

# 深水重力流沉积水槽实验研究进展

张雨晴, 宋来明, 张宇焜, 杨 烁, 王 帅

中海油研究总院, 北京  
Email: zhangyq13@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020年11月3日; 录用日期: 2020年11月17日; 发布日期: 2020年11月24日

## 摘 要

深水重力流沉积一种重要的沉积类型, 目前已在全球发现多个深水油气田, 可采储量占全球油气新发现储量已达55%, 深水重力流沉积已成为油气增储上产的关键目标。目前深水重力流沉积研究主要是基于露头、岩心、测井及地震资料得到的宏观定性认识, 缺乏对沉积过程的定量化研究, 而水槽实验是深水重力流沉积过程有效的定量化研究手段, 为此本文系统总结了深水重力流水槽实验的试验装置, 实验流程, 以及在深水重力流沉积过程、沉积特征及主控因素方面的应用进展, 在此基础上指出水槽实验研究要进一步完善实验参数及限制条件设定, 同时要加强对多种技术手段的交叉融合, 形成各种技术手段优势互补的系统研究方法, 有效指导深水油气勘探及开发。

## 关键词

深水, 重力流, 水槽实验

# Flume Experiment Research Progress of Deep Water Gravity Flow

Yuqing Zhang, Laiming Song, Yukun Zhang, Shuo Yang, Shuai Wang

CNOOC Research Institute, Beijing  
Email: zhangyq13@cnooc.com.cn

Received: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2020; accepted: Nov. 17<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 24<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Deep water gravity flow is an important depositional type. At present, lots of deep water oil/gas fields have been discovered all over the world and their recoverable reserves account for 55 percent of the newly discovered oil and gas reserves. So oilfields with deep water gravity flow became key objectives for increasing reserves and production. However, the study of deep water gravity

flow is mainly based on outcrop, core, logging and seismic data, so the research results are more qualitative and macroscopic, lack of quantitative cognition. Flume experiment is an effective quantitative method for the study of sedimentary process of deep water gravity flow. So flume experiment equipment and process, sedimentary process, characteristics and the main controlling factors were summarized in the paper, and the paper also pointed out the setting of experimental parameters and limiting conditions should be further improved. In addition, the paper suggested it is necessary to strengthen the integration of various technical means and form a systematic research method with complementary advantages of various technical means, which will effectively guide for deep water oil and gas exploration and development.

## Keywords

Deep Water, Gravity Flow, Flume Experiment

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

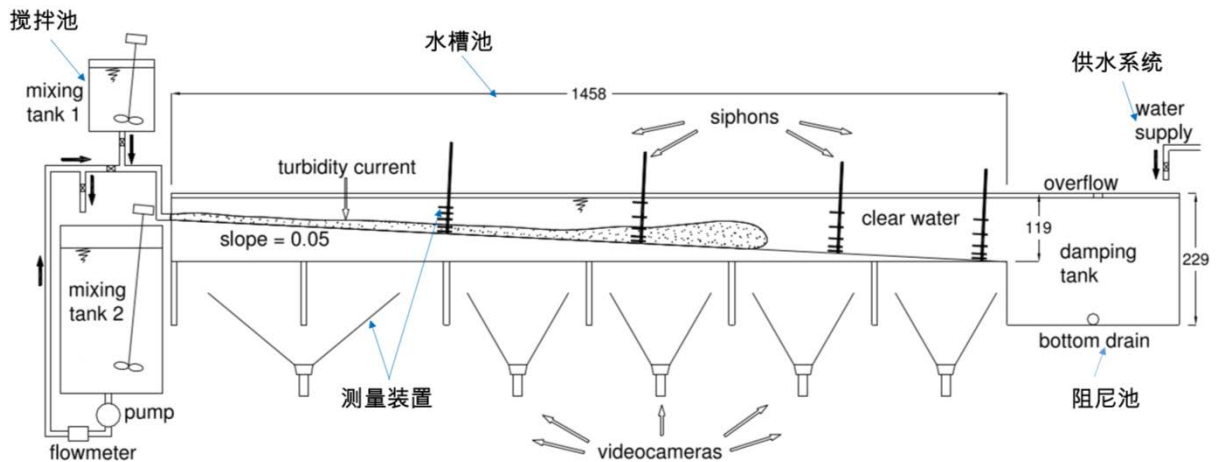
深水重力流沉积是一种重要的沉积类型, 2008 年以来, 全球深水、超深水领域共发现油气田 747 个, 2P 可采储量共计 217 亿吨油当量, 占全球油气新发现的 56% [1]。在我国南海海域, 2011 至 2015 年期间累计发现了 18 个深海沉积油气藏, 涉及探明可采储量 4.09 亿吨, 占总发现量的 55%, 2011 年深海沉积新发现储量仅占当年发现总量的 2.66%, 而到 2015 年该比例已达到 97.01% [2] [3]。近年来, 在珠江口盆地白云凹陷深水区、莺歌海盆地中央低位扇、琼东南盆地中央峡谷水道、文莱-沙巴盆地深水区均陆续发现了储量规模可观的油气藏, 南海深水区已成为中海油油气勘探的主战场, 具有重要的战略意义[4] [5]。

深水重力流研究始于 20 世纪 50 年代, 鲍马通过野外露头分析, 建立了浊流沉积识别标志—“鲍马序列” [6]; Kuenen [7] [8]开展了高密度浊流模拟实验, 认识到“递变层理”是浊流主要识别标志。20 世界 70 年代, 深水沉积研究逐渐成为研究热点, 国内外学者综合野外露头, 岩心, 测井及地震等多种资料建立深水沉积模式, 探索深水沉积主控因素及分布规律, 一些学者也开展了简单的水槽模拟研究, 建立了重力流沉积微观沉积模式。然而此阶段的研究主要还是基于古代露头、测井及地震资料, 所建立的沉积模式缺乏动力学机制的支撑, 地质模式存在一定不确定性[9] [10] [11]。近几年国内外学者更加关注重力流物理实验和数值模拟研究, 对重力流沉积过程、沉积机理及水动力等特征开展了深入的研究, 这些研究进一步验证了基于露头、测井及地震资料分析得到的重力流沉积模式及主控因素, 并且探索了重力流沉积成因机理, 对于深水油气的勘探开发具有重要的指导意义[12] [13] [14]。

## 2. 深水重力流沉积水槽实验装置及流程

### 2.1. 水槽实验装置

重力流水槽实验装置主要包括四部分[15] (图 1): 搅拌池、水槽池、供水系统及阻尼池。搅拌池主要控制水槽入口处输入流体的传输速度, 流体浓度及携载沉积物的分选, 并且控制入流方式(滑塌触发型及洪水型); 水槽池的作用主要是观察实验过程, 浊流流动特征, 沉积特征及河道形态等; 供水系统的主要作用是确保水槽池内部充满环境水(淡水、模拟海水); 阻尼池主要是容纳水槽末端阻尼的浊流流体, 避免由于尾壁碰撞而使流体产生紊流。



