

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2019.0604

余和雨,刘晓磊,陆杨.海底碎屑流运动特性研究的若干进展[J].地质科技情报,2019,38(6):25-32.

海底碎屑流运动特性研究的若干进展

余和雨¹, 刘晓磊^{1,2}, 陆 杨¹

(1.中国海洋大学山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100;
2.青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要:海底碎屑流运动特性的认知直接关系到对海底沉积物重力搬运过程的正确理解,同时对于深海油气资源的勘探开采及海洋工程设施的安全建设意义重大。海底碎屑流发生时间、地点的不确定性及其直接观测手段的不足制约了其运动特性研究的发展,在总结国内外研究进展的基础上,讨论了海底碎屑流运动的影响因素、流动头部产生的滑水现象及碎屑流向浊流的转化机制,重点综述了现场观测、模型试验及数值模拟等研究手段。最后,指出目前海底碎屑流运动特性研究中存在的问题,建议围绕现场观测技术体系的完善、海底碎屑流长距离搬运机制的进一步明确及碎屑流引发地质灾害的风险性评估等方面开展深入研究。

关键词:海底碎屑流;运动特性;滑水机制;长距离搬运;现场观测;灾害评估

中图分类号:P736.12

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2019)06-0025-08

Advances in Motion Characteristics of Submarine Debris Flow

Yu Heyu¹, Liu Xiaolei^{1,2}, Lu Yang¹

(1.Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering,
Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China;

2.Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine
Science and Technology, Qingdao Shandong 266061, China)

Abstract: The cognition of the motion characteristics of submarine debris flow is directly related to the correct understanding of the submarine sediments mass transport, and also has a significant impact on the submarine oil and gas resources exploitation and the security construction of marine engineering facilities. The research advances of motion characteristics are limited by the uncertainty of onset time and space of submarine debris flow as well as the lack of direct observation methods. Based on the research progress at home and abroad, this paper discusses the influencing factors of submarine debris flow movement, the hydroplaning generated at the flow head and the transformation mechanism of debris flows into turbidity currents. The paper also summarizes the main research methods such as field observation, model test and numerical simulation and current problems in the study of the motion characteristics of submarine debris flow were pointed out. We suggest that the further research can be carried out around the improvement of the field observation technology system, the further clarification of the long runout distance transport mechanism and the risk assessment of geological hazards caused by submarine debris flow.

Key words: submarine debris flow; motion characteristics; hydroplaning; long runout distance transport; field observation; hazard assessment

收稿日期: 2019-07-15

编辑: 沈文祺

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC08020301); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(201822013)

作者简介: 余和雨(1997—), 男, 现正攻读环境工程专业学士学位, 主要从事海底碎屑流研究工作。E-mail: zgghydxhyu@163.com

通信作者: 刘晓磊(1985—), 男, 副教授, 主要从事海洋工程地质相关教学与科研工作。E-mail: xiaolei@ouc.edu.cn

海底重力流作为海底沉积物搬运的主要动力之一,与深海油气资源的勘探开采、海底运输管道和通讯线缆等工程设施的建设密切相关^[1-3]。以浊流理论为核心的研究在过去几十年内广泛开展,而关于海底碎屑流的触发、搬运及沉积研究相对有限。直至 20 世纪 90 年代碎屑流研究才从高密度浊流研究中真正剥离出来,成为独立的研究热点持续至今^[4-5]。

由于海底碎屑流发生的环境有异于陆上,较之于陆上碎屑流其有效重力较小,黏性阻力较大。然而,在深水环境中,碎屑流的运动速度和距离更加巨大,其对周围建筑物、构筑物的破坏作用不容忽视。1929 年,Grand Banks 地震引起的碎屑流和浊流运动摧毁了距震源近 1 000 km 处的大部分通信电缆,且其引发的海啸袭击了纽芬兰的南部海岸,造成数十人死亡^[3]。1998 年发生于巴布新几内亚海岸的海啸也是由海底滑坡碎屑流引起,海浪波高达 15 m,二千余人死亡^[6]。可见,除了碎屑流自身会严重破坏周围工程设施外,其引发的次生灾害也会造成巨大的经济损失和人员伤亡。另外,海底碎屑流可在低坡度下($<1^\circ$)进行长距离搬运(最远可达 1 500 km)^[7-8],较之陆上碎屑流其运动性更强,灾害波及距离更远。

海底碎屑流成因复杂,地震、波浪潮、渗流、沉积物迅速累积、海底火山、天然气水合物释放及人为干扰等因素均有可能触发碎屑流的启动,因此海底碎屑流的形成具有相当的不确定性^[9]。受限于碎屑流发生的位置和时间无法准确预测,开展有关其运动过程的直接观测也极为困难,尽管有学者采用人为扰动的方式意图触发海底碎屑流启动,但未取得显著成效^[10]。

目前,沉积地质学分析方法、物理模型试验和数值计算仍是研究海底碎屑流运动过程的主流手段。笔者拟以海底碎屑流的运动特性为研究内容,结合当前相关研究的热点问题,系统综述海底碎屑流运动过程的研究进展,对存在的问题及未来研究动向进行分析与探讨。

