



内孤立波、内潮及季节性底层水体温度变化对南海浅表层水合物分解影响研究

胡聪, 李晓梅, 贾永刚

Effects of internal solitary waves, internal tides, and seasonal bottom-water temperature variations on the dissociation of shallow gas hydrates in the South China Sea

Hu Cong, Li Xiaomei, Jia Yonggang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb20260016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海北部内波作用下声散射层垂直迁移特征研究

Study on the vertical migration characteristics of the acoustic scattering layer under the influence of internal waves in the northern South China Sea
海洋学报. 2024, 46(8): 37-49 <https://doi.org/10.12284/hyxb2024073>

南海北部内孤立波影响海域悬浮颗粒物特征变化研究

Characteristics of suspended particulate matter in the northern South China Sea affected by internal solitary waves
海洋学报. 2024, 46(6): 114-129 <https://doi.org/10.12284/hyxb2024057>

南海潮汐主要分潮振幅变化趋势研究

The study of the trends of tidal amplitudes of major constituents in the South China Sea
海洋学报. 2021, 43(6): 26-34 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021096>

内孤立波破碎后对斜坡沉积物的动力作用过程及特性实验研究

Experimental study on the dynamic process and characteristics of slope sediments after breaking of internal solitary waves
海洋学报. 2022, 44(8): 42-50 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022174>

利用FY-4B地球静止气象卫星观测南海北部内孤立波及传播速度

Observation and propagation velocity study of internal solitary waves in the northern South China Sea based on the FY-4B geostationary meteorological satellite
海洋学报. 2024, 46(7): 1-15 <https://doi.org/10.12284/hyxb2024036>

基于遥感的南海北部中尺度涡对内孤立波传播的影响

Influence of mesoscale eddy on internal solitary wave propagation in the northern South China Sea based on remote sensing
海洋学报. 2022, 44(7): 137-144 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022106>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

胡聪, 李晓梅, 贾永刚. 内孤立波、内潮及季节性底层水体温度变化对南海浅表层水合物分解影响研究[J]. 海洋学报, 2026, 48(2): 40–57, doi:10.12284/hyxb20260016

Hu Cong, Li Xiaomei, Jia Yonggang. Effects of internal solitary waves, internal tides, and seasonal bottom-water temperature variations on the dissociation of shallow gas hydrates in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(2): 40–57, doi:10.12284/hyxb20260016

内孤立波、内潮及季节性底层水体温度变化对南海浅表层水合物分解影响研究

胡聪^{1,2}, 李晓梅^{1,2}, 贾永刚^{1,2}

(1. 中国海洋大学 山东省海洋工程地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 南海北部陆坡边缘海底分布有浅表层水合物, 这类水合物埋藏浅、覆盖层薄, 对海底温压变化敏感, 易发生分解。本文针对南海北部内孤立波、内潮及季节性底层水体温度变化, 应用一维热传导模型, 模拟其对浅表层水合物分解的影响, 并开展参数敏感性分析。研究表明: 单次内孤立波引起的温压扰动不足以引发海底以下约 0.078 m 的水合物赋存区 (Hydrate Occurrence Zone, HOZ) 顶部分解, 而内潮引起 1.72°C 的升温持续 18 h, 在 60 d 内将热量传入至 HOZ 顶部, 可导致约 4 cm 水合物分解。季节性底水升温幅度为 1.76°C, 持续 5 个月, 在 1 a 内推动分解界面持续下移, 累计分解厚度可达 14 cm, 影响效果明显, 表明持续升温效应显著强于瞬时扰动。同时, 参数敏感性分析表明, 温度幅值与有效热扩散系数共同控制热扰动传输深度与分解速率。水合物初始分布特征亦显著影响分解过程, 其中, 地温梯度、甲烷通量和渗透率决定 HOZ 顶底部位置, 而孔隙度调节初始饱和度及分解敏感性。本研究为评价预测浅表层水合物稳定性及甲烷释放风险等提供了重要依据。

关键词: 内孤立波; 内潮; 季节性底层水体温度变化; 一维热传导模型; 水合物; 南海

中图分类号: P744

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2026)02-0040-18

1 引言

天然气水合物是由甲烷等气体和水在低温高压环境下形成的自然结晶物质^[1-2], 常被认为是一种潜力巨大的清洁能源^[3], 广泛分布于高纬度永久冻土和海洋大陆边缘地区^[4]。全球天然气水合物储量约 2.54×10^{13} t 油当量^[5], 南海水合物资源丰富, 仅南海北部水合物储量约 3.8×10^{10} t 油当量^[6-7]。天然气水合物稳定性直接受控于海底温度-压力条件^[8], 其分解后向外释放气体和水, 将改变原有沉积物的应力特征从而引发海底地质灾害, 同时可能向大气中释放甲

烷, 对气候变化产生潜在影响^[9]。南海北部水合物广泛分布于水深 500~3 500 m 的陆坡及洋陆过渡带环境, 水合物稳定带厚度最大可达近 300 m^[10]。近年勘查研究发现南海北部浅表层水合物, 其埋藏深度仅数米或直接裸露于海水^[11-14]。2015 年“海马”号 ROV 在南海北部陆坡西部陵水低凸起发现的海马冷泉显示, 其水合物最浅埋深仅约 0.15 m^[15], 随后在 Formosa Ridge 冷泉区(水深约 1 130 m)亦首次观测到裸露型水合物^[16]。这种浅埋或裸露型水合物缺乏沉积层覆盖, 对海底温度与压力的微小扰动高度敏感^[15]。

目前关于自然状态下天然气水合物分解的研究,

收稿日期: 2026-01-03; 修订日期: 2026-03-23。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42377142); 国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFC3082500); 山东省高等学校“青创团队计划”项目(2022KJ052)。

作者简介: 胡聪(1988—), 男, 山东省青岛市人, 副教授, 研究方向为海洋工程地质。E-mail: hucong@ouc.edu.cn

多集中于地质历史时期的气候演化背景,主要探讨千年至万年尺度的海洋变暖或冰期消融对埋藏较深水合物稳定带的长期影响^[2, 17-19]。古新世-始新世极热事件(PETM)期间,全球海洋底水温度在约10 ka内上升约4℃,很显然深海变暖改变了沉积物地温梯度,诱发中等水深区域甲烷水合物失稳分解,水合物厚度约减小30%^[20]。在北美大陆边缘,墨西哥湾暖流导致海水温度在过去约5 000 a内最高升温达8℃,引起 2.5×10^8 t甲烷水合物不稳定^[21];在北极斯瓦尔巴群岛,100 a内海水温度升高约2~3℃时,可能导致水合物稳定带(Gas Hydrate Stability Zone, GHSZ)上边界移动10~110 m^[22]。另有模拟显示,在过去30 a里,海底温度上升1℃,GHSZ范围可能减小,甲烷从分解的水合物中释放出来^[23]。100 a内海底温度升高2℃时,GHSZ体积减小5.4%^[24];在南海东沙海域,过去约2.5 ka以来海底温度上升促使水合物稳定带底界发生上移,并引发浅层水合物分解,该过程呈现约1~3 ka的滞后响应^[25]。在同一区域的进一步研究表明,末次冰期以来不同部位的水合物分解程度存在差异,整体分解厚度约为26 m^[26]。

然而目前国内外对短时间尺度的内孤立波(internal solitary waves, ISWs)、内潮(internal tides, IT)^[27-30]引起的温压变化及季节性底层水体温度变化^[31],导致浅表层水合物分解的响应机制尚缺乏充分的分析探究。近年来针对季节性温度变化对水合物稳定性影响有相关研究,主要集中在北极海域。在斯瓦尔巴群岛,年际尺度1~2℃的温差即可导致水合物形成或分解,从而使稳定带在1 a内发生周期性扩张与收缩^[32]。另外,海底热传导模型模拟发现,季节性温度波动能影响至海底以下1.65 m深度的天然气水合物,而该深度以下水合物温度全年保持稳定,不受短期季节性变暖的干扰^[31]。尚须强调指出,与地质历史时期的长期变暖不同,这种短时间尺度事件虽能量有限,但具有高频、瞬态和强扰动等特征,能够在数分钟至数月的时间内引起显著的海底温压变化,诱发海底热力学不稳定^[27],造成水合物分解及气体逸散。因此,深入研究短时间尺度温压扰动对浅表层水合物稳定性的影响,对于揭示天然气水合物分解至关重要。鉴此,本文利用一维热传导模型,定量模拟内孤立波、内潮及季节性底层水体温度扰动下南海北部浅表层水合物的动态响应,为评价预测海底地质灾害风险和水合物分解对碳循环产生的影响提供科学依据^[8]。

2 南海北部陆坡地质特点及水动力特征

南海作为西太平洋典型边缘海,形成演化受欧亚、太平洋和印澳板块相互作用控制^[33]。南海北部陆坡分布多条NW-SE向断裂带^[34-35]、底辟构造、海底滑塌体等^[19],存在烃气向上输送的地质基础^[19, 36]。第四纪以来,南海北部气候快速变化,来自珠江、红河等河流的输入物源增加,沉积速率最大增至40~85 cm/ka^[37]。经历古近纪的张裂和新近纪以来的热沉降后,该区域形成了海马冷泉、九龙甲烷礁等浅表层水合物区^[38]。

南海北部陆坡区水动力活动强烈,内孤立波^[27, 39-40]与内潮^[28-29, 41]是南海典型的水动力过程。单个内孤立波作为典型的瞬态非线性波动事件,持续时间通常为10 min至30 min,可导致等温线下移,将上层暖水输送至深层,并因强流作用引起海床近底负压扰动^[27, 39-40];内潮则在半日潮或全日潮周期内引起底层海水温度和流场的往复变化^[42-43]。内孤立波和内潮这种扰动可持续改变近海底温压条件,可能对浅表层水合物的稳定性产生影响。

除水动力扰动外,南海北部陆坡区底层水温还受季节性变化控制。根据世界海洋数据库,该区域底层水温平均年际波动幅度约1.58℃^[44],其周期性变化可改变顶部边界条件与温度梯度,影响沉积物内的热传导过程,进而影响浅表层水合物的平衡位置与稳定性。相比内孤立波和内潮等短时或周期性扰动,季节性底层水体温度变化的持续时间更长、作用深度更大,是决定浅层水合物年际稳定性的重要环境因素。

3 研究方法

本研究基于适用于海洋环境的相对简单的一维热传导模型^[4]开展数值模拟,采用一维模型的主要原因在于,大多数水合物赋存于在地层受限的水合物储集层中,这类储集层通常没有显著的横向变化^[45]。该模型主要考虑了温度和沉积物性质等关键因素对水合物赋存区的影响,定量评价南海浅表层天然气水合物在底层水温压扰动下的稳定性响应。其中,顶部边界设为海水温度和压力的变化,底部边界则设为恒定的地温梯度。模型中涉及的主要参数包括:海底温度^[44]、沉积物孔隙度^[38]、渗透率^[46]、甲烷通量^[47-48]、导热系数^[4]等,这些参数的取值来源于已有文献或原位观测获得。

3.1 水合物厚度计算方法

本研究基于Xu和Ruppel^[2]水合物形成模型构建

南海浅表层天然气水合物的初始分布。模型通过耦合沉积物物理性质、温压条件及甲烷供给通量,定量刻画水合物赋存区的空间位置。其顶部位置的计算公式为

$$z_t = -\frac{\phi K_m}{q_f} \ln \left(\frac{q_m - q_f M_0}{q_m - q_f M_{st}(z_t)} \right), \quad (1)$$

其中,

$$q_m = q_f M_{st}(z_t) - \phi K_m \left(\frac{dM_{st}}{dz} \right)_{z=z_t}, \quad (2)$$

式中, ϕ 为沉积物孔隙度; K_m 为甲烷扩散-弥散系数 ($K_m = D_m \rho_i$), 是扩散弥散系数与流体密度的乘积; q_f 为流体质量通量; q_m 为 HOZ 顶部的甲烷通量; M_0 为海底海水中甲烷质量分数, 在大多数情况下可以忽略不计, 在这里假设为 0; $M_{st}(z_t)$ 为 HOZ 顶部深度 z_t 处的甲烷溶解度。

HOZ 底部的位置可以通过迭代法确定, 具体的计算公式为

$$q_m = q_f M_{st}(z_b) - \phi K_m \left(\frac{dM_{st}}{dz} \right)_{z=z_b}, \quad (3)$$

