

文章编号: 1000-0550(2025)03-0797-16

环形水槽物理模拟的沉积学应用与发展趋势

孙浩南^{1,2}, 谈明轩^{1,2}, 姚鹏³

1. 河海大学自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 南京 210098

2. 河海大学海洋学院, 南京 210098

3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210098

摘要 【意义】水槽沉积模拟实验是模拟沉积物沉积过程、揭示其形成机理的有效手段之一, 对水利工程、沉积地质学及油气勘探等具有重要意义。环形水槽能够使流体在惯性力与剪切力作用下发生持续流动, 被近似认为在无限长距离上搬运与沉积, 因此可以从搬运距离和流体速度方面近似还原模拟环境流体, 突破了传统水槽模拟的应用局限性。【进展】为应对不同研究需求, 环形水槽衍生出4种类型, 包括常规环形水槽、底栖式原位环形水槽、小型环形水槽以及跑道式环形水槽。目前环形水槽物理模拟在泥沙特性、底形构造、沉降机制等方面取得了丰硕成果。随着技术的发展, 相关沉积地质学物理模拟研究也取得了重要进展。其中, 重力流沉积、细粒沉积物的沉积学特征以及潮汐与波浪沉积已经成为环形水槽沉积地质学物理模拟的重要研究对象。尽管如此, 环形水槽物理模拟尚存在诸多不足, 例如二次环流的影响、沉积物横向演化的追踪对比等问题将在后续研究中通过完善实验方案与提高测量精度进行优化。【结论与展望】基于沉积学原理系统拓展环形水槽物理模拟在沉积学中的应用范围, 将对基础沉积学理论的创新以及细粒沉积学、非常规油气沉积学等诸多方面做出相应的贡献。

关键词 物理模拟; 环形水槽; 沉积地质学; 沉积过程; 指示意义

第一作者简介 孙浩南, 男, 1998年出生, 硕士研究生, 沉积学、深水沉积学, E-mail: 211311040017@hhu.edu.cn

通信作者 谈明轩, 男, 博士, 副教授, 沉积学、层序地层学, E-mail: mxtan@hhu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

DOI 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.032

CSTR 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.032

0 引言

水槽物理模拟研究起始于19世纪末, 主要通过调控水动力、物源供应、流体性质等边界条件来模拟沉积物的形成过程, 是系统分析沉积岩物质组成、沉积构造以及地层展布的重要研究手段^[1-6]。20世纪中叶以来, 国内外诸多学者采用沉积物理模拟研究方法对沉积物搬运与沉积过程开展了系统研究, 并相继取得了丰硕成果^[7-10]。作为一种重要的沉积物理模拟研究载体, 环形水槽因具备模拟长距离输送强紊流流体的能力而被广泛应用于泥沙启停、底形改造、动水沉降等相关领域^[11-13]。环形水槽物理模拟作为研究沉积物运动特性与沉降过程的有效手段, 克服了传统长直水槽物理模拟过程中沉积物颗粒的破坏及输送距离限制等问题, 同时又兼具结构简单、操作

方便等优点^[14-16]。

近半个世纪以来, 国内学者针对水利水电与港口航道相关领域开展了相当多的水槽物理模拟工作^[17-18]。然而, 以沉积组构和岩相展布预测为目标的沉积地质学物理模拟研究则相对匮乏。20世纪70年代, 国内高校和院所陆续开展一系列基于直道水槽或方形水槽的沉积物理模拟实验, 在沉积地质学范畴(特别是河流三角洲与深水重力流沉积体系)研究中取得了丰富的理论成果^[19-20], 为沉积机理、储层构型做出了积极贡献。然而, 国内的环形水槽模拟多集中于泥沙启停、河口海岸及环境生态学相关领域, 往往忽略了其在沉积物搬运与沉降过程中的应用潜力。目前, 国内利用环形水槽开展的沉积物理模拟研究相对较少^[21]。如何拓展环形水槽在沉积地质学领域中的应用是一个值得深入思考与积极探究的新方向。

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2024-02-29; 录用日期: 2024-04-03; 网络出版日期: 2024-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42372118, 42002117); 江苏省自然科学基金项目(BK20200529) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42372118, 42002117; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No. BK20200529]

本研究立足于近年来国内外环形水槽沉积学物理模拟的研究成果,系统总结沉积学物理模拟的技术流程与研究经验,展望环形水槽物理模拟在沉积地质学领域的应用方向与发展趋势。环形水槽沉积物理模拟研究还可与数值模拟研究相结合^[21-22],借助多种国内领先的水槽实验配套设备,实现对沉积过程及沉积产物的实时监测与精细解剖,并进行系统的沉积地质学分析。从观测和模拟两个角度进行相互验证,精细刻画沉积物的沉积过程。随着沉积物理模拟研究的飞速发展,环形水槽沉积物理模拟为沉积地质学物理模拟开拓了新视野。

1 环形水槽物理模拟发展历史

随着科技的不断进步,国内外环形水槽物理模拟也呈现出多元化发展历程。纵观环形水槽物理模拟的发展史,随着不同类型环形水槽的更迭,环形水槽也逐渐被分为狭义环形水槽与广义环形水槽两类。狭义环形水槽(annular flume)特指圆环形外观且具有上部剪切环的一类水槽^[11];广义环形水槽(circular flume)泛指具有闭合路径、内部流体可以实现体循环过程的一类水槽,包括圆形环形水槽、椭圆形跑道式水槽等^[14-16]。最初,环形水槽物理模拟主要应用于分析流体挟砂能力^[1],随后便被广泛应用于泥沙侵蚀作用、沉降机理以及输运过程等一系列研究并取得了部分成果^[14,23-24]。此外,基于环形水槽在物理模拟应用中的可观前景,陆续开展了重力流沉积、细粒沉积过程以及环境流体模拟等一系列研究工作^[25-26]。目前大多数环形水槽沉积物理模拟相关研究仍聚焦于沉积动力学机制,而针对流体的沉积过程及相关沉积产物观测与解释的定量研究则相对稀缺。总体而言,环形水槽沉积物理模拟发展历史经历了规模从小到大、实验过程及装置由简单变复杂、研究内容由单一变丰富、研究深度由定性向定量转变的过程。

1.1 国外发展历史

国外环形水槽沉积物理模拟应用范围十分广泛。早在19世纪末,水槽物理模拟研究便被应用于水利、水文、海洋学等方向,随后便陆续拓展到其他领域的研究,并在流体动力学、沉积底形与沉积构造、沉积产物以及动力地貌学等沉积学研究中取得了巨大进展^[21,24-26]。20世纪初,国外环形水槽物理模

拟技术已经日益成熟,被广泛运用于分析河流挟砂、输砂能力的定量研究^[12-13]。随着此类模拟研究方法被引入河口动力学研究领域,便逐渐成为研究细粒泥沙特性、流体流变学性质、细粒泥沙絮凝沉降以及侵蚀过程的有效手段^[27-29]。在后续研究中,环形水槽物理模拟的开展系统揭示了近海海底地貌与沉积底形的演化过程^[30-31]。除了在流体动力学领域的突出贡献,环形水槽物理模拟方法在基础沉积学研究中也发挥出重要作用。20世纪中叶,荷兰著名的重力流沉积学理论研究先驱 Philip H. Kuenen 首次将环形水槽物理模拟方法引入沉积物重力流的研究中,相继应用于浊积岩泥质含量、沉积构造成因以及浊流挟砂能力等方面^[14,32-34];相关研究陆续证实,环形水槽模拟的浊流具有典型的流速剖面结构以及沉积动力学特征^[26],并能够模拟出具有不同鲍马层序的浊积岩序列^[15,35]。在沉积物理模拟实验过程中,环形水槽自身的动力学因素也是一个不可忽略的问题,可能对模拟结果产生一定的影响。因此,环形水槽动力学机制的研究能够标定最佳转速比,以降低二次环流效应所引起的系统误差^[23-25]。21世纪以来,环形水槽物理模拟发展迅速,并逐步扩展到分析细粒沉积物流动性对地层孔隙度的影响以及河流沉积底形与海底地貌的塑造作用^[36]。

