基于 CEL 算法的神狐海域泥火山内部物质运动过程数值模拟

刘晓艳[1], 孙永福[1,2*], 宋玉鹏[1], 修宗祥[1], 李西双[1], 宋丙辉[1]

（1. 自然资源部 第一海洋研究所，山东 青岛 266061；
2. 国家深海基地管理中心，山东 青岛 266237）

摘　要：以南海北部神狐海域地震剖面识别的泥火山为基础，基于耦合的欧拉-拉格朗日算法（CEL）模拟了泥火山内部物质的运动过程。通过不同阶段的对比分析，研究探讨了泥火山的形成机理，总结了泥火山内部物质的运动特征及规律。数值模型的结果显示泥火山形成过程中物质的运移具有明显的阶段性变化，展现了物质在运移时的应力与应变的不规则变化规律，本文根据这些变化分析了泥火山形成过程中应力、应变与能量的强度变化趋势。地层在物质向上刺穿过程中受力分布表现出明显的不均匀性，中间部位的突起破裂引起两侧地层的隆升。由模拟结果提供的泥火山形成过程中内部物质的特征，可以推动对泥火山形成机制及过程的进一步认识，同时也能对深部底辟构造以及油气迁移提供理论指导。

关键词：神狐海域；泥火山；CEL 算法；刺穿
中图分类号：P736　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671-6647（2024）02-0325-12
doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230208001
引用格式： 刘晓艳, 孙永福, 宋玉鹏, 等, 2024. 基于 CEL 算法的神狐海域泥火山内部物质运动过程数值模拟[J]. 海洋科学进展, 42(2): 325-336. LIU X Y, SUN Y F, SONG Y P, et al, 2024. Numerical simulation of substance motion in mud volcano in the Shenhu area based on CEL algorithm[J]. Advances in Marine Science, 42(2): 325-336.

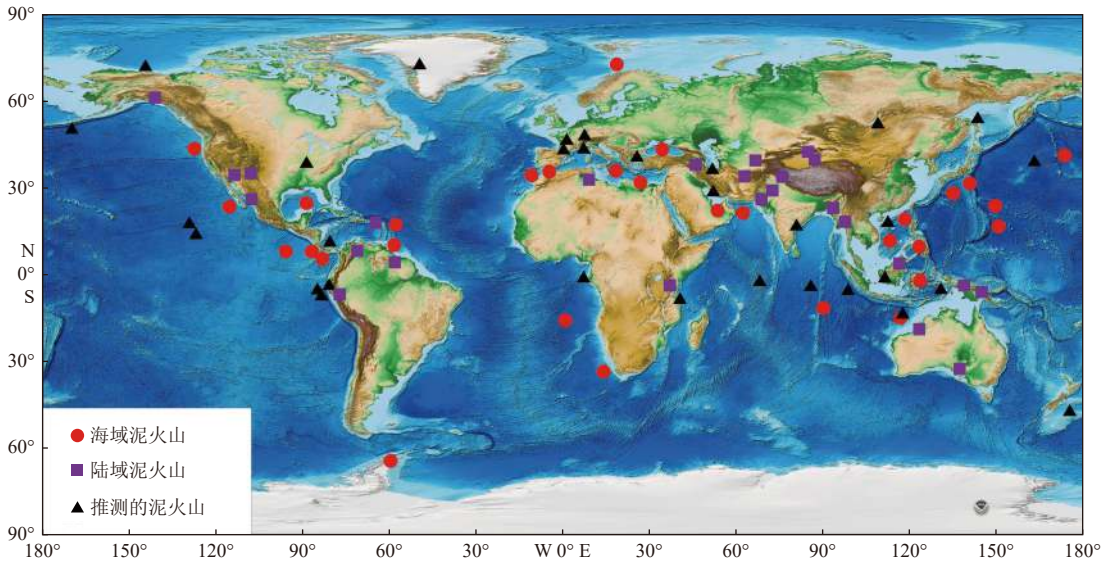
海底泥火山是地球深部物质在密度倒置产生的差异重力作用、超压作用、构造挤压应力等因素下发生上拱挤入上覆地层，并使得上覆地层弯曲进而穿透上覆地层的一种地质现象，属于流体逸散系统的一种，也称为海底泥丘、泥拱，其高度可达数百米，宽度达数千米，一般可见泥浆流等溢出（Dimitrov, 2002）。泥火山一般具有正地貌特征，主要包括 2 个部分：内部的流体通道和外部被流体破坏的丘状建造部分（Dimitrov, 2002; Kopf, 2002）。泥火山内部物质运移的主要通道称为中央通道，在靠近地表的位置会产生一系列的伴生通道（闫大伟等, 2021）。喷口处泥火山物质的溢出除了受到海水的影响之外一般不会受到空间的限制，因而其平面形态一般为圆形或者椭圆形。泥火山外部形态多样，常见有圆锥形、平坦形和塌陷形三种，与喷发物黏度、供给通道有关（刘杰等, 2015）。

泥火山在全球范围内广泛分布（图 1），除陆地外，已在世界上 20 多个海域发现了泥火山，目前已发现的泥火山数量达 2 000 多个，据估计大陆斜坡和深海区可能还会有 5 000～10 000 座泥火山（Milkov, 2000; Milkov et al, 2002; Milkov, 2005b; 刘杰等, 2015）。海底泥火山在里海、黑海、挪威海、地中海、巴巴多斯近海、尼日利亚近海、墨西哥湾和我国东海、南海等海域均有发现（沙志彬等, 2005）。我国南海是东亚大陆边缘最大的边缘海，富含丰富的油气资源，构造活动强烈，已发现大

收稿日期：2023-02-08　　**网络首发日期：**2024-01-19
资助项目：国家自然科学基金项目（41876066）
作者简介：刘晓艳（1998—），女，硕士研究生，主要从事工程地质环境方面研究. E-mail: xyliu@fio.org.cn
*** 通信作者：**孙永福（1964—），男，研究员，博士，主要从事海洋工程地质与灾害地质方面研究.
E-mail: sunyongfu@fio.org.cn