1 海底碎屑流概念简述

迄今为止,海底重力流的分类尚未有统一标准,仍存在争议。笔者所讨论的海底碎屑流是一种沿海底面发育和运动的、具有黏性的高浓度水—碎屑混合物^[11]。Middleton 等^[12]认为这种黏性碎屑流是真正意义上的碎屑流(true debris flow),因为黏性碎屑流的大颗粒支撑机制是沉积物—水基质之间的黏结作用而非颗粒间的分散压力,这也是它与颗粒

流(grain flow)的重要区分点^[13]。

海底碎屑流与浊流最初在概念上具有本质区别,虽然二者都为固液相混合的重力驱动流,但从流变学性质上来说浊流属于牛顿流体,碎屑流属于非牛顿流体,这与 Dott^[14]的分类方式类似。基于此,Shanmugam^[15]曾明确指出浊流与碎屑流的定义:浊流是一种具有牛顿流变学性质和湍流状态的沉积物重力流,通过悬浮沉降作用沉积;而碎屑流是一种具有塑性流变学性质和层流状态的沉积物重力流,通过冻结作用沉积。容易产生混淆且存在争议的是砂质碎屑流和高密度浊流 2 个概念,且碎屑流本身也存在分类不清晰的问题。早期海底碎屑流的类别多是根据流体性质和沉积物支撑机制等来进行划分,后来也有学者提出从流体类型、流体行为和沉积物浓度进行分类^[16-17]。

1996 年,Shanmugam^[4]提出了砂质碎屑流的概念,认为此前归因于高密度浊流的沉积现象应为砂质碎屑流成因,并进行了沉积物重力流分类体系的整合(图 1),由此将深水沉积研究引入全新阶段,同时也掀起了海底碎屑流研究的热潮。近年来,海底碎屑流的概念及分类问题仍然是相关研究的热点^[18-19],随着现场观测技术和数值计算手段的发展,海底碎屑流的分类体系也将渐趋明朗。另外,此次研究中所综述的海底碎屑流少有涉及砂质碎屑流,原因在于当今学术界对砂质碎屑流的争议颇大,尚无定论^[20-21]。

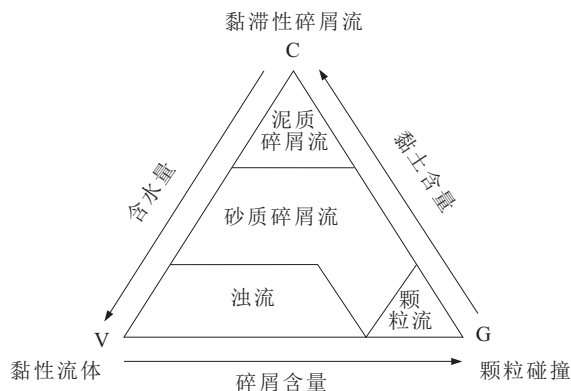


图 1 Shanmugam^[4]的沉积物重力流分类

Fig.1 Classification of sediment gravity flow by Shanmugam^[4]

2 海底碎屑流运动研究进展

海底碎屑流的运动行为较陆上碎屑流更为复杂,其突出特征表现为能够在缓坡情形下进行长距离搬运,运动过程中可能产生滑水现象以及碎屑流头部的浊流化。因此,海底碎屑流的运动特性难以

捕捉,继而导致其搬运机制的解释成为学界一大难题。

2.1 海底碎屑流运动的影响因素

2.1.1 沉积物矿物成分

海底沉积物的矿物成分是影响海底碎屑流运动过程的重要因素之一。目前,应用于海底碎屑流研究的沉积物矿物大致有石英粉(砂)、高岭土、膨润土、煤渣(用于粒子示踪)等^[7,22-24],抑或是同时采用几种矿物与水掺混制备。其中,黏土矿物的添加有助于黏性碎屑流的形成,其流动时整体性更佳,因此在缓坡上能够实现长距离搬运,而仅有砂和水组成的沉积物在某些低坡度下甚至无法形成连续的运动。

2.1.2 沉积物黏土含量

关于沉积物组分特别是黏土含量对碎屑流运动行为的影响已有过系统研究^[23-28],包括流变学性质研究、运动特性研究和沉积几何学特征研究。研究发现较高的黏土含量有利于滑水现象的产生,而较低的黏土含量则会加剧碎屑流头部的崩解,并导致运动过程中流体内部砂颗粒的沉降^[25],如图2所示。Elverhoi等^[26]在进行沉积物组成对海底碎屑流搬运距离和沉积影响的研究中得出了相似结论,并以此来解释 Bear Island 海底复合扇、Storegga 滑坡及 Grand Bank 滑坡过程的差异性。Yin等^[27]在碎屑流试验中选取了125%~185%的高含水率及高岭土制备试验沉积物,实际上也是从黏土含量的角度划分了强黏性、中黏性及弱黏性碎屑流并就其运动特性加以讨论。余斌^[28]也曾开展类似研究,用于3种黏性(黏性、亚黏性及稀性)碎屑流的运动速度计算,但其试验并未考虑滑水作用。