基于沉积学、环境科学以及河口动力学等多学科交叉研究的环形水槽物理模拟取得了诸多进展,主要体现在以下多个方面:(1)潮间带区域数值模拟与水槽模拟结果指示了沉积物对微塑料的捕获方式^[37];(2)湖泊、河流内化学元素内源释放模式的研究表明沉积物通量与水动力模式间存在定量关系^[38];(3)颗粒有机碳迁移与氧化机制模型的建立系统揭示了河流沉积物输运、颗粒磨蚀和湍流混合对颗粒有机碳保存方式的响应作用。至今为止,国外环形水槽物理模拟已经在多领域取得了丰硕的研究成果,但主体研究仍聚焦于水动力学机制的成因探讨;其在沉积学领域的研究则主要集中于沉积动力模式的探究,忽略了对沉积产物模拟的观测与解释。尽管环形水槽在模拟泥沙沉降过程中具有潜在优势,但相较于传统水槽对沉积产物模拟与解释的工作仍稍逊一筹。国外环形水槽物理模拟经过多学科研究的联合发展,已经形成了较为成熟的理论体系与技术方法,为进一步拓展环形水槽的应用领域奠定了坚实基础。

1.2 国内发展历史

国内环形水槽物理模拟研究起步较晚,研究方向与应用领域也较为单一,主要集中在水利工程与环境生态科学应用两方面。20世纪70年代,河海大学、天津水运工程科学研究所、浙江大学等高校与研究所相继建立环形水槽实验室,并初步开展水槽模拟研究。此时,环形水槽物理模拟仅仅聚焦于水利工程领域的泥沙动力学研究,旨在解决防洪、水库、灌溉渠、港湾河口淤积等问题^[39-45]。20世纪80年代,国内首例基于长江口河床冲淤特征研究的环形水槽物理模拟取得成功,随后在河口、港口及航道等研究区域进行了大量环形水槽模拟实验,获得了大量的泥沙沉积与侵蚀的临界阈值数据^[43]。在此基础上,进一步明确了细粒沉积物的动水沉降速率,并厘定了动水环境中沉积物絮凝的临界速度^[39,43-44]。21世纪初,环形水槽物理模拟被初步应用于生态环境科学研究中,相关研究进一步完善了环形水槽物理模拟的水动力学机制与沉积动力过程^[46-49]。

国内环形水槽物理模拟在生态环境研究与水利工程领域中取得了丰硕的研究成果,反观沉积物理模拟领域应用停滞不前。近年来,基于环形水槽物

理模拟的沉积学研究也主要集中于悬浮泥沙启停对沉积底形的改造作用、流体流速分布特征以及悬浮泥沙沉降机制等水利工程或水文地质学领域内的科学问题^[50-52]。在沉积学领域中,前人研究主要聚焦于环形水槽的沉积动力特征(图1),并对泥沙的沉积动力学特征取得了一定认识。然而,如何将沉积动力学理论进一步拓展至沉积地质学研究,利用环形水槽所模拟的沉积物与野外露头沉积现象进行类比分析,对沉积岩的沉积过程进行反演并揭示沉积岩的沉积机理与成因机制,同样也是国内沉积学工作者值得深思的问题。

2 环形水槽主要类型及其配套设备的应用

随着物理模拟研究的不断深入,环形水槽结构体系得到了进一步完善,满足了不同物理模拟实验的需求(图2)^[52-60]。环形水槽物理模拟最初的研究思路是将长度尺度转化为时间尺度,即通过控制实验时长达到长距离搬运的目的。然而,现阶段环形水槽除了能够满足长距离输送要求外,还可以通过控



图1 环形水槽物理模拟发展历史与典型代表事件

Fig.1 The development history and typical representative events of the circular flume

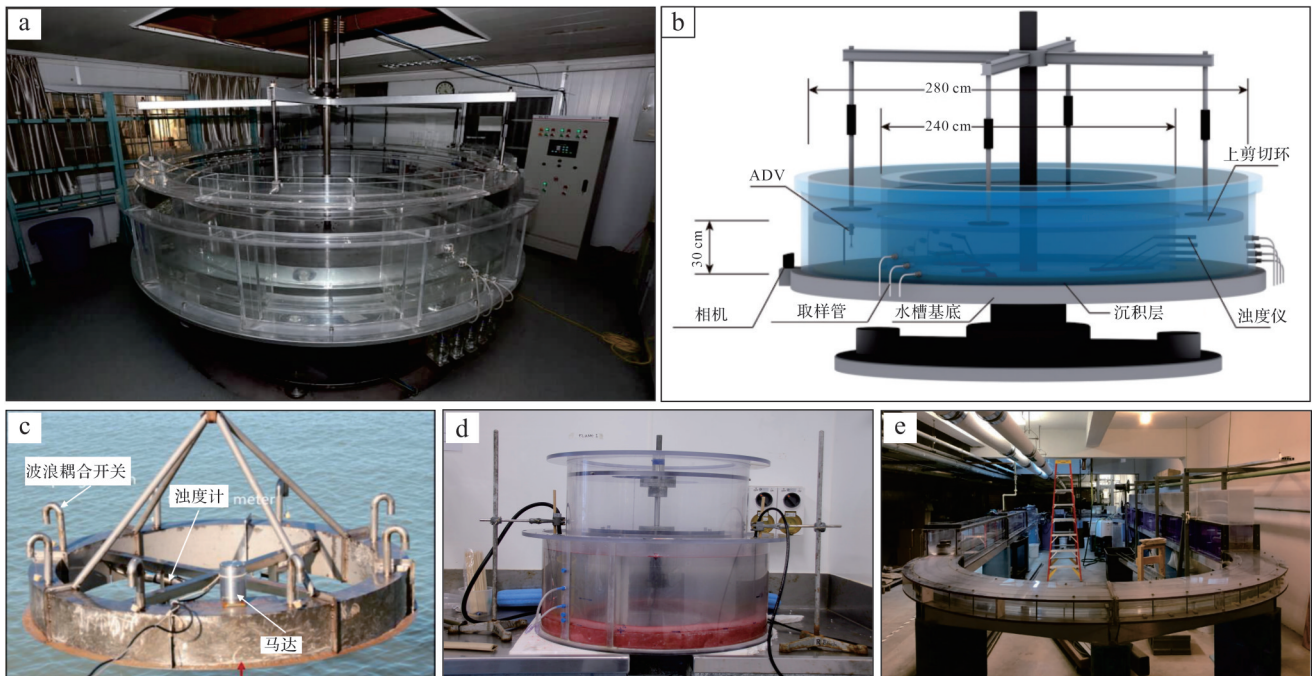


图2 环形水槽模型及不同类型的环形水槽(据文献[41,52,59]修改)

(a,b)河海大学常规环形水槽及模型示意图;(c)原位环形水槽;(d)小型环形水槽;(e)跑道式水槽

Fig.2 Circular flume model and different types of circular flume (modified from references [41,52,59])

(a, b) conventional circular flume and its schematic diagram of model at Hohai University; (c) *in situ* circular flume; (d) mini circular flume; (e) racetrack circular flume

制水槽转速并获得不同流变性的流体。此外,一系列观测设备的革新使得环形水槽物理模拟的沉积产物观测得到进一步提升,并在此基础上对沉积产物的沉积过程进行实时监测与模拟分析。