式中, z_b 是 HOZ 底部深度; q_m 是甲烷通量; $\frac{dM_{st}}{dz}$ 是甲烷溶解度随深度的梯度。

3.2 水合物饱和度计算方法

为研究南海北部浅表层水合物对温压扰动的动态响应, 基于 Mestdagh 等^[4]建立的模型, 通过求解一维热传导方程来描述水合物储层对温度扰动的响应。模型的核心控制方程如下:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + s(z, t), \quad (4)$$

式中, z 表示深度, 方向朝下; t 表示时间; $T(z, t)$ 表示沉积柱中深度 z 处随时间 t 变化的温度场; κ 为南海典型沉积物的热扩散率; 源项 $s(z, t)$ 表征水合物相变过程中的潜热效应。求解该方程采用有限差分法:

$$T_{nk} = T_{(n-1)k} + \frac{\lambda \Delta t}{\Delta z^2} (T_{(n-1)(k-1)} - 2T_{(n-1)k} + T_{(n-1)(k+1)}). \quad (5)$$

在这里热传导方程被离散化为有限差分形式, 在一维情况下, 拉普拉斯算子简化为二阶空间导数对于时间和空间的离散化, 分别用 Δt 和 Δz 表示时间步长和空间步长, 采用中心差分格式来近似二阶空间导数, 并向前差分格式来近似一阶时间导数, 也就是时间 n 和深度 k 处的温度 T_{nk} 是根据前一个时间步长 $(n-1)$ 在深度 k 、 $(k-1)$ 和 $(k+1)$ 处的温度计算出来的。

在公式(5)中 Δt 和 Δz 需要满足的条件是:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta z^2}{2\kappa}. \quad (6)$$

该研究在处理压力分布时, 将海底以下的压力场

定义为遵循静水压力梯度分布, 即海底压力作为整个压力剖面计算的基准点, 压力随深度呈线性增加。

在天然气水合物发生相变的过程中, 会消耗热量即潜热, 由于潜热的存在, 温度脉冲在地层中的传播会被延迟。当地下某一层开始经历温度变化时, 如果该层含有正在分解的天然气水合物, 则其温度不会立即达到新的平衡状态。相反, 它会在相变过程中保持相对恒定的温度, 直到所有的水合物或冰都完成相变。为了准确模拟上述过程, 模型修正了每个时间步长内的温度分布。这意味着, 在计算过程中, 每当遇到含有正在经历相变的天然气水合物的地层时, 温度会被调整到相应的相变温度, 并且积累的热量 Q_{acc} 用以更新饱和度:

$$S_h = S_{h,n-1} \times \frac{L_h - Q_{acc}}{L_h}. \quad (7)$$

3.3 计算参数

表 1 汇总了模型计算中采用的关键物理与热力学参数, 用以表征海底沉积物的基本物理性质并确定其在温压扰动下的热响应能力。除沉积物参数外, 温压扰动条件亦作为本节的重要组成部分, 主要包括内孤立波引起的温压变化、内潮引起的温度变化和季节性底层水体温度变化。观测资料显示, 在南海北部陆坡神狐海域, 内孤立波可引起海底温度上升约 0.14℃ 并伴随约 472 Pa 的负压变化, 而一次典型的内潮升温事件中, 18 h 内海底温度可升高 1.72℃^[49]。观测与理论一致表明: 一次典型的内潮引起的海底压力扰动通常为 10~100 Pa 量级^[50], 因其变化幅度较小, 对模拟影响不大, 将其假设为静水压力变化 0 Pa; 根据世界海洋数据库数据, 九龙甲烷礁 500 m 水深处海底温度在 2001 年季节性底层水体温度变化较大, 幅度达 1.76℃^[44], 呈现周期性波动, 压力变化无显著长期偏移, 也假设为恒定静水压力。上述温压变化均来源于实测资料或前人研究结果, 引起的温压变化作为顶部边界条件输入模型, 使模型能够合理表征内孤立波、内潮及季节尺度热扰动对浅表层水合物系统的影响。

4 结果和讨论

4.1 内孤立波对南海北部陆坡浅表层水合物分解影响

模拟内孤立波在水深 500 m 处^[10], 20 min 内引起海底温度升高 0.14℃, 压力降低 472 Pa, 因其时间跨度较小, 我们观察 5 d 内浅表层水合物的变化情况。图 1a 显示了 HOZ 顶部和底部的初始位置以及在 5 d 内海床内温度分布的演变, 此时水合物埋藏于海底以

表1 模型计算中采用的关键物理及热力学参数

参数	名称	取值
ϕ	孔隙度	0.5
k	渗透率	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^{2[51-53]}$
λ	热导率	$1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}^{[4]}$
C_i	海水比热容	$4.18 \times 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}^{[4]}$
ρ_i	海水密度	$1024 \text{ kg/m}^{3[4]}$
ρ_h	甲烷水合物密度	$930 \text{ kg/m}^{3[4]}$
S	海水盐度	$35^{[4]}$
κ	沉积物热扩散率	$3.9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^{[4]}$
C_{ph}	水合物比热容	$2.16 \times 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}^{[4]}$
L_h	潜热	$4.3 \times 10^5 \text{ J/kg}^{[4]}$
q_e	热流密度	$9 \times 10^{-2} \text{ W/m}^{2[4]}$
q_m	甲烷通量	$5.5 \times 10^{-11} \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}^{[4, 47-48, 54-56]}$
q_f	流体通量	$6.4 \times 10^{-8} \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}^{[4]}$
M_0	底水甲烷质量分数	$0^{[4]}$
M_h	甲烷水合物中甲烷的质量分数	$0.134^{[4]}$
g	重力加速度	$9.81 \text{ m/s}^{2[4]}$
D_m	扩散弥散系数	$1.3 \times 10^{-9} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}^{[4]}$

下 0.078~0.672 m。图中黑线是温度平衡曲线,代表气相-水相-水合物三相平衡温度,在该曲线左侧代表地温低于平衡温度,此时水合物稳定,可与水共存,水合物不分解,若地温在平衡温度曲线右侧代表地温高于平衡温度,水合物不稳定,分解成自由气体。由于HOZ内部水合物饱和度呈渐变分布,HOZ顶部的下移距离仅反映相平衡边界的迁移位置,而并不严格等

同于实际水合物分解体积。因此本文将作为浅表层水合物潜在分解厚度的近似估计。图1a中,5 d内海底浅表层温度均未超过水合物分解的平衡温度,位于平衡温度曲线的左侧,该温度变化不足以引起水合物分解。图1b显示模型预测的水合物饱和度随着海底深度变化情况,此时水合物顶部饱和度为0.321,底部为0.322,水合物饱和度随深度增加而增大,但因模型中水合物厚度较薄,水合物饱和度在储层中差别不大,记初始饱和度为0.32,5 d内饱和度图线相互重叠,顶底部未发生变化,说明在该工况下水合物不分解。图1c表示HOZ顶部和底部位置随时间变化情况,在5 d的模拟时段内,HOZ的位置与初始条件保持一致,说明该扰动不足以对水合物产生显著影响。这一结果主要归因于单次内孤立波扰动作用的时间和空间范围有限。首先,短时温度升高在数小时内仅能传导至数厘米深度,无法作用于更深处的水合物层,单次内孤立波事件持续时间仅为分钟量级,缺乏有效的热量累积,因而无法改变该深度水合物的热力学平衡;其次,水合物分解是一个强吸热过程,潜热效应会迅速抵消微弱的温度升高,从而抑制反应的持续进行^[57]。

4.2 内潮对南海北部陆坡浅表层水合物分解影响

模拟内潮在水深500 m处,18 h内引起海底温度升高1.72℃,压力不变,因其时间跨度为数小时级,模拟60 d内浅表层水合物的变化情况。图2a表明,水合物埋藏于海底以下0.078~0.672 m,至模拟的第10天,地温已超过平衡温度,水合物已发生分解,后续温度继续向下传导触发水合物持续分解。水合物的饱和度数值与4.1节中描述一致,记为0.32,但在模拟期水合物顶部持续下移,因垂直分辨率为0.02 m,至模拟的第20天,水合物顶部已下降至海底以下0.10 m,

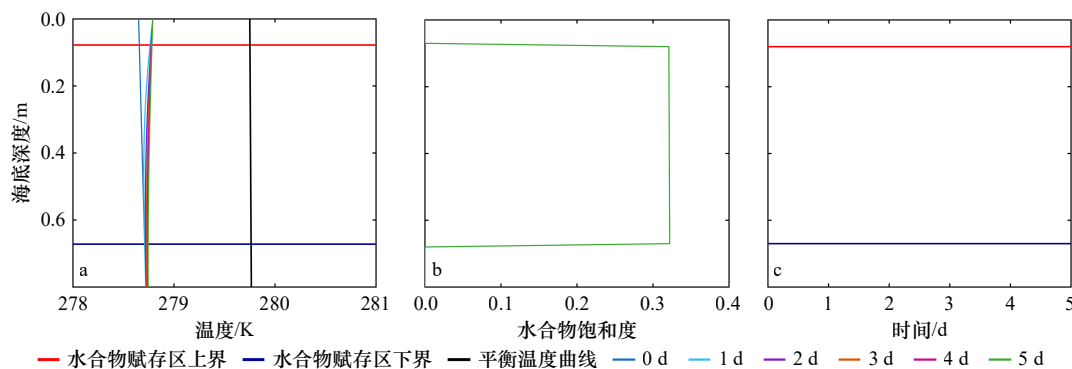


图1 内孤立波对浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 1 Simulated results of the effects of internal solitary waves on the dissociation of shallow gas hydrates

a. 温度剖面; b. 水合物饱和度和剖面; c. 水合物赋存区剖面

a. Temperature profiles; b. hydrate saturation and profiles; c. hydrate occurrence zone profiles

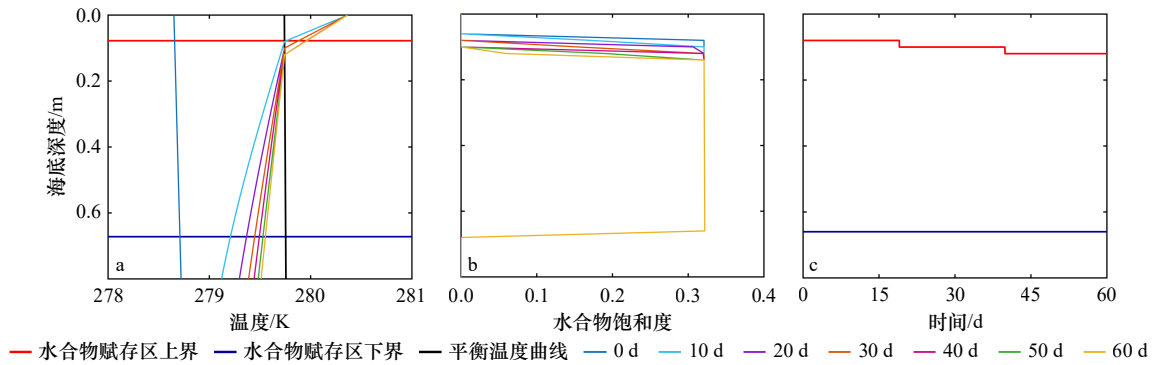


图2 内潮对浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 2 Simulated results of the effects of internal tides on the dissociation of shallow gas hydrates

a. 温度剖面; b. 水合物饱和度剖面; c. 水合物赋存区剖面

a. Temperature profiles; b. hydrate saturation profiles; c. hydrate occurrence zone profiles

下降了 2 cm(图 2b)。随着内潮扰动的持续作用,至第 41 天,水合物顶部再次下移 2 cm,在整个模拟期内 HOZ 顶部向下迁移约 4 cm(图 2c),该数值反映了相平衡边界的移动距离,可作为浅表层水合物潜在分解厚度的近似表征。这一结果表明,内潮引起的温度变化使得热量逐渐向沉积物深部传导,可达数十厘米量级,足以作用于 HOZ 顶端,从而推动水合物的相平衡边界向下迁移。