**Figure 1.** Flume experiment research setup of deep water gravity flow (Sequeiros *et al.*, 2009)

**图 1.** 重力流水槽实验装置(Sequeiros *et al.*, 2009)

目前水槽池的种类主要包含 5 种[16] [17]: a) 长型水槽, 这种水槽多设计为斜坡与平坡组合, 斜坡坡度可进行调整, 主要模拟重力流在平直峡谷种的流动特征; b) 环形水槽: 这类水槽主要由环形水槽环, 剪力环和传动系统三部分组成, 重力流在惯性力及剪切力作用下可在水槽环内发生持续流动, 主要用于分析随着搬运距离的增大重力流沉积变化特征, 并分析重力流对水道底床的侵蚀作用; c) 弯道水槽: 主要是将弯曲水道模型放入方形水池中, 弯曲水道模型根据实际地貌进行设计, 这类水槽主要模拟深水曲流水道中的沉积过程; d) 与方形池结合水槽: 主要是将平坡方形水池接于斜坡水槽下游, 可模拟深水扇沉积过程; e) 地面可调节水槽: 这类水槽的非限制性特征可以模拟宽广陆坡上的水道形成及演化, 也可模拟多物源供给下的深水扇沉积特征。

水槽池内部配备多种测量装置[18] (图 1), 用于测量流体的速度, 浓度及沉积特征等, 主要包括 4 种类型: a) 高速胶片摄像机及超声波扫描仪: 主要用于记录整个流体的流动过程及水道底床的变化过程, 也可测量流动速度; 超声波扫描仪主要用于捕捉流体头部的变化特征; b) 超声速度剖面测量仪 (ADV/UDVP): 声波传感器可计算不同高度的流速, 不同信道的传感器计算的流速可组成流速剖面, 通过该装置可得到速度随时间的变化曲线, 速度随高度的变化曲线以及流速场剖面; c) 流体浓度测量装置 (ABS/UHCM): ABS 主要利用散射声压测量流体浓度, UHCM 主要利用信号衰减原理测量浓度, 通过此类装置可得到浓度随高度的变化曲线以及浓度剖面; d) 数字高程模型建立 (DEM) 装置: 通过 DEM 装置可以获得三维沉积地貌特征及截面沉积变化特征。

## 2.2. 水槽实验流程

重力流水槽实验在建立实验模型时, 由于水槽实验模型无法 1:1 的复制原型模型, 因此为确保实验模型和原型模型具有流体动态相似, 实验模型设置的弗劳德数要接近原型模型, 且雷诺数设置值要大于 2000。

模拟流体类型主要包括 2 种[19]: 一是牵引型流体模拟, 进行牵引流模拟时, 主要采用盐水作为流体, 流体内部加入  $\text{KMnO}_4$  染料, 流体内无悬浮沉积物, 流体过剩密度设置为 2.5% 左右, 并且水槽内部铺设移动底床, 底床采用低密度、次棱角状的聚二甲硅氧烷, 中值粒径一般为  $175 \mu\text{m}$  左右; 二是悬浮型流体模拟, 流体选用溶解  $\text{CaCl}_2$  的淡水, 采用球形石英玻璃珠或石英颗粒、塑料颗粒、煤和粘土颗粒作为悬浮沉积物, 过剩密度设置为 2.1% 左右, 进行悬浮流体模拟时, 不铺设移动底床。

在开展水槽实验前要记录好流体参数, 包括流体密度、速率、温度、过剩密度、雷诺数、理查德森数、颗粒的中值粒径等。同时记录好水槽池的坡度、水道弯曲度以及水槽池的温度和环境水的密度。

水槽实验的主要流程包括：a) 将水槽池充满淡水(环境水)，准备好流体样品；b) 打开阀门，释放浊流流体；c) 流体向下游移动，测量装置记录各类浊流数据(速度、浓度、形状)；d) 流体到达尽头，进入阻尼池；e) 流体流完后，等 1~2 天使沉积物完全沉淀；f) 在实验 1 完成后使用超声波地层剖面仪记录地形，如有需要提供环境水；g) 进行实验 2，重复上述操作步骤，产生新的沉积物直至充满水道模型；

### 3. 深水重力流沉积水槽实验应用进展

水槽实验可以模拟重力流沉积过程，国内外一些学者通过水槽实验分析了流体速度、浓度、流态转化等在整个沉积过程中的变化特征，认识了重力流沉积过程变化规律，同时也进一步明确了重力流沉积特征及沉积主控因素，主要技术路线见图 2。