2.1.3 海底性质及海底地形

海底碎屑流下伏底床土性会影响碎屑流的运动过程,最终影响砂体分布和沉积形态。Shan-

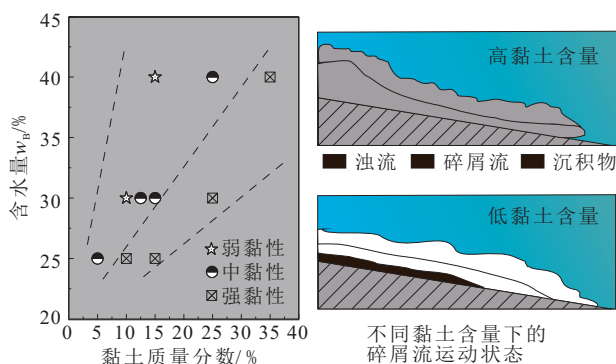


图2 沉积物黏土含量对碎屑流运动的影响(据文献^[23]和^[24]修改)

Fig.2 Effect of clay content in the sediment on debris flow movement

mugam^[15]根据富泥质海底和富砂质海底将碎屑流的沉积模式分为水道体系(尼日利亚海岸 Edop 油田的某些层段、现代 Mississippi 扇等)和非水道体系(英国北海、挪威海、墨西哥湾等地的大部分深水储层)。然而,依据海底碎屑流的沉积特征仅能推断碎屑流运动的大致状态,其运动过程中的重要细节特征由于受复杂的深海环境影响而难以得出,这也是海底碎屑流运动特性研究中亟待解决的难点问题。

另外,Marr等^[24]的研究表明,海底地形(光滑粗糙程度或不规则地形地貌等)可能也是影响碎屑流运动的因素之一,特别是对于黏性较强的碎屑流而言,坡折带的存在会导致碎屑流厚度突然增加。

2.2 碎屑流流动头部与滑水现象

目前研究多将重点聚焦于碎屑流流动头部的动力学特性及变形特性等方面,尤其是碎屑流头部的运动速度及其形态变化^[7,9,27]。部分学者^[7,24,29]基于室内水槽试验,对于海底碎屑流的运动过程获得了一定的感性认识,此过程中也提出了适用于海底碎屑流运动的理论模型。但是,深水环境下碎屑流的长距离搬运现象仍然得不到有效解释,原因在于:海底碎屑流在运动过程中受到环境水的浮力作用导致有效重力降低,阻力增加,这种情况下其运动速度和搬运距离应该较小,这与现场调查结果差异巨大。

随着现代高速摄影与声学成像技术的发展和实验应用,相关研究得到了有力的技术支持。自1998年以来,Mohrig等^[7]、Marr等^[24]、Ilstad等^[29]相继在室内海底碎屑流的物理模拟过程中观测到了流动头部的滑水(hydroplaning)现象(图3),认为滑水作用是海底碎屑流长距离搬运机制的合理佐证。滑水作用,即当碎屑流的运动速度足够大时,头部下方的动水压力和上方的吸力共同作用导致碎屑流头部抬起,环境水侵入碎屑流头部底端而形成一层润滑水膜。滑水现象是否会发生可通过碎屑流的密度弗劳德数 Fr_d 来判断:

$$Fr_d = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_d}{\rho} - 1\right) g h_a \cos \theta}}$$

式中: v 为碎屑流头部流速; ρ_d 为沉积物泥浆密度; ρ 为环境水体密度; h_a 为碎屑流的平均厚度; θ 为斜坡角度; g 为重力加速度。

Mohrig等^[7]认为 $Fr_d > 0.4$ 时会发生滑水现象,而 $Fr_d < 0.3$ 时则不会发生滑水现象。

滑水作用使得碎屑流头部的流动性较其余部位更强,最终流动头部可能会脱离碎屑流主体继续滑移,形成远端的脱离滑块(outrunner blocks,图4),这也印证了现场观测到的碎屑流主体搬运距离有

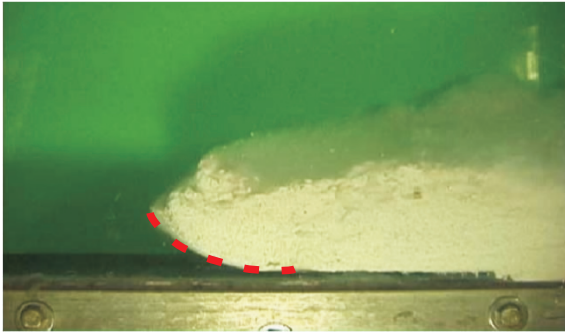
图3 试验中的滑水现象^[30]

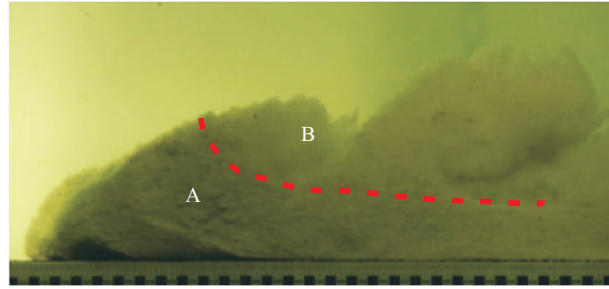
Fig.3 Hydroplaning in experiments

限,与脱离滑块相隔较远^[31]。脱离滑块的体积较碎屑流整体规模来说可忽略不计,但是由于其能够在一定程度上表征海底碎屑流运动时的动力学特性,因此滑块脱离的现象也引起了研究者的关注^[32-34]。