（胡筱敏　编辑）

量的泥火山群的存在(南海北部台西南盆地、珠江口盆地以及中建南盆地等)(Dimitrov, 2002)。各地泥火山有不同的喷发周期，喷发物有不同的形态、成分、来源和年龄，但一般都发育在沉积速率较快和有横向挤压构造的盆地中。泥火山作为海底环境中连接岩石圈和水圈的通道，物质在其中的转移为我们提供了研究深部地质条件和过程的媒介(李昂等, 2020; 万志峰等, 2022)。不同泥火山不仅会形成不同形态、成分和年龄的沉积物，而且其内部的物质来源深度也有很大的区别，深度一般在 2～15 km(Milkov, 2005b)。泥火山与油气成藏有着密切的联系，如莺歌海盆地的泥火山发现了大量的流体渗漏冷泉区(李列等, 2006)。全球有很大一部分油气田是在地表有油气渗漏的区域发现的，泥火山的演化往往伴随着油气的生成、运移、破坏以及天然气水合物的成藏，因此泥火山是寻找油气及天然气水合物资源的重要标志(陈多福等, 2005; 沙志彬等, 2005; Egorov et al, 2010; Franek et al, 2014)。泥火山代表的是现代地壳运动和新构造活动，影响油气钻探和管道的铺设，大陆边缘的泥火山还容易引起斜坡失稳从而对海底基础设施造成损害，容易引发工程事故(Mellors et al, 2007; Manga et al, 2009; Kholodov, 2013; Wan et al, 2022)。此外，甲烷造成的温室效应要比二氧化碳强 20 多倍，据估算，每年全球泥火山的甲烷排放量可达 500 万 t，加剧了全球的温室效应(Dimitrov, 2002; Milkov et al, 2005a; Sauter et al, 2006; 万志峰等, 2022)。因此，泥火山的研究对深部地层构造、油气勘探、全球变暖与地质灾害等问题有着重要的研究意义。



注：泥火山位置信息来自文献 Milkov(2000, 2005b)、Milkov 等(2002)和 Kopf(2002)。

图 1 泥火山全球分布

Fig. 1 Global distribution of mud volcanoes

目前，对泥火山特征的研究往往采用地质取样、多波束成像、地震反射、侧扫声呐等高精度地球物理手段，但这些仅限于对泥火山的分布与形貌、周边土层结构等的研究。地球化学研究则主要针对的是泥火山喷出物(天然气、沉积物、水等)的测试分析，但对泥火山形成过程中流体喷溢过程的模拟研究较少。泥火山的形成机制是当今研究的热点与难点，其触发因素、内部油气渗漏的“聚”和“散”过程仍有待深入研究(Milkov et al, 2005a; 万志峰等, 2022)。有学者在传统砂箱模拟设备上加载流体输入系统，对不同流体压力和构造环境下泥火山/泥底辟的形成与演化进行了物理模拟实验，建立了不同地质条件下泥火山/泥底辟的流体泄露模型(Wan et al, 2021)。但砂箱模拟系统尺度较小，所需的力较小，无法还原海底复杂的原位环境，并且不能呈现泥火山形成过程中泥浆流体的应力、应变等的细节。也有学者通过数值模拟的方式对泥火山的喷发过程以及泥火山油气泄漏与

水合物聚集的关系进行了研究(Zoporowski et al, 2009; Zhang et al, 2013)。然而，泥火山/泥底辟的形成机制，特别是内部物质的迁移过程仍未明确。

本文基于耦合的欧拉-拉格朗日算法(coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)，在前人(Zoporowski et al, 2009; Zhang et al, 2013; Wan et al, 2021)对泥火山形成机理的研究基础上，以南海神狐海域的地层物理力学特征为研究条件，结合真实泥火山特点，对泥火山的形成过程进行了模拟。在此基础上分析了泥火山形成过程中内部物质迁移时的应力、应变以及地层形态的变化，为今后泥火山地形成机制研究提供参考依据。

1　海底泥火山的成因机制与触发因素

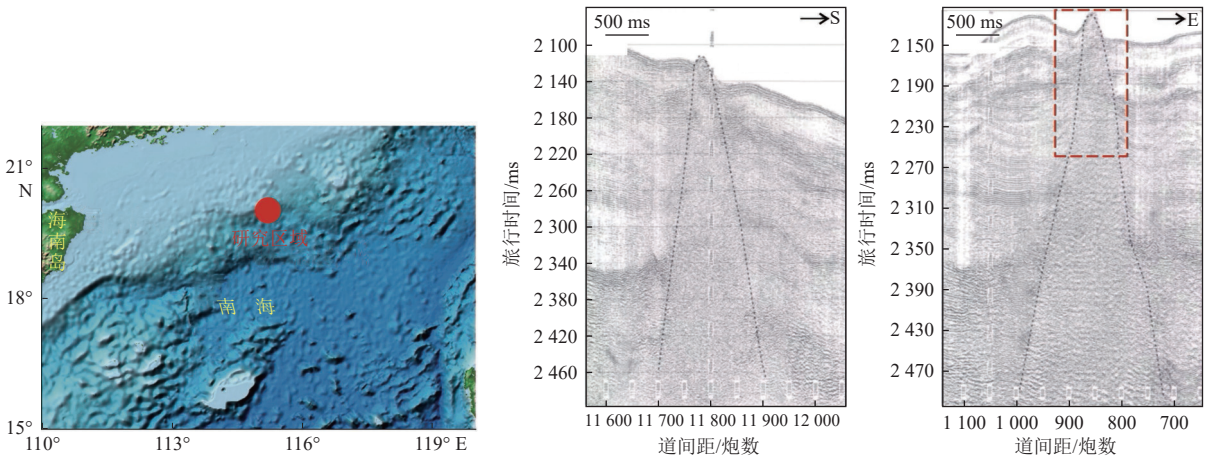
泥火山究竟是由于拉张、走滑等构造活动造成的深层泥质流体沿断裂喷出，还是深层超压流体泥底辟活动刺穿上覆岩层并突破海底(地表)形成，或是由于地震、水文地质等其他因素触发，均有待深入研究。从泥火山的形成机制来看，导致泥火山形成的原因可分为 4 类：地质原因、构造原因、地球化学原因和水文地质原因(Milkov et al, 2005a; 万志峰等, 2022)。泥火山活动在构造空间上的分布与砂岩侵入、泥(盐)底辟、气烟囱有关，这些活动是由于长期的碰撞或挤压构造造成的。这些活动通常发生在挤压应力较强的增生楔，如地中海海岭、东加勒比海的巴巴多斯近海、西班牙西南的加的斯湾、南开海槽以及台湾西南海岸，还有一些出现在拉张盆地，如黑海和第勒尼安海东南部；有些泥底辟和泥火山与拉张和挤压背景有关系，如阿尔沃兰海域西部(王浩宇等, 2018)。