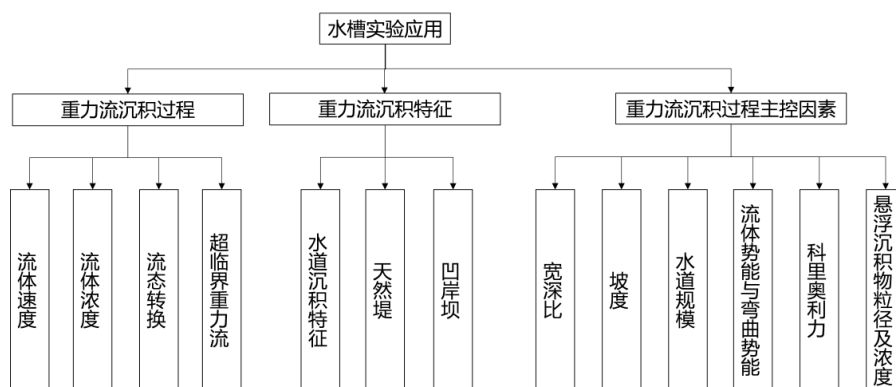


Figure 2. Technical route of gravity flume experiment

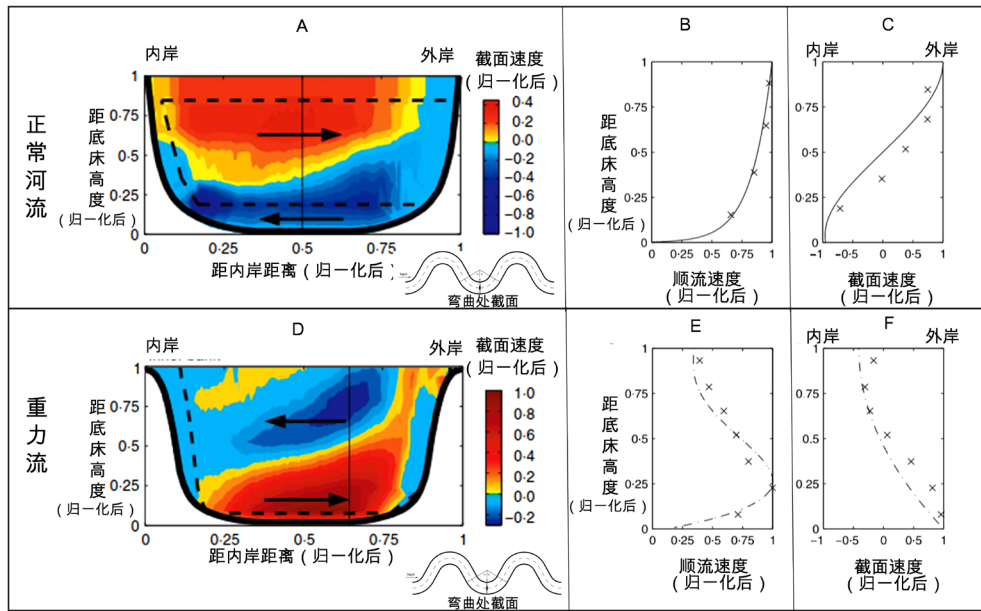
图 2. 重力流水槽实验应用技术路线

#### 3.1. 重力流沉积过程

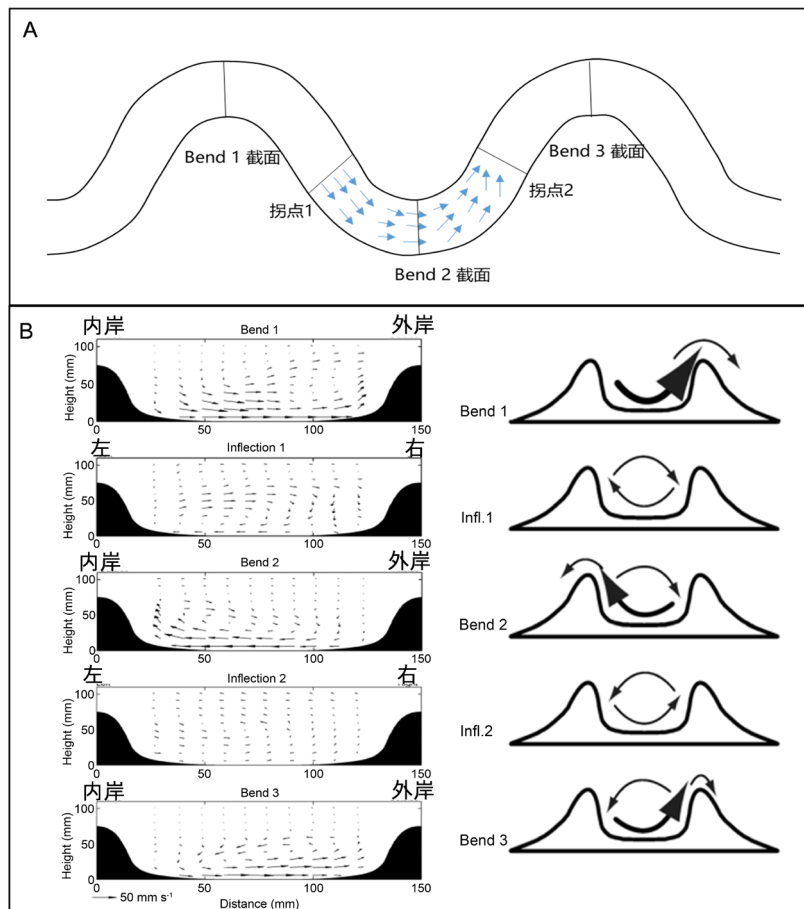
**流体速度：**Corney [20]等人通过开展水槽实验认识到了重力流沉积与正常的河流沉积其流体速度方向和分布存在差异，正常河流在河道弯曲处的横向环流表现为顺时针方向(图 3(A))，而重力流在河道弯曲处的横向环流方向为逆时针方向(图 3(D))；正常河流截面速度最大值位于顶部及底部(图 3(C))，而重力流的截面速度最大值位于水道底部(图 3(F))；正常河流的顺流速度最大值位于水流顶部(图 3(B))，而重力流最大顺流速度位于靠近水道底部(图 3(E))。

Peakall [21]等人采用水槽内嵌正弦形状水道模型，通过牵引型模拟的方式研究了弯曲水道流体速度的变化特征，认识到流体的顺流速度在弯曲点处平行水道方向，弯曲点下游水流向内岸汇聚，这于正常的河流有所差异，正常河流在弯曲点上游水流已向内岸的汇聚(图 4(A))。Keevil [22]等人开展了牵引型水槽模拟实验研究，他认识到在水道弯曲点处(Bend 1、2、3)，水道底部水流截面速度大，且底部截面速度方向由内岸流向外岸，顶部截面速度由外岸朝向内岸，随着搬运距离的增大，水道溢岸作用逐渐减弱。在两个拐点处(Infl. 1&2)水流横向速度方向与弯曲处的方向一致，但不发生溢岸作用(图 4(B))。

Imran [23]等人开展水槽实验认为在弯曲处存在多个环形水流，最下部的环形水流方向为顺时针，与正常河流一致，并且他通过数值模拟技术验证了这一认识，从数值模拟得到的横向速度矢量图可以看出(图 5)，截面处发育两个环形水流，下部环形水流规模大，下部环形水流单元与正常河流中观察到的水流方向相似，他认为下部环形水流是由于离心力和引起漩涡流的压差力之间的不平衡导致的，而上部的环形水流是由于水流速度梯度反转而造成的。该水槽实验得到的结果和 Corney 等开展水槽实验得到的结果有所差异，Imran 等认为主要是由于 Corney 采用的水道模型具有较大的弯曲度，造成较强的溢岸作用，导致底部环形水流不发育。



**Figure 3.** Comparison of fluid velocity between normal and gravity flow (Corney *et al.*, 2006)  
**图 3.** 正常河流与重力流流体速度对比(Corney *et al.*, 2006)



**Figure 4.** Gravity flow velocity characteristics in sinusoidal channel (Peakall *et al.*, 2007; Keevil *et al.*, 2006)  
**图 4.** 正弦形状水道重力流流体速度特征(Peakall *et al.*, 2007; Keevil *et al.*, 2006)