4.3 季节性底层水体温度变化对南海北部陆坡浅表层水合物分解影响

模拟季节性底层水体温度变化在水深 500 m 处,5 个月内引起海底温度升高 1.76°C,压力不变,因其时间跨度为数月级,模拟 1 a 内浅表层水合物的变化情况。图 3a 显示,在浅表层,地温在第 120 天已超过平衡温度曲线,模拟时间越长地温传播得越深,至模拟的第 360 天,地温已在海底以下 0.22 m 处与平衡温度曲线相交,说明在此之上,水合物均已发生分解。水合物的饱和度为 0.32,与 4.1 节描述一致,但水合物顶部随着作用时长增加而不断下移(图 3b),在第 141

天、165 天、193 天、225 天、263 天、304 天和 351 天各完成了 2 cm 的分解,累计分解厚度达到 14 cm(图 3c)。在 1 a 的模拟时间内,分解过程仍在持续,但分解速率逐渐减缓,表现出由初期的快速响应逐渐过渡为潜热控制下的缓慢分解。前期各阶段之间的间隔相对较短,说明热量供给充足,驱动作用较强。进入中后期后,分解所需的大量潜热逐渐消耗了热扰动提供的能量,使得温度继续向深部传递的效率下降,分解速率逐渐放缓,表现为完成相同厚度所需时间不断延长。

4.4 参数敏感性分析

为了评估数值结果的稳健性,有必要进一步分析关键控制因素对水合物稳定性的具体影响。从物理机制来看,温度与压力的变化直接决定了水合物相平衡的移动方向和幅度^[58],而扰动传递所需的时间则反映了温度和压力能否在短期内作用于沉积物内部并触发分解过程。同时,沉积物的有效热扩散系数决定了热量在垂向的传播速率,是刻画短期与长期响应差异的核心参数^[59]。另一方面,水合物在垂向上的分布特征(包括稳定带厚度、饱和度及初始埋深)则决定

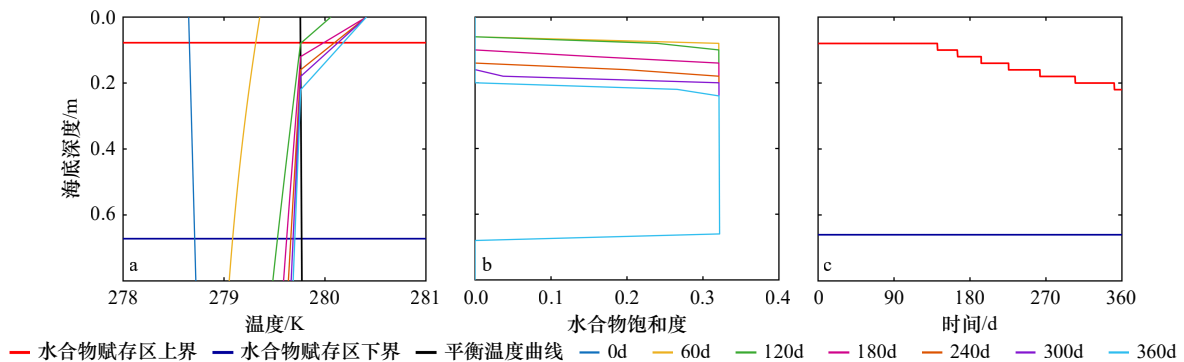


图3 季节性底层水体温度变化对浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 3 Simulated results of the effects of seasonal bottom-water temperature variations on the dissociation of shallow gas hydrates

a. 温度剖面; b. 水合物饱和度剖面; c. 水合物赋存区剖面

a. Temperature profiles; b. hydrate saturation profiles; c. hydrate occurrence zone profiles

了体系对外界扰动的敏感程度^[59]。基于此,以下部分将从温度与压力的变化、有效热扩散系数以及水合物分布特征3个方面展开讨论,以系统揭示这些因素对水合物稳定性的影响机制。

4.4.1 温度和压力

在温压敏感性分析中,分别研究了内孤立波、内潮以及季节性底层水体温度变化对浅表层水合物稳定性的影响。在4.1节初始状态的基础上,使压力不变,将20 min内内孤立波作用下的海底温度升高值设定为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5℃,再使温度不变,压力变化设置为-2 000、-1 000、0、1 000、2 000 Pa,模拟5 d内HOZ顶端位置的变化。模拟结果显示,在此类工况下,水合物并未发生明显分解,HOZ顶端位置基本保持稳定(图1c),表明短时微弱温压扰动不足以影响浅表层水合物的热力学平衡。

对于18 h内内潮引起的海底温度变化,在4.2节初始状态的基础上分别将温度升高值设置为1.0、1.5、2.0℃,并模拟60 d内HOZ顶端位置的变化。结果表明,水合物顶端发生了不同程度的下移,对应的分解厚度分别为0、2、6 cm(图4a),呈现出随温度升高值增大而加速分解的趋势。在相同的水动力扰动时长下,更高的温度幅值导致更大规模的水合物分解。

5个月内的季节性底水温度变化在4.3节的初始状态基础上,将温度升高值设定为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0℃,模拟360 d内HOZ顶端位置的变化。结果显示,水合物顶端的累计分解厚度分别为0、8、16、24、28 cm(图4b),表现出明显的持续性分解效应。在同一季节性升温背景下,温度升高值越高,分解厚度也显著增加,验证了温度升高对水合物分解的主控作用。

总体来看,温度对浅表层水合物稳定性的影响具

有显著的时间尺度依赖性。单次内孤立波虽能在短时间内引起温度扰动,但其幅值较小且作用时间有限,难以诱发水合物分解。相比之下,内潮具有更长的作用时长和更大的温度扰动,使得热量能够逐渐传导至浅表层水合物层顶端,从而诱发分解并表现出厚度随时间累积增加的特征。而在年际尺度上,季节性底层水体温度变化引起的热扰动最为显著,不仅突破了浅层沉积物对热量的缓冲效应,而且通过长期持续的累积作用推动分解界面不断下移,最终导致显著的水合物分解量。

此外,在同一升温事件过程下,温度升高值与分解量呈正相关关系:升温幅度越大,分解量越多,响应速率也越快。这一规律在内潮和季节性底层水体温度变化的模拟中尤为明显,显示出升温幅值是控制水合物分解程度的关键因子。由此可见,单次内孤立波对浅表层水合物的影响主要受限于扰动深度,而内潮与季节性底层水体温度变化对浅表层水合物的影响不仅受持续时间控制,更与升温幅值密切相关。当高幅值扰动与内潮或季节性底层水体温度变化叠加时,可能对浅表层水合物稳定性构成显著影响。

4.4.2 有效热扩散系数

有效热扩散系数(κ)是决定沉积物中热量传递速率的关键参数,对水合物分解过程具有显著的调控作用。在海底以下浅层至数百米海洋沉积物中,测得的有效热扩散系数数值在 $2 \times 10^{-7} \sim 1.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间^[60-61]。在本研究的数值模拟中,将有效热扩散系数分别取值为 2×10^{-7} 、 5×10^{-7} 、 $8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。模拟结果显示,在内孤立波作用下,即使改变有效热扩散系数,HOZ顶端的位置也完全重合,并未分解,说明其变化对单次内孤立波作用下的浅表层水合物分解

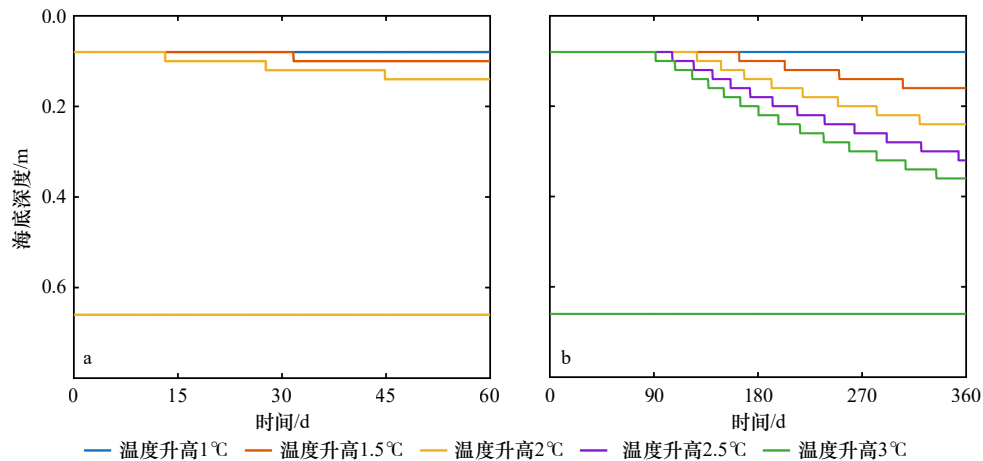


图4 HOZ随内潮引起的温度变化响应(a)和HOZ随季节性底层水体温度变化响应(b)

Fig. 4 Simulated responses of the hydrate occurrence zone to temperature variations induced by internal tides (a) and seasonal bottom-water temperature variations (b)

影响不大(图 5a)。而对内潮作用下的浅表层水合物分解具有决定性影响,有效热扩散系数的不同取值直接改变了热扰动在沉积物中的传播速度与作用深度,从而调控了水合物分解的开始时间及分解速率。结果表明,当 $\kappa = 2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,温度向下传递较为缓慢,水合物在约第 38 天才完成首次分解,60 d 内累计分解仅 2 cm; 当 $\kappa = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,温度传播效率显著提升,首次完成 2 cm 分解时间提前至约第 15 天,60 d 内分解厚度增至 6 cm; 进一步升高至 $\kappa = 8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,完成首次分解时间缩短至约第 10 天,60 d 内累计分解厚度达 8 cm(图 5b)。在模拟季节性温度变化的影响中,因显示精度问题,这一模拟将垂直分辨率设为 0.04 m,随着有效热扩散系数增大,浅表层水合物顶部分别分解 8、20、24 cm(图 5c),对应的水合物初步完成 4 cm 分解时间分别是约第 184 天、第 147 天、第 136 天。上述结果说明,较高的有效热扩散系数使外界温度变化更有效地向水合物层传递,从而缩短水合物分解所需的时间并促进 HOZ 顶部下移。从热传导机理来看,有效热扩散系数直接决定温度梯度在沉积物中的扩散速率:较低时,热量主要集中于近表层并迅速衰减;较高时,热量能够持续向下输送,抵消水合物分解过程中的潜热吸收,使温度扰动能够在更短时间内达到触发分解的阈值。在内潮和季节性底层水体温度变化两种条件下,相同的有效热扩散系数下,模拟时间越长,升温越高,浅表层水合物分解量越大。此外,自然沉积物有效热扩散系数的空间差异受到孔隙度、饱和度及矿物组成等因素的控制^[62],因此即便在相同的温度扰动背景下,不同区域水合物储层仍可能表现出不同的分解敏感性。

4.4.3 水合物分布

(1) 地温梯度

在本研究中,地温梯度(G)并非直接设定,而

是由热流密度(q_e)与有效热导率(λ)的比值隐式确定,即 $G = q_e/\lambda$ 。南海北部地温梯度普遍介于 0.028~0.128 K/m 之间,热流密度介于 0.040~0.159 W/m² 之间^[63],在海洋沉积物中有效热导率通常介于 1.0~2.0 W/(m·K) 之间。在 4.1 节、4.2 节、4.3 节中(图 1 至图 3),设定 $G = 0.09 \text{ K/m}$,对应 $\lambda = 1.0 \text{ W/(m·K)}$ 、 $q_e = 0.09 \text{ W/m}^2$,此时 HOZ 分布于海底以下 0.078~0.672 m 处。为评估地温梯度变化对 HOZ 结构的影响,将 G 调整为 0.075 K/m($\lambda = 1.2 \text{ W/(m·K)}$ 、 $q_e = 0.09 \text{ W/m}^2$)和 $G = 0.1 \text{ K/m}$ ($\lambda = 1 \text{ W/(m·K)}$ 、 $q_e = 0.1 \text{ W/m}^2$)。结果显示,当 $G = 0.075 \text{ K/m}$ (较低梯度)时,HOZ 范围缩小至海底以下 0.079~0.204 m,厚度显著缩小,水合物顶部饱和度为 0.268 2,底部为 0.268 3,饱和度约由 0.32 降至 0.27。当 $G = 0.1 \text{ K/m}$ (较高梯度)时,HOZ 增厚至海底以下 0.077~0.819 m,水合物饱和度顶部为 0.357,底部为 0.358,整体升至约 0.36。