泥火山触发形成的基本机制有 2 种：①在垂直应力或横向挤压、拉张作用下，下覆地层刺穿上覆地层形成火山构造；②在液化作用下，泥流沿着断层和破碎带向上迁移(王浩宇等, 2018)。深部超压是第一种机制中泥火山形成的必要条件，是受到外界环境的影响，或者是由于沉积物在形成过程中受到内部压力的作用而产生的。触发条件包括地震、火山活动、海啸、风暴、重力滑塌或滑坡、外界天体撞击等。多种因素导致了超压的形成，包括：泥岩的压缩程度、水热增压的程度、有机物的分解、压力的传导、地下水的渗透、密度的变化、构造的压缩、气体的流动、黏土矿物的脱水、地层的上升或下沉，以及等势面的不规则形态等。在强挤压的背景下，压实不均衡和生烃作用是可独立产生大规模超压的 2 种主要机制。通常，地层与外界是相互联系的一个开放体系。岩石的结构和孔隙的存在使得地面上的静水压力得以维持，这种压力是由其自身的重量和稳定性决定的，它是一种正常的地层压力。一些特殊情况下，地层水不但要承受静水压力，还要承受一部分静地压力，从而形成超压(Zhang et al, 2013; 万志峰等, 2022)。综上，不难看出这些泥火山的形成原因具有一定的关联性(Milkov, 2005b)，尽管针对具体泥火山形成机制的问题未有定论，但可以确定的是，泥火山的形成都离不开深部气体在压力作用下的向上运移，本文则是基于超压存在的条件下，模拟泥火山内部物质运动的过程。

2　研究区域地质背景

我国海域已发现以及推测存在的泥火山主要分布在南海北部的大型油气田盆地，如南海大陆边缘西北部走滑伸展型的莺歌海盆地以及大型断陷裂谷的琼东南盆地、珠江口盆地及台西南盆地(张伟, 2016)。其中，珠江口盆地天然气水合物勘探程度及泥火山的研究程度均不及南海其他区域，且神狐海域沉积物具有高含水量、低密度、高孔隙比和流动塑性状态的特征，地下蕴含软弱层，易形成泥火山。本文的研究区域选定为神狐海域(图 2a)，以南海神狐海域地质条件以及地震剖面识别的某小型泥火山(地震剖面图见图 2b)为背景，模拟了泥火山形成的全过程。神狐海域位于珠江口

盆地中最大的沉积凹陷区白云凹陷的中心区，水深在上千米(张伟, 2016)，泥火山多位于浅表层。地质历史时期，神狐海域经历了珠琼运动、南海运动和东沙运动构造运动，表现为由陆向海的演化过程(梁永兴等, 2013)。该区域海底地质构造复杂，主要发育有海丘、海谷、冲蚀槽、冲蚀沟以及17条SSE走向的陆坡限制型海底峡谷(Ding et al, 2013; Su et al, 2019; 杨承志等, 2020)，广泛发育断裂-褶皱构造，高角度的断裂和垂向裂隙系统有利于深部天然气流体的向上迁移(谢蕾等, 2013)。神狐海域是典型的“下断上坳”的凹陷结构，海底内部构造发育极为复杂，区域大尺度断层、小尺度断层以及第四系拆离断层等流体运移通道极其发育(Sun et al, 2012; 梁永兴等, 2013; Yang et al, 2015)，同时新构造运动也会诱发海底深部形成规模巨大的泥底辟和气烟囱活动带，这些都构成了物质运移的重要通道(李刚等, 2014)。



(a) 神狐海域位置 (b) 神弧海域某小型泥火山地震剖面

注：图b中红色虚线框内为该小型泥火山浅层部分。

图 2 研究区的主要位置与地震剖面

Fig. 2 The location and seismic profile of the study area

中国地质调查局广州海洋地质调查局已在神狐海域进行了多次水合物钻探调查，取得了大量的水合物样品，证实了千亿立方米级天然气储量的水合物藏的存在(Wang et al, 2014; Yang et al, 2017)。在该海域，由于长期受到构造挤压的应力，大量的陆地碎片以及高沉积充填速率，加快新生代和上生代的巨厚泥页岩沉积充填过程，导致了欠压实的现象。有机质的成熟生烃，使得这一地区的气候变得极其炎热，甚至出现了极端的高温超压，为泥火山、泥底辟等物质渗漏的形成提供了重要的物质和动力来源(张启明等, 2000; 张伟等, 2017; 苏丕波等, 2021)。因此，利用神狐海域的地层参数进行模拟，能够更直观地展示超压存在下泥火山的形成过程。

3 研究方法与模型的构建

CEL算法最早由Noh(徐文杰, 2012)提出，该方法是欧拉与拉格朗日相互结合的一种耦合有限元算法，结合了这2种算法的优点，即网格不发生扭曲，并能准确地计算材料边界，在解决大变形冲击、碰撞等问题方面有明显优势(Zhang et al, 2013; 齐贺阳等, 2022)。在该方法中，网格点既可以随物质点一起运动，也可以在空间中固定不动，甚至网格点可以在一个方向固定，而在另一个方向上随物质一起运动。

CEL算法的控制方程由连续方程、动量守恒方程和能量守恒方程组成，控制方程需在欧拉坐标

下进行时间积分。Abaqus/Explicit 可以通过中心差分格式对时间项进行积分，从而直接获得未知解，而无需进行复杂的迭代操作。显式计算是条件稳定的，数值的稳定性需要引入临界时间步 Δt_{crit} 来保证。Δt_{crit} 取决于单元特征尺寸 L_{e} 和波速 C_{d}，在每个时间步，Δt_{crit} 可以通过下式获得：

$$\Delta t_{\mathrm{crit}} = \frac{L_{\mathrm{e}}}{C_{\mathrm{d}}}。\tag{1}$$

在 CEL 算法中，欧拉材料通过欧拉体积分数（Eulerian Volume Fraction, EVF）跟踪各材料经过网格的状态，分割后的所有欧拉单元需通过指定 EVF 值代表其充满欧拉材料的类型以及比例 。如果 EVF 值=1，则表示该欧拉单元被欧拉材料完全充满 ；当 EVF 值=0 时，代表该欧拉单元中将自动被“空”材料占据，“空”材料没有任何材料参数，即虚拟材料，可看作空域（李刚等, 2014）。

本研究采用 Abaqus 进行计算分析，以泥火山形成的土质条件、地质原因，即异常高深部地层压力以及水合物分解形成泥浆释放的巨大压力导致上覆土层破裂为基础，在模型建立过程中设置 3 层地层，并在底部设置 1 个压力值，包含地层压力以及水合物分解释放的压力。为了更加贴近神狐海域的真实地质环境，搜集了大量文献，根据文献数据，对相关地层设置对应的密度、弹性模量、内摩擦角、内聚力、泊松比等参数（表 1）。本模型的构建参考神狐海域的 1 个小型泥火山，模拟其浅层部分（图 2b）。该泥火山模型设置水深为 1 200 m，模型中地层的深度为 135 m，模型从上到下分别为海水、粉土与粉质黏土互层、黏土质粉砂、粉质黏土。其中粉土与粉质黏土互层深度设置为 45 m，黏土质粉砂深度设置为 44 m，粉质黏土层深度设置为 46 m，地层总厚度为 135 m，模型水平方向设置为 2 000 m，泥火山活动区域水平结合实际设置为 1 000 m（图 3）。