依据不同场景下环形水槽的应用频率(表1),常规环形水槽的物理模拟仍占据主导地位,在沉积产物模拟实验中也广泛被应用。早期环形水槽的基底由混凝土制成,仅能通过上部剪切环旋转驱动流体,无法进行流速调节。后续研究中,混凝土基底被替换为塑料底座,这不仅能够直接观测与记录沉积过程,还可以通过基底和剪切环的反向旋转调节流速、消除离心力影响^[35]。随着环形水槽尺寸不断增加,如何进一步提升槽内流体的紊流强度以维持颗粒物的悬浮状态,成为环形水槽发展过程中亟待解决的问题。同时,环形水槽配套的测量设备也发生了巨大更迭。流速测量方法得到了改进与完善,测量精度也随之取得了显著提升。早期流速测量多依靠旋桨流速仪,只能测得单点流速,无法指示连续的流速分布特征;随后,声学多普勒流速仪(ADV)的应用使得低精度的单点流速逐渐被高精度剖面流速数据所取代,并进一步细化流速分布特征^[65]。近年来,声学多普勒剖面流速仪(ADVP)与超声多普勒速度剖面测

量仪(UDVP)的应用,提供了更高精度的速度剖面数据与可视化流速分布,进而弥补了无法对沉积过程实时监测的不足^[66]。此外,红外/光学测沙仪(IFS/OBS)的使用能够精确测定沉积物浓度,无需再通过虹吸管取样标定槽内沉积物浓度^[42]。

截至目前,国内外已开展的环形水槽沉积产物物理模拟研究仍较为匮乏。河海大学作为国内环形水槽物理模拟领域的前驱者,配备了多种不同类型的环形水槽,在河口动力学以及环境科学方向不断取得丰硕的研究成果^[41-49]。以河海大学环境泥沙实验室的常规环形水槽D280为例,其主体结构包括上部剪力环、下部环形槽与传动系统,通过改变剪力环与环形槽的转速可调整水流速度。该水槽配置的相关设备包括:ADVP测量,实验中固定ADVP探头距底高度,使其可采集流速剖面数据;OBS测量,9个OBS分别嵌在内壁面9个不同高度,以采集悬沙浓度变化;水槽外围装备高速摄像机,以记录环形水槽内部的沉积过程(表2)^[52]。此外,基于ADVP所测定的流速剖面、OBS测得的浓度剖面以及高速相机所记录的流体沉积过程所搭建的一系列实时监测体系能够进一步对流体性质进行鉴别分析,更有利于沉积产物的观察。

表1 环形水槽分类及基本特征

Table 1 Summary of domestic and foreign circular flumes

类型	基础规格	驱动方式	应用场景	文献依据
常规环形水槽	外径为0.64~4.00 m;内径为0.43~3.40 m; 最大水深为0.1~0.6 cm;最大流速可达3.6 m/s	剪切环与环形槽转 速差驱动、旋浆驱动	重力流、细粒沉积物沉降;波 浪、潮汐模拟;环境流体模拟	[41,52-58]
底栖式原位 环形水槽	外径为1.4~2.1 m;内径为0.28~2.00 m; 最大水深为0.15~0.30 m;最大流速可达2 m/s	外部流体驱动	河口、三角洲区域沉积物实时 监测与临界剪切应力测定	[59-61]
小型环形水槽	直径为0.240~0.305 m;宽0.045~0.080 m;床底展布面积为0.034~0.080 m ² ; 最大水深为0.5 m;最大流速可达0.45 m/s	水槽顶部旋浆驱动	环境流体模拟、细粒沉积物 模拟、碳汇、碳循环模拟	[36,55,62]
跑道式水槽	直线段长5.0~7.2 m;宽0.15~0.25 m;弯道段半径最长可达1.5 m; 有效流体深度为0.1~0.2 m;最大流速可达2.5 m/s	底部电动机 浆带驱动	细粒沉积物沉降模拟、泥页岩 沉积、底形成因模拟	[63-64]

表2 环形水槽监测设备类型及主要参数

Table 2 Types and main parameters of monitoring equipment for the circular flume

类型	基础规格
光电式旋浆流速仪(NKY04-L1)	仪器流速测量范围:0.05~5.00 m/s;仪器工作水深10~30 cm;讯号频率:两个信号; 环境温度:0℃~20℃;连续工作时间6~10 h;相对误差 $\delta \leq \pm 5\%$
剖面流速仪(Vector6MHz)	仪器流速测量范围:0~4 m/s;精度: $\pm 1\% \pm 1$ mm/s;采样输出频率:1~25 Hz;距探头距离:3.5 cm; 直径:6 mm;回声强度:25 dB;环境温度:-4℃~40℃;响应时间:5 min
光学后散射浊度计(OBS-3A)	仪器浊度测量范围:0~4 000 NTU;工作水深:0~20 m;环境温度:0℃~35℃;电导率:65 mS/cm

3 环形水槽模拟沉积产物

近年来,环形水槽物理模拟在地学领域的应用愈发广泛。本研究系统总结了环形水槽实验在沉积物理模拟领域内已取得的重要进展,并阐述其在重力流沉积学、细粒沉积学以及潮汐与波浪沉积物理模拟方面的应用现状^[67-72]。其中,环形水槽物理模拟在重力流沉积学方面的工作主要聚焦于浊流成因模拟、初始浊流在碎屑黏土驱动下的流动特征以及动态转化过程、重力流混合事件层成因机制等研究^[15-16,26];在细粒沉积学研究中,则是重点关注沉积物的动水沉降机制、细粒沉积物底形的成因特征^[69-70];而在潮汐与波浪沉积的模拟研究中,则专注于泥质纹层成因机制与有机质在沉积地层中的赋存形式^[71-72]。

3.1 重力流沉积序列模拟

重力流沉积特征与沉积过程一直都是沉积学领域的热点研究主题。尽管目前国内外均具备开展重力流原位监测的能力,但需要布置相对高精度的观测网且整体操作流程也较为繁琐,实施条件过于苛刻。因此,多数研究仍集中于野外露头以及地球物理资料,无法完全还原重力流的沉积过程^[73-74]。前人

试图从水槽模拟的角度出发,利用常见的直道水槽与方形水槽物理模拟对重力流的沉积过程与成因机制进行深度剖析^[14-16,75-76]。相比而言,环形水槽能够模拟长期维持紊流态的重力流,是分析浊流挟砂能力、浊积岩沉积构造成因、过渡性重力流沉积过程与成因机制的有效途径。

3.1.1 浊流沉积模拟

相关研究表明,涉及长期过程的沉积物理模拟,如浊流减速沉降,受传统水槽空间尺度限制的影响,其模拟结果并非完全准确。然而,环形水槽物理模拟克服了空间尺度的限制,近似还原模拟自然界中的重力流。相关模拟证实,环形水槽所模拟的高流速、强紊流的持续性流体具有典型浊流流速结构(图3),并且其沉积物特征与浊积岩沉积序列相类似^[14-16,35]。因此,环形水槽物理模拟被认为是模拟浊流沉积的有效手段^[14-16]。在对应的物理模拟实验中,首先将流体调至最大流速,随后对其进行减速以模拟涌浪型浊流的沉积过程。通过改变颗粒粒径与流体减速速率,能够模拟出具有不完整鲍马序列的浊流沉积^[35]。在分析浊积岩沉积构造的成因机制时,当流体处于加速期间未发育任何沉积构造;当流体开

