究采用tomiyama模型[25, 26]计算气泡阻力系数 C_D 和浮升力系数 C_l , 该模型适用于气泡外形明显变化的流动过程, 公式如下:

$$C_D = \max\left(\min\left(\frac{24}{Re}(1+0.15Re^{0.687}), \frac{72}{Re}\right), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo+4}\right) \quad (6)$$

$$C_l = \begin{cases} \min[0.288 \tanh(0.121Re), f(Eo')] & Eo' \leq 4 \\ f(Eo') & 4 < Eo' \leq 10 \\ -0.27 & 10 < Eo' \end{cases} \quad (7)$$

其中 Eo 为奥托斯数, $Eo = g(\rho_l - \rho_g)d_g^2 / \sigma$; σ 为表面张力系数。

为了计算两相流动过程中的湍流动能 k , 本研究采用可扩展壁面函数Realizable $k-\varepsilon$ 模型[27]。该湍流模型在CO₂泄漏与强化石油开采领域的相关模拟工作中被证实计算可靠[28, 29], 并适用于浅海环境[12]。

Eulerian-Eulerian多相流模型局限于计算连续性流体, 而实际泄漏的CO₂羽流中气泡离散分布且直径不一。为此本研究加入基于离散方法的群体平衡模型 (Population Balance Model, PBM), 通过将气泡直径分布范围划分为多个区间[30], 支持分析不同直径CO₂气泡的破裂耦合规律, 提高结果精度的同时降低计算负担。公式可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_g) + \nabla(\alpha_i \rho_g v_i) = \rho_g V_i (B_{ci} - D_{ci} + B_{bi} - D_{bi}) \quad (8)$$

其中下标 i 表示第 i 个气泡直径区间; B_{ci} 表示因耦合导致新气泡生成的速率; D_{bi} 表示因破裂导致气泡消失的速率, 各速率模型表示如下:

$$\alpha_i = N_i V_i; \quad \alpha_g = \sum_i \alpha_i \quad (9)$$

$$B_{ci} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N a_{kj} N_k N_j x_{kj} \xi_{kj} \quad (10)$$

$$D_{ci} = \sum_{j=1}^N a_{ij} N_i N_j \quad (11)$$

$$B_{bi} = \sum_{j=1}^N g(V_k) n_{i,k} N_k \quad (12)$$

$$D_{bi} = g(V_i) N_i \quad (13)$$

下标 k 和 j 与下标 i 的意义相同。 a_{kj} 代表 k 区间和 j 区间气泡的耦合速度; $g(V_k)$ 表示 k 区间气泡的破裂频率。 ξ_{kj} 表示 k 区间和 j 区间气泡的尺寸比; N 即数量密度, 表示单位体积 (m^3) 内气泡数量; 进一步表示如下:

$$\xi_{kj} = \begin{cases} 1; & V_i < V_c < V_{i+1} (i \leq N-1) \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$V_c = [x_{kj} V_i + (1-x_{kj}) V_{i+1}] \quad (15)$$

$$x_{kj} = \frac{V_c - V_{i+1}}{V_i - V_{i+1}} \quad (16)$$

$$n_{i,k} = \int_{V_i}^{V_i} V_i \frac{V_{i+1} - V}{V_{i+1} - V_i} \beta(V_k, V) dV + \int_{V_{i+1}}^{V_i} \frac{V - V_{i+1}}{V_i - V_{i+1}} \beta(V_k, V) dV \quad (17)$$

其中, V_c 表示 k 区间和 j 区间气泡耦合后形成的体积; β 表示气泡破裂的概率函数。

为了模拟CO₂气泡溶解传质过程, 本研究将溶解在海水中的CO₂ (Dissolved CO₂, DCO₂) 视为海水中的一种组分, 组分输运方程与上述质量守恒方程及动量方程共同计算, 表示如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l Y_D) + \nabla(\alpha_l Y_D \bar{v}) = \nabla \left[\alpha_l \left(D + \frac{v_t}{Sc} \right) \nabla Y_D \right] + S \quad (18)$$

其中, Y_D 表示DCO₂局部质量分数; v_t 表示湍流运动粘度 (m^2/s); D 表示CO₂扩散系数 (m^2/s); 湍流施密特数表示为 $Sc = v_t / D$; S 表示DCO₂传质速率源项, 可表示为:

$$S = \pi d_g \cdot Sh \cdot D (C_l - C) N \quad (19)$$

其中, C_l 表示气相CO₂浓度; C 表示周边海水中DCO₂浓度; CO₂气泡数量密度 N 计算公式如下:

$$\frac{1}{6} \pi d_g^3 \cdot N = \alpha_g \quad (20)$$

本研究中采用Ranz-Marshall经验公式计算界面间舍伍德数[31], 公式如下:

$$Sh = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (21)$$

2.2. 模拟域与初始、边界条件

本研究基于QICS浅海泄漏实验环境及其测量数据[11, 22], 采用10m×100m的流域模拟浅海环境[12]下CO₂海底泄漏过程(如图1所示)。CO₂泄漏口设置宽0.4 m(边界E), 位于海床正中心, 默认沿 y 轴正方向进入流域; 泄漏速度分别取17.0、31.8和60.0 kg/天。高速洋流速度设置为0.20 m/s与0.405 m/s, 低速洋流在0.05 m/s [18]。泄漏CO₂气泡直径分布范围为2 mm至12 mm, 划分为5个区间, 区间分数设置为0.07、0.32、0.441、0.154和0.015 [22]。海水从流域左侧速度入口(边界A)沿 x 轴正方向流入, 右侧outflow出口(边界B)流出。海底设置为无滑移壁面(边界D)。考虑计算精确性, 流域上方采用degassing边界(边界C)模拟海平面, 该边界支持CO₂气泡溢出, 但海水不会被裹挟带离。初始条件下洋流具备初始流速, 并设置湍流动能 k 与湍流耗散能 ε 如下[23]:

$$k = 10^{-4} v_l^2; \quad \varepsilon = 10^{-4} v_l^4 \quad (22)$$

为保证流场运动稳定性, 在计算开始后的0.5秒内, 流域中仅有海水流动, 随后CO₂正式泄漏进入流域。其余物性参数设置详见表1。为比较高速洋流下不同泄漏速率对CO₂溶解传质过程影响, 本研究各案例设置如表2所示, 其中案例1为基本案例。