表 1　南海神狐海域泥火山区域沉积层的土体力学参数

Table 1　Soil mechanical parameters of mud volcano sedimentary layer in the Shenhu area of the South China Sea

土　层	厚度/m	天然密度 ρ/(g·cm^{-3})	弹性模量/Mpa	内摩擦角 φ/(°)	内聚力/kPa	泊松比	重度/(N·m^{-3})
粉土与粉质黏土互层	45	1.65	38.56	22.5	12	0.33	16.2
黏土质粉砂	44	1.65	37.88	25.0	38	0.35	16.2
粉质黏土	46	1.66	42.20	22.1	58	0.35	16.3

注：地层参数信息来自文献陈俊仁等（1994）、陈聪等（2015）、李佳杰（2019）和王辉等（2022）。

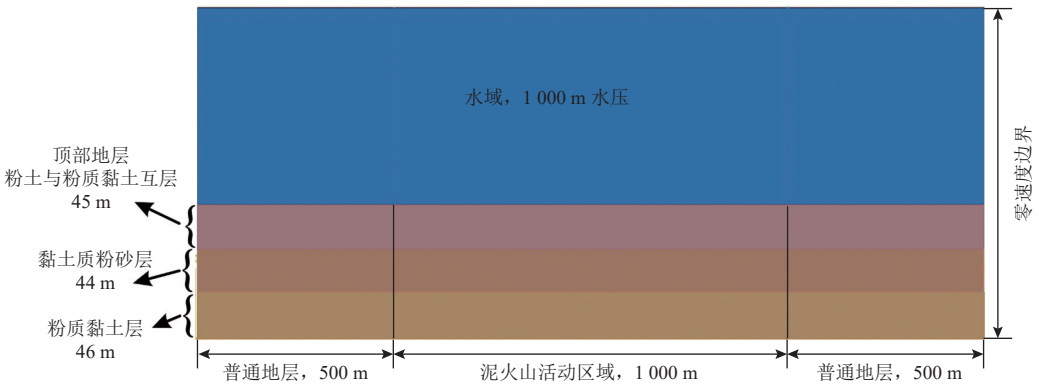


图 3　地层初始无变形模式图

Fig. 3　Initial non-deformation mode diagram of stratum

本研究采用八节点欧拉单元 EC3D8R 模拟地层建模，运用摩尔-库伦塑性模型进行模拟。在本模型中，顶部和底部为开放边界，顶部与海水直接接触，并受 1 000 m 深的水压力，底部受深部地层压力以及下层水合物分解释放的压力，两侧为防止模型内材料外溢，均设置为零速度边界。各地层

受到的主要压力为：水体压力、地层的自重应力、深部地层应力等，而泥火山区域还受到水合物分解释放的应力影响，从而导致流体上涌。由于流体运移到各地层时会不可避免地与地层发生混合，因此在该模型中流体的相关参数参考各地层参数。

海水的状态方程为：

$$\rho = (S + 1\,305 - 0.3t + 5.25)/1.305, \tag{2}$$

式中：ρ 为密度；S 为盐度；t 为温度。

地层破坏判据服从摩尔-库仑准则，表达式为：

$$\sigma_1 = 2c\cos\varphi + \sigma_3(1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi), \tag{3}$$

式中：σ_1 和 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力；c 和 φ 分别为土的内聚力和内摩擦角（高文伟，2022）。

一般 2 个方向的压力是保持平衡的，但当深部地层物质压力和水合物分解释放的压力大于土层自重应力和水压力时，地层的力平衡被打破，土体材料被上拱至破裂，进而有物质溢出。

4 结果与分析

泥火山内部物质可分为头部和本体两个部分，在物质向上迁移过程中，其头部排开地层，引导本体向上迁移。泥火山的形态受地层结构以及运移物质能量变化等参数的影响，在不同的阶段存在明显的差异。泥火山内部的物质主要以垂向运移为主。根据模拟的泥火山形成过程，我们将泥火山分成地层上拱阶段、刺穿阶段以及泥火山发育阶段三个阶段，其中地层上拱阶段与刺穿阶段贯穿整个泥火山形成过程。

在泥火山活动初期，地层中间区域表现为一个强应变和应力状态（图 4a 和图 4b）。其中强应变仅集中在中间一小部分区域，强应力由中间逐渐向两边呈缓坡分布。此时为最底部粉质黏土地层逐渐变形上拱阶段，形成一个背斜形态（图 5a）。该阶段地层上拱幅度小，气体未突破初始地层，迁移效率低。同时，此阶段进行时间较长，说明泥火山初期阶段上拱较慢。初期地层的背斜形态使流体能量持续增大。

当底部粉质黏土层所受到的部地层物质压力和水合物分解释放的压力超过地层所能承受的压力极限时（图 5b），地层将发生破裂，此时由于上覆地层的存在，粉质黏土层形成的结构可称为泥底辟。地层被泥浆流体刺穿并向上拉，地层被刺穿的阶段称为泥火山物质的刺穿阶段。当物质刺穿底部地层到达中间地层时，中间地层的变化趋势相似，均在地层中部位置先经历上拱阶段形成明显的背斜鼓包，然后运移物质刺穿地层背斜顶端继续向上迁移（图 5c 和图 5d）。中间地层的刺穿阶段显示出中部地形逐渐出现断裂的现象，中部的断裂引导两边的地层向上隆升，地层受力集中在中部，模型两侧颜色变化显示了地层受力的不均匀分布（图 5c 和图 5d）。地层内外边缘形态呈现出锯齿状变化，锯齿状的地层出现新的小突破口可能预示着裂缝的发育（图 5c 和图 5d）。刺穿阶段形成的地层裂缝有可能会成为物质运移的新通道，引导泥浆等物质发生侧向运移，使泥火山内部通道逐渐变宽发育。随着泥火山运动的持续，地层的应变呈驼峰状变化。中间凹陷处存在一强应变点，向两侧应变逐渐减小（图 4c）。应力整体的变化与应变的变化相对应，呈驼峰形状，在地层中间部位存在一个强应力点，在靠近两侧背斜底部的区域存在 2 个强应力区域（图 5d）。向内部延伸表现出圆锥形的不均匀的应力分布（图 4d）。应力与应变的不均匀性也反映了在流体运移过程中地层受力的不均匀性。在内部物质迁移过程中，地层受力强的点日后均可能会发育成裂缝。