2.3 海底碎屑流向浊流转化

海底重力流的搬运沉积过程中常伴有流体间的过渡和转化现象,其中以碎屑流向浊流转化最为常见(图5)。Talling^[35]及操应长等^[36]都曾对这一现象的发生转化机制及特征进行过系统总结和深入探讨。碎屑流向浊流的转化过程常被描述为塑性流体在运动过程中受到环境水体的稀释,逐渐转化为液态流体即浊流,在这种非牛顿流体转化为牛顿流体的过程中被认为存在一种过渡状态即上文提及的砂质碎屑流,也就是说碎屑流向浊流转化的过程是连续变化的^[37-38]。

Felix等^[39]总结了6种海底碎屑流向浊流转化的作用机制(图6),包括液化作用、沉积物破碎、流体顶部剪切侵蚀、接触面不稳定性及波浪破碎、水力跳跃及流体头部与环境水体混合,并认为这6种转化机制均无法实现向浊流的整体转化。这与Talling等^[40]通过沉积学分析发现的碎屑流整体转化为浊流的现象相悖。操应长等^[36]结合Felix等^[39]的研究结果补充阐释了第7种转化机制,即多



A.碎屑流主体区;B.头部向浊流转化区

图5 试验中碎屑流头部部分转化为浊流^[26]

Fig.5 The head part of debris flow transformed into turbidity flow in the experiments

种机制协同作用下的整体转化。

另外,目前关于海底碎屑流向浊流转化的研究大多基于沉积物取样和野外露头证据,间接性证据对于理解碎屑流的转化机制始终存有一定局限性,而模型试验尺度下对于海底碎屑流运动过程的再现能够给予部分直观认知,亦有学者针对此开展了碎屑流转化效率的定量分析工作,以此作为间接性证据的有益补充^[41]。

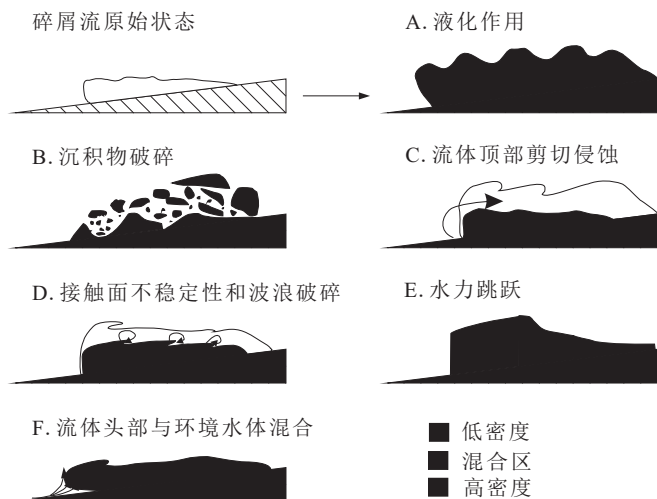
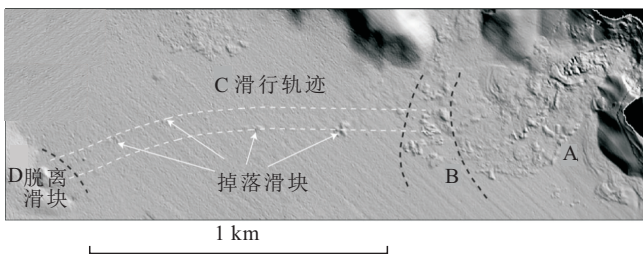
图6 海底碎屑流向浊流转化的6种机制^[38]

Fig.6 Six mechanisms of turbidity current conversion from submarine debris flow



A.滑坡主区;B.松散块体分布区;C.块体滑行区;D.脱离滑块

图4 挪威 Finneidfjord 滑坡形态分区^[29]

Fig.4 Morphological zoning of Finneidfjord landslides in Norway

3 研究方法介绍

海底碎屑流运动过程的直接观测极为困难,相关研究鲜有开展。目前,碎屑流沉积后的现场调查、室内模型试验(主要为斜坡水槽实验)及数值模拟等成为海底碎屑流运动特性研究的主要手段。

3.1 现场观测与调查

目前,针对海底重力流的直接观测技术已取得了一定进展,如部分学者实现了对于海底浊流运动

速度的量测^[42-43]。但是,直接观测碎屑流的运动过程仍然是海底原位观测领域的重大难题之一,因此笔者所讨论的现场观测和调查方法一般是指海底碎屑流运动停止后,对其沉积展布形态、内部构造、垂向演化等或沉积物粒度、矿物成分、物理力学性质等特征进行调查和测试,以此来识别海底碎屑流并推断其搬运特征或运动特性^[44]。