表1 基本物性参数设置[23, 31]。

参数	数值	参数	数值
海水密度 (kg/m^3)	1027	CO ₂ 摩尔质量 ($kg/kmol$)	44

参数	数值	参数	数值
CO ₂ 密度 (kg/m ³)	1.9	表面张力系数 (N/m)	0.0737
海水粘度 (Pa s)	0.0014	CO ₂ 粘度 (Pa s)	0.0142

案例	洋流速度 (m/s)	泄漏速度 (kg/天)
5	0.20	60.0
6	0.20	17.0
7	0.405	31.8
8	0.405	60.0
9	0.405	17.0

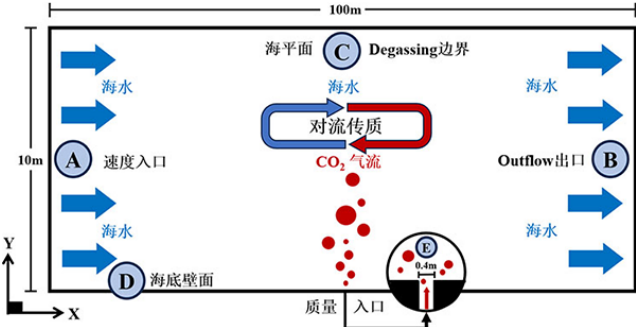


图1 流域及边界条件示意图。

表2 案例设置。

案例	洋流速度 (m/s)	泄漏速度 (kg/天)
1	0.05	31.8
2	0.05	60.0
3	0.05	17.0
4	0.20	31.8

2.3. 模型验证

为了进一步验证模型可靠性，需要对二维模型执行网格无关性研究。泄漏初期，CO₂进入流场与高速洋流混合，此时两相流动复杂，泄漏口周边网格疏密程度将直接影响到CO₂气泡后续运移过程及分布趋势。因此本研究采用分区域局部加密的网格生成方式（如图2a所示），泄漏口周边的四边形网格划分密集，由此往外逐步稀疏，保证计算精确性的同时大幅提高计算效率。如图2b所示，随着网格数量增加，流域内CO₂气泡羽流平均浓度逐渐减小，当网格数量达到一定值时，浓度几乎不变。为了平衡模型计算结果精确性和计算负担，同时考虑到DCO₂云图的分辨率精度，本研究后续案例计算选取的网格数量为13.8万。

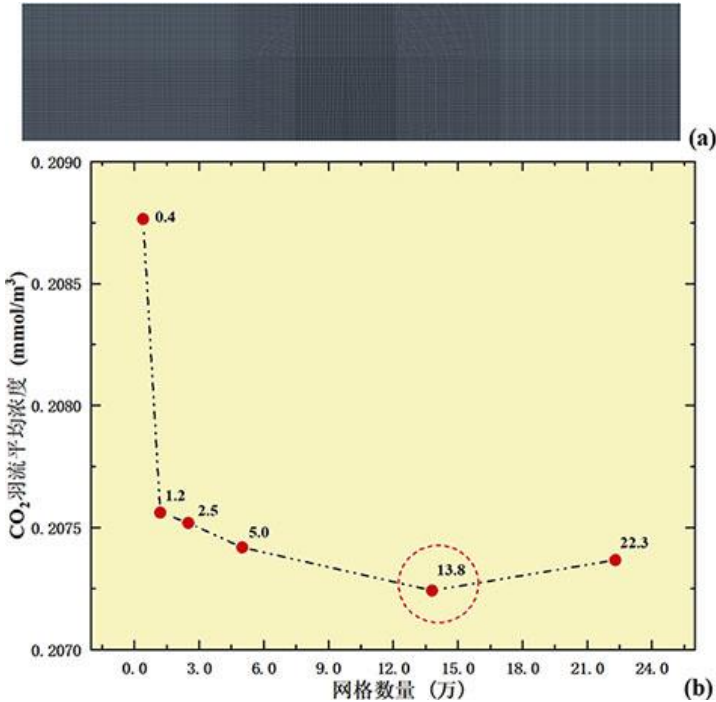


图2 网格划分结果(a); 网格无关性验证比较曲线图(b)。

3. 结果与讨论

3.1. 高速洋流下DCO₂扩散路径变化及扩散范围

图3a展示了高速洋流（0.20、0.405 m/s）与低速洋流（0.05 m/s）在31.8 kg/天泄漏速率下，海水中DCO₂运移路径变化：CO₂气泡进入海水并溶解形成DCO₂，在浮升力和洋流作用下，DCO₂向海平面及流域出口扩散。低速洋流下，泄漏口周边两相混合明显，CO₂气泡羽流裹挟含DCO₂海水上浮，削弱周边海水流速（如图3b），滞后海底DCO₂的扩散；当气泡羽流到达海面，上浮海水向四周散开，形