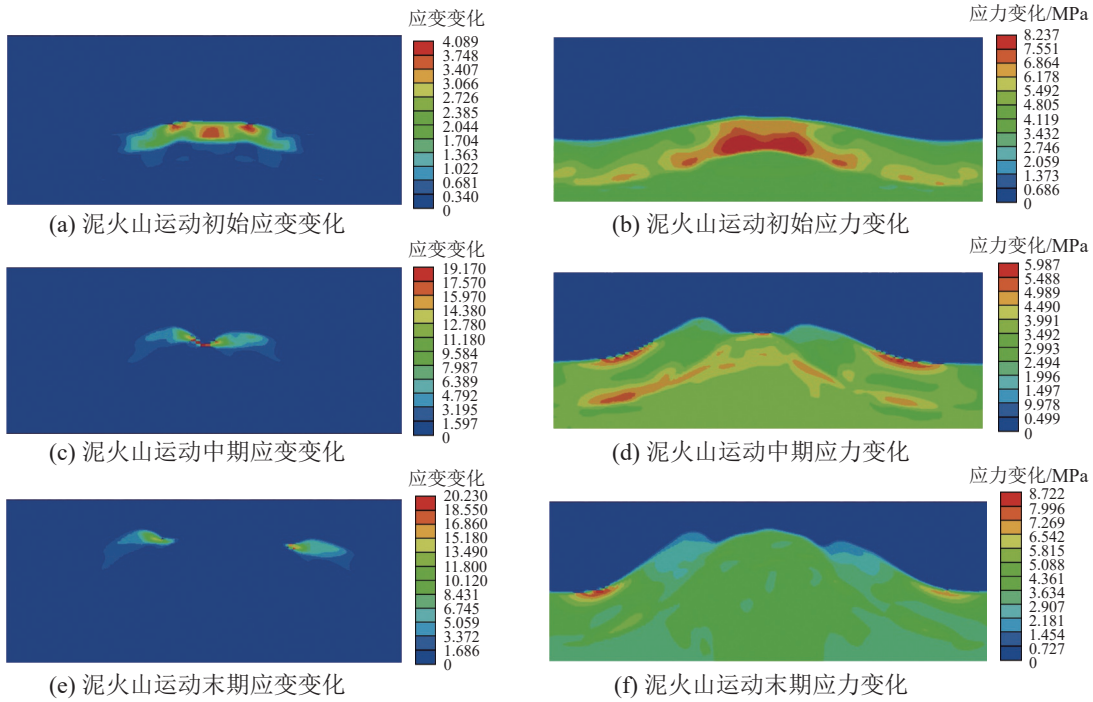


图 4　泥火山内部流体应变与应力分布

Fig. 4　Fluid stress and strain within a mud volcano

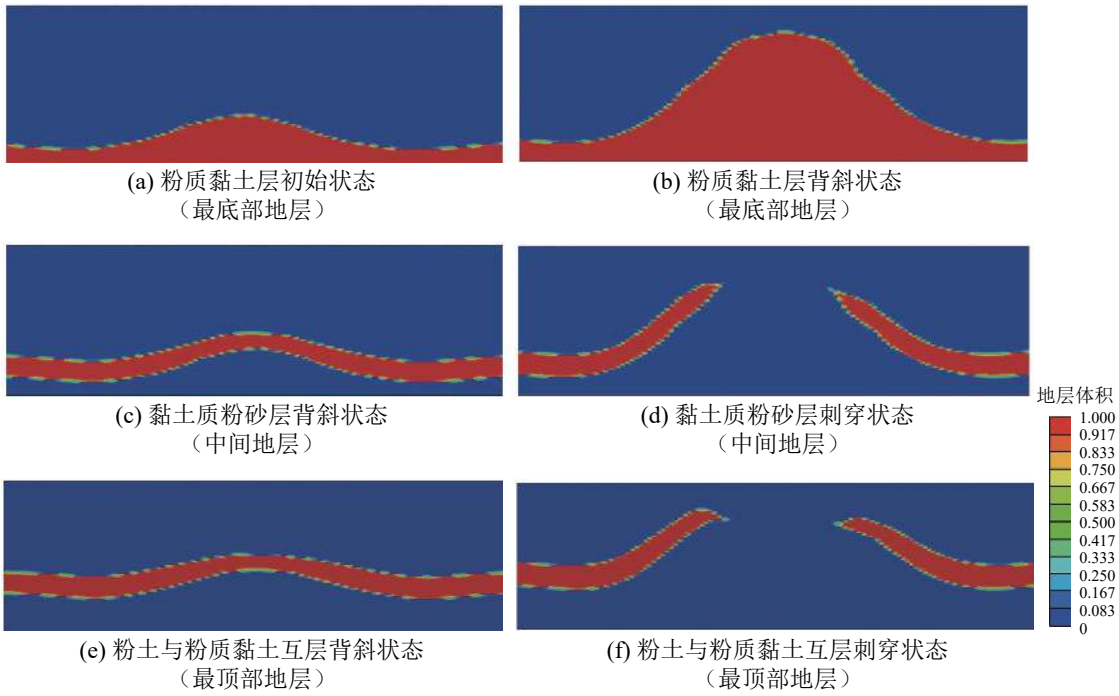


图 5　流体活动过程中地层体积变化分布

Fig. 5　Stratum volume variation during fluid movement

泥底辟内部活动后期物质逐渐接近海底。地层的应变整体呈不规则的点状分布，中间应变消失，两侧各表现出 1 个强应变区域(图 4e)。中间应变消失可能是由于最顶部地层的突破，泥浆等物质直

接接触海水，中间缺少受力地层导致。应力分布整体表现为火山口的形状，相对于上一阶段，此阶段应力形状中间存在 3 个连续的大凸起，但强应力区域分布在凸起背斜形状的下方区域(图 4f)。最顶部地层整体首先受到物质运移的作用，地层与中间层一致，呈明显的背斜形状(图 5e)。地层中部逐渐受力突起，牵引两边地层向内部凹陷(图 5e)。当压力积累到一定程度，或有外部的触发机制如海底地震、浊流扰动等，物质刺穿顶部地层通过输导体系向海洋大量逸散、喷发(图 5f)。泥浆等物质突破最顶部地层表明泥火山建造的开始，此阶段称为泥火山的发育阶段。此时中间喷口两侧的地层有明显的受力分布，这可能会形成一些气体的裂隙通道(图 5f)。物质释放到海底时，压力下降，使得泥底辟顶部孔隙度增加，密度下降，进一步加大了泥火山内部物质上升的浮力。流体携带泥浆等杂质在喷口附近形成圆锥状等的建造(张伟, 2016)。在泥火山形成的过程中，整个泥火山基本都处于强应力状态，来支撑泥火山形成过程中的强应力需求(图 6a)。应力变化趋势整体表现为初始应力波动较强，后续应力波动逐渐减小，最后变化速率几乎为 0。泥火山活动后期由于泥浆等物质突破顶层进入海水，不再受到地层限制，导致应力的波动变小。在泥火山形成初始阶段都处于强应变状态，伴随时间应变逐渐呈减弱趋势(图 6a)。泥火山模型初期由于受到强应力影响，强应变持续时间较长，在地层被刺穿的过程中一直处于强应变状态。在地层被刺穿之后，高渗通道初步形成，逐渐形成泥火山的雏形，地层变形幅度逐渐减小，应变也会逐渐减小(图 6a)。泥火山形成是一个很复杂的过程，在物质运移过程中会伴随着能量的释放。在泥火山形成过程中，能量呈逐渐增大趋势(图 6b)。在进行到分析步为 10 时能量突降，这是由于顶层地层突破导致压力突然释放所致。泥火山的形成需要强应力作用，在形成裂隙等高渗通道的过程中会释放出更巨大的能量来支撑这一过程的顺利进行。监测泥火山形成过程中物质的能量释放也有助于我们了解地层底部的构造分布情况。