近年来,随着高分辨率多波束声学测深^[45]、差分全球定位系统^[3]、侧扫声呐和浅地层剖面技术^[46]及高分辨率地震勘探^[47]等地球物理勘探技术的迅速发展,海洋深水环境下的地形地貌、地质构造等特征的获取难度降低,信息准确性提高。通过物探技术的使用,碎屑流沉积位置的形态及内部构造得以被初步认识及分析。

岩土工程勘察分析也是现今海洋观测调查工作中不可或缺的重要一环^[48]。相较于多波束声学测深等物探手段的经济和高效,高质量的岩土工程原位试验或现场取样工作则显得尤为不易。Locat等^[3]曾对现场取样方法进行过详细讨论,并列举了一系列的重力取样方法或系统,如法国海洋开发研究院的 Calypso 取样、罗德岛大学的 Jumbo Piston Corer 取样、Lehigh 取样、Kastin Corer 取样、箱式取样及表层取样等。但是受限于所取样品的质量难以得到保证,因此开展原位测试工作,如沉积物力学性质原位测试及孔压监测等项目是现场取样工作的有效补充。

海洋深水环境的工程地质条件复杂,单一采用某种观测调查手段难以窥其全貌,针对具体问题联合选取合适的观测调查方案尤为重要。目前海底碎屑流运动研究多采用沉积物取样方法,但是这种形式的调查手段仅能针对已发生海底碎屑流沉积的场区,反演海底碎屑流运动过程的分析方法与实际情况的相符性未可知,因此如何直接有效地捕捉海底碎屑流的运动特性仍是目前研究的难点。

3.2 室内模型试验

由于海底碎屑流发生的时间和地点无法准确预测,加之现场直接观测手段的缺失,室内水槽试验成为理解海底碎屑流启动、运动及演变机制的一种有效手段。虽然研究对象相同,但不同学者所采用的水槽尺寸(长×宽×高)及斜坡坡度差异较大,Mohrig等^[7]使用的水槽为10 m×0.6 m×3 m,坡度范围为1°~20°;Ilstad等^[29]则将尺寸为9 m×2.25 m、坡度为8°的斜坡置于一条超长水道中进行试验;Toniolo等^[49]使用3.93 m×2.13 m×0.59 m且坡度可调节的水槽进行黏性碎屑流运动试验;Yin等^[27]采用的水槽尺寸最小,仅为41.5 cm×10.5 cm×50 cm,但斜坡坡度达到了试验研究中罕有使用

的高坡度57°和68°,其目的是提供足够的驱动力使得碎屑流头部达到产生滑水现象的速度。邓检良等^[50]则采用一种特殊的旋转水槽对比研究海底与陆上碎屑流的阻力坡降与流速的关系,旋转水槽可视为一种底面微弯的传统水槽绕定点旋转的试验装置。

随着试验测试技术的革新,一些光学及声学测试方法被应用到海底碎屑流的试验研究中,如粒子图像测速(particle image velocimetry)方法、声学后向散射成像(acoustic backscatter image)等方法。Elverhøi等^[26]使用粒子图像测速法计算碎屑流运动剖面的速度场来分析其运动机制。Mohrig等^[41]将声学后向散射成像技术用于处理碎屑流头部附近湍动区域的内边界与碎屑流本体难以区分的问题。另外,海底碎屑流运动过程中的孔压响应问题也是研究者们关注的重点之一,因此孔隙水压力的实时量测在试验研究中也较为常见^[25,27,30]。

尽管室内模型试验在一定程度上有助于对海底碎屑流发生及其发展过程的理解,但由于模型尺寸的限制而无法完全满足模型与滑坡现场之间的相似比要求,因此模型试验可能只适用于认识海底碎屑流运动过程中的部分特征,而关于海底碎屑流的动力学研究是否合理则值得商榷。为了还原海底碎屑流运动的真实情形,如应力应变关系和重力效应等,Gue等^[51]、Acosta等^[52]及Yin等^[53]利用(臂式或鼓式)离心机模型试验研究海底碎屑流的运动机制,试验中也发现了碎屑流头部的滑水现象。

3.3 数值模拟研究

早期的数值模型多采用刚性体或连续变形体来描述海底碎屑流的运动,可以说海底碎屑流数值模拟研究的发展相对落后于现场观测和室内模型试验研究。Jiang等^[54]将现存的碎屑流运动模型(连续体模型)大致分为3种:黏性模型、黏塑性模型和摩擦模型。其中,Bingham 黏塑性模型由于其本构关系简洁且能够较好地描述碎屑流的流变学性质而被广泛使用。然而,Huang等^[55]指出 Hershel-Bulkley模型应用于海底碎屑流的模拟更为合适。Locat^[56]则认为 Hershel-Bulkley 模型仅适用于描述海底沉积物的流变学性质而非运动特性,并提出 Bilinear 模型可能是描述碎屑流运动特性的最佳选择。目前,数值模拟研究中对于流变模型的选择还存在争议,如 Iverson^[57]倾向于用颗粒流变学模型代替传统的 Bingham 模型,但是就富含黏粒的碎屑流沉积物而言,颗粒流变学模型可能不适用^[58]。基于前人研究,Imran等^[59]于2001年发布了一款基于 Visual Basic 程序语言的数值软件 BING,该软件集成了 Bingham、Hershel-Bulkley 及 Bilinear 3种