成局部涡旋聚集DCO₂。此时DCO₂扩散路径受CO₂气泡羽流、水平洋流和湍流影响：500秒内DCO₂海底扩散距离与海平面处相差最大，落后16.96 m；海平面处局部涡旋的最远扩散距离达到7.39 m。而在高速洋流下，两相对流受海水运动主导，泄漏口周边的海水流速稳定，难以跟随气泡羽流上浮，无法形成涡旋。此时水平方向洋流对DCO₂扩散路径的影响占主体地位，洋流速度越高，越早进入海水的DCO₂在洋流带动下扩散越远：31.8 kg/天泄漏速率，高速洋流下，120秒内DCO₂最远扩散距离分别为22.12 m和44.96 m（如图4），均靠近海底区域，与海平面处扩散距离相差最大，分别达到5.57 m和12.96 m。

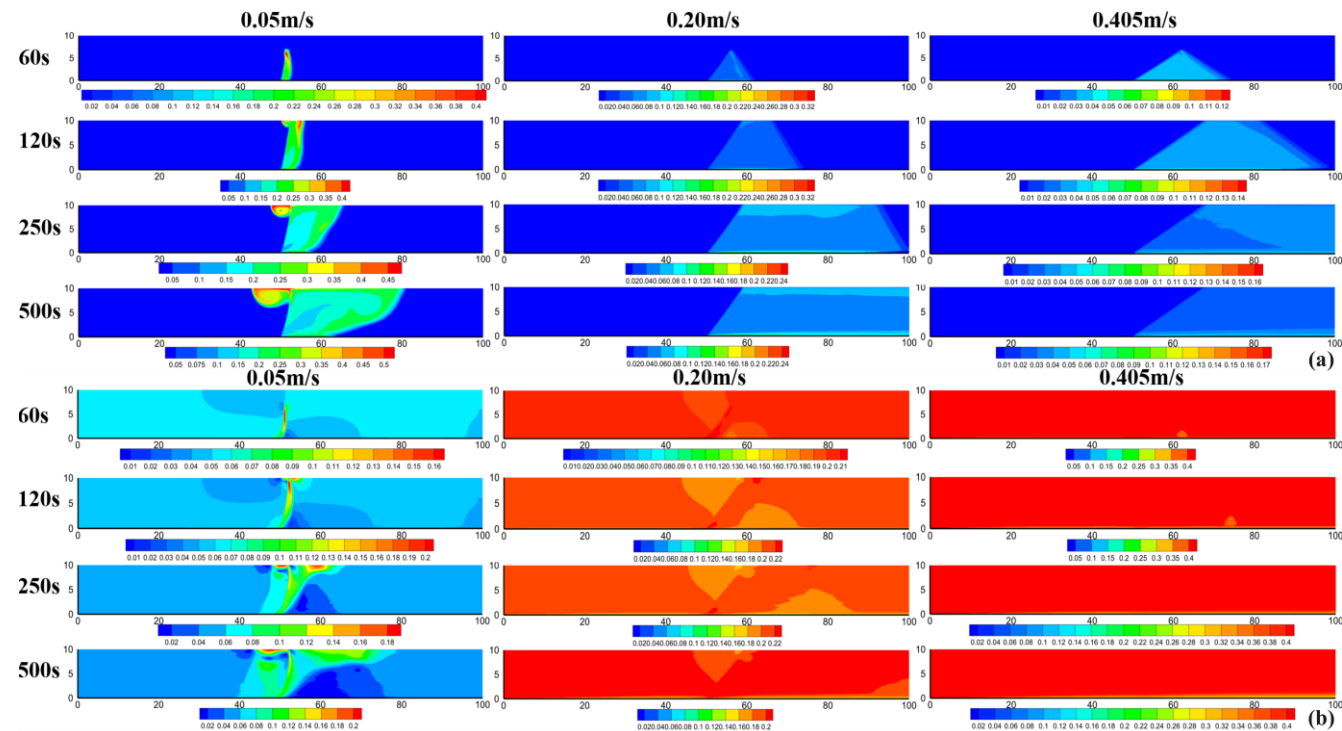


图3 低速与高速洋流, 31.8 kg/天泄漏速率下(a) DCO₂浓度 (mmol/m³) 与(b)海水流速 (m/s) 云图随时间推移对比。

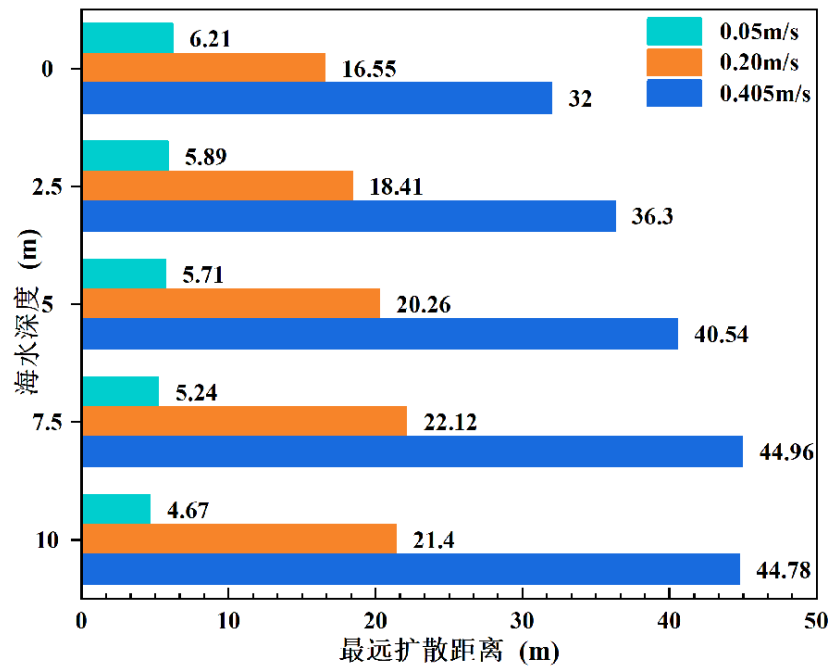


图4 泄漏120秒内, 31.8 kg/天泄漏速率, 高低速洋流下不同水深区域DCO₂最远扩散距离对比。