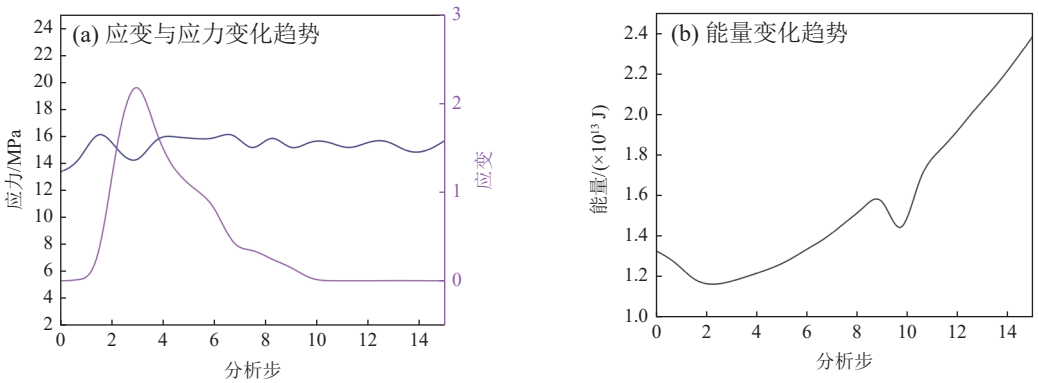


图 6 泥火山形成过程中应力、应变与能量的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of stress, strain and energy during the formation of mud volcano

在实际地质情况中，影响地层压力的主要因素体现在流体源层的深度、泥源层上覆沉积层的厚度以及流体的压力等方面(张伟等, 2017)。为了更加符合实际的地质环境，对 3 层地层设置不同的厚度，地层总厚度为 135 m。泥火山模拟过程(图 5a 和图 5b)结合地层厚度显示，当刺穿阶段流体遇到的沉积层较厚时，流体向上运移穿透上覆地层并最终到达海底积聚形成泥火山所受的应变与应力的变化就较为剧烈，说明刺穿地层所需的压力较大。此时，地层的受力分布不均匀性更加明显，横向发展的地层裂隙可能会增多(图 4)，如莺歌海盆地具有较厚的沉积厚度，不利于流体向上运移，使得盆地内部泥底辟发育，而泥火山构造较少发育(He et al, 2006; 刘杰等, 2016; 邱燕等, 2016)。我们模拟还原的图 2 中地震剖面中的泥火山的形成过程以及最终的发育模式，以及分析得到的泥火山形

成过程中的应变与应力变化情况，都与先前的一些数值模拟过程、地震剖面解译相符（Zoporowski et al, 2009; Zhang et al, 2013; 闫大伟等, 2021）。

5 结　语

长期的构造挤压应力与快速的沉积充填过程，导致神狐海域具有欠压实的现象，非常容易为泥火山、泥底辟等流体渗漏的形成提供重要的物质和动力来源。本文以神狐海域的工程地质参数为基础，利用 CEL 算法构建了三层地层的泥火山的形成模型，并用此模型模拟了泥火山的形成过程，展现了泥火山形成过程中明显的阶段性变化。泥火山内部物质头部排开地层引导本体向上迁移。在泥火山内部物质侵入地层时，地层并未被直接刺穿，而是先呈现出明显的背斜变化，此时存在一个应力与应变增大的阶段，表明运移的物质能量/压力在持续增大，地层的拱起幅度也越加明显。当压力超过地层所能承受的压力时，地层将在中部优先发生破裂，引导内部物质向上迁移。整个泥火山形成过程中的应力和应变多呈不规则分布，物质的迁移过程中地层受力也呈现出明显的不均匀性，这种不均匀性与地层厚度成正比。地层受力的不均匀性预示着物质迁移过程中地层裂缝的增多。物质迁移距离与地层厚度对流体的影响较大。

本文以南海北部神狐海域地震剖面识别的泥火山为基础，基于神狐海域工程地质参数的模拟结果提供了泥火山形成过程中内部物质的运动特征，对理解全球其他超压盆地中泥火山的形成过程具有一定的参考价值。但在泥火山模型的建立和参数的选择过程中进行了适当的简化，如本文只采用了三层地层厚度，并没有考虑在地层本身就具有的不均匀性。实际的泥火山形成过程是一个非常复杂的过程，目前所建模型未能全面地考虑泥火山形成过程中受到的影响因素，如断层、温度条件、不同地层结构对泥火山形成过程的影响等，泥火山的模型计算方法还有待进一步完善。

参考文献 (References):

陈聪, 龙建军, 李赶先, 2015. 南海深海海底沉积物力学性质试验研究[J]. 海洋工程, 33(4): 108-114. CHEN C, LONG J J, LI G X, 2015. Experimental study on mechanical properties of deep seabed sediments in South China Sea[J]. Ocean Engineering, 33(4): 108-114.

陈多福, 冯东, 陈光谦, 等, 2005. 海底天然气渗漏系统演化特征及对形成水合物的影响[J]. 沉积学报, 23(2): 323-328. CHEN D F, FENG D, CHEN G Q, et al, 2005. Evolution of marine gas venting system and impact on gas hydrate crystallization[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 23(2): 323-328.

陈俊仁, 黄志玮, 1994. 南海珠江口盆地工程地质分区与评价[J]. 工程地质学报, 2(2): 18-28. CHEN J R, HUANG Z W, 1994. Zoning and evaluation of engineering geology in Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Journal of Engineering Geology, 2(2): 18-28.