流变模型,用于评价海底碎屑流的运动过程。

上述提及的海底碎屑流运动模型多基于同一种假定,即滑动体或碎屑流底面总是与斜坡面保持接触,均未考虑流动头部滑水作用的影响,无法解释缓坡上碎屑流的长距离搬运机制。因此,Harbitz 等^[60]基于动态润滑理论提出了稳态滑水条件下碎屑流滑块运动的一维解析解。De Blasio 等^[61]则针对滑水条件下的可变形碎屑流建立了更为完善的二维理论模型,并基于 Imran 等^[59]开发的 BING 软件框架补充了滑水条件下的碎屑流数值计算方法。Hu^[62]具体讨论了已有碎屑流滑水数值方法的局限性,提出了一种考虑滑水作用的海底滑坡块体模型,该模型通过监测滑坡体底部和斜坡面的接触情况来模拟滑水作用。

近年来计算流体力学(CFD)的方法蓬勃发展,关于海底碎屑流运动问题的数值模拟研究也多有应用。Gauer 等^[63]将 CFD 方法与土体应变软化模型相结合,研究 Storegga 滑坡的渐进后退式滑坡过程。Zakeri 等^[64-65]基于 ANSYS CFX 软件的多相流模型开展了海底碎屑流对海底管线的冲击模拟。另外,海底碎屑流头部的滑水现象也已借助 CFX 软件得到有效模拟(图 7),模拟结果与试验现象吻合良好^[66]。

海底碎屑流作为固体颗粒与流体的混合物,实质上是一种颗粒系统,其模拟可使用离散元法(DEM)实现,然而鲜有研究与此相关。近年来,数值方法的进步提供了譬如光滑粒子法(SPH)、格子玻尔兹曼法(LBM)、移动粒子半隐式法(MPS)、非连续变形分析法(DDA)及上文提及的离散元法(DEM)等一批行之有效的数值计算方法^[67-68],将上述数值方法间的耦合计算应用于海底碎屑流的运动特性分析也是未来发展的方向之一。

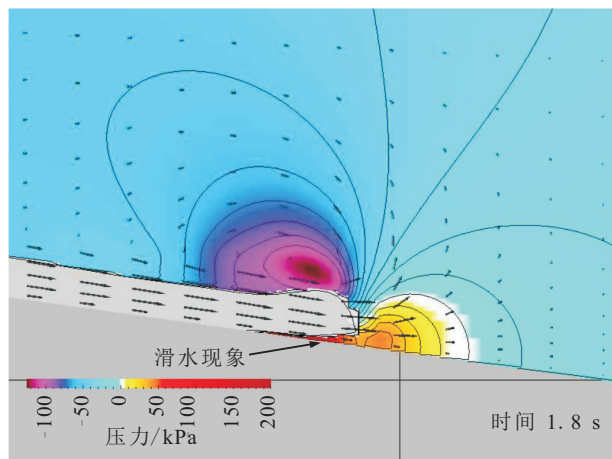


图 7 CFX 软件模拟的海底碎屑流滑水现象^[66]

Fig.7 CFX simulation of submarine debris flow hydroplaning

4 存在的问题与展望

目前,海底碎屑流研究的重点在于运动过程中的形态变化、流体性质转化与动力学特征,所用研究手段主要为现场观测、模型试验及数值模拟。虽然过往研究均取得了一定进展,但仍存在部分问题有待解决:

(1)海底碎屑流的概念和分类尚未明确。概念与分类的混淆导致当前研究难以系统准确地刻画海底碎屑流的运动特性,且研究重点多集中于黏性碎屑流,研究方向较为局限。

(2)现场观测技术体系不够完善,研究多依赖沉积物取样及沉积地质学分析反演海底碎屑流的运动过程,限制了运动特性的精细化分析,继续推进原位观测系统的研发及现场与模型试验研究的有机结合可能是一条新的研究思路。

(3)海底碎屑流运动特性的定量研究工作不足,尤其是国内学者少有开展相关的试验或数值研究。目前,碎屑流运动过程中的滑水作用及其远程搬运机制不甚清楚,且相关研究以定性分析为主,定量分析不足的问题亟待解决。

(4)另外,海底碎屑流引发的深水地质灾害破坏性和影响范围巨大,对海洋工程设施的建设极为不利,目前的研究仍不能有效指导实际工程的开展。因此,海底碎屑流的灾害风险评估与控制也将是未来的重要研究方向。

参考文献:

- [1] Amy L A, McCaffrey W D, Talling P J. Special issue introduction: Sediment gravity flows—Recent insights into their dynamic and stratified/composite nature[J]. Marine & Petroleum Geology, 2009, 26(10): 1897-1899.
- [2] Bruschi R, Bughi S, Spinazze M, et al. Impact of debris flows and turbidity currents on seafloor structures[J]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 2006, 86(3): 317-336.
- [3] Locat J, Lee H J. Submarine landslides: Advances and challenges[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 39(1): 193-212.
- [4] Shanmugam G. High-density turbidity currents: Are they sandy debris flows? [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66(1): 2-10.
- [5] 鲜本忠, 安思奇, 施文华. 海底碎屑流沉积: 深水沉积研究热点与进展[J]. 地质论评, 2014, 60(1): 39-51.
- [6] Masson D G, Harbitz C B, Wynn R B, et al. Submarine landslides: Processes, triggers and hazard prediction[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2006, 364: 2009-2039.
- [7] Mohrig D, Whipple K X, Hondzo M, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows[J]. Geological Society of America Bulletin, 1998, 110(3): 387-394.
- [8] Talling P J, Wynn R B, Masson D G, et al. Onset of submarine