图5展示了泄漏500秒后, 31.8 kg/天泄漏速率, 高速洋流与低速洋流下不同DCO₂浓度扩散区域的分布趋势。洋流速度较低时, DCO₂覆盖面积有限且扩散缓慢, 但高浓度区域覆盖率高: 0.05 m/s洋流下, 泄漏500秒后DCO₂覆盖面积仅达到283.1 m²; 高速洋流下, DCO₂被快速冲刷远离泄漏口周边流域, 覆盖面积快速增加却大幅稀释浓度: 0.20 m/s与0.405 m/s洋流速度下, 分别泄漏290秒与160秒

后, 覆盖面积就达到454.3 m²与392.7 m²。然而0.20 m/s洋流下DCO₂浓度大于0.07 mmol/m³的面积为0.05 m/s下的13.2%, 而在0.405 m/s下甚至小于0.5%。说明高速洋流浅海环境下, CO₂快速逃逸泄漏口附近流域, 且浓度大幅度稀释, 不利于现场快速响应DCO₂浓度变化, 对及时防范CO₂泄漏构成考验。

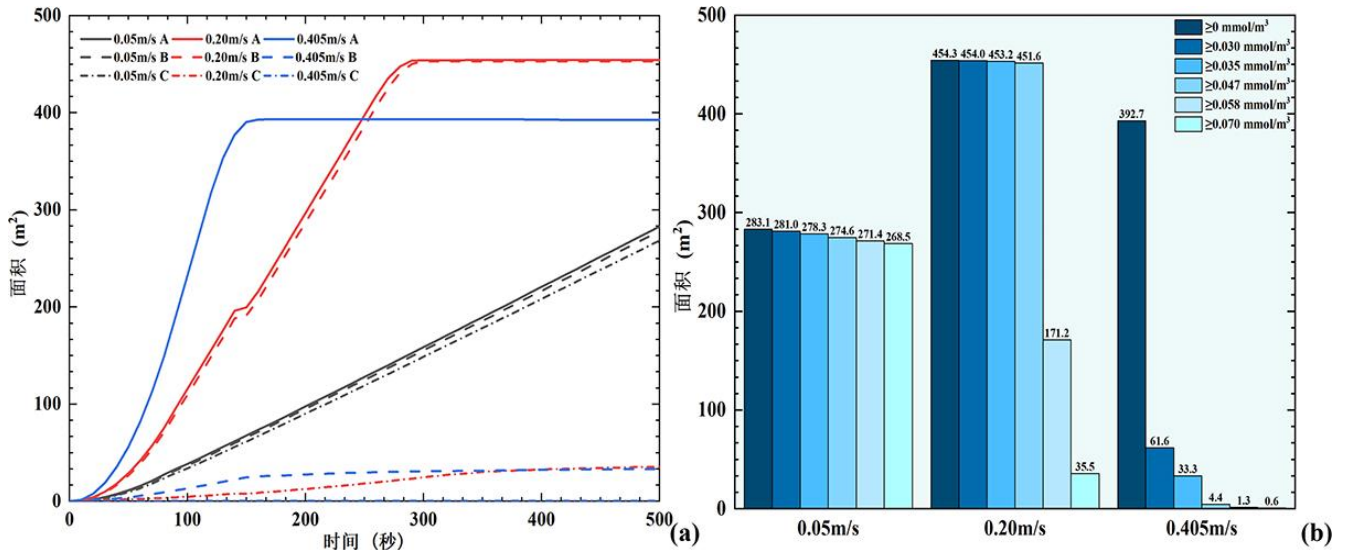


图5 31.8kg/天泄漏速率，高速与低速洋流下不同DCO₂浓度（A≥0 mmol/m³；B≥0.035 mmol/m³；C≥0.07 mmol/m³）覆盖面积随时间变化(a)；与泄漏500秒后面积对比结果(b)。