在模拟内孤立波对浅表层水合物分解影响中,3 种地温梯度条件(0.075、0.09、0.10 K/m)下,温度曲线均在平衡温度曲线左侧(图 6a、图 1a、图 6d),单次内孤立波扰动无法在沉积物中形成有效热量积累,因此 3 种工况下 HOZ 上下边界保持稳定且无分解发生。尽管地温梯度增大,对应的水合物饱和度为 0.27、0.32 和 0.36,呈升高趋势(图 6b、图 1b、图 6e),HOZ 厚度也随之增加(图 6c、图 1c、图 6f),但均不足以改变单次内孤立波短时扰动下水合物的稳定性。说明在分钟尺度的温压变化作用下,地温梯度仅对 HOZ 厚度及深度产生轻微调节,不足以影响分解过程。

在模拟内潮对浅表层水合物分解影响中,温度可在十几小时内有效传入浅层沉积物,3 种地温梯度工况下浅表层的温度曲线均超过平衡温度,触发水合物分解(图 7a、图 2a、图 7d)。随着地温梯度升高,水合

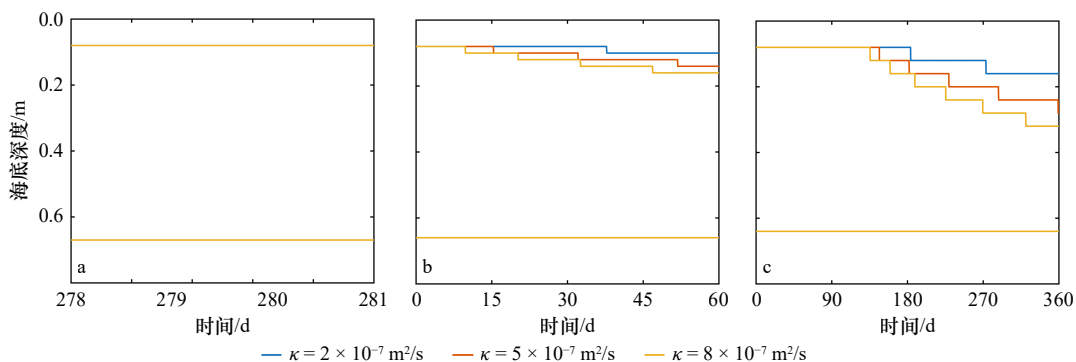


图 5 内孤立波作用下(a)、内潮作用下(b)和季节性底层水体温度变化下(c)HOZ 随 κ 的变化

Fig. 5 Simulated variations of the hydrate occurrence zone with thermal diffusivity (κ) under internal solitary waves (a), internal tides (b), and seasonal bottom-water temperature variations (c)

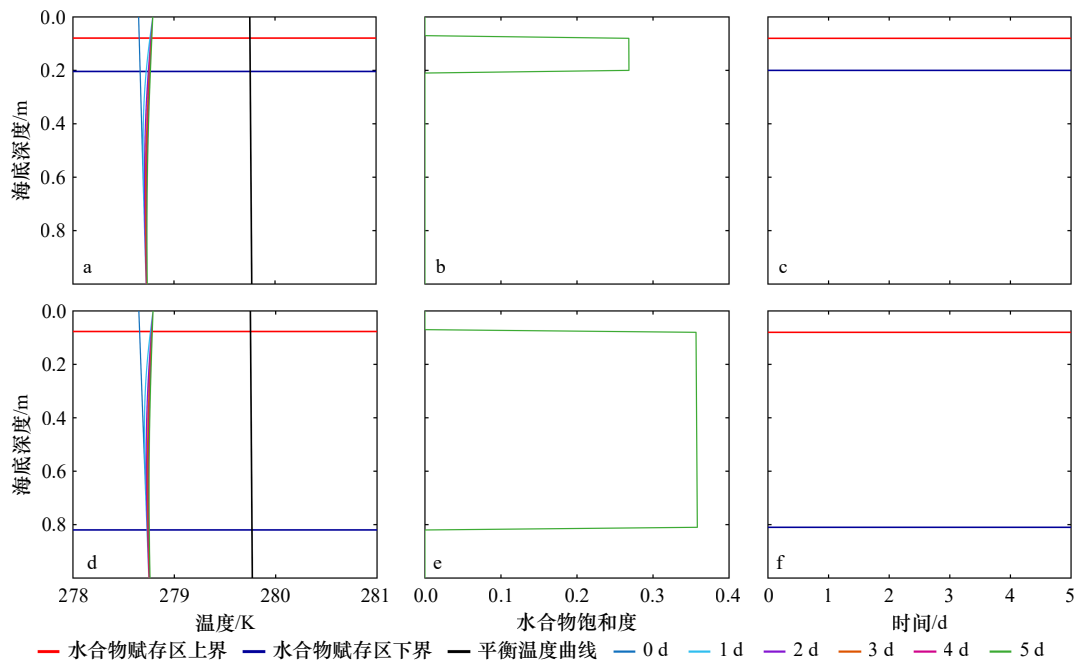
图6 内孤立波作用下不同 G 值对浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 6 Simulated results of the effects of different geothermal gradients on the dissociation of shallow gas hydrates under internal solitary wave forcing

a-c. $G = 0.075$ K/m 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. $G = 0.1$ K/m 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面

a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at $G = 0.075$ K/m; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at $G = 0.1$ K/m

物初始饱和度增大(图7b、图2b、图7e), HOZ 顶部位置略微上移, 由海底以下 0.079 m 到 0.078 m 再到 0.077 m, 底部随之下移, 厚度增加, 完成 2 cm 水合物分解的时间也略有提前, 分别是第 19.07 天、第 19.03 天和第 18.99 天, 但在 60 d 的模拟期内, 3 种工况的累计分解厚度均稳定在约 4 cm(图7c、图2c、图7f)。结果表明, 对于内潮引起的热扰动, 地温梯度主要通过改变水合物初始埋深影响分解的启动时间, 但对总体分解规模作用有限。

在模拟季节性升温对浅表层水合物分解影响中, 不同地温梯度条件下沉积物温度均在约第 120 天已超过平衡温度曲线, 浅表层水合物顶端开始分解(图8a、图3a、图8d)。随着地温梯度升高, 初始饱和度升高(图8b、图3b、图8e), HOZ 顶部略微上移、底部明显下移(图8c、图3c、图8f), 完成 2 cm 分解的时间分别是第 141.71 天、第 141.60 天和第 141.54 天。值得注意的是, 在 $G = 0.075$ K/m 条件下, 由于 HOZ 较薄、饱和度较低, 水合物在模拟至第 305 天已完全分解(图8c); 而在较高地温梯度条件下, 1 a 内累计分解厚度维持在 14 cm(图3c、图8f)。这一结果表明, 地温梯度通过调控 HOZ 厚度显著影响季节性温度扰动下的分解总量, 尤其在浅表层或裸露型水合物系统中, 较低梯

度可能导致季节性升温能够完全分解浅层水合物, 使其在自然条件下难以长期稳定。

(2) 甲烷通量

甲烷通量(q_m)影响 HOZ 底部的位置^[2]。南海北部甲烷通量的分布具有显著的空间差异性, 在九龙甲烷礁 F 站位、海马冷泉等冷泉活动区甲烷释放量高, 表现出高达数个数量级的强通量排放, F 站位甲烷通量高达 1.39×10^{-9} kg/(m²·s)^[47], 在非冷泉区, 沉积环境相对稳定, 甲烷的向上运移速率较慢, 其通量往往较低, 在神狐海域水合物区海底沉积物中甲烷通量为 3×10^{-12} kg/(m²·s)^[54]。在 4.1 节、4.2 节、4.3 节中, 选取了一个合理且较为理想的数值 $q_m = 5.5 \times 10^{-11}$ kg/(m²·s)^[47-48, 54-56], HOZ 分布于海底以下 0.078~0.672 m。当甲烷通量减小时^[54, 56], 沉积物孔隙水中甲烷供给减少, 进入水合物稳定带的甲烷通量降低, 从而限制水合物的形成规模, 使 HOZ 厚度减小。相反, 将甲烷通量增大至 6×10^{-11} kg/(m²·s) 时^[4, 47-48, 55], HOZ 顶部不变, 底部显著下移, 扩展至海底以下 14.953 m(图9a), HOZ 顶部饱和度为 0.32, 底部为 0.35, 饱和度随深度的增加而增大。这一现象表明, 甲烷通量通过增强孔隙水中甲烷的向下扩散与供应能力, 提高了深部沉积物满足水合物相平衡条件的可能性, 进而促进

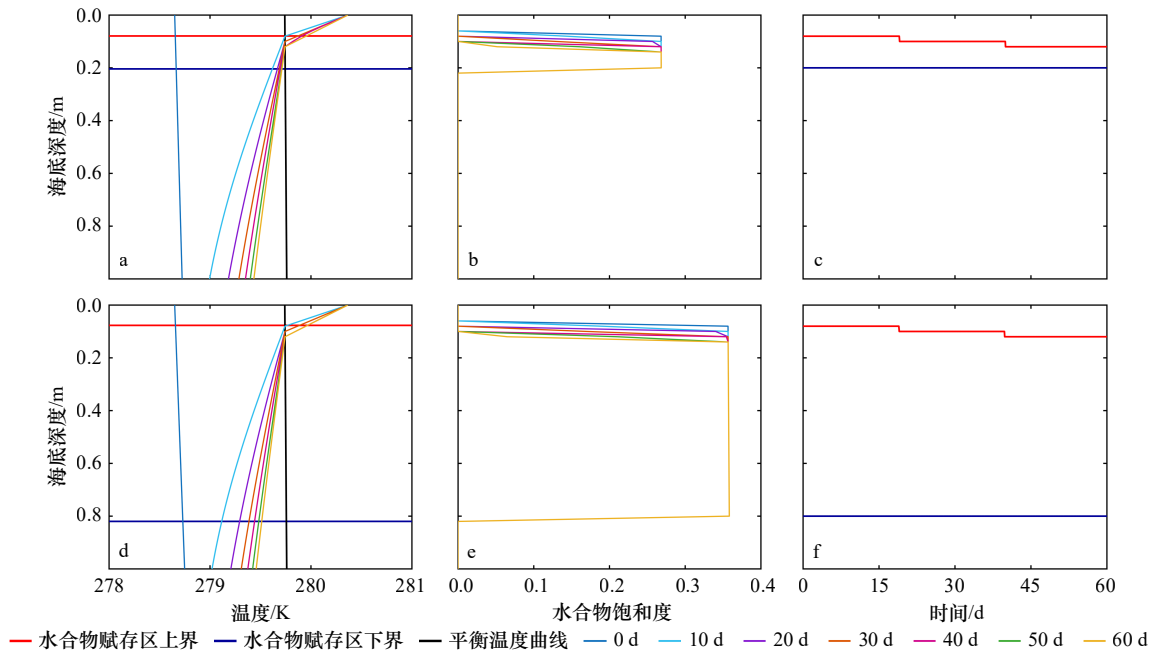


图 7 内潮作用下不同 G 值对浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 7 Simulated results of the effects of different geothermal gradients on the dissociation of shallow gas hydrates under internal tide forcing

a-c. $G = 0.075$ K/m 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. $G = 0.1$ K/m 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面

a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at $G = 0.075$ K/m; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at $G = 0.1$ K/m