- debris flow deposition far from original giant landslide[J]. *Nature*, 2007, 450: 541-544.
- [9] Locat J, Lee H J. Subaqueous debris flows[C]// Hungr O, Jakob M. Debris-flow hazards and related phenomena. Berlin: Springer, 2005: 203-245.
- [10] Couture R, Konrad J-M, Locat J. Analyse de la liquéfaction et du comportement non drainé des sables du delta de Kenamu (Projet ADFEX)[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32: 137-155.
- [11] Coussot P, Meunier M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows [J]. *Earth-Science Reviews*, 1996, 40(3/4): 209-227.
- [12] Middleton G V, Hampton M A. Sediment gravity flows; Mechanics of flow and deposition[C]// Middleton G V, Bouma A H. Turbidites and deep-water sedimentation. Los Angeles: SEPM Pacific Section, 1973: 1-38.
- [13] Lowe D R. Sediment gravity flows; II. depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52: 279-297.
- [14] Dott Jr R H. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1963, 47: 104-128.
- [15] Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s — 1990s): Deep-water processes and facies models: A critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.
- [16] 裴羽, 何幼斌, 李华, 等. 高密度浊流和砂质碎屑流关系的探讨[J]. *地质论评*, 2015, 61(6): 1281-1292.
- [17] 李相博, 卫平生, 刘化清, 等. 浅谈沉积物重力流分类与深水沉积模式[J]. *地质论评*, 2013, 59(4): 607-614.
- [18] Mulder T, Alexander J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits[J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 269-299.
- [19] Talling P J, Masson D G, Sumner E J, et al. Subaqueous sediment density flows; Depositional processes and deposit types [J]. *Sedimentology*, 2012, 59(7): 1937-2003.
- [20] 孙国桐. 深水重力流沉积研究进展[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(3): 30-36.
- [21] 梁建设, 田兵, 王琪, 等. 深水沉积理论研究现状、存在问题及发展趋势[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(10): 1488-1496.
- [22] Laval A, Cremer M, Beghin P, et al. Density surges; Two-dimensional experiments[J]. *Sedimentology*, 2010, 35(1): 73-84.
- [23] Mohrig D, Elverhøi A, Parker G. Experiments on the relative mobility of muddy subaqueous and subaerial debris flows, and their capacity to remobilize antecedent deposits[J]. *Marine Geology*, 1999, 154(1/4): 117-129.
- [24] Marr J G, Harff P A, Shanmugam G, et al. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: The role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(11): 1377-1386.
- [25] Ilstad T, Elverhøi A, Issler D, et al. Subaqueous debris flow behaviour and its dependence on the sand/clay ratio: A laboratory study using particle tracking [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1): 415-438.
- [26] Elverhøi A, Breien H, de Blasio F V, et al. Submarine landslides and the importance of the initial sediment composition for run-out length and final deposit[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(4): 1027-1046.
- [27] Yin M, Rui Y. Laboratory study on submarine debris flow[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(8): 950-958.
- [28] 余斌. 无水滑的海底泥石流运动速度的实验研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18(5): 641-647.
- [29] Ilstad T, De Blasio F V, Elverhøi A, et al. On the frontal dynamics and morphology of submarine debris flows[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1): 481-497.
- [30] Ilstad T, Marr J G, Elverhøi A, et al. Laboratory studies of subaqueous debris flows by measurements of pore-fluid pressure and total stress[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1): 403-414.
- [31] De Blasio F V, Elverhøi A. Properties of mass-transport deposits as inferred from dynamic modeling of subaqueous mass wasting: A short review[J]. *Special Publication-Society for Sedimentary Geology*, 2010, 96: 499-508.
- [32] Nissen S E, Haskell N L, Steiner C T, et al. Debris flow outrunner blocks, glide tracks, and pressure ridges identified on the Nigerian continental slope using 3-D seismic coherency[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(5): 595-599.
- [33] Lastras G, De Blasio F V, Elverhøi A, et al. Conceptual and numerical modeling of the BIG'95 debris flow, Western Mediterranean Sea[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(6): 784-797.
- [34] De Blasio F V, Engvik L E, Elverhøi A. Sliding of outrunner blocks from submarine landslides [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6): L06614.
- [35] Talling P J. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow; Deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models[J]. *Geosphere*, 2013, 9(3): 460-488.
- [36] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制[J]. *地学前缘*, 2017, 24(3): 234-248.
- [37] 李存磊, 任伟伟, 唐明明. 流体性质转换机制在重力流沉积体系分析中应用初探[J]. *地质论评*, 2012, 58(2): 285-296.
- [38] 李存磊, 左晓春, 王玲玲, 等. 基于沉积实验的重力流沉积体系砂体分布特征分析[J]. *沉积学报*, 2019, 37(1): 89-96.
- [39] Felix M, Peakall J. Transformation of debris flows into turbidity currents; Mechanisms inferred from laboratory experiments [J]. *Sedimentology*, 2006, 53(1): 17.
- [40] Talling P J, Peakall J, Sparks R S J, et al. Experimental constraints on shear mixing rates and processes; Implications for the dilution of submarine debris flows[C]// Dowdeswell J A, Cofaigh C. Glacier-influenced sedimentation on high-latitude continental margins. London: Geological Society, 2002: 89-103.
- [41] Mohrig D, Marr J G. Constraining the efficiency of turbidity current generation from submarine debris flows and slides using laboratory experiments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 883-899.
- [42] Paull C K, Talling P J, Maier K L, et al. Powerful turbidity currents driven by dense basal layers[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4114.
- [43] Xu J P. Measuring currents in submarine canyons; Technological and scientific progress in the past 30 years[J]. *Geosphere*, 2011, 7(4): 868-876.
- [44] 秦雁群, 万仑坤, 计智锋, 等. 深水块体搬运沉积体系研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 140-152.
- [45] Clarke J E H, Mayer L A, Wells D E. Shallow-water imaging-