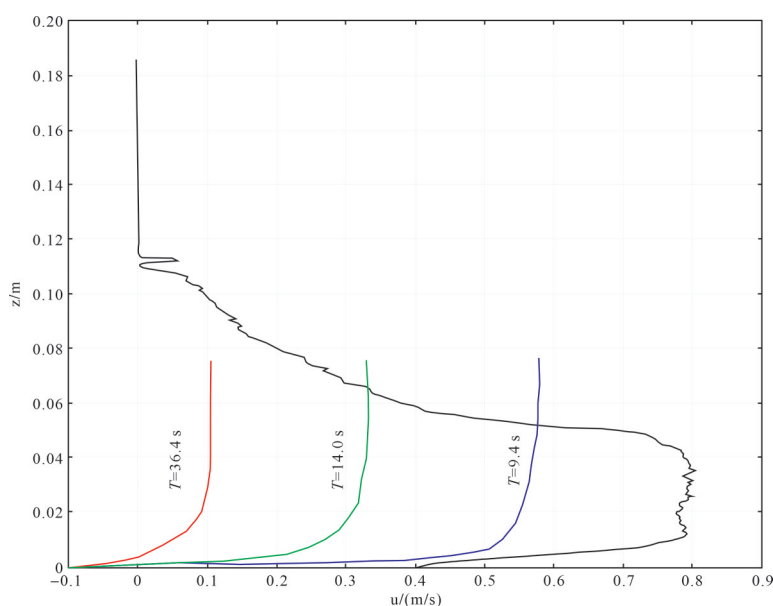


图3 基于环形水槽物理模拟的流速剖面图(据文献[52]修改)

黑色曲线为环形水槽所模拟的浊流流速剖面;红色、绿色、紫色曲线为环形水槽所模拟的牵引流流速剖面

Fig.3 Physical simulation flow velocity profile of the circular flume (modified from reference [52])

the black curve represents the turbidity flow velocity profile simulated by the circular flume; the red, green and purple curves represent the traction flow velocity profiles simulated by the circular flume

始减速时,下伏床层和上部流体间开始发育沉积构造(图4a,c)。随着减速速率变化,沉积构造从最初的平行纹层逐渐转变为波状纹层^[15-16]。近床层内的高泥沙浓度可能对底床的形成产生一定抑制作用,并阻碍沉降颗粒沿底床进行侧向迁移及颗粒分选。此外,层流剪切层内的高颗粒浓度以及颗粒间的相互作用也能够抑制流体的湍流性质,导致上部塞流区呈现弱湍流性质,部分颗粒发生整体沉降形成块状沉积。随着流速进一步衰减,上部流体内的颗粒浓度降低,形成低幅床波并逐渐发育平行纹层(图4b,d);随后受到上部流体改造,逐渐向波纹过渡。因此,流体减速速率可能是影响沉积构造发育的一个潜在控制因素,一系列减速实验证实了不同流体减速速率会制约流体内部的流变性质,进而影响其沉积过程及沉积特征^[32-35]。

3.1.2 过渡性重力流沉积模拟

环形水槽物理模拟能够正演沉积物重力流的沉积过程,并深入探究其沉积过程。与单次浊流相关的流体转化是混合事件层最为普遍的成因^[78-79]。不同类型的浊流转换现象均与紊流抑制作用密切相关:(1)浊流冲刷下伏泥岩,由于紊流抑制作用增强,泥质颗粒在局部聚集形成次级碎屑流。流速较快的浊流率先沉积,后续碎屑流沉积形成混合事件层(图

5a)。(2)浊流减速,其紊流支撑能力减弱。在低速状态下,泥质颗粒对紊流抑制作用变得更为明显,致使浊流性质发生变化,从而在浊流尾部形成黏性碎屑流。这种情况下,浊流首先沉积,碎屑流随后沉积,形成混合事件层(图5b)。环形水槽物理模拟记录了不同高岭土含量的重力流水下流动过程,明确了五种不同类型的过渡性流体(图5c)^[16]。因此,在浊流形成碎屑流之前,会经历一个过渡性阶段,并发育过渡性流体。当初始浊流侵蚀下伏泥岩时,浊流中泥质含量不断增加,使得浊流向层流转化,形成混合事件层。在初始浊流泥质含量不变的情况下,随着浊流缓慢减速,紊流支撑能力逐渐减弱,形成混合层沉积。通过改变模拟实验中沉积物体积浓度、黏土矿物类型及相应比例,能够模拟混合事件层沉积,并进一步揭示流体转化过程。

3.2 细粒沉积岩模拟

随着沉积物理模拟技术日趋成熟,细粒沉积学研究从简单的长试管静置沉降扩展至动水沉降模拟细粒沉积岩,也是近年来细粒沉积物的重要发展趋势^[80]。相比之下,环形水槽物理模拟则为细粒沉积学研究提供了新方法与新思路。基于跑道式水槽物理模拟实验的最新研究进展(图2d),泥页岩可以通过底流搬运作用沉积形成,并非完全沉积于静水环

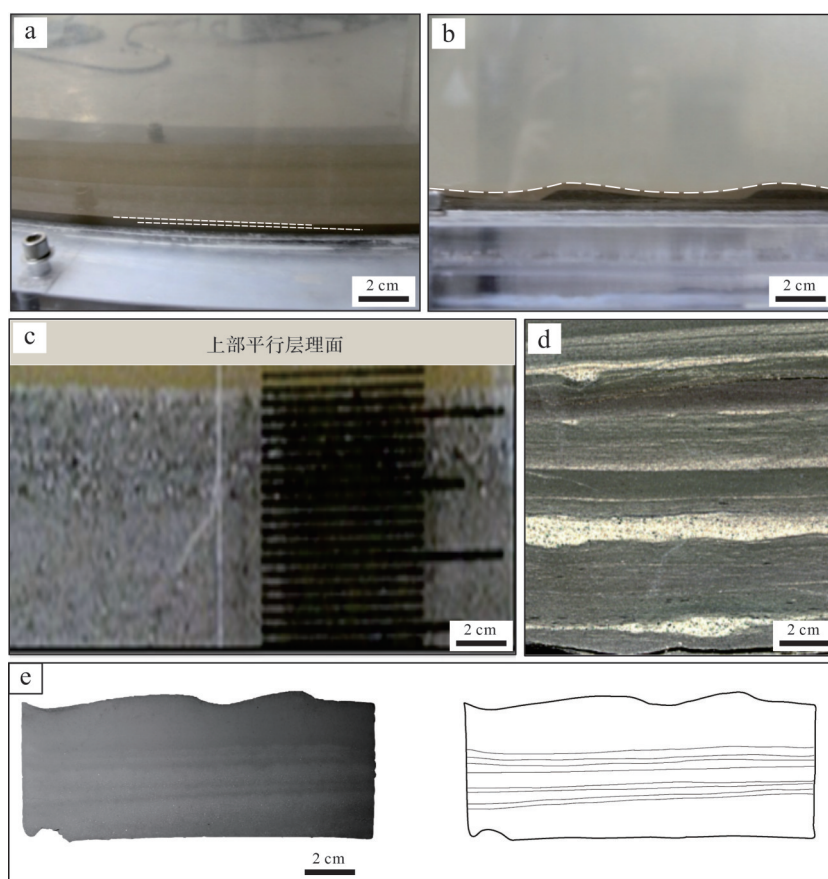


图4 环形水槽物理模拟沉积产物与露头沉积特征对比分析(据文献[52,77]修改)

(a)环形水槽中沉积的平行纹层;(b)环形水槽中沉积的波状纹层;(c)水槽沉积产物中的上部平行层理;(d)野外露头中的沉积特征;(e)水槽沉积产物的薄片及素描图

Fig.4 Comparative analysis of physical simulation sedimentary products and outcrop sedimentary characteristics in a circular flume (modified from references [52,77])

(a) parallel laminations deposited in a circular flume; (b) wave laminations deposited in a circular flume; (c) upper parallel laminations in the deposits of the flume; (d) depositional characteristics in outcrops; (e) thin sections and sketches of deposits in circular flume