高文伟, 2022. 基于摩尔库伦准则的数值流形法岩体破坏模拟分析[J]. 延安大学学报(自然科学版), 41(4): 7-17. GAO W W, 2022. Simulation analysis of rock mass failure by numerical manifold method based on Mohr-Coulomb criterion[J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 41(4): 7-17.

李昂, 蔡峰, 李清, 等, 2020. 浅表层泥火山型天然气水合物成藏地质模型[J]. 海洋地质前沿, 36(9): 94-100. LI A, CAI F, LI Q, et al, 2020. A geological model for shallow gas hydrates accumulation associated with mud volcano[J]. Preface to Marine Geology, 36(9): 94-100.

李刚, 艾森, 唐霄汉, 等, 2014. Abaqus的CEL算法在整流罩地面分离试验仿真中的应用研究[C]//2014年中国计算力学大会. 贵阳: 中国力学学会计算力学专业委员会. LI G, AI S, TANG X H, et al, 2014. Application research of Abaqus CEL algorithm in fairing ground separation test simulation[C]//2014 China Computational Mechanics Conference. Guiyang: Professional Committee of Computational mechanics of China Mechanical Society.

李佳杰, 2019. 天然气水合物储层上覆土层力学特性研究[D]. 大连: 大连理工大学. LI J J, 2019. Study on mechanical properties of overlying layer of gas hydrate reservoir[D]. Dalian: Dalian University of Technology.

李列, 宋海斌, 杨计海, 2006. 莺歌海盆地中央坳陷带海底天然气渗漏系统初探[J]. 地球物理学进展, 21(4): 1244-1247. LI L, SONG H B, YANG J M, 2006. A preliminary study of seafloor gas seepage in central sag zone of Yinggehai Basin[J]. Progress in Geophysics, 21(4): 1244-1247.

梁永兴, 曾溅辉, 杨智峰, 等, 2013. 南海北部神狐海域输导体系特征及其对天然气水合物成藏的影响[J]. 地球科学与环境学报, 35(4): 30-38. LIANG Y X, ZENG J H, YANG Z F, et al, 2013. Characteristics of passway systems and their influence on gas hydrate accumulation in Shenhu area of northern South China Sea[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 35(4): 30-38.

刘杰, 孙美静, 苏明, 等, 2015. 海底泥火山特征及其与天然气水合物的成矿关系[J]. 海洋地质前沿, 31(8): 53-61. LIU J, SUN M J, SU M, et al, 2015. Submarine mud volcano and its relationship with gas hydrate[J]. Marine Geology Frontiers, 31(8): 53-61.

刘杰, 孙美静, 杨睿, 等, 2016. 泥底辟输导流体机制及其与天然气水合物成藏的关系[J]. 现代地质, 30(6): 1399-1407. LIU J, SUN M J, YANG R, et al, 2016. Diapir conduit fluid mechanism and its relationship with gas hydrate accumulations[J]. Geoscience, 30(6): 1399-1407.

齐贺阳, 田永卫, 2022. 基于ABAQUS CEL的高速水冲击载荷仿真与试验研究[J]. 理论与实践, 42(3): 36-42. QI H Y, TIAN Y W, 2022. Simulation and experimental study of high speed water impact load based on ABAQUS CEL[J]. Theory and Practice, 42(3): 36-42.

邱燕, 王立飞, 黄文凯, 2016. 中国海域中新生代沉积盆地[M]. 北京: 地质出版社: 1-223. QIU Y, WANG L F, HUANG W K, 2016. Mesozoic and cenozoic sedimentary basins in China seas[M]. Beijing: Geological Press, 1-223.

沙志彬, 张光学, 梁金强, 等, 2005. 泥火山——天然气水合物存在的活证据[J]. 南海地质研究, (1): 48-56. SHA Z B, ZHANG G X, LIANG J Q, et al, 2005. Mud volcano: one live evidence of the existence of gas hydrates[J]. Geological Research of South China Sea, (1): 48-56.

苏丕波, 梁金强, 张伟, 等, 2021. 神狐海域天然气水合物成藏系统数值模拟与试采矿体优选[J]. 地质通报, 40(2/3): 267-279. SU P B, LIANG J Q, ZHANG W, et al, 2021. Numerical simulation and ore-body selection of gas hydrate accumulation system in Shenhu sea area[J]. Geological Bulletin, 40(2/3): 267-279.

万志峰, 吴婷婷, 张伟, 等, 2022. 海底泥火山形成机制——南海台西南盆地泥火山钻探建议[J]. 地质学报, 96(8): 2906-2916. WAN Z F, WU T T, ZHANG W, et al, 2022. Formation mechanism of submarine mud volcanoes: suggestions on mud volcano drilling in the southwest Taiwan Basin of the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 96(8): 2906-2916.

王浩宇, 苗芷苋, 吴涛, 等, 2018. 实验分析泥火山构造特征对天然气水合物形成影响[J]. 科技通报, 34(10): 59-65. WANG H Y, MIAO Z X, WU T, et al, 2018. The influence of mud volcano structure on gas hydrate formation was analyzed experimentally[J]. Science and technology bulletin, 34(10): 59-65.

王辉, 修宗祥, 孙永福, 等, 2022. 考虑天然气水合物上覆层不排水抗剪强度深度变化的海底斜坡稳定性影响分析[J]. 高校地质学报, 28(5): 747-757. WANG H, XIU Z X, SUN Y F, et al, 2022. Analysis of the stability of submarine slope considering the effects of undrained shear strength of the cover layer of gas hydrates[J]. Geological Journal of China Universities, 28(5): 747-757.

谢蕾, 王家生, 吴能友, 等, 2013. 南海北部神狐海域浅表层沉积物中自生黄铁矿及其泥火山指示意义[J]. 中国科学: 地球科学, 43(3): 351-359. XIE L, WANG J S, WU N Y, et al, 2013. Authigenic pyrite in shallow surface sediments of Shenhu sea area, northern South China Sea and its implications for mud volcanoes[J]. Scientia Sinica, 43(3): 351-359.

徐文杰, 2012. 基于CEL算法的滑坡涌浪研究[J]. 工程地质学报, 20(3): 350-365. XU W J, 2012. Research on landslide surge based on CEL algorithm[J]. Journal of Engineering Geology, 20(3): 350-365.

闫大伟, 孙治雷, 耿威, 等, 2021. 海底水合物丘与泥火山的演化特征及其对天然气水合物聚集的影响[J]. 海洋地质前沿, 38(1): 1009-2722. YAN D W, SUN Z L, GENG W, et al, 2021. Characteristics of submarine hydrate pingos and mud volcanoes and their effects on gas hydrate accumulation[J]. Marine Geology Frontiers, 38(1): 1009-2722.