- multibeam sonars; A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf[J]. *Marine Geophysical Researches*, 1996, 18(6): 607-629.
- [46] Krastel S, Schmincke H U, Jacobs C L, et al. Submarine landslides around the Canary Islands[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B3): 3977-3997.
- [47] Davies T A, Austin J A. High-resolution 3D seismic reflection and coring techniques applied to Late Quaternary deposits on the New Jersey shelf[J]. *Marine Geology*, 1997, 143(1): 137-149.
- [48] 贾永刚, 王振豪, 刘晓磊, 等. 海底滑坡现场调查及原位观测方法研究进展[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2017, 47(10): 61-72.
- [49] Toniolo H, Harff P, Marr J G, et al. Experiments on reworking by successive unconfined subaqueous and subaerial muddy debris flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(1): 38-48.
- [50] 邓检良, 柳青, 朱昱琛, 等. 基于旋转水槽试验的海底与陆上泥石流对比研究[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2017, 47(10): 99-103.
- [51] Gue C S, Soga K, Bolton M, et al. Centrifuge modelling of submarine landslide flows[C]// Springman S, Laue J, Seward L. *Proceedings of the 7th international conference on physical modelling in geotechnics*. London: Taylor & Francis Group, 2010: 1113-1118.
- [52] Acosta E A, Tibana S, De Almeida M D S S, et al. Centrifuge modeling of hydroplaning in submarine slopes[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 129: 451-458.
- [53] Yin M, Rui Y, Xue Y. Centrifuge study on the runout distance of submarine debris flows [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 37(3): 301-311.
- [54] Jiang L, LeBlond P H. Numerical modeling of an underwater Bingham plastic mudslide and the waves which it generates[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1993, 98: 10303-10317.
- [55] Huang X, García M H. A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 374: 305-333.
- [56] Locat J. Normalized rheological behaviour of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime[C]// Chen C. *Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, prediction, and assessment*, proceedings of the first international conference, New York: American Society of Civil Engineers, 1997: 260-269.
- [57] Iverson R M. The physics of debris flows[J]. *Reviews of Geophysics*, 1997, 35(3): 245-296.
- [58] Vorren T O, Laberg J S, Blaume F, et al. The Norwegian-Greenland Sea continental margins: Morphology and Late Quaternary sedimentary processes and environment[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1998, 17: 273-302.
- [59] Imran J, Harff P, Parker G. A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface[J]. *Computers & Geosciences*, 2001, 27(6): 717-729.
- [60] Harbitz C B, Parker G, Elverhøi A, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows and glide blocks: Analytical solutions and discussion[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B7): 2349.
- [61] De Blasio F V, Engvik L, Harbitz C B, et al. Hydroplaning and submarine debris flows [J/OL]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: C01002, doi: 10.1029/2002JC001714, 2004.
- [62] Hu H. A block model for submarine slides involving hydroplaning[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2007.
- [63] Gauer P, Kvalstad T J, Forsberg C F, et al. The last phase of the Storegga slide: Simulation of retrogressive slide dynamics and comparison with slide-scar morphology[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(1): 171-178.
- [64] Zakeri A, Høeg K, Nadim F. Submarine debris flow impact on pipelines-Part II: Numerical analysis[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(1): 1-10.
- [65] Zakeri A, Hawlader B. Drag forces caused by submarine glide block or out-runner block impact on suspended (free-span) pipelines: Numerical analysis[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 67: 89-99.
- [66] Elverhøi A, Issler D, De Blasio F V, et al. Emerging insights into the dynamics of submarine debris flows[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2005, 5(5): 633-648.
- [67] Qiu L, Jin F, Lin Z, et al. Numerical simulation of submarine landslide tsunamis using particle based methods[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(4): 542-551.
- [68] Ding W T, Xu W J. Study on the multiphase fluid-solid interaction in granular materials based on an LBM-DEM coupled method[J]. *Powder Technology*, 2018, 335: 301-314.