3.2. 高速洋流下泄漏CO₂浓度变化及泄漏量分析

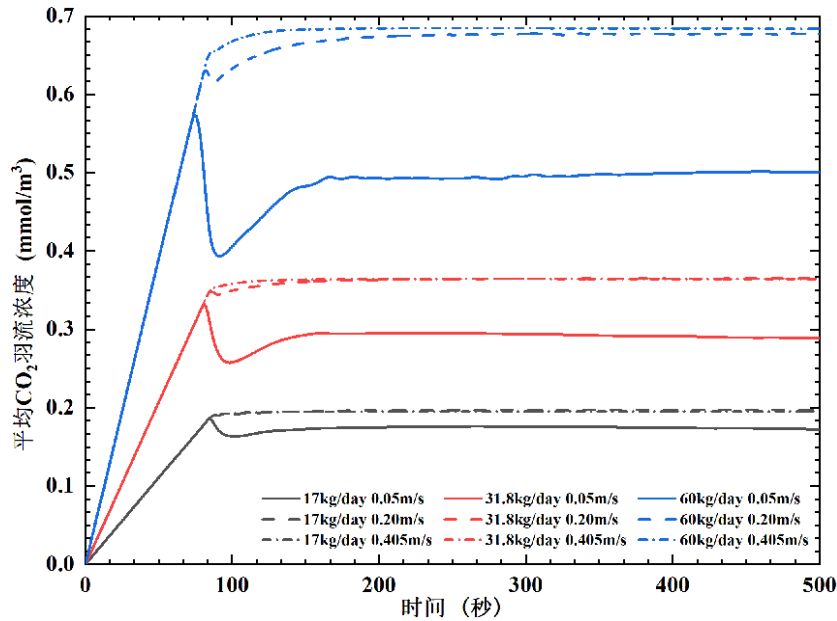


图6 高低速洋流下，流域内CO₂气泡羽流平均浓度随时间变化关系。

图6展示了高速与低速洋流下，流域内CO₂气泡羽流平均浓度随时间变化趋势：初期浓度曲线快速上升至峰值后开始下降，说明泄漏CO₂首次上浮至海面溢出，低速洋流下，上浮气泡羽流裹挟海水至海面，海面处两相对流强，加剧峰值后的大幅波动；而高速洋流下，CO₂气泡被冲散，羽流强度降低，海面两相对流较弱，因此浓度曲线在峰值后波动较小。另一方面，高速洋流下流域内CO₂气泡羽流平均浓度有明显提升，且泄漏速率越高影响越明显：17.0、31.8与60.0 kg/天泄漏速率，0.405 m/s高速洋流下，流域中CO₂气泡羽流平均浓度比0.05 m/s分别高出14.3%、26.4%与35.3%。

图7a与图7b分别展示了高速与低速洋流下，流域中CO₂实时滞留总量与溢出海面总量随时间变化情况，受流域内CO₂气泡羽流平均浓度影响，滞留总量变化趋势与其相近，溢出海面总量间接受到影响：17.0、31.8与60.0 kg/天泄漏条件，高速洋流下的滞留总量比低速洋流下最多提升了13.0%、27.3%与33.0%；而溢出海平面的CO₂总量则最多降低了2.7%、4.3%与5.3%。可以看出，CO₂溢出总量明显高于滞留总量，泄漏500秒后二者间最大差距达到6.22倍。

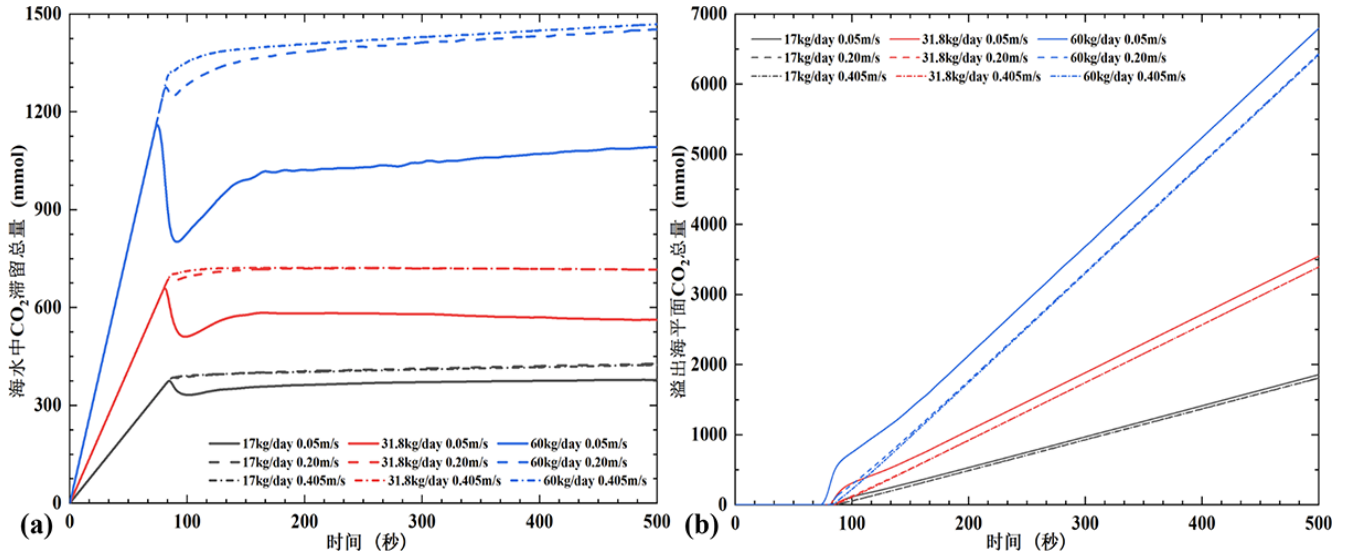


图7 高低速洋流下，流域内CO₂滞留(a)与溢出总量(b)随时间变化关系。

图8进一步展示了高速与低速洋流，31.8 kg/天泄漏速率下，单位时间内流域内泄漏CO₂滞留量百分比变化趋势：泄漏初期CO₂在海水中运移，滞留百分比达到100%；初次溢出海平面时，百分比短期内出现波动：高速洋流下，百分比波动较弱且更快趋于稳定，与海面处较弱的两相对流相关；低速洋流下，百分比波动剧烈且更慢趋于稳定，与

海面处两相强对流的现象照应。随着时间推移，单位时间内CO₂滞留百分比稳定在特定范围内波动，但最大值依旧小于5%，说明高速洋流环境虽然一定程度提高CO₂滞留总量，但10 m水深的浅海中绝大多数泄漏CO₂无法及时溶解，最终溢出海面回归大气层。