境^[56,69-70]。通过对细粒沉积物沉积模式、底形特征以及输运机制进行环形水槽物理模拟,深入分析细粒沉积物沉积过程,以及有机质输运与富集机理间的耦合关系。这可为沉积机理、储层构型和沉积古环境恢复提供理论依据。

相关研究表明,细粒沉积物与非黏性颗粒在沉积过程中并无本质区别,但前者更为复杂,主要表现为细粒沉积物或絮凝团沉积速率变化。未发生絮凝时,颗粒沉降速率受其粒径控制,通常以悬浮载荷的形式沉降于静水环境,并形成平行纹层^[81]。相反,絮凝作用形成的絮凝团块具有变化的沉降速率,可沉积于强水动力环境,形成不同尺度的砂质波纹。由于细粒沉积物之间具有较强黏结力,其表现出与非黏性颗粒的显著差异,因此所形成的底形特征也有所不同。石英粉砂和黏土颗粒混合物的水槽模拟结

果表明,在流体搬运过程中沉积物会发生分选现象,产生由粗粉砂组成的砂质波纹以及由黏土颗粒形成的泥质纹层。波纹背流面为强湍流区,沉积物堆积不均匀,呈朵叶状分布。在低流速情况下,泥质纹层以朵体形式向前扩展;而在高流速情况下,朵体加宽并覆盖背流面斜坡^[56]。此外,泥质纹层与砂质波纹类似,也会发生崩塌并形成狭窄的舌状体,沿前积层表面不断向下游移动。随着沉积物的不断累积,砂质波纹发生崩塌,并持续向前推进,整个沉积物表面呈现出连续的不规则形态。大量层状絮凝物在边界层表面移动,并汇聚于波峰。当足量沉积物堆积时,背流面发生崩塌,并形成复合前积层(图7)^[69]。

在研究细粒沉积物输运机制的过程中,强紊流流体导致细粒沉积物以悬移质进行输运。随着流体衰减,部分细粒沉积物发生絮凝并形成底床载荷沿

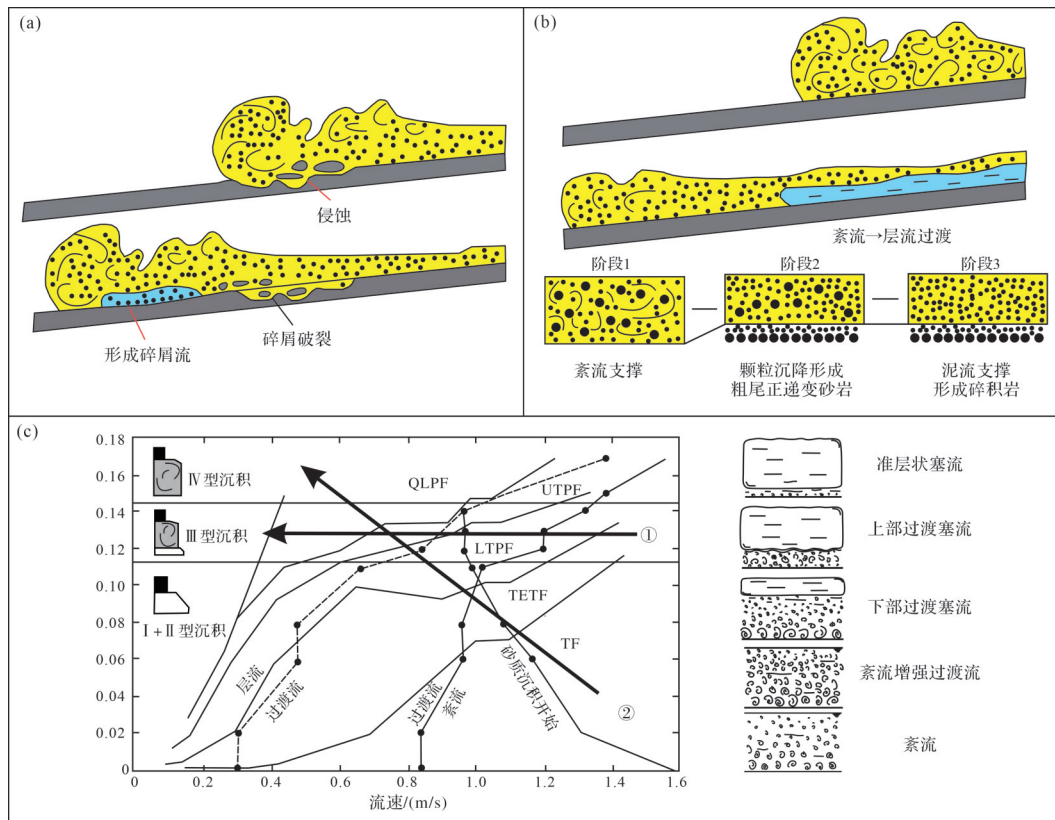


图5 环形水槽物理模拟中的混合事件层成因模式及流体转化机制(据文献[16,79]修改)

(a)初始浊流侵蚀下伏泥岩发育碎屑流;(b)初始浊流减速发育碎屑流;(c)流体性质变化及沉积类型模式图

Fig.5 Genetic model of HEB and fluid transformation mechanism in the physical simulation of the circular flume (modified from references [16,79])

(a) development of debris flow in the underlying mudstone under initial turbidity erosion; (b) initial turbidity current decelerates and develops debris flow; (c) changes in fluid properties and depositional type patterns

床层底部输运。当流体静止时,未絮凝的细粒沉积物则发生缓慢沉降。长期处于悬浮状态的细颗粒发生絮凝沉降,有助于细颗粒沉积范围扩张至静水区之外。此外,细粒沉积物还会影响沉积物重力流(如异重流)的沉积过程,通过抑制流体紊流性质,减小输运距离,进而影响细粒沉积物在空间上的展布特征以及沉积形态^[80]。作为自然环境中细粒沉积物输运的重要机制,开展细粒异重流物理模拟对于进一步揭示其沉积机制至关重要。

3.3 潮汐与波浪沉积序列模拟

潮汐及波浪物理模拟实验多聚焦于传统水槽研究,其相关配套设备较为复杂^[66,83]。依托直道、方形水槽模拟对潮汐和波浪沉积进行研究,其中包含:在涨潮一退潮过程中分析潮汐层理的沉积过程,以揭示内部泥质纹层的成因机制^[72];在规则波浪作用下研究黏性颗粒对波痕平衡状态的影响^[83]。然而,传统水槽模拟受限于水槽空间以及潮汐、波浪模拟方法,无

法进行深入探究。基于环形水槽具有模拟双向振荡水流的特殊优势,相关物理模拟方法被引入到潮汐与波浪沉积模拟实验中,其相对于往复流水槽和造浪系统更加简便易用^[70,82]。在此基础上,通过正一反向旋转环形水槽以模拟具有双向振荡性质的潮汐与波浪流体,旨在探明潮汐层理与浪成交错层理的沉积过程及泥质披覆沉积现象的成因机制^[72,84-86]。

3.3.1 潮汐沉积物理模拟

潮汐沉积环形水槽物理模拟已取得了一定的研究进展,主要集中于解析潮汐层理中泥质纹层的成因机制与沉积过程(图8)^[72]。在初始阶段,沉积物受到单向高速流体驱动,形成波痕并向下游迁移;随着潮汐流体减速,波痕迁移停止,泥质沉积物逐渐从上部悬浮液中沉降并形成A型泥质纹层;当泥质纹层逐渐增厚,具有较强流动性的泥质颗粒开始在波谷位置充填,形成B型泥质纹层(图8a)。随着流体开始反向旋转,B型泥质纹层发生液化并重新悬浮,A型泥质纹层