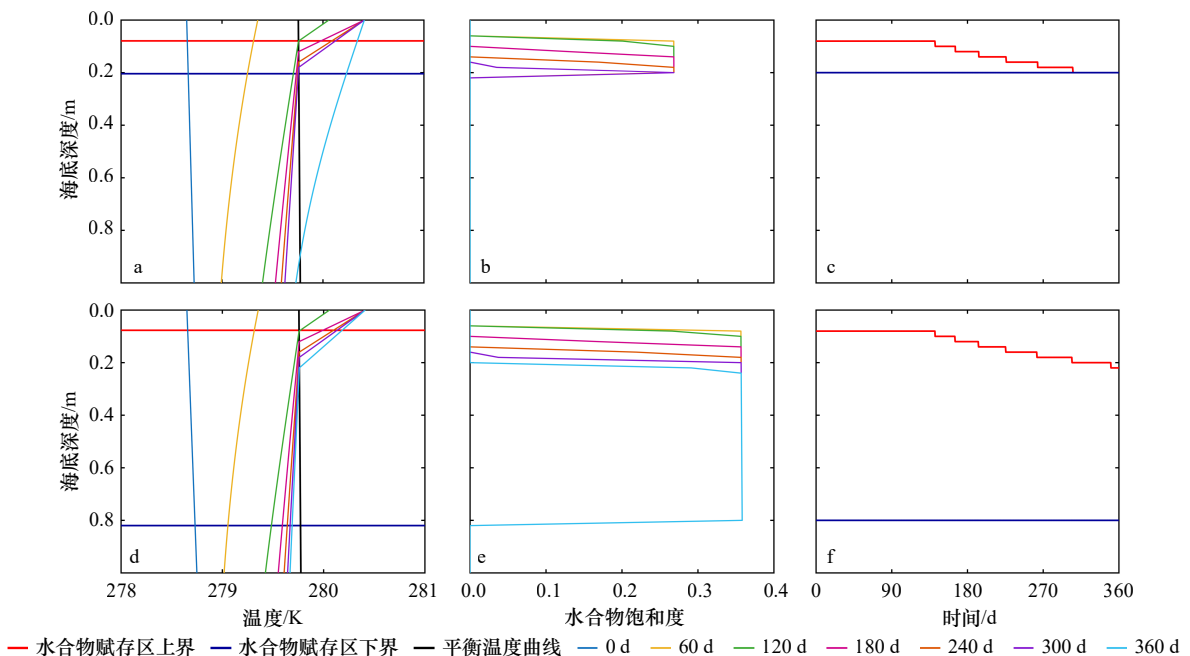


图 8 季节性底层水体温度变化作用下不同 G 值对浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 8 Simulated results of the effects of different geothermal gradients on the dissociation of shallow gas hydrates under seasonal bottom-water temperature variations

a-c. $G = 0.075$ K/m 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. $G = 0.1$ K/m 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面

a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at $G = 0.075$ K/m; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at $G = 0.1$ K/m

稳定带向深部扩展^[64]。尽管高甲烷通量显著加厚了HOZ,但3类温度扰动(内孤立波、内潮及季节性底层水体温度变化)下的水合物分解规律仍与4.1节、4.2节、4.3节保持一致(图1至图3),未表现出明显差异。其原因在于:甲烷通量控制着深部甲烷向稳定带的供给能力,从而决定HOZ下界的位置^[2],而内孤立波、内潮及季节性底层水体温度变化3类温度扰动最深影响至海底约12 m以上在浅层区域(图9g),因此对HOZ顶部影响更为显著,而对深部边界控制作用相对有限。此外,水合物分解所需的潜热吸收仅发生于温度实际达到相平衡条件的浅层水合物区。深部水合物在整个扰动期内温度未升至分解阈值,因此不会参与分解过程,也不会吸收潜热,对扰动响应不产生贡献。

(3)孔隙度及渗透性

孔隙度(ϕ)与渗透性(k)是调控沉积物储集能力与流体运移特征的关键参数,对水合物的形成、分布与热力学稳定性具有重要影响^[65]。孔隙度反映沉积物中孔隙空间的体积分数,决定水合物可赋存的空间规模,并影响孔隙水中甲烷的扩散与运移过程^[66];渗透性反映孔隙结构的连通程度及流体在沉积物中的渗流能力,是量化含水合物沉积系统中气体、水和热通量的关键因素^[67-68]。两者共同控制气体供给、水体交换与局部压力平衡,是水合物生成与分解过程的重要岩石物理控制因素^[67,69-70]。

在4.1节、4.2节、4.3节中, $\phi = 0.5$,HOZ位于海底以下0.078~0.672 m。为评估孔隙度变化对HOZ的影响,将 ϕ 调整为0.4和0.7,当孔隙度减小至0.4时,

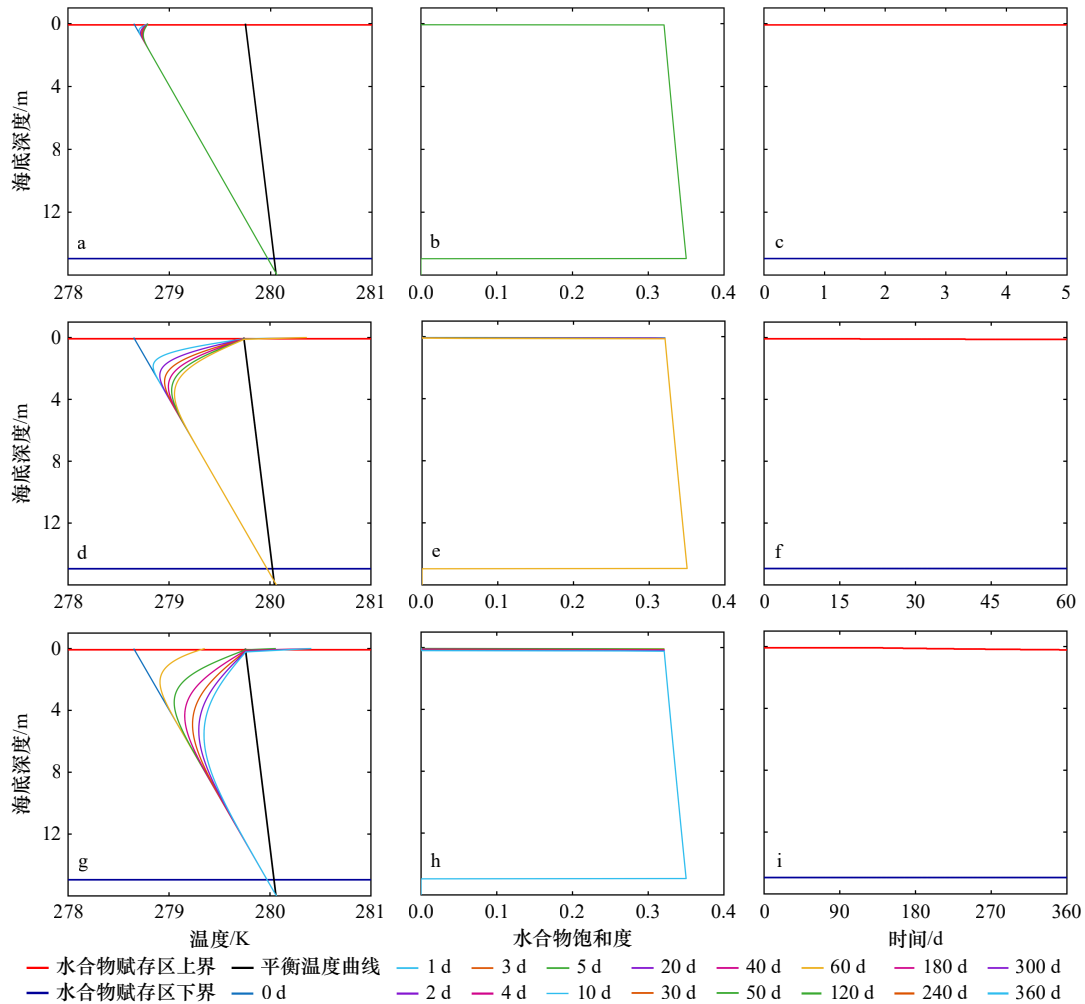


图9 $q_m = 6 \times 10^{-11} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 9 Simulated results of the effects of shallow gas hydrate dissociation at $q_m = 6 \times 10^{-11} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

a-c. 内孤立波作用下温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. 内潮作用下温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面;
g-i. 季节性底层水体温度变化作用下温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面
a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles under internal solitary wave forcing; d-f. temperature profiles,
hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles under internal tide forcing; g-i. temperature profiles, hydrate saturation profiles,
and hydrate occurrence zone profiles under seasonal bottom-water temperature variations

初始水合物饱和度升高至约 0.40, HOZ 顶部上移至海底以下 0.064 m, 底部略有下移至海底以下 0.674 m, 稳定带厚度略增。反之, 当孔隙度增大至 0.7 时, 初始饱和度降至约 0.23, HOZ 顶部下移至海底以下 0.105 m, 底部轻微上移至海底以下 0.669 m, 使水合物整体变薄。这反映出孔隙度升高意味着单位体积中固相水合物所占比例降低, 且孔隙水需在更大体积中达到溶解度平衡, 从而导致初始饱和度下降并使稳定带上界下移^[70]。

在模拟内孤立波对浅表层水合物分解影响中, 不同孔隙度下, 温度曲线均在平衡温度曲线左侧, 未超过平衡温度, 未出现分解现象(图 10a、图 1a、图 10d)。尽管孔隙度增大导致对应的初始饱和度分别是 0.40、0.32、0.23, 呈逐渐降低趋势(图 10b、图 1b、图 10e), HOZ 顶部下移且厚度减小(图 10c、图 1c、图 10f), 但短时扰动无法在沉积物中产生有效热量积累, 对水合物稳定性影响极弱。

在模拟内潮对浅表层水合物分解影响中, 不同孔隙度下, 热量可被有效传入浅表层, 温度超过平衡温度并触发浅表层水合物分解(图 11a、图 2a、图 11d)。随着孔隙度增大, 水合物初始饱和度降低(图 11b、图 2b、图 11e), HOZ 顶部向深部移动、厚度减小

(图 11c、图 2c、图 11f)。不同孔隙度下的分解速率表现出显著差异, 当 $\phi = 0.4 \sim 0.5$ 时, 60 d 内累计分解厚度约为 4 cm, 而 $\phi = 0.7$ 时分别完成 2 cm 分解的时间明显推后(图 11c、图 2c、图 11f)。孔隙度越大, HOZ 顶部位置越深, 有效热量越少, 水合物储集能力越弱, 导致分解所需的潜热吸收量减少, 从而使分解启动滞后、分解量降低。

在模拟季节性升温对浅表层水合物分解影响中, 不同孔隙度下, 沉积物温度均在 120 d 已超过浅表层平衡温度并引发浅表层水合物分解(图 12a、图 3a、图 12d)。随着孔隙度增大, 初始饱和度降低(图 12b、图 3b、图 12e)、HOZ 顶部持续深移。季节性升温作用下, 随着孔隙度增大浅表层水合物首次分解时间推迟, 1 a 模拟期内, $\phi = 0.4 \sim 0.5$ 时累计分解厚度约为 14 cm(图 12c、图 3c), 而 $\phi = 0.7$ 时降至 10 cm(图 12f), 表现出高孔隙度条件下浅表层水合物对内潮作用的敏感性减弱。原因在于孔隙度升高, HOZ 顶部下移, 浅层扰动难以使更深部的水合物温度达到相平衡温度, 从而显著削弱分解过程^[70], 同时, 水合物分解是强吸热反应, 当分解点位于较深处时, 周围沉积物的热容量更大, 散热路径更长, 潜热效应更明显^[71]。

南海水合物储层典型渗透率(k)约 $10^{-16} \sim$

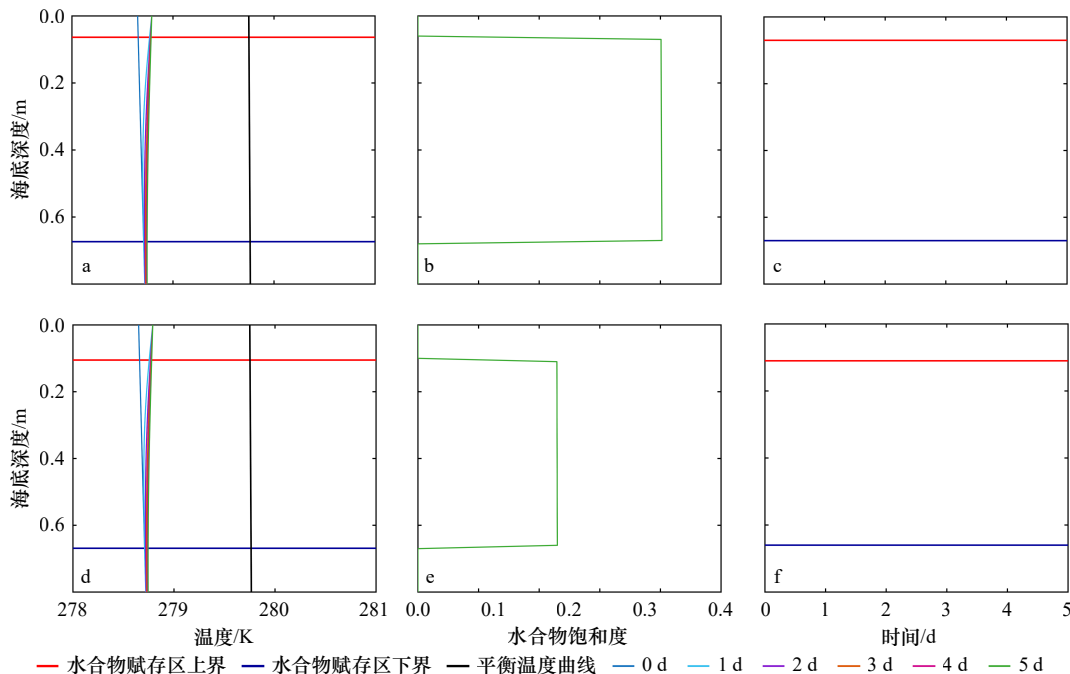


图 10 内孤立波作用下不同孔隙度对浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 10 Simulated results of the effects of different porosities on the dissociation of shallow gas hydrates under internal solitary wave forcing

a-c. $\phi = 0.4$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. $\phi = 0.7$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面

a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at porosity $\phi = 0.4$; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at porosity $\phi = 0.7$