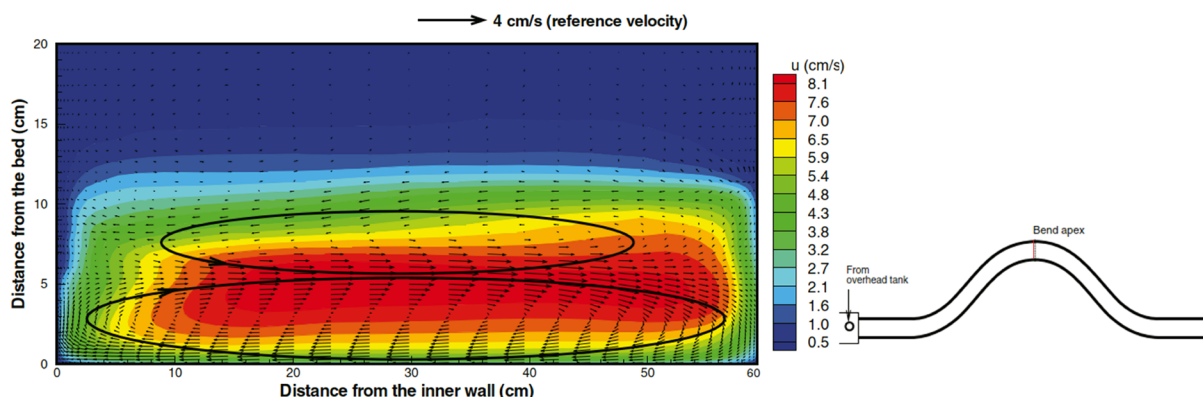


Figure 5. Fluid velocity of cross section at bend of single bend channel (Imran *et al.*, 2007)

图 5. 单弯曲水道弯曲处流体截面速度(Imran *et al.*, 2007)

**流体浓度:** Keevil [24]等人采用水槽内嵌正弦形状水道模型开展水槽实验, 超声浓度测量仪(UHCM)记录了弯曲点和拐点处的浓度变化特征, 可以看出: 浓度最高处位于距离水道底床附近, 随着距离底床距离越大, 浓度降低; 拐点处的浓度比弯曲处的浓度略高(图 6(A))。Peakall [25]等人也研究了重力流沉积过程浓度变化特征, 研究表明: 流态及水道弯曲度都会影响流体浓度的变化, 弯曲水道相对于顺直水道, 浓度变化更大(图 6(B)); 超临界流的浓度变化较为明显, 靠近水道底部浓度最大, 向上减小, 亚临界流的浓度变化不明显, 尤其在水道中下部, 浓度几乎不发生变化(图 6(C))。

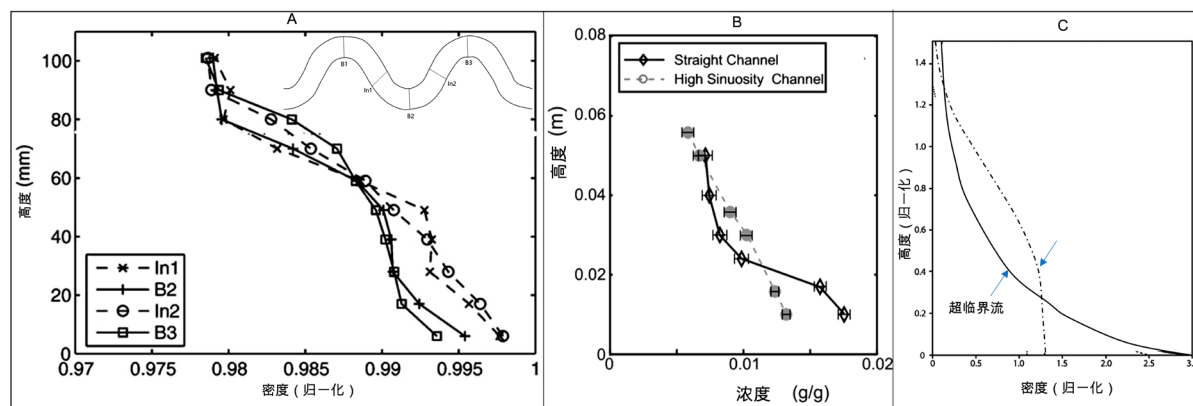


Figure 6. Fluid concentration characteristics during gravity flow deposition (Keevil, 2006; Peakall, 2015)

图 6. 重力流沉积过程流体浓度特征(Keevil, 2006; Peakall, 2015)

**流态转换:** 水槽实验研究表明由滑塌所触发的黏性碎屑流在向下游搬运过程中常常会发生一系列的流态转换[26], 超高密度的碎屑流在搬运过程中(图 7(A)), 上界面被部分侵蚀形成高密度浊流(图 7(B)), 随着搬运距离的增加, 高密度碎屑流转化为中等密度碎屑流, 同时碎屑流块体进一步分解, 转化为高密度浊流(图 7(C)), 随着搬运的继续, 碎屑流完全分解, 转化为浊流(图 7(D)), 随着搬运距离的进一步增加高密度浊流向低密度浊流进一步转化。由于自然界重力流的搬运距离长, 一般难以对其转换过程开展野外检测, 然而水槽实验可有效的揭示重力流的转化机制及控制因素。

**超临界重力流:** 超临界沉积物重力流是指在深水环境中弗劳德数大于 1, 沿水下斜坡向盆地中心搬运、在水力跳跃机制作用下发生超临界流与亚临界流频繁转化、形成易于保存的大型波状旋回坎的高密度流。它是深水环境中一种较为重要的流态, 由于其强烈的侵蚀能力, 保留下来的沉积地貌较少, 难以通过野外露头资料分析超临界流对海底地貌及沉积展布的影响作用, 水槽模拟则可有效揭示超临界流沉

积地貌及形成过程,水槽模拟实验表明:随着弗劳德数不断增大,超临界重力流形成的沉积底形变化过程为(图 8):稳定逆行沙丘-不稳定逆行沙丘-流槽及凹坑-旋回坎。同时水槽实验揭示超临界沉积物重力流形成的主控因素包括:沉积物浓度、地形坡度、流体流量和流体厚度[27]。

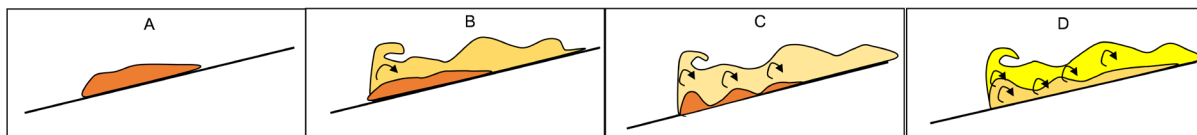


Figure 7. Physical simulation of gravity flow fluid conversion process (Wang Xingxing *et al.*, 2018)

图 7. 基于物理模拟所建立的重力流流体转换过程模拟(王星星等, 2018)