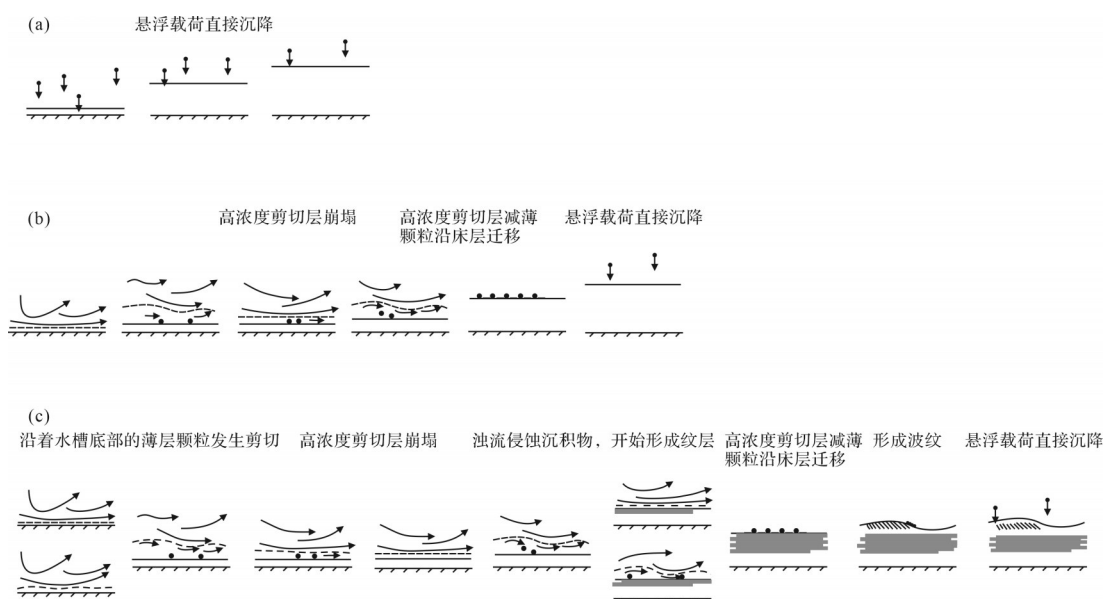


图6 环形水槽物理模拟底形成因机制(据文献[15-16]修改)

(a) 环形水槽快速减速的底床成因机制; (b) 环形水槽中—快速减速的底床成因机制; (c) 环形水槽慢速减速的底床成因机制

Fig.6 Mechanism of formation of bedforms in the physical simulation of the circular flume (modified from references [15-16])

(a) mechanism causing rapid deceleration in a circular flume; (b) mechanism of rapid deceleration in the formation of bed in a circular flume; (c) mechanism of bed for slow deceleration in circular flume

受到侵蚀,同时在波谷位置发生沉积;随着波痕的迁移,上一组波痕被截断并最终形成具有双向振荡结构的潮汐层理(图8b)。野外露头沉积现象与环形水槽模拟的产物类比分析,系统探明了潮汐流体的沉积过程与潮汐层理、泥质披覆沉积的成因机制。

3.3.2 波浪沉积物理模拟

波浪沉积的环形水槽物理模拟应用成果主要聚焦于探究浪成交错层理规模的制约因素以及曲流河道中波浪的分选作用^[84-86]。环形水槽物理模拟研究表明,大型浪成波痕仅在长周期的振荡流(较大的轨道直径和较小的轨道速度)作用下形成^[84]。在轨道直径较小的弱波浪作用下,底床上不发育波痕;在轨道速度较大的强波浪作用下,形成具有圆形波峰的波痕;而介于两者之间,则形成具有锥形波峰的波痕^[84]。通过对波痕形态的识别,能够初步判断波浪特征。大型浪成波痕成因条件取决于轨道速度的上限和轨道直径的下限,利用这些波痕参数进行波浪反演对古环境重建具有重要意义。同时,水槽模拟中波浪横向分选是沉积物分选的主导机制,也是导致沙丘发育的重要因素^[86]。在波浪作用下,细颗粒物将受到向上流体作用力影响而被抬升到沙丘顶部,而粗颗粒物则受到重力作用发生沉降并逐渐形成沙丘^[77,86]。结合环形水槽波浪沉积产物的沉积过程监

测与成因机制分析,将进一步探明滨岸带浪控体系与沉积环境间的响应机制。

4 存在问题及研究展望

4.1 环形水槽物理模拟的主要缺陷

虽然环形水槽物理模拟在沉积学应用领域取得了可观成果,但在模拟过程中仍存在一定缺陷。环形水槽内的流体同天然河道中弯道水流一样存在横向环流,是流速横向分布不均匀和垂直于弯曲平面的离心力不平衡而产生的流体^[87]。弯曲水流中离心力无法消除,仅依靠其他作用力与之平衡,削弱由离心力产生的横向流。当环形槽与剪力环以一定转速比转动时,槽内离心流、向心流相互削弱,水流中横向力达到平衡状态(图9)。因此,在模拟过程中可通过多次模拟实验标定最优转速比,最大限度削弱横向环流作用,尽可能减小其对沉积物的影响^[88]。

相较于传统水槽模拟实验,环形水槽所模拟的沉积产物形成于圆环状的槽内,随着流体衰减而发育多期次沉积物堆积。如何对流体横向演化与沉积物垂向堆积模式进行追踪与对比分析是环形水槽物理模拟发展过程中不可忽视的一环,需要如等高精度粒子图像测速(PIV、V3V)以及环形水槽流体数值模拟技术的协助配合^[89-90]。此外,通过PVC隔板或泥

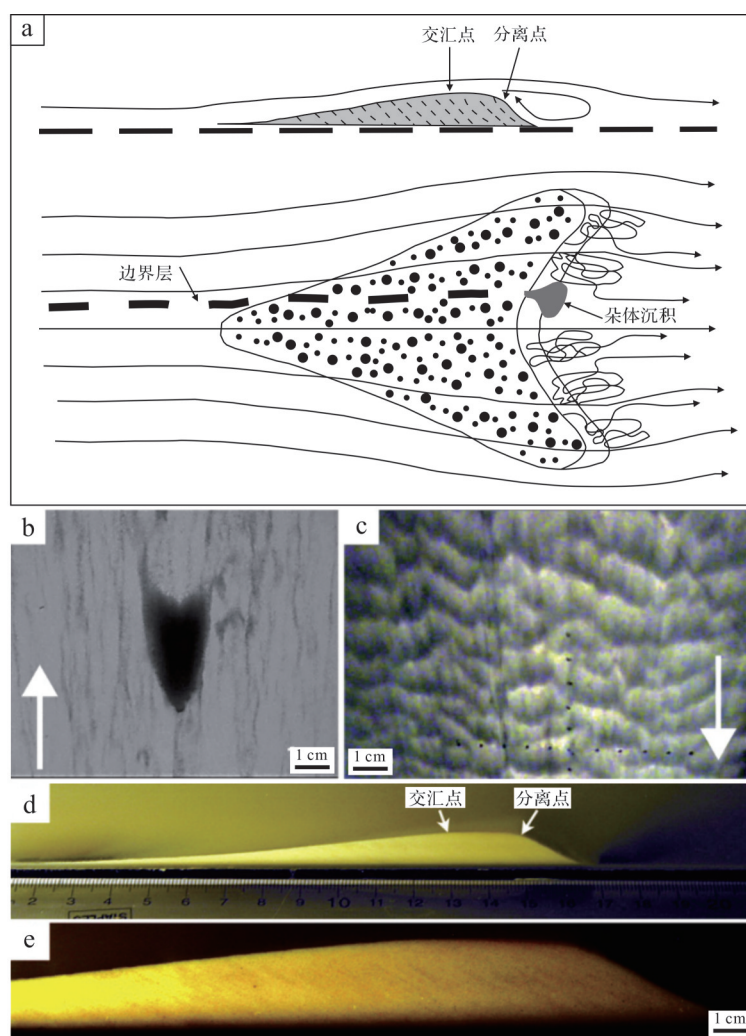


图7 环形水槽物细粒沉积物波纹成因机制(据文献[56]修改)