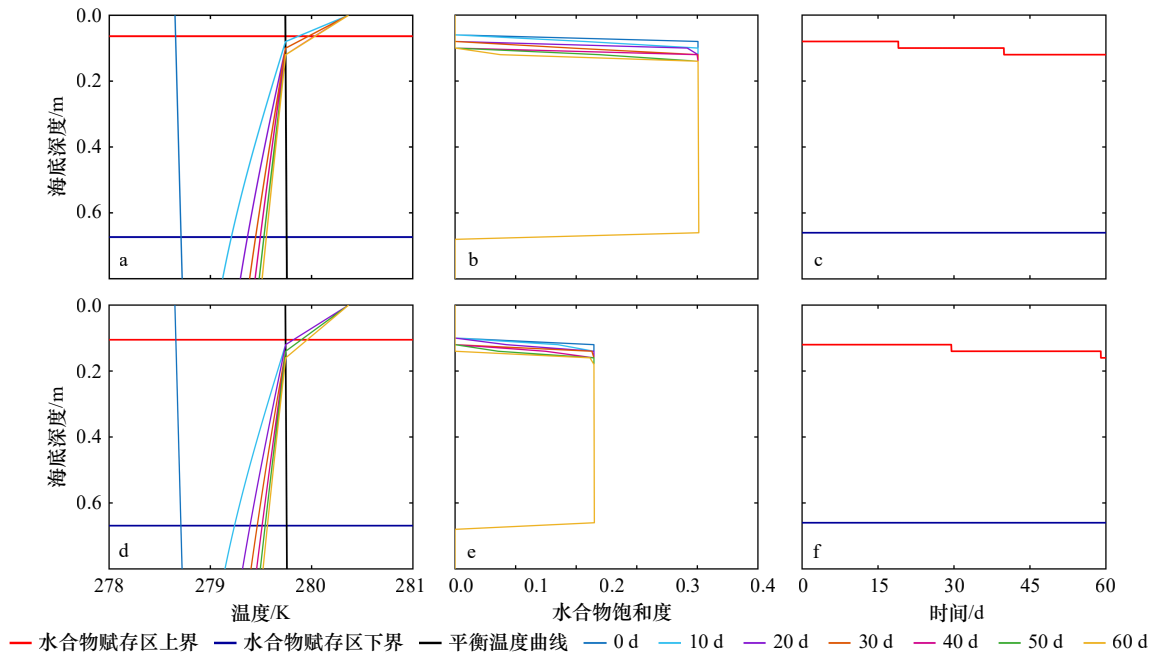


图 11 内潮作用下不同孔隙度对浅表层水合物分解影响模拟结果
 Fig. 11 Simulated results of the effects of different porosities on the dissociation of shallow gas hydrates under internal tide forcing

a-c. $\phi = 0.4$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. $\phi = 0.7$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面
 a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at porosity $\phi = 0.4$; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at porosity $\phi = 0.7$

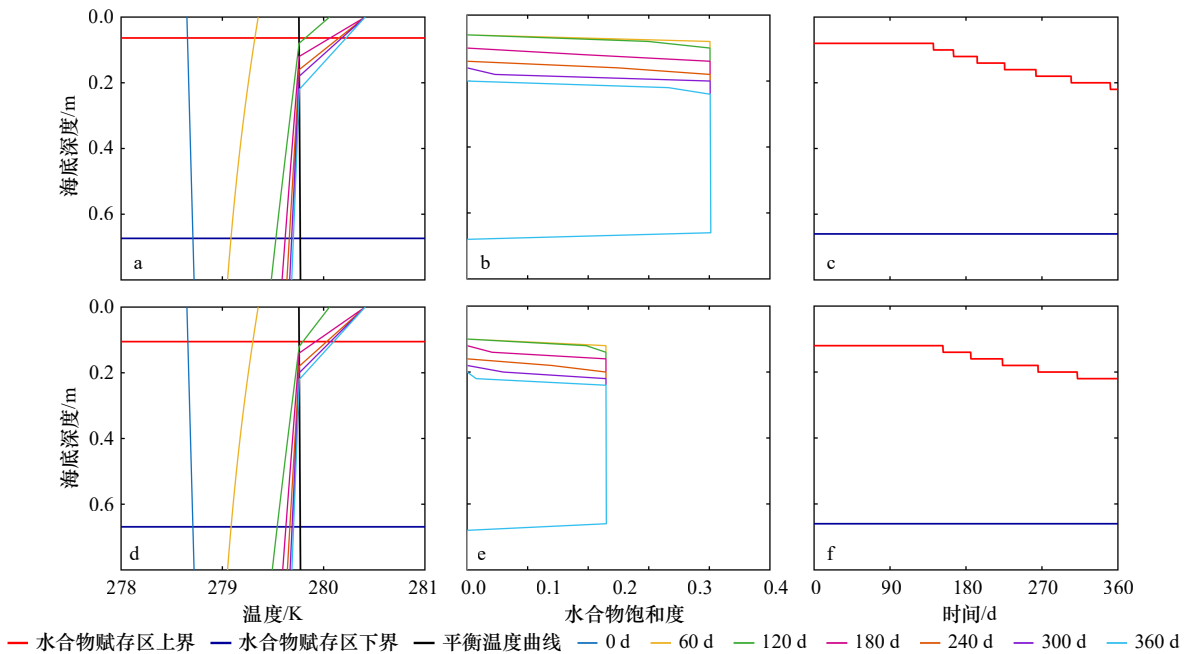


图 12 季节性底层水体温度作用下不同孔隙度对浅表层水合物分解影响模拟结果
 Fig. 12 Simulated results of the effects of different porosities on the dissociation of shallow gas hydrates under seasonal bottom-water temperature variations

a-c. $\phi = 0.4$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面、水合物赋存区剖面; d-f. $\phi = 0.7$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面
 a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at porosity $\phi = 0.4$; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at porosity $\phi = 0.7$

10^{-13} m^2 ^[51-53], 在 4.1 节、4.2 节、4.3 节中, 渗透率为 $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, 若将渗透率缩小至 $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 水合物位于海底以下 0.078~0.540 m, 而将渗透率扩大至 $1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 时, 水合物位于海底以下 0.078~0.673 m, 水合物饱和度均约为 0.32。在内孤立波、内潮及季节性底层水体温度变化作用下其变化规律均与 4.1 节、4.2 节、4.3 节保持一致(图 13 至图 15)。原因在于改变渗透率仅改变水合物底部的位置, 渗透率越高, 水合物底部越深, 水合物越厚, 其初始顶部位置不变, 分解规律不变。其次, 浅表层海洋沉积物渗透性本身极低, 流体难以在数值模拟所涉及的短时间尺度内实现有效运移, 不同渗透性条件下温度仍主要以热传导方式传播, 分解行为对渗透性变化不敏感^[66]。综合而言, 孔隙度与渗透性通过调节沉积物的储集能力、流体连通性与甲烷扩散特征, 影响 HOZ 的初始位置与饱和度水平。孔隙度升高会降低浅表层的水合物饱和度, 导致 HOZ 下移。孔隙度升高时, 单次内孤立波对浅表层水合物难以造成影响, 内潮和季节性升温扰动会减弱扰动分解速率, 降低累计分解厚度。渗透率升高会使 HOZ 底部下移, 影响水合物厚度, 但不影响水合物分解规律。因此, 孔隙度是控制浅表层水合物对热扰动响应强度的关键参数之一, 高孔隙度沉积物

可能在自然环境中具有更强的抗扰动能力, 而渗透性仅对 HOZ 厚度产生次级调节作用。

5 结论

本文基于一维热传导模型, 系统模拟了南海北部陆坡区域在内孤立波、内潮及季节性底层水体温度变化扰动下浅表层水合物的动态响应过程, 并通过多参数敏感性分析揭示了关键控制因素对水合物稳定性的影响机制。获取的主要成果及认识如下:

(1) 由持续时间约 20 min 的内孤立波作用引起的 0.142°C 温升和 472 Pa 压力降低的短时温压扰动不足以触发位于海底以下 0.078 m 的浅表层水合物分解, 内孤立波通常以波列的形式出现, 其对浅表层水合物分解的影响还有待进一步探究。

(2) 由内潮引起的 1.72°C 温升持续达 18 h, 在 60 天内向沉积物输入了足够热量, 使热扰动扩散至水合物层顶, 进而触发累计约 4 cm 的分解。说明内潮具有突破浅表层沉积物热缓冲的能力, 是可导致局部浅表层水合物分解的常见动力因素。

(3) 5 个月内 1.76°C 的季节性升温, 在 1 a 的模拟周期内导致累计分解厚度达 14 cm。因此, 较长时间的升温效应能持续推动水合物分解界面向深部迁移。

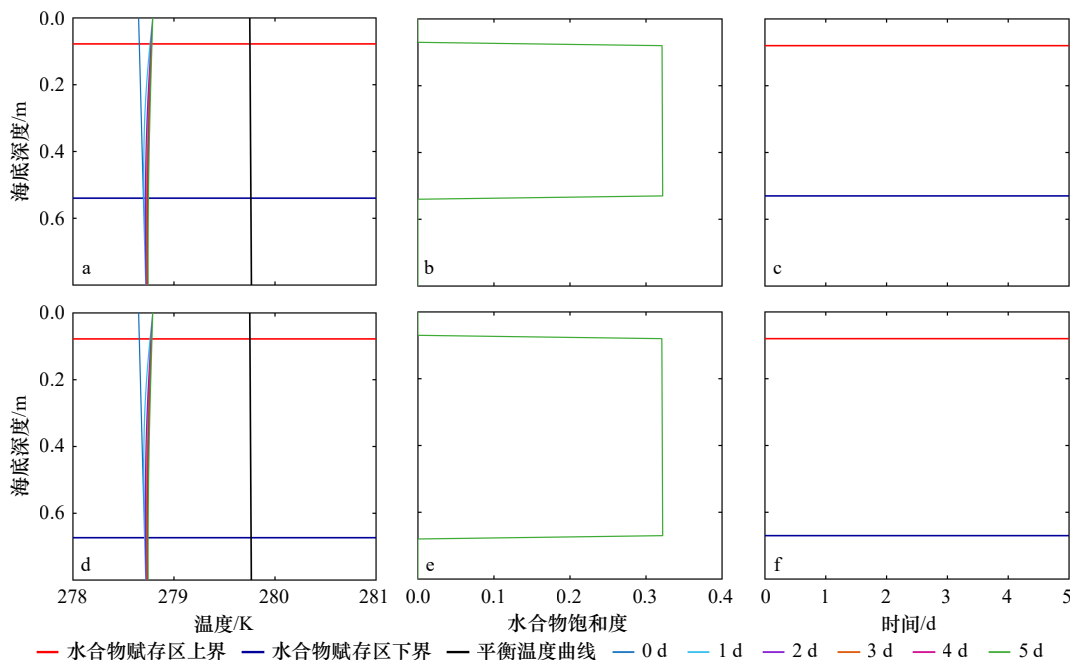


图 13 内孤立波作用下不同渗透率对浅表层水合物分解影响模拟结果

Fig. 13 Simulated results of the effects of different permeabilities on the dissociation of shallow gas hydrates under internal solitary wave forcing

a-c. $k = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. $k = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面

a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at permeability $k = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at permeability $k = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$