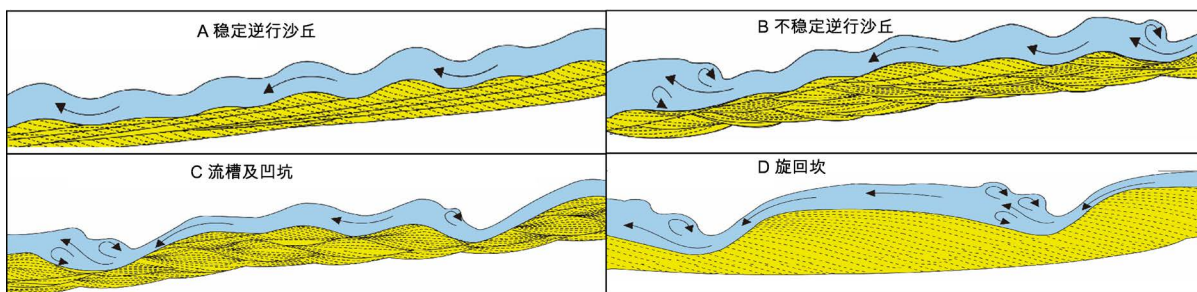


Figure 8. Change process of sediment bottom shape in supercritical gravity flow (Kostic *et al.*, 2010)

图 8. 超临界重力流沉积底形变化过程(Kostic *et al.*, 2010)

### 3.2. 重力流沉积特征

**水道沉积特征:** Peakall [21]等人通过水槽实验研究进一步认识了重力流水道沉积特征,研究认为(图 9):水道沉积厚度较大的区域基本位于最大弯曲的下游方向,靠近内岸,且随着时间增加厚度越来越大,沉积的内岸坝始端位置保持不变,随着时间的推移,向水道下游不断进积,内岸坝的形成是由于在弯曲点下游水流向内岸汇聚,类似于正常曲流河的点坝沉积,但沉积位置更靠近下游方向。侵蚀区主要位于弯曲顶点处,且靠近外岸,随着时间推移,侵蚀作用越来越强,并且随着搬运距离的增大,侵蚀作用减弱。

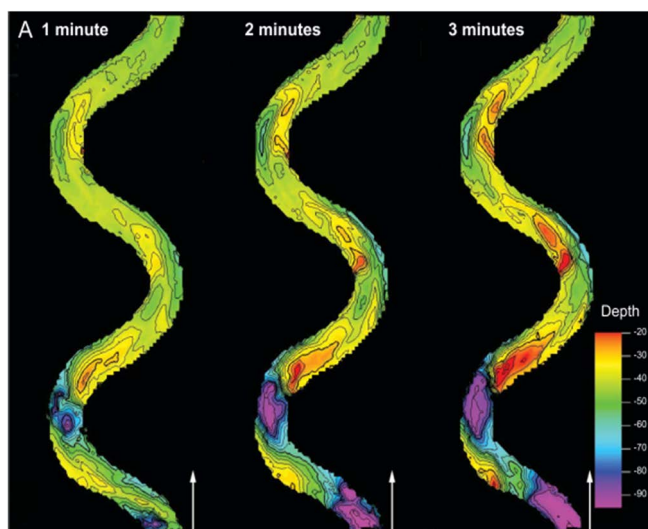


Figure 9. Sedimentary characteristics of gravity flow channel (Peakall *et al.*, 2007)

图 9. 重力流水道沉积特征(Peakall *et al.*, 2007)

Straub [28]研究成果表明：每一次水流形成层状沉积，后期水流对早期沉积物无再改造作用；每期浊流的沉积粒度及厚度沿着向水道远端减小(图 10(C)，图 10(D))。沉积最厚及粒度最粗的区域分布在河道中心线靠向外岸一侧(图 10(A))，这与前述研究认识相反，Straub 认为这主要是由于模拟条件不一致造成的。同时，Straub 对天然堤的沉积特征进行了研究(图 10(B)，图 10(D))，可以看出随着距离的增大，天然堤的厚度及粒度逐渐降低的；内外岸的天然堤不对称，外岸处的天然堤更为发育，内岸处的天然堤厚度薄，粒度细；靠近外岸的天然堤具有较大的坡度，且随着距离增大，坡度逐渐降低。Kane [29]通过水槽实验认识到：外岸天然堤为形态为平行河道的长条状，内岸天然堤形态为丘状沉积，弯曲点及下游外岸较内岸天然堤厚度大。

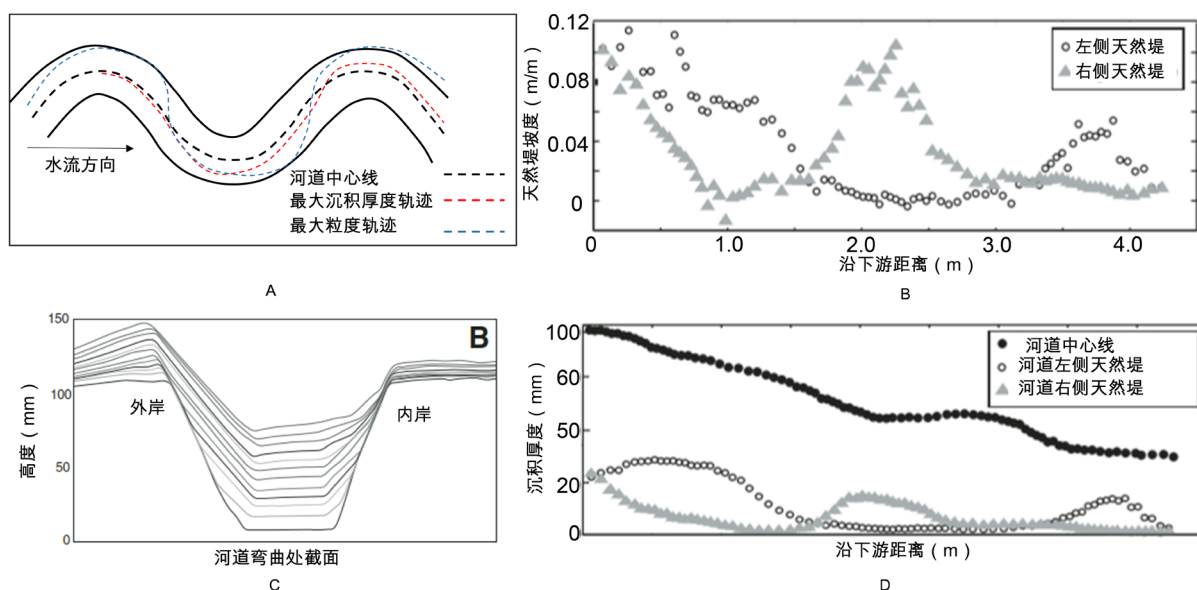


Figure 10. Sedimentary characteristics of gravity flow channel and levee (Straub *et al.*, 2011)

图 10. 重力流水道及天然堤沉积变化特征(Straub *et al.*, 2011)