(a)细粒沉积物中的絮状波纹成因模式;(b,c)絮状波纹照片;(d,e)波纹横截面照片

Fig.7 Mechanism of the formation of ripples in fine-grained sediments in the circular flume (modified from reference [56])

(a) formation pattern of flocculent ripples in fine-grained deposits; (b, c) photographs of flocculent ripples; (d, e) photographs of ripple cross-sections

沙取样器对环形水槽沉积产物进行采集,便于观察垂向剖面的变化以及沉积序列特征并对其进行高精度粒度分析,进一步揭示沉积物的沉积过程。

4.2 研究展望

环形水槽模拟能近似还原自然流体的沉积过程,不仅确保了物理模拟研究结果的准确性,还克服了传统水槽的应用限制,为基础沉积学研究提供了新思路与新方法。目前,环形水槽物理模拟聚焦于重力流沉积与流体转换模拟、细粒沉积物搬运、有机质输运与富集机理等热点研究方向。相关研究系统探明了不同沉积物体积浓度、黏土矿物类型对过渡性重力流沉积过程的直接影响,有助于系统揭示流体转化过程中的沉积响应机制^[75];同时,该模拟方法还适用于分析细粒沉积物研究,并进一步明确了细粒沉积物输

送过程中颗粒磨蚀、流体性质变化对颗粒有机碳富集机理及赋存形式的影响^[56,69-70];此外,环形水槽在潮间带区域的物理模拟也进一步指示了潮间带内植物与沉积物对微塑料分布方式的影响^[37]。尽管如此,国内基于环形水槽物理模拟的研究仍多集中于悬浮泥沙启停的沉积底形模拟,对上述的沉积学热点研究则较为薄弱。此外,环形水槽物理模拟在重力流沉积过程、非常规油气甜点预测、深水碳汇过程等多种沉积学应用领域具有重要科研价值^[6,91]。

5 结语

综合环形水槽物理模拟的发展历史与研究进展,系统探讨了该模拟方法在重力流沉积过程与成

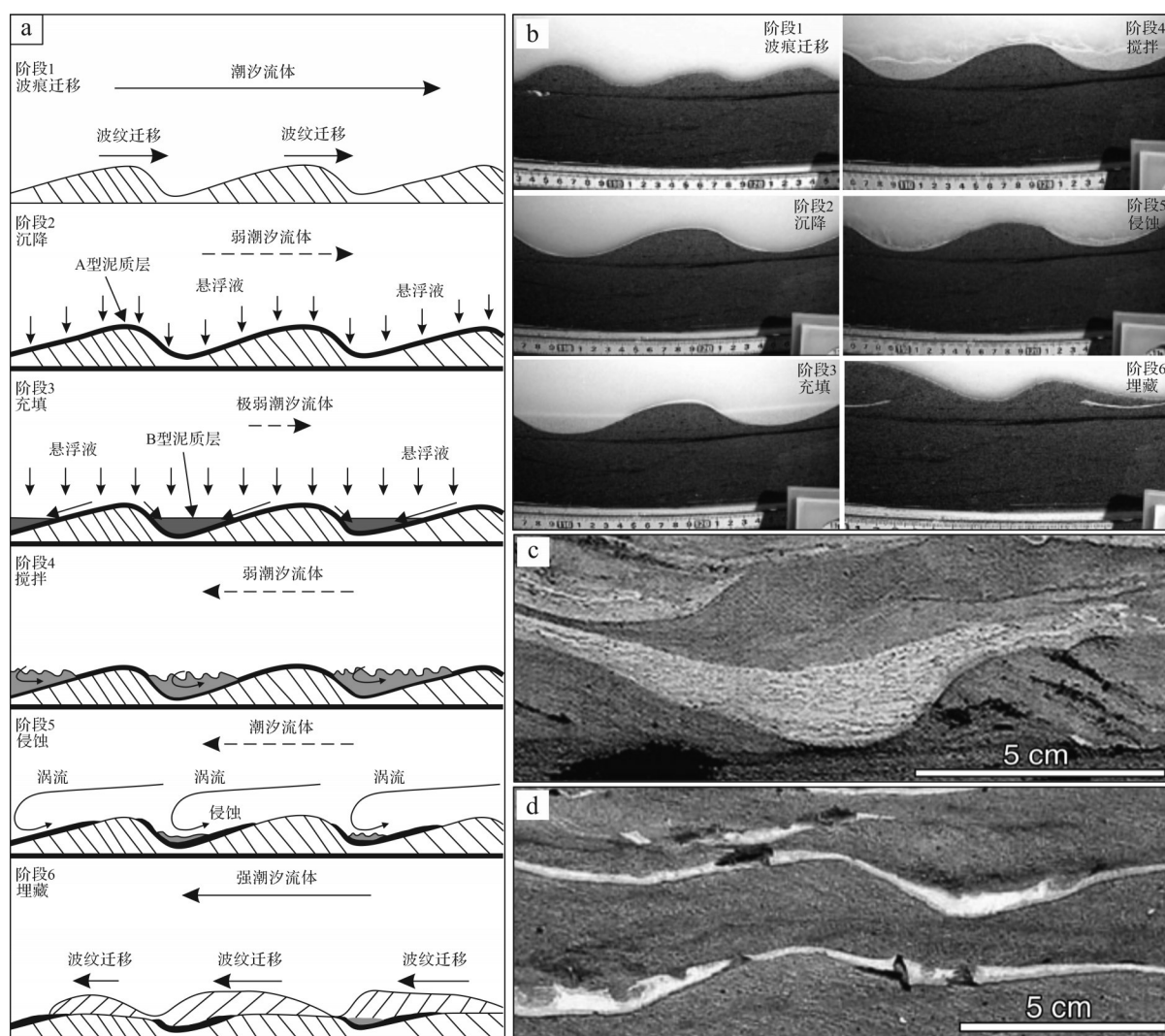


图8 环形水槽物理模拟潮汐层理成因模式(据文献[72]修改)

(a)潮汐层序成因模式;(b)环形水槽所模拟的潮汐层序;(c,d)野外露头中的潮汐层序

Fig.8 Formation mode of tidal bedding in physical simulation of the circular flume (modified from reference [72])

(a) tidal sequence genesis model; (b) tidal sequence simulated by the circular flume; (c, d) tidal sequences in outcrops

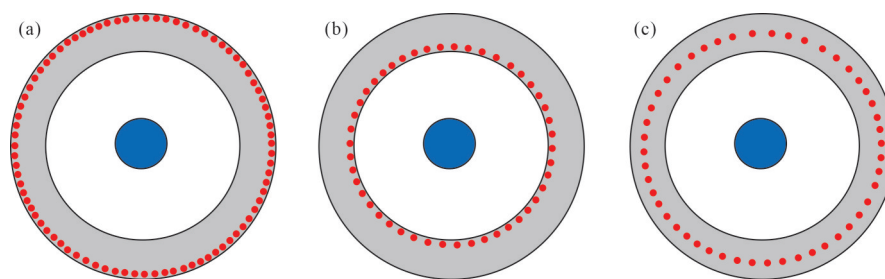


图9 环形水槽中二次环流模型(据文献[52]修改)