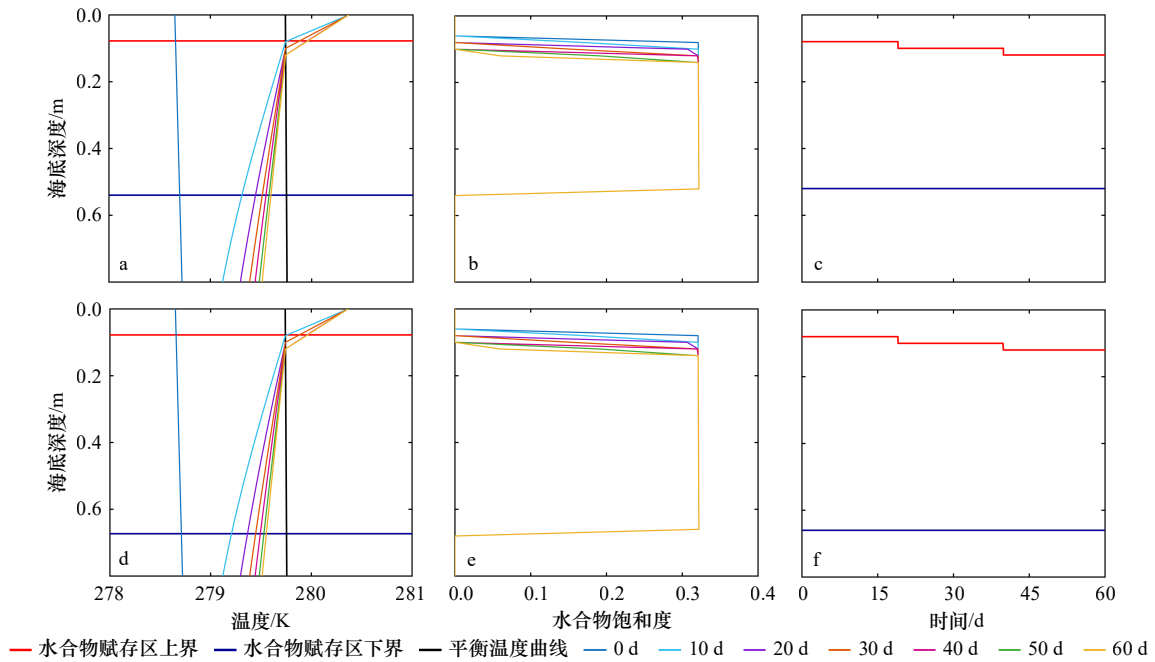


图 14 内潮作用下不同渗透率对浅表层水合物分解影响模拟结果
 Fig. 14 Simulated results of the effects of different permeabilities on the dissociation of shallow gas hydrates under internal tide forcing

a-c. $k = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. $k = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面
 a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at permeability $k = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at permeability $k = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$

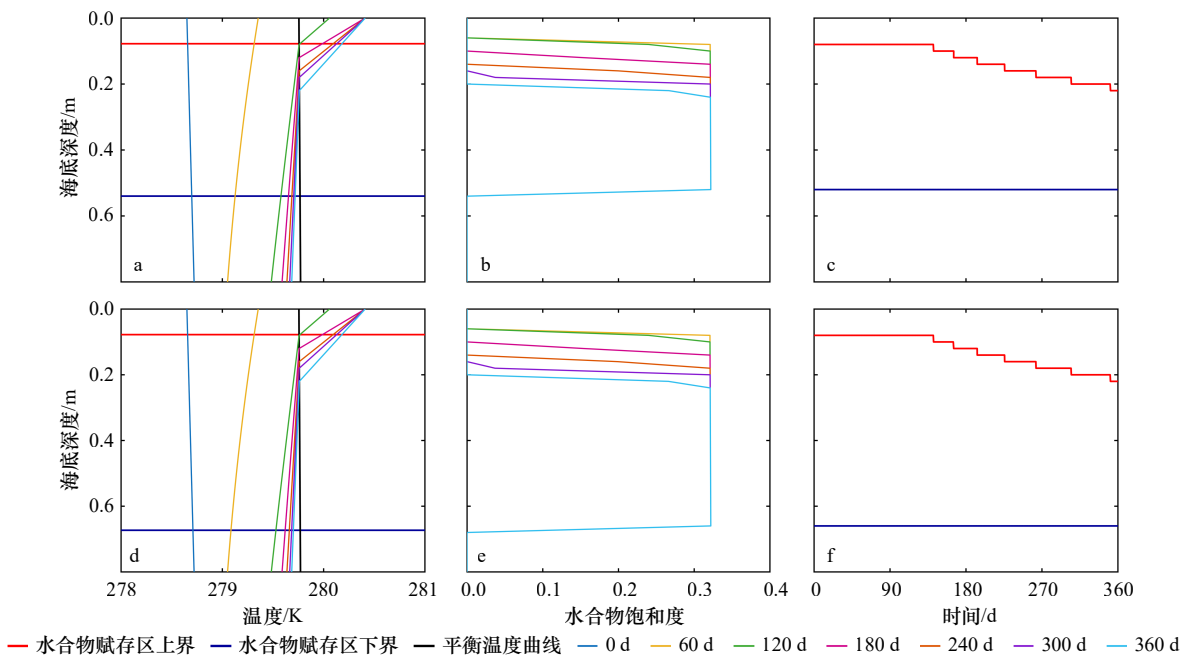


图 15 季节性底层水体温度变化下不同渗透率对浅表层水合物分解影响模拟结果
 Fig. 15 Simulated results of the effects of different permeabilities on the dissociation of shallow gas hydrates under seasonal bottom-water temperature variations

a-c. $k = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面; d-f. $k = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 时温度剖面、水合物饱和度剖面和水合物赋存区剖面
 a-c. Temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at permeability $k = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$; d-f. temperature profiles, hydrate saturation profiles, and hydrate occurrence zone profiles at permeability $k = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$

(4) 温度扰动强度直接决定浅层沉积物能否克服潜热效应并触及分解阈值, 温升幅度越大, 越容易突破水合物相平衡条件, 使分解提前发生。较大的有效热扩散系数可显著提高热扰动的向下传输效率, 使分解界面推进加速; 而较低的热扩散率使热量难以穿透沉积物上部冷却层, 延迟甚至抑制分解过程。热扩散能力与温升幅值共同控制水合物的热响应强度。

(5) 水合物初始分布特征对热扰动响应具有重要调节作用。地温梯度控制 HOZ 厚度及浅层温度结构, 地温梯度越低, 水合物稳定区越厚, 分解所需的热能越大, 高梯度情形下 HOZ 变薄, 长期温度扰动下水

合物可能完全分解; 甲烷通量主要影响 HOZ 底部位置, 增大甲烷通量使 HOZ 底部下移, 但 HOZ 顶部位置不变, 因此扰动可及的分解区域保持一致; 孔隙度影响初始饱和度与 HOZ 上界位置, 从而调节分解敏感性, 孔隙度增大使初始饱和度降低、HOZ 顶部下移, 导致分解阈值提高、分解延迟、总体分解厚度减少; 渗透率主要影响 HOZ 底部位置, 低渗条件下, 流体运移与对流效应可忽略, 热量仍以传导为主, 因此渗透率在 $10^{-16} \sim 10^{-13} \text{ m}^2$ 量级范围的变化不足以改变水合物分解规律。

参考文献:

- [1] Kvenvolden K A. Gas hydrates-geological perspective and global change[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(2): 173–187.
- [2] Xu Wenyue, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B3): 5081–5095.
- [3] 刘昌岭, 孙运宝. 海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 44–57.
Liu Changling, Sun Yunbao. Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 44–57.
- [4] Mestdagh T, Poort J, De Batist M. The sensitivity of gas hydrate reservoirs to climate change: perspectives from a new combined model for permafrost-related and marine settings[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 169: 104–131.
- [5] Ruppel C. Permafrost-associated gas hydrate: is it really approximately 1% of the global system?[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2015, 60(2): 429–436.
- [6] Lin Qi, Wang Jiasheng, Algeo T J, et al. Formation mechanism of authigenic gypsum in marine methane hydrate settings: evidence from the northern South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2016, 115: 210–220.
- [7] 宁伏龙, 梁金强, 吴能友, 等. 中国天然气水合物赋存特征[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 1–24.
Ning Fulong, Liang Jinqiang, Wu Nengyou, et al. Reservoir characteristics of natural gas hydrates in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 1–24.
- [8] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 1–14.
Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, Lu Jing'an, et al. New understandings on the characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 1–14.
- [9] Dickens G R. Rethinking the global carbon cycle with a large, dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213(3/4): 169–183.
- [10] 吴时国, 王吉亮. 南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考[J]. *科学通报*, 2018, 63(1): 2–8.
Wu Shiguo, Wang Jiliang. On the China's successful gas production test from marine gas hydrate reservoirs[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(1): 2–8.
- [11] Huang Y S, Hsu S K, Su C C, et al. Shallow gas hydrates off southwest Taiwan and their mechanisms[J]. *Marine Geophysical Research*, 2021, 42(1): 7.
- [12] Li Lun, Lei Xinhua, Zhang Xin, et al. Gas hydrate and associated free gas in the Dongsha Area of northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 92–101.
- [13] Lin Qi, Wang Jiasheng, Fu Shaoying, et al. Elemental sulfur in northern South China Sea sediments and its significance[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(12): 2271–2278.
- [14] Wang T K, Chen Tingren, Deng Jiaming, et al. Velocity structures imaged from long-offset reflection data and four-component OBS data at Jiulong Methane Reef in the northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 206–218.
- [15] Zhang Xin, Du Zengfeng, Luan Zhendong, et al. In situ raman detection of gas hydrates exposed on the seafloor of the South China Sea[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(10): 3700–3713.
- [16] Feng Jingchun, Wang Yi, Li Xiaosen, et al. Production performance of gas hydrate accumulation at the GMGS2-Site 16 of the Pearl River Mouth Basin in the South China Sea[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 27: 306–320.
- [17] Ruan Wenfeng, Hu Cong, Li Zhenghui, et al. Effects of the Last Deglaciation climate warming on hydrate dissociation in the northern South China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2024, 242: 103945.
- [18] 杨顶辉, Xu Wenyue. 盐度对甲烷气水合物系统的影响[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(10): 1370–1381.
Yang Dinghui, Xu Wenyue. Effects of salinity on methane gas hydrate system[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007,