**凹岸坝：**由于水道弯曲凹岸处侵蚀作用比较强，故在深海水道的水槽以及数值模拟实验中，基本无法模拟出自然界状态下水道弯曲凹岸处的砂体堆积。Straub 在水槽实验中将水道内通过的一般浓度流体改为物源供给十分强烈的流体后，水道弯曲凹岸处的砂质沉积物在水槽实验中才少量产生。国内学者冯潇飞、赵晓明等人研究了凹岸坝形成的主控因素[30]，研究表明：凹岸坝形成的主控因素主要包括水道曲率及宽度，当水道弯曲处曲率较大时，凹岸坝发育；对于水道宽度而言，研究表明宽度较窄、以垂向加积为主的末期水道凹岸坝较为发育，而对于整体宽度较宽、以侧向加积为主的早期被强烈侵蚀的水道凹岸坝较难完整保存。通过对凹岸坝形成机制的研究表明，凹岸坝主要是由于惯性离心力作用形成的，在物源供给充足情况下，水流流经水道，在水道曲率较大的弯曲处，由于惯性离心力作用使得流体产生快速的流体超高，当流体内沉积物则产生明显的分层，上层为粒度较小的悬浮负载颗粒，下层为粒度较粗的砂质颗粒，在惯性力作用下流体发生剥离，上层流体密度较小的部分向上爬升越过内天然堤形成溢岸沉积，之后水道弯曲处流体流量迅速减小，其所携带沉积物负载的能量也随之减弱，因此沉积物快速沉降，在水道弯曲处形成凹岸坝。

### 3.3. 重力流沉积过程主控因素

**宽深比[29]：**水槽实验研究表明，随着宽深比的降低，水流速度变化幅度有所降低，在高宽深比条件



下,随着搬运距离的增大,水流速度在 P2 和 P3 处依次减小幅度为 50%和 85%,在中等宽深比条件下,随着搬运距离的增大,水流速度在 P2 和 P3 处依次减小幅度为 40%和 70%。在高宽深比条件下,随着搬运距离的增大,水流速度在 P2 和 P3 处依次减小幅度为 12%和 55% (图 11(A))。宽深比也影响沉积量的变化,随着宽深比降低,水道内沉积体积有所增加,宽深比在 ar8 处达到最大,之后沉积体积减小;随着宽深比降低,溢岸沉积体积相对不变,在到达 ar8 后,溢岸沉积体积快速减少;随着宽深比降低,沉积过路作用随着宽深比的减少,进一步加强,也就是说水道限制作用加强,沉积过路作用增加(图 11(B))。

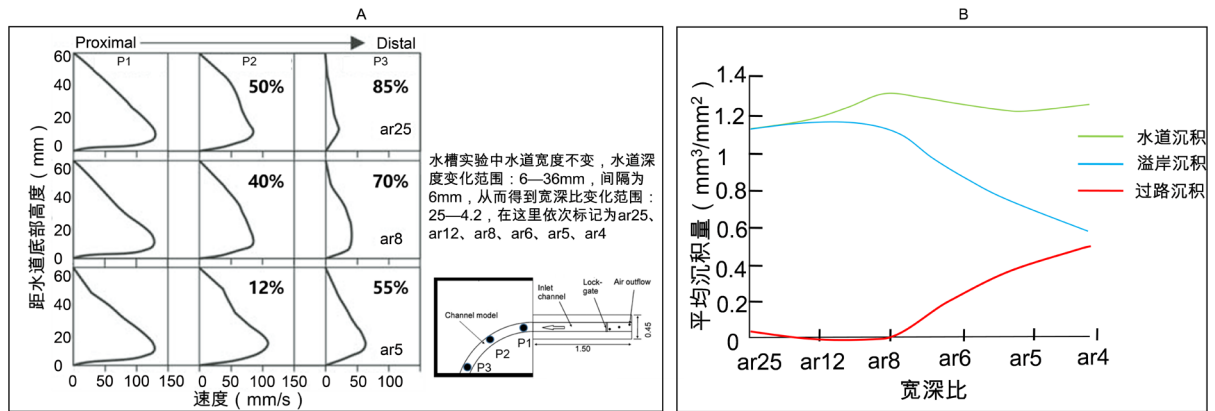


Figure 11. Influence of width depth ratio on sedimentary characteristics of gravity flow (Kane *et al.*, 2008)  
图 11. 宽深比对重力流沉积特征的影响(Kane *et al.*, 2008)

**坡度[31]:**水槽实验表明,对于顺流速度,随坡度增大,顺流速度增大,且顺流速度变化幅度越来越大,在坡度为 1 度时,顺流速度随高度的变化不明显,在坡度为 3 和 5 度时,最大顺流速度靠近水道底部(图 12(A))。对于截面速度,随坡度增大,截面速度增大;最大截面速度进一步向外岸迁移,且流体抬升作用增大(图 12(B))。

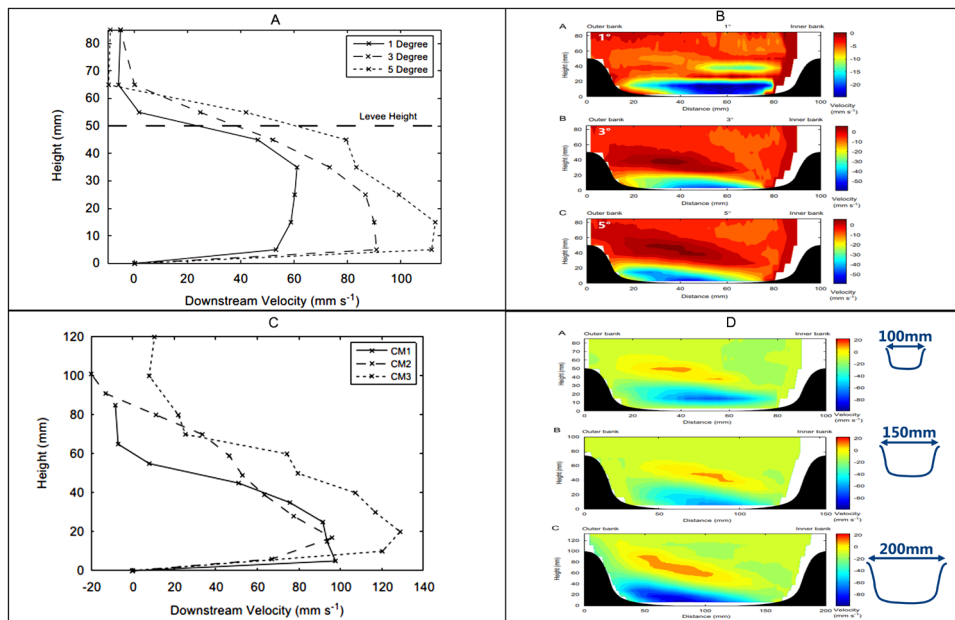
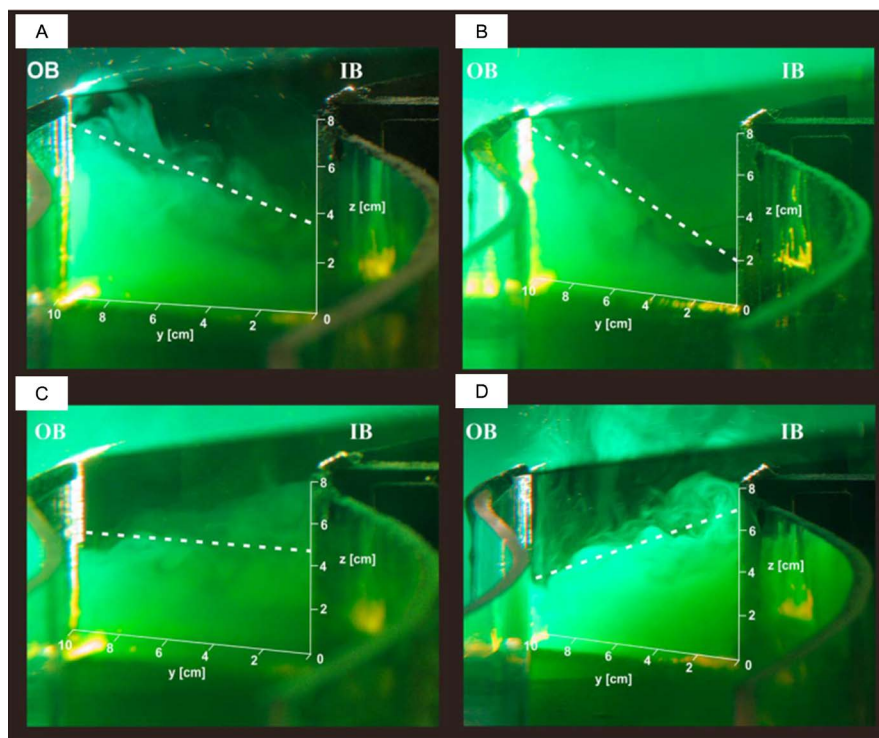