杨承志, 罗坤文, 梁金强, 等, 2020. 南海北部神狐海域浅层深水沉积体对天然气水合物成藏的控制[J]. 天然气工业, 40(8):

68-76. YANG C Z, LUO K W, LIANG J Q, et al, 2020. Control effect of shallow-burial deepwater deposits on natural gas hydrate accumulation in the Shenhu sea area of the northern South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 40(8): 68-76.

张启明, 董伟良, 2000. 中国含油气盆地中的超压体系[J]. 石油学报, 21(6): 1-11. ZHANG Q M, DONG W L, 2000. Overpressure systems in petroliferous basins in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 21(6): 1-11.

张伟, 2016. 南海北部主要盆地泥底辟/泥火山发育演化与油气及天然气水合物成矿成[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所. ZHANG W, 2016. Research on the development and evolution of mud diapir/mud volcano and their relationship with migration and accumulation of petroleum and natrural gas-hydrate in major basins, northern South China Sea[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences.

张伟, 梁金强, 何家雄, 等, 2017. 南海北部陆坡泥底辟/气烟囱基本 特征及其与油气和水合物成藏[J]. 海洋地质前沿, 33(7): 11-23. ZHANG W, LIANG J Q, HE J X, et al, 2017. Basic characteristics of mud diapir/gas chimney on continental slope of northern South China Sea and its accumulation with oil, gas and hydrate[J]. Marine Geological Frontier, 33(7): 11-23.

DIMITROV L I, 2002. Mud volcanoes: the most important pathway for degassing deeply buried sediments[J]. Earth Science Reviews, 59(1/4): 49-76.

DING W W, LI J B, LI J, et al, 2013. Morphotectonics and evolutionary controls on the Pearl River canyon system, South China Sea[J]. Marine Geophysical Research, 34(3): 221-238.

EGOROV A V, ROZHKOV A N, 2010. Formation of gas hydrate reservoirs in submarine mud volcanos[J]. Fluid Dynamics, 45(5): 769-778.

FRANEK P, MIENERT J, BUENZ S, et al, 2014. Character of seismic motion at a location of a gas hydrate-bearing mud volcano on the SW Barents Sea margin[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(8): 6159-6177.

HE J, BIN X, SHULIN Z, et al, 2006. Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai Basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas[J]. Geology in China, 33(6): 1336-1344.

KHOLODOV V N, 2013. Distribution and formation conditions of salt diapirs and mud volcanoes[J]. Lithology and Mineral Resources, 48(5): 398-415.

KOPF A J, 2002. Significance of mud volcanism[J]. Significance of Mud Volcanism, 40(2): 1-52.

MANGA M, BRUMM M, RUDOLPH M L, 2009. Earthquake triggering of mud volcanoes[J]. Marine and Petroleum Geology, 26(9): 1785-1798.

MELLORS R, KILB D, ALIYEV A, et al, 2007. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B4): 1-11.

MILKOV A V, 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. Marine Geology, 167: 29-42.

MILKOV A V, R SASSEN, 2002. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces[J]. Marine and Petroleum Geology, 19: 1-11.

MILKOV A V, ETIOPE G, 2005a. Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the earth's climate —a comment[J]. International Journal of Earth Sciences, 94: 490-492.

MILKOV A V, 2005b. Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere and as a geohazard[J]. Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity, 51, 29-34.

SAUTER E J, MUYAKSHIN S I, CHARLOU J L, et al, 2006. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles[J]. Earth and Planetary Science Letters, 243(3): 354-365.

SU M, ALVES T M, LI W, et al, 2019. Reassessing two contrasting Late Miocene-Holocene stratigraphic frameworks for the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Marine Petroleum Geology, 102: 899-913.

SUN Y, WU S G, DONG D D, et al, 2012. Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the

northern South China Sea[J]. Marine Geology, 311: 32-40.

WAN Z, ZHANG J F, LIN G Q, et al, 2021. Formation mechanism of mud volcanoes/mud diapirs based on physical simulation[J]. Geofluids, 5331975: 1-16.

WAN Z F, ZAHNG W, MA C, et al, 2022. Dissociation of gas hydrates by hydrocarbon migration and accumulation-derived slope failures: an example from the South China Sea[J]. Geoscience Frontiers, 13(2): 101345.

WANG X J, COLLETT T S, LEE M W, et al, 2014. Geological controls on the occurrence of gas hydrate from core, downhole log, and seismic data in the Shenhu area, South China Sea[J]. Marine Geology, 357: 272-292.

YANG R, SU M, QIAO S H, et al, 2015. Migration of methane associated with gas hydrates of the Shenhu area, northern slope of South China Sea[J]. Marine Geophysical Research, 36(2): 253-261.

YANG S X, LEI Y, LIANG J Q, et al, 2017. Concentrated gas hydrate in the Shenhu area, South China Sea: results from drilling expeditions GMGS3 & GMGS4[C]. Proceedings of 9th International Conference on Gas Hydrates, 25-30.

ZHANG A M, YANG W S, HUANG C, et al, 2013. Numerical simulation of column charge underwater explosion based on SPH and BEM combination[J]. Computers & Fluids, 71: 169-178.

ZOPOROWSKI A, MILLER S A, 2009. Modelling eruption cycles and decay of mud volcanoes[J]. Marine Petroleum Geology, 26(9): 1879-1887.

Numerical Simulation of Substance Motion in Mud Volcano in the Shenhu Area Based on CEL Algorithm

LIU Xiaoyan[1], SUN Yongfu[1,2], SONG Yupeng[1], XIU Zongxiang[1], LI Xishuang[1], SONG Binghui[1]

（1. *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China；
2. *National Deep Sea Center*, Qingdao 266237, China）

Abstract: Based on the seismic profile identification of a mud volcano in the Shenhu area of the northern South China Sea, this study used coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) algorithm to simulate the motion process of the material inside the mud volcano. Through the comparative analysis of different stages, this study indicated the formation mechanism of mud volcano and summarized the motion characteristics and rules of the materials in the mud volcano. The numerical modeling results showed that the fluid migration styles during the formation of mud volcano took place obvious changes in different stages, showing the irregular change law of fluid stress and strain during the fluid migration. Then this study analyzed the intensity variation trend of stress, strain and energy during the formation of mud volcano. In the process of fluid penetrating upward, the force distribution of the stratum shows obvious unevenness, and the protrusion in the middle part breaks and causes the uplift of the strata on both sides. The characteristics of the internal fluid during the formation of mud volcanoes provided by the simulation results in this study can promote the further understanding of the formation mechanism and process of mud volcanoes, and provide a theoretical guidance for the deep diapiric structure and hydrocarbon migration.

Keywords: Shenhu area；mud volcano；CEL algorithm；puncture

Received: February 8, 2023 **Online:** January 19, 2024