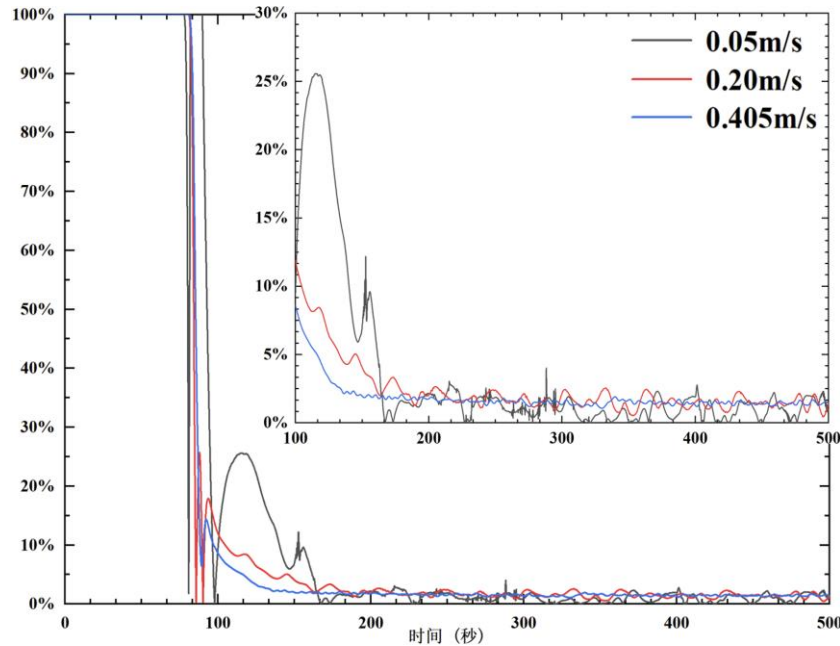


图8 高低速洋流，31.8 kg/天泄漏速率下，单位时间内泄漏CO₂滞留量百分比随时间变化（右上为后400秒曲线放大图）。

3.3. 高速洋流下CO₂传质速率及溶解总量分析

图9分别展示了高低速洋流下，泄漏过程流域中DCO₂平均浓度与传质速率随时间变化规律，可以看出，洋流速度越高，DCO₂浓度越低：以31.8 kg/天泄漏速率为例，泄漏500秒后，0.05、0.20与0.405 m/s洋流速度下平均DCO₂浓度分别为0.054、0.027与0.013 mmol/m³。另一方面，泄

漏速率越高，高速洋流环境对传质速率的提升效果越明显：17.0 kg/天泄漏速率下，不同洋流速度的平均传质速率稳定后基本趋于一致；31.8 kg/天泄漏速率，0.20 m/s与0.405 m/s洋流下传质速率比0.05 m/s洋流分别提升了3.59%与7.19%；而60.0 kg/天下传质速率分别提升了7.01%与10.62%。

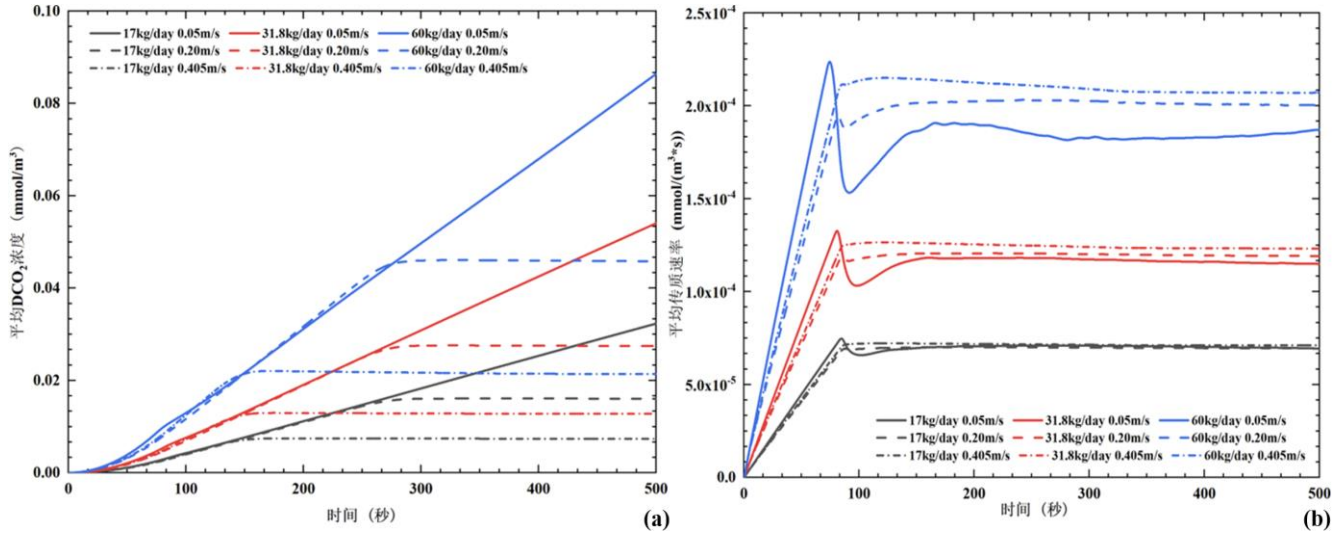


图9 高速与低速洋流下，海水中平均DCO₂浓度(a)与传质速率(b)随时间变化关系。

图10a展示了DCO₂总量随时间变化趋势，受传质速率与流域内DCO₂平均浓度影响，DCO₂总量在高速洋流环境下相较于低速洋流有明显提升，且泄漏速率越高提升越明显：泄漏500秒后，31.8与60.0 kg/天泄漏速率、0.20 m/s与0.405 m/s洋流下DCO₂总量比0.05 m/s洋流分别增加了

1.82%，6.08%与6.83%、12.17%。另一方面，高速洋流环境下，50%-75%的DCO₂被带离泄漏口附近流域向远处海域扩散（如图10b），进一步说明了高速洋流浅海环境下CO₂泄漏扩散范围加剧，溶解总量虽然有所提升，但无法阻挡溶解浓度大幅稀释的结果。