Figure 12. Influence of channel slope and scale on gravity flow sedimentary characteristics (Keevil *et al.*, 2007)  
图 12. 水道坡度及规模对重力流沉积特征的影响(Keevil *et al.*, 2007)

**水道规模[31]:**水槽实验表明,随着水道规模增大,最大顺流速度略有增大(图 12(C));对于截面速度,随水道规模增大,流速略增大,且进一步向凹岸迁移,流体抬升作用增大(图 12(D))。

**流体势能与弯曲势能的比值[28]:** Straub 等人研究表明,流体势能(密度  $\times$  速度)与弯曲势能(密度差  $\times$  重力加速度  $\times$  满岸深度)的比值影响重力流沉积特征,当比值大于 1 时,水道将不能限制内部流体,流体将冲出水道,比值越小,水道对流体的限制能力越好,水道化程度越高,溢岸沉积越不发育,当比值大于 1,弯曲则完全不能限制浊流,浊流将沿着原始路劲冲出水道。

**科里奥利力[32]:** Cossu 等人在水槽池下部安装了旋转系统模仿地球自转,进而研究了科里奥利力对重力流沉积过程的控制作用,研究表明:无科里奥利力条件下,水流在离心加速度的作用下,流体顶界面向外岸弯曲倾斜(图 13(A));在正科里奥利力(北半球)条件下,由于科里奥利力和离心力作用在同一方向,流体顶界面向外岸弯曲的倾斜度进一步增加(图 13(B));在负科里奥利力(南半球)条件下,由于科里奥利力与离心力相反,流体顶界面几乎水平(图 13(C));在南半球纬度更高的地区,由于科里奥利力增强且超过离心力作用,使流体顶界面向内岸抬升(图 13(D))。



**Figure 13.** Influence of Coriolis force on sedimentary characteristics of gravity flow (Cossu *et al.*, 2010)

**图 13.** 科里奥利力对重力流沉积特征的影响(Cossu *et al.*, 2010)

**悬浮沉积物粒径及浓度[26]:**随着悬浮沉积物粒径变粗或悬浮沉积物浓度的降低,深水沉积朵体的长宽比逐渐变小,朵体形状由长条状逐渐变为扁圆状,朵体厚度也逐渐变小。

#### 4. 深水重力流沉积水槽实验发展趋势

深水重力流沉积研究手段多样,主要包括露头、岩心、测井、地震、水槽实验以及数值模拟方法。目前基于露头、岩心、测井、地震等手段开展的深水重力流沉积研究主要以定性、半定量的沉积过程分析为主,而水槽实验的研究可实现沉积过程的定量化分析,进而可以有效的揭示重力流沉积砂体的沉积主控因素、展布规律及砂体构型特征[33]。

目前国内深水重力流的水槽实验研究主要应用环境流体力学研究领域[34],更多关注于重力流沉积过程中的水动力参数的时空变化,未来还需进一步加强在地质学研究领域的应用,应用水槽实验手段定量研究重力流沉积砂体的空间展布规律及砂体构型特征。

由于深水沉积单元规模大,实验室的水槽规模远小于实际地貌规模,因此模拟时并不能实现等比例模拟,同时由于重力流沉积过程复杂,沉积控制因素多,水槽实验不能完全一致于实际原型模型,只能保证流体动力学参数(如雷诺数、弗劳德数等)的其中一项一致,并不能实现所有动力学参数同时一致,因此水槽实验模拟与实际原型模型之间存在一定差异性,未来还需进一步完善水槽实验的实验参量及限制条件,使得模拟结果更贴近于实际模型。同时未来深水重力流沉积研究要进一步加强多技术手段交叉研究,将实际的露头、岩心、测井、地震等地质资料与模拟分析相结合,各种技术手段优势互补,全方位、多角度地实现重力流沉积过程量化研究,深入认识重力流沉积主控因素,砂体空间分布规律及构型模式。未来水槽实验研究还应与数值模拟充分结合,模拟结果相互验证与补充,提升模拟结果的精度,使得模拟结果符合客观沉积规律。

## 5. 结论

1) 重力流水槽实验装置主要包括四部分:搅拌池、水槽池、供水系统及阻尼池,水槽池内部配备多种测量装置,用于测量流体的速度,浓度及沉积特征。水槽实验的主要流程包括:准备好流体样品;测量装置记录各类油流数据;实验完成后记录地形特征等主要工作。

2) 通过水槽实验可以分析流体速度、浓度、流态转化等在整个沉积过程中的变化特征,认识了重力流沉积过程变化规律,同时也进一步明确了重力流沉积特征及沉积主控因素。

3) 水槽实验的研究可实现深水重力流沉积过程的量化分析,进而可以有效揭示重力流沉积主控因素、展布规律及砂体构型特征,未来还需进一步加强在地质学研究领域的应用,并完善水槽实验的实验参量及限制条件。同时要进一步加强多技术手段交叉研究,使得多种技术手段优势互补,全方位、多角度地实现重力流沉积过程量化研究。

## 致 谢

感谢审稿专家与编辑老师提出的宝贵建议!