- 50(11): 1733–1745.
- [19] 苏丕波, 梁金强, 付少英, 等. 南海北部天然气水合物成藏地质条件及成因模式探讨[J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 415–427.
Su Pibo, Liang Jinqiang, Fu Shaoying, et al. Geological background and accumulation models of gas hydrate reservoir in northern South China Sea[J]. *Geology in China*, 2017, 44(3): 415–427.
- [20] Dickens G R, O'Neil J R, Rea D K, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene[J]. *Paleoceanography*, 1995, 10(6): 965–971.
- [21] Phrampus B J, Hornbach M J. Recent changes to the Gulf Stream causing widespread gas hydrate destabilization[J]. *Nature*, 2012, 490(7421): 527–530.
- [22] Malakhova V V, Golubeva E N, Eliseev A V, et al. Estimation of possible climate change impact on methane hydrate in the Arctic Ocean[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 211: 012017.
- [23] Westbrook G K, Thatcher K E, Rohling E J, et al. Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(15): L15608.
- [24] Marín-Moreno H, Giustiniani M, Tinivella U, et al. The challenges of quantifying the carbon stored in Arctic marine gas hydrate[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 76–82.
- [25] 马瑞琦, 曹运诚, 何雯, 等. 南海北部东沙海域 GMGS2-16 站位 25 ka 以来水合物稳定带和流体超压变化[J]. *海洋地质前沿*, 2025, 41(1): 21–30.
Ma Ruiqi, Cao Yuncheng, He Wen, et al. Changes of gas hydrate stability zone and fluid overpressure over the past 25 ka at GMGS2-16 site in the Dongsha area of northern South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2025, 41(1): 21–30.
- [26] 刘杰, 刘丽华, 吴能友, 等. 南海东沙海域深水区末次冰期以来天然气水合物稳定带演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 146–155.
Liu Jie, Liu Lihua, Wu Nengyou, et al. Evolution of gas hydrate stability zone in the deep water of Dongsha sea area since the Last Glaciation Maximum[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(2): 146–155.
- [27] Huang Xiaodong, Chen Zhaohui, Zhao Wei, et al. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 30041.
- [28] Beardsley R C, Duda T F, Lynch J F, et al. Barotropic tide in the northeast South China Sea[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1075–1086.
- [29] Chen Shengli, Chen Daoyi, Xing Jiuxing, et al. Features of internal tides observed near the shelf break in the northern South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2019, 69(3): 353–365.
- [30] Xu Zhenhua, Yin Baoshu, Hou Yijun, et al. Variability of internal tides and near-inertial waves on the continental slope of the northwestern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(1): 197–211.
- [31] Hong Weili, Torres M E, Carroll J, et al. Seepage from an arctic shallow marine gas hydrate reservoir is insensitive to momentary ocean warming[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15745.
- [32] Berndt C, Feseker T, Treude T, et al. Temporal constraints on hydrate-controlled methane seepage off svalbard[J]. *Science*, 2014, 343(6168): 284–287.
- [33] 靳佳澎, 王秀娟, 邓炜, 等. 南海北部多类型天然气水合物成藏特征与赋存差异[J]. *地学前缘*, 2025, 32(2): 61–76.
Jin Jiapeng, Wang Xiujuan, Deng Wei, et al. Accumulation characteristics and occurrence differences of multitype gas hydrates in the northern South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(2): 61–76.
- [34] 邱燕, 杜文波, 鞠东, 等. 南海主要断裂(带)与构造分区[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2025, 45(1): 136–153.
Qiu Yan, Du Wenbo, Ju Dong, et al. Main faults and tectonic divisions in the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2025, 45(1): 136–153.
- [35] 郑金云, 代一丁, 刘军, 等. 南海北部陆缘地壳结构及其伸展破裂过程的差异性[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(3): 12–22.
Zheng Jinyun, Dai Yiding, Liu Jun, et al. Differences in continental crust structure and its extensional fracture process in northern South China Sea[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2022, 19(3): 12–22.
- [36] Hu Dengke, Zhou Di, Wu Xiangjie, et al. Crustal structure and extension from slope to deepsea basin in the northern South China Sea[J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(1): 27–37.
- [37] Huang Wei, Wang Pinxian. Sediment mass and distribution in the South China Sea since the Oligocene[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(11): 1147–1155.
- [38] 匡增桂, 任金锋, 邓炜, 等. 南海北部陆坡天然气水合物钻探发现及成藏特征[J]. *地学前缘*, 2025, 32(2): 1–19.
Kuang Zenggui, Ren Jinfeng, Deng Wei, et al. Drilling discoveries and accumulation characteristics of gas hydrate in the Northern Slope of South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(2): 1–19.
- [39] Huang Xiaodong, Huang Siwei, Zhao Wei, et al. Temporal variability of internal solitary waves in the northern South China Sea revealed by long-term mooring observations[J]. *Progress in Oceanography*, 2022, 201: 102716.
- [40] 陈喆. 南海北部陆坡区内潮波与内孤立波振幅研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
Chen Zhe. Study on the amplitude of the internal tide waves and internal solitary waves in northern continental slope of the South China Sea[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [41] Weber M E, von Stackelberg U, Marchig V, et al. Variability of surface sediments in the Peru basin: dependence on water depth, pro-

- ductivity, bottom water flow, and seafloor topography[J]. *Marine Geology*, 2000, 163(1/4): 169–184.
- [42] Chang E T Y, Chao B F, Chen Guanyu, et al. Internal tides recorded at ocean bottom off the coast of Southeast Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(5): 3381–3394.
- [43] 郭朴, 方文东, 于红兵. 近海陆架区内潮观测研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 617–624.
- Guo Pu, Fang Wendong, Yu Hongbing. Progress in the observational studies of internal tide over continental shelf[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(6): 617–624.
- [44] Mishonov A V, Boyer T P, Baranova O K, et al. World ocean database 2023[R]. Silver Spring: NOAA Atlas NESDIS 97, 2024.
- [45] Archer D, Buffett B, Brovkin V. Ocean methane hydrates as a slow tipping point in the global carbon cycle[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(49): 20596–20601.
- [46] Feng Dong, Cheng Ming, Kiel S, et al. Using *Bathymodiolus* tissue stable carbon, nitrogen and sulfur isotopes to infer biogeochemical process at a cold seep in the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 104: 52–59.
- [47] Cao Lei, Lian Chao, Ran Xiangbin, et al. *In situ* observations of methane dynamics in an active cold seep of the Formosa Ridge, the South China Sea[J]. *The Innovation Geoscience*, 2026, 4(1): 100192.
- [48] Di Pengfei, Li Niu, Feng Dong, et al. Quantifying the flux of dissolved inorganic carbon in surface sediments of the Haima cold seep area, northern South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2025, 279: 106454.
- [49] 季春生. 内孤立波对南海北部陆坡海底甲烷释放影响的原位观测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2021.
- Ji Chunsheng. In-situ observation of the effect of internal solitary waves on methane release from surface sediments on the northern slope of South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2021.
- [50] Williams E F, Ugalde A, Martins H F, et al. Fiber-optic observations of internal waves and tides[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2023, 128(9): e2023JC019980.
- [51] Li Chuanhui, Zhao Qian, Xu Hongjun, et al. Relation between relative permeability and hydrate saturation in Shenhu area, South China Sea[J]. *Applied Geophysics*, 2014, 11(2): 207–214.
- [52] Sun Jiaxin, Ning Fulong, Liu Tianle, et al. Gas production from a silty hydrate reservoir in the South China Sea using hydraulic fracturing: a numerical simulation[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(4): 1106–1122.
- [53] Ren Xingwei, Guo Zeyu, Ning Fulong, et al. Permeability of hydrate-bearing sediments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103100.
- [54] 冯俊熙, 杨胜雄, 梁金强, 等. 南海北部神狐东南海域沉积物孔隙水地球化学特征及其对天然气水合物的指示[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(7): 32–44.
- Feng Junxi, Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, et al. Pore water geochemistry in shallow sediments from southeastern Shenhu area of northern South China Sea and their implications for gas hydrate occurrence[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(7): 32–44.
- [55] 吴雪婷, 刘丽华, Haeckel M, 等. 南海北部深海浅层沉积物中甲烷生物地球化学过程数值模拟研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(3): 81–90.
- Wu Xueting, Liu Lihua, Haeckel M, et al. Simulation of the biogeochemical processes in methane-bearing surface sediments of Haiyang 4 Area, northern slope of South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(3): 81–90.
- [56] 丛晓荣, 曹运诚, 苏正, 等. 南海北部东沙海域浅层沉积物孔隙水地球化学示踪深部水合物发育特征[J]. *地球化学*, 2017, 46(3): 292–300.
- Cong Xiaorong, Cao Yuncheng, Su Zheng, et al. Gas hydrate occurrence in subsurface near the Dongsha area at northern South China Sea inferred from the pore water geochemistry of shallow sediments[J]. *Geochimica*, 2017, 46(3): 292–300.
- [57] Reagan M T, Moridis G J. Dynamic response of oceanic hydrate deposits to ocean temperature change[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C12): C12013.
- [58] 吴保祥, 雷怀彦, 段毅, 等. 沉积物体系中甲烷水合物平衡温度、压力条件实验模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(4): 22–24,28.
- Wu Baoxiang, Lei Huaiyan, Duan Yi, et al. Experimental simulation on equilibrium temperature and pressure of methane hydrate in sediment systems[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(4): 22–24,28.
- [59] Waite W F, Stern L A, Kirby S H, et al. Simultaneous determination of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat in sl methane hydrate[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(2): 767–774.
- [60] Cao Ying, Li Chunfeng, Yao Yongjian. Thermal subsidence and sedimentary processes in the South China Sea Basin[J]. *Marine Geology*, 2017, 394: 30–38.
- [61] Dai Sheng, Cha J H, Rosenbaum E J, et al. Thermal conductivity measurements in unsaturated hydrate-bearing sediments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(15): 6295–6305.
- [62] Cortes D D, Martin A I, Yun T S, et al. Thermal conductivity of hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B11): B11103.
- [63] Liao Weizhi, Lin A T, Liu C S, et al. Heat flow in the rifted continental margin of the South China Sea near Taiwan and its tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92: 233–244.
- [64] Feng Junxi, Yang Shengxiong, Wang Hongbin, et al. Methane source and turnover in the shallow sediments to the west of haima cold seeps on the northwestern slope of the South China Sea[J]. *Geofluids*, 2019, 2019: 1010824.
- [65] Hu Cong, Jia Yonggang, Duan Zhibo. Pore scale study of the permeability anisotropy of sands containing grain-coating and pore-filling hydrates[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 215: 110590.

- [66] Deng Wei, Kuang Zenggui, Daigle H, et al. Coupled geomechanical and thermodynamic controls on global distribution and morphology of gas hydrate in clay-rich marine sediments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(18): e2025GL116985.
- [67] Hu Cong, Liu Xiaolei, Jia Yonggang, et al. Permeability anisotropy of methane hydrate-bearing sands: insights from CT scanning and pore network modelling[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 123: 103568.
- [68] Hu Cong, Jia Yonggang, Duan Zhibo. The influence of inhomogeneous hydrate formation on permeability anisotropy of porous media[J]. *Geo-Marine Letter*, 2021, 41(1): 10.
- [69] Qin Xuwen, Lu Cheng, Wang Pingkang, et al. Hydrate phase transition and seepage mechanism during natural gas hydrates production tests in the South China Sea: a review and prospect[J]. *China Geology*, 2022, 5(2): 201–217.
- [70] Xu Jianchun, Bu Ziwei, Li Hangyu, et al. Permeability models of hydrate-bearing sediments: a comprehensive review with focus on normalized permeability[J]. *Energies*, 2022, 15(13): 4524.
- [71] Chen Chang, Zhang Yu, Li Xiaosen, et al. Study on the dissociation conditions of methane hydrate in silty-clayey sediments[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2025, 591: 114316.

Effects of internal solitary waves, internal tides, and seasonal bottom-water temperature variations on the dissociation of shallow gas hydrates in the South China Sea

Hu Cong^{1,2}, Li Xiaomei^{1,2}, Jia Yonggang^{1,2}

(1. *Ocean University of China, Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Engineering Geology and the Environment, Qingdao 266100, China*; 2. *Ocean University of China, Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China*)

Abstract: Shallow-buried gas hydrates are distributed along the continental slope margin of the northern South China Sea. These hydrates are characterized by shallow burial depths and thin overburden layers, rendering them sensitive to changes in seabed temperature and pressure and prone to dissociation. Focusing on internal solitary waves, internal tides, and seasonal bottom-water temperature variations in the northern South China Sea, this study employs a one-dimensional heat conduction model to simulate their effects on shallow subsurface hydrate dissociation and conducts a parameter sensitivity analysis. Results indicate that temperature-pressure perturbations induced by a single internal solitary wave propagate less than a few centimeters into the sediments, falling short of reaching the top of the Hydrate Occurrence Zone (HOZ) located approximately 0.078 m below the seabed, and are thus unlikely to trigger dissociation. In contrast, an internal-tide-induced temperature increase of 1.72 °C lasting 18 hours transfers heat to the HOZ top within 60 d, potentially leading to the dissociation of approximately 4 cm of hydrate. Seasonal bottom-water warming with an amplitude of 1.76 °C persisting for five months drives the dissociation front downward continuously over one year, resulting in a cumulative dissociation thickness of up to 14 cm. This significant impact demonstrates that the effect of sustained warming is substantially stronger than that of transient perturbations. Furthermore, parameter sensitivity analysis reveals that temperature amplitude and effective thermal diffusivity jointly control the propagation depth of thermal perturbations and the dissociation rate. The initial distribution characteristics of hydrates also significantly influence the dissociation process; specifically, the geothermal gradient, methane flux, and permeability determine the positions of the HOZ upper and lower boundaries, whereas porosity regulates the initial saturation and dissociation sensitivity. This study provides a critical basis for evaluating and predicting the stability of shallow subsurface hydrates and the associated risks of methane release.

Key words: internal solitary waves; internal tides; seasonal bottom-water temperature variations; one-dimensional heat conduction model; hydrates; South China Sea