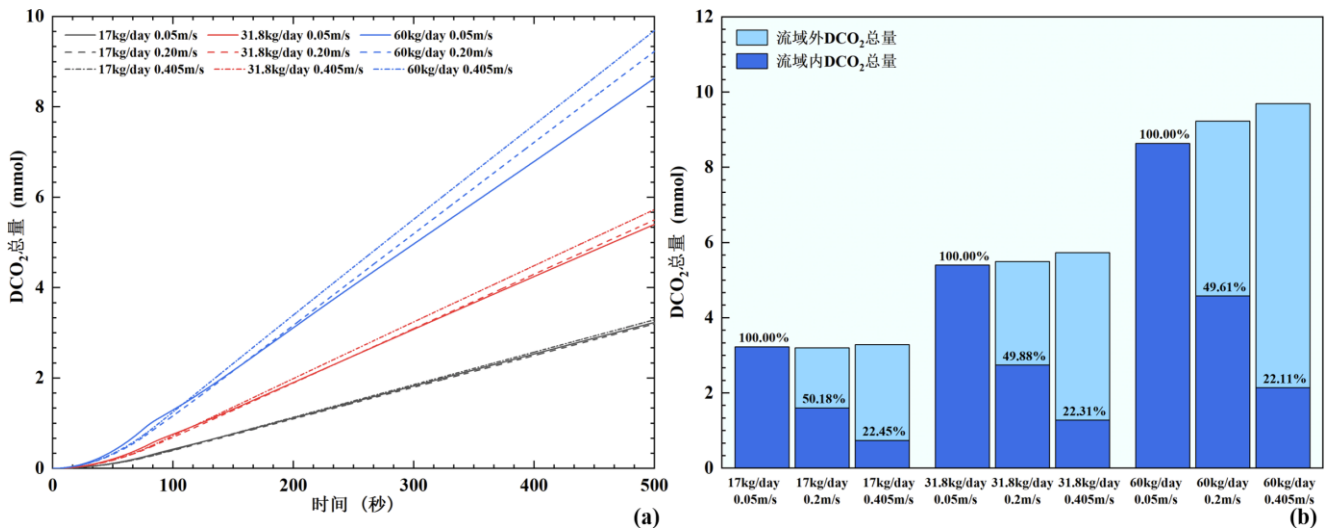


图10 高速与低速洋流下，泄漏过程中海水DCO₂总量随时间变化趋势(a)与500秒后分布范围(b)。

4. 结论

本研究根据浅海环境特征建立浅海咸水层泄漏CO₂在海水中的两相对流溶解-扩散模型，首先分析了高洋流速度下泄漏CO₂溶解扩散的时空演化规律，并研究了DCO₂扩散波及范围变化趋势，接着深入探究了高速洋流下流域内CO₂气泡羽流平均浓度、CO₂滞留量与溢出海面量随时间变化规律，最后调查了高速洋流下泄漏CO₂传质速率及溶解总量变化趋势，主要得出如下结论：

(1) 高速洋流浅海环境下，两相对流效果受海水运动主导，泄漏口周边洋流速度稳定，此时洋流速度越高，越早进入海水的DCO₂在洋流带动下扩散越远，快速逃逸泄漏口附近流域，且DCO₂浓度大幅度稀释，不

利于现场监测设备快速响应海水中的浓度变化，对及时防范CO₂泄漏构成考验。

(2) 高速洋流环境下，CO₂气泡被海水冲散，羽流强度降低，海面两相对流较弱，流域内CO₂气泡羽流平均浓度与CO₂实时滞留总量有明显提升，溢出量有所下降，且泄漏速率越高影响越明显，但即便如此10 m水深下CO₂溶解量依旧有限，至少95%泄漏CO₂最终溢出海面回归大气层。

(3) 高速洋流环境下，浅海流域内泄漏CO₂传质速率有所提升，且泄漏速率越高提升效果越明显，间接增大了溶解总量。但DCO₂浓度降低，超过半数的DCO₂随高速洋流远离流场，扩大影响范围。

当前研究构建的海水-CO₂两相流溶解传质模型在小尺度区域的数值模拟工作已初步证明可行性。未来的研究工作可将模拟流域的范围提高至三维大尺度海洋区域，并

结合化学反应模型对海水中DCO₂浓度与pH值变化趋势进行关联性分析,进而评估泄漏过程对海底生态环境的危害。除此之外,海底地形以及泄漏口分布位置等因素对DCO₂在大尺度流域扩散的影响同样值得深入调查研究。