## 基金项目

国家科技重大专项“油砂 SAGD 开发地质油藏评价及方案优化技术”(2016ZX05031003)。

## 参考文献

- [1] 计智锋,穆龙新,万仑坤,等.近10年全球油气勘探特点与未来发展趋势[J].国际石油经济,2019,27(3):16-22.
- [2] 胡孝林,刘新颖,刘琼,等.深水沉积研究进展及前缘问题[J].中国海上油气,2015,27(1):10-18.
- [3] 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.
- [4] 何家雄,夏斌,施小斌,等.世界深水油气勘探进展与南海深水油气勘探前景[J].天然气地球科学,2006,17(6):747-752,806.
- [5] 张功成,米立军,吴时国,等.深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J].石油学报,2007,28(2):15-21.
- [6] Bouma, A.H. (1962) *Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation*. Elsevier, Amsterdam.
- [7] Kuenen, Ph.H. and Migliorini, C.I. (1950) Turbidity Currents as a Cause of Graded Bedding. *Geology*, **58**, 41-127.

- <https://doi.org/10.1086/625710>
- [8] Kuenen, Ph.H. and Menard, H.W. (1952) Turbidity Current, Graded and Nongraded Deposits. *Sedimentary Petrology*, **22**, 83-96. <https://doi.org/10.1306/D42694CC-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- [9] 赵晓明, 吴胜和, 岳大力, 等. 西非某油田深水海底扇岩石相类型及其识别方法研究[J]. 测井技术, 2010, 34(5): 506-510.
- [10] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 尼日尔三角洲盆地深水油田 A 海底扇储层质量差异[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 494-502.
- [11] 赵晓明, 刘丽, 谭程鹏, 等. 海底水道体系沉积构型样式及控制因素: 以尼日尔三角洲盆地陆坡区为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 826-840.
- [12] 秦国省, 邹存友, 赵亮, 等. 基于沉积过程的储层表征研究进展及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30): 111-120.
- [13] 冯文杰, 吴胜和, 张可, 等. 曲流河浅水三角洲沉积过程与沉积模式探讨——沉积过程数值模拟与现代沉积分析的启示[J]. 地质学报, 2017, 91(9): 2047-2061.
- [14] 张可, 吴胜和, 冯文杰, 等. 砂质辫状河心滩坝的发育演化过程探讨——沉积数值模拟与现代沉积分析启示[J]. 沉积学报, 2018, 36(1): 81-91.
- [15] Middleton, G.V. (1966) Experiments on Density and Turbidity Current. *Canadian Journal of Earth Science*, **3**, 523-546. <https://doi.org/10.1139/e66-038>
- [16] Baas, J.H., Van Kesteren, W. and Postma, G. (2004) Deposits of Depletive High-Density Turbidity Currents: A Flume Analogue of Bed Geometry, Structure and Texture. *Sedimentology*, **51**, 1053-1088. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2004.00660.x>
- [17] 杨华, 牛小兵, 罗顺社, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段致密砂体重力流沉积模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 322-332.
- [18] Breien, H., Blasio, F.V.D., Elverhi, A., *et al.* (2010) Transport Mechanisms of Sand in Deep-Marine Environment-Insight Based on Laboratory Experiments. *Journal of Sedimentary Research*, **80**, 975-990. <https://doi.org/10.2110/jsr.2010.079>
- [19] Talling, P.J., Sumner, E.J., Masson, D.G., *et al.* (2012) Subaqueous Sediment Density Flows: Depositional Processes and Deposit Types. *Sedimentology*, **59**, 1937-2003. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01353.x>
- [20] Corney, R.K.T., Peakall, J., Parsons, D.R., *et al.* (2006) The Orientation of Helical Flow in Curved Channels. *Sedimentology*, **53**, 249-257. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00771.x>
- [21] Peakall, J., Amos, K.J., Keevil, G.M., *et al.* (2007) Flow Processes and Sedimentation in Submarine Channel Bends. *Marine and Petroleum Geology*, **24**, 470-486. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.01.008>
- [22] Keevil, G.M., Peakall, J., Best, J.L., *et al.* (2006) Flow Structure in Sinuous Submarine Channels: Velocity and Turbulence Structure of an Experimental Submarine Channel. *Marine Geology*, **229**, 241-257. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.03.010>
- [23] Imran, J., Islam, M.A., Huang, H.Q., *et al.* (2007) Helical Flow Couplets in Submarine Gravity Underflows. *Geology*, **35**, 659-665. <https://doi.org/10.1130/G23780A.1>
- [24] Keevil, G.M., Peakall, J., Best, J.L. and Amos, K.J. (2006) Flow Structure in Sinuous Submarine Channels Velocity and Turbulence Structure of an Experimental Submarine Channel. *Marine Geology*, **229**, 241-257. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.03.010>
- [25] Peakall, J. and Sumner, E.J. (2015) Submarine Channel Flow Processes and Deposits: A Process-Product Perspective. *Geomorphology*, **244**, 95-120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.005>
- [26] 王星星, 王英民, 高胜美, 等. 深水重力流模拟研究进展及对海洋油气开发的启示[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 588-602.
- [27] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 超临界沉积物重力流形成演化及特征[J]. 石油学报, 2017, 38(6): 607-621.
- [28] Straub, K.M., Mohrig, D., Buttles, J., *et al.* (2011) Quantifying the Influence of Channel Sinuosity on the Depositional Mechanics of Channelized Turbidity Currents: A Laboratory Study. *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 744-760. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.05.014>
- [29] Kane, I.A., McCaffrey, W.D. and Peakall, J. (2008) Controls on Sinuosity Evolution within Submarine Channels. *Geology*, **36**, 287-290. <https://doi.org/10.1130/G24588A.1>
- [30] 冯潇飞, 赵晓明, 等. 深海弯曲水道内部一种特殊的沉积单元: 凹岸坝[J]. 沉积学报, 2020, 38(2): 440-450.
- [31] Keevil, G.M., Peakall, J. and Best, J.L. (2007) The Influence of Scale, Slope and Channel Geometry on the Flow Dy-

- namics of Submarine Channels. *Marine and Petroleum Geology*, **24**, 487-503.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.01.009>
- [32] Cossu, R., Wells, M.G. and Wåhlin, A. (2010) Influence of the Coriolis Force on the Velocity Structure of Gravity Currents in Straight Submarine Channel Systems. *Geophysical Research Atmospheres*, **115**, 117-127.  
<https://doi.org/10.1029/2010JC006208>
- [33] 邓强. 深水沉积研究综述及未来方向[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(1): 26-37.
- [34] 黄河清. 环境流体力学[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2013: 161-205.