致谢

本文研究工作得到国家自然科学基金项目(No. 52176059)的支持。

参考文献

- [1] Steel L. L., Mackay E. A., Liu Q., et al. CO₂ solubility measurements in brine under reservoir conditions: A comparison of experimental and geochemical modeling methods [J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 197-217, <https://doi.org/10.1002/ghg.1590>
- [2] Taylor P. J., Stahl H., Vardy M. E., et al. A novel sub-seabed CO₂ release experiment informing monitoring and impact assessment for geological carbon storage [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38, 3-17, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2014.09.007>
- [3] 罗海中, 吴大卫, 范永春, et al. 碳中和背景下CCUS技术发展及广东离岸封存潜力评估 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 1-13, <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.001>
- [4] 许晓艺, 李琦, 谭永胜, et al. 日本苦小牧CO₂海底地质封存监测技术分析及其启示 [J]. *高校地质学报*, 2023, 29(1): 013-024, <https://doi.org/10.16108/j.issn1006-7493.2022096>
- [5] Sasaki T., Sawada Y. Capture and Compression Process of the Tomakomai CCS Demonstration Project [J]. *Social Science Research Network*, 2021, <https://doi.org/10.2139/SSRN.3815378>
- [6] Weijermars R. Concurrent challenges in practical operations and modeling of geological carbon-dioxide sequestration: Review of the Gorgon project and FluidFlower benchmark study [J]. *Energy Strategy Reviews*, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101586>
- [7] 衣华磊, 郭欣, 贾津耀, et al. 恩平15-1油田开发CO₂回注封存工程方案研究 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(1): 163-169, <https://doi.org/10.11935/j.issn.1673-1506.2023.01.017>
- [8] Jones D. G., Beaubien S. E., Blackford J., et al. Developments since 2005 in understanding potential environmental impacts of CO₂ leakage from geological storage [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 350-377, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2015.05.032>
- [9] Kim H., Kim Y. H., Kang S. G., et al. Development of environmental impact monitoring protocol for offshore carbon capture and storage (CCS): A biological perspective [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2016, 57: 139-150, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.004>
- [10] Barry J. P., Buck K. R., Lovera C. F., et al. Utility of deep sea CO₂ release experiments in understanding the biology of a high-CO₂ ocean: Effects of hypercapnia on deep sea meiofauna [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: C09S12, <https://doi.org/10.1029/2004JC002629>
- [11] Sellami N., Dewar M., Stahl H., et al. Dynamics of rising CO₂ bubble plumes in the QICS field experiment: Part 1 – The experiment [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38: 44-51, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2015.02.011>
- [12] Dewar M., Sellami N., Chen B. Dynamics of rising CO₂ bubble plumes in the QICS field experiment: Part 2 – Modelling [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38, 52-63, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2014.11.003>
- [13] Maeda Y., Shitashima K., Sakamoto A. Mapping observations using AUV and numerical simulations of leaked CO₂ diffusion in sub-seabed CO₂ release experiment at Ardmucknish Bay [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38: 143-152, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2015.01.017>
- [14] Totland C., Eek E., Blomberg A. E., et al. The correlation between pO₂ and pCO₂ as a chemical marker for detection of offshore CO₂ leakage [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 99: 103085, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103085>
- [15] Gros J., Schmidt M., Dale A. W., et al. Simulating and Quantifying Multiple Natural Subsea CO₂ Seeps at Panarea Island (Aeolian Islands, Italy) as a Proxy for Potential Leakage from Subseabed Carbon Storage Sites [J]. *Environmental science & technology*, 2019, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02131>
- [16] Flohr A., Schaap A., Achterberg E. P., et al. Towards improved monitoring of offshore carbon storage: A real-world field experiment detecting a controlled sub-seafloor CO₂ release [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2020.103237>
- [17] Mori C., Sato T., Kano Y., et al. Numerical study of the fate of CO₂ purposefully injected into the sediment and seeping from seafloor in Ardmucknish Bay [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38, 153-161, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2014.11.023>
- [18] Atamanchuk D., Tengberg A., Aleynik D., et al. Detection of CO₂ leakage from a simulated sub-seabed storage site using three different types of pCO₂ sensors [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38: 121-134, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2014.10.021>
- [19] OSPAR. 2007 Amendment to 1992 OSPAR Convention, Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic [Z]. 2007, <https://www.ospar.org/convention>
- [20] Shitashima K., Maeda Y., Sakamoto A. Detection and monitoring of leaked CO₂ through sediment, water column and atmosphere in a sub-seabed CCS experiment [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38, 135-142, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2014.12.011>
- [21] Dewar M., Wei W., McNeil D. A., et al. Small-scale modelling of the physiochemical impacts of CO₂ leaked from sub-seabed reservoirs or pipelines within the North Sea and surrounding waters [J]. *Marine pollution bulletin*, 2013, 73 2: 504-15, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.005>
- [22] Pham L. P., Rusli R., Shariff A. M., et al. Dispersion of carbon dioxide bubble release from shallow subsea carbon dioxide storage to seawater [J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 196, 104075, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104075>

- [23] Pham L. P., Rusli R., Keong L. K. Consequence Study of CO₂ Leakage from Ocean Storage [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 148: 1081-1088, <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.06.597>
- [24] Drew D. A., Lahey R. T., In *Particulate Two-Phase Flow* [M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 1993: 509–566, <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/abs/particulate-twophase-flow-edited-by-m-c-ro-co-butterworthheinemann-1993-1002-pp-isbn-0750692758-95/D9A5A1C384D27CEFFDD657174A252DE2>
- [25] Takamasa T., Tomiyama A. Three-Dimensional Gas-Liquid Two-Phase Bubbly Flow in a C-Shaped Tube [C]. Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9). San Francisco. 1999, <https://www.proceedings.com/63358.html>
- [26] Tomiyama A. Struggle with computational bubble dynamics [C]. Third International Conference on Multiphase Flow, Lyon, France. 1998, <https://doi.org/10.1615/MultScienTechn.v10.i4.40>
- [27] Shih T. H., Liou W. W., Shabbir A. H., et al. A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows [J]. *Computers & Fluids*, 1995, 24: 227-238, <https://doi.org/10.1016/0045-7930%2894%2900032-T>
- [28] Ji M., Utomo T. S., Woo J. S., et al. CFD investigation on the flow structure inside thermo vapor compressor [J]. *Energy*, 2010, 35: 2694-2702, <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2009.12.002>
- [29] Xing J., Liu Z., Huang P., et al. Experimental and numerical study of the dispersion of carbon dioxide plume [J]. *Journal of hazardous materials*, 2013, 256-257, 40-8, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.066>
- [30] Ramkrishna D. *Population Balances: Theory and Applications to Particulate Systems in Engineering* [M]. New York: Academic Press, 2000, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-576970-9.X5000-0>
- [31] Sato T., Sato K. Numerical prediction of the dilution process and its biological impacts in CO₂ ocean sequestration [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2002, 6: 169-180, <https://doi.org/10.1007/S007730200005>