(a)水槽旋转;(b)剪切环旋转;(c)水槽、剪切环共同旋转

Fig.9 Secondary circulation model in a circular flume (modified from reference [52])

因机制、细粒沉积物沉积底形以及潮汐与波浪沉积等方面已取得的相关成果。环形水槽物理模拟作为一类可靠的研究方法,使得一些沉积学领域的热点

研究从定性研究逐渐转向定量分析。虽然,国内环形水槽物理模拟正处于快速发展阶段,但仍存在一定的制约因素。因此,为了深化基础沉积学及相关

沉积学热点研究的认知,应从研究内容、技术手段和应用展望三个方面进一步促进环形水槽物理模拟发展。

(1) 在研究内容上,除了开展围绕基础水动力学特征探索的泥沙沉降、泥沙启停模拟之外,还应增加沉积产物模拟,以全面分析自然界中广泛发生的沉积过程。此外,沉积产物的地形、沉积构造也应开展系统性研究,以全面了解沉积产物中沉积构造的水动力与沉积环境意义,从而为古环境与岩相古地理恢复提供准确的依据。尽管前人对环形水槽物理模拟进行了大量的研究,但所取得的成果仍局限于环境流体水动力学机制的研究。

(2) 在技术手段上,应引进全新的模拟技术与监测设备,搭建大尺度、长周期的实验平台,通过物理模拟技术再现沉积过程,使得研究人员更加直观地观察到沉积产物的演化过程。如今,随着科学技术的快速发展,沉积物理模拟技术逐渐向自动化、智能化发展,研究精度也将不断提高。在实验观测方面,高精度的实时监测体系将为沉积产物模拟的开展创造良好条件。

(3) 环形水槽物理模拟已经在重力流沉积、细粒沉积物搬运以及潮汐与波浪沉积等研究中取得了一定进展,有助于初步了解其沉积过程。然而,在后续研究中,仍需要深入探究其沉积与演化过程。这一工作对模拟沉积物的空间分布规律和构型特征具有重要的指示意义。首先,由于深水地貌单元规模巨大且形成时间长,而水槽的规模远远小于实际的地貌尺度,最终的沉积产物无法实现等比例模拟。其次,环形水槽的二次环流效应以及沉积物横向演化的追踪对比会产生系统误差,这也是一个亟待解决的重要问题。因此,环形水槽模拟与实际情况之间存在一定的差异,为了提高模拟结果的可靠性与真实性,仍需进一步完善实验方案并提高观测精度。

致谢 论文评审过程中,编辑部老师、三位评审专家提出了非常宝贵的修改建议;在实验过程中,乔中行博士对环形水槽物理模拟实验的指导,在此一并表示真诚的感谢。

参考文献(References)

- [1] 曹耀华,赖志云,刘怀波,等. 沉积模拟实验的历史现状及发展趋势[J]. 沉积学报, 1990, 8(1): 143-147. [Cao Yaohua, Lai Zhiyun, Liu Huaibo, et al. Sedimentary simulation experiments: In the past, current states, and developing trend[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(1): 143-147.]
- [2] Williams G P. Flume experiments on the transport of a coarse sand[M]. Washington. Government Printing Office, 1967: 1-31.
- [3] Wijbenga J H A, Klaassen G J. Changes in bedform dimensions under unsteady flow conditions in a straight flume[M]//Collinson J D, Lewin J. Modern and ancient fluvial systems. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. , 1983: 35-48.
- [4] Southard J B, Boguchwal L A. Flume experiments on the transition from ripples to lower flat bed with increasing sand size[J]. Journal of Sedimentary Research, 1973, 43(4): 1114-1121.
- [5] Riddell J F. A laboratory study of suspension-effect density currents[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6(2): 231-246.
- [6] 卢斌,邱振,周川闽,等. 泥页岩沉积物理模拟研究进展与发展趋势[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 781-793. [Lu Bin, Qiu Zhen, Zhou Chuanmin, et al. Progress and prospects in the physical simulation of mudstone deposition[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 781-793.]
- [7] Potter P E, Maynard J B, Depetris P J. Mud and mudstones: Introduction and overview[M]. Berlin: Springer, 2005: 23-74.
- [8] Middleton G V. Experiments on density and turbidity currents: I. Motion of the head[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1966, 3(4): 523-546.
- [9] Middleton G V. Experiments on density and turbidity currents: II. Uniform flow of density currents[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1966, 3(5): 627-637.
- [10] Middleton G V. Experiments on density and turbidity currents: III. Deposition of sediment[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1967, 4(3): 475-505.
- [11] Cao K, Shao Y Y, Tong C F, et al. Research progress of annular flume technology[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 256-259: 2498-2508.
- [12] Gilbert G K, Murphy E C. The transportation of debris by running water[R]. Washington: U. S. Geological Survey, 1914: 86.
- [13] Best J L, Reid I. Discussion of "Separation zone at open-channel junctions" by James L. Best and Ian Reid (November, 1984) [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 113(4): 545-548.
- [14] Kuenen P H. Experimental turbidite lamination in a circular flume[J]. The Journal of Geology, 1966, 74(5): 523-545.
- [15] Sumner E J, Amy L A, Talling P J. Deposit structure and processes of sand deposition from decelerating sediment suspensions [J]. Journal of Sedimentary Research, 2008, 78(8): 529-547.
- [16] Sumner E J, Talling P J, Amy L A. Deposits of flows transitional between turbidity current and debris flow[J]. Geology, 2009, 37(11): 991-994.
- [17] 赵德招,刘杰,吴华林. 近十年来台风诱发长江口航道骤淤的初步分析[J]. 泥沙研究, 2012(2): 54-60. [Zhao Dezhaoh, Liu Jie, Wu Hualin. Preliminary analysis of typhoon-induced sudden sedimentation in navigation channel in Yangtze Estuary over last

- decade[J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(2): 54-60.]
- [18] 李孟国,曹祖德. 粉砂质海岸泥沙问题研究进展[J]. 泥沙研究, 2009(2): 72-80. [Li Mengguo, Cao Dezu. Review on the study of sediment problems on the silt-sandy coast[J]. *Journal of Sediment Research*, 2009(2): 72-80.]
- [19] 张春生,刘忠保,曹跃华,等. 歧北凹陷舌状砂体沉积模拟实验[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 178-183. [Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Cao Yuehua, et al. Depositional simulation of lobate sand body in Qibei Sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 1995, 16(2): 178-183.]
- [20] 鄢继华,陈世悦,姜在兴,等. 断陷湖盆震浊积岩成因模拟实验[J]. 古地学报, 2007, 9(3): 277-282. [Yan Jihua, Chen Shiyue, Jiang Zaixing, et al. Simulating experiment on genesis of seismo-turbidites in rift lacustrine basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 277-282.]
- [21] 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. [Wang Xingxing, Wang Yingmin, Gao Shengmei, et al. Advancements of the deep-water gravity flow simulations and their implications for exploitation of marine petroleum[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(3): 588-602.]
- [22] 程立华,陈世悦,吴胜和,等. 断陷盆地陡坡带扇三角洲模拟及沉积动力学分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(4): 29-34. [Cheng Lihua, Chen Shiyue, Wu Shenghe, et al. The simulation and sedimentary dynamic analysis of fan delta in the steep slope of fault basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(4): 29-34.]
- [23] Petersen O, Krishnappan B G. Measurement and analysis of flow characteristics in a rotating circular flume[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1994, 32(4): 483-494.
- [24] Pope N D, Widdows J, Brinsley M D. Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach—A comparison of annular flume and field data[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(8): 959-970.
- [25] James P W, Jones T E R, Stewart D M. Numerical and experimental studies of annular flume flow[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1996, 20(3): 225-231.
- [26] Bath Enright O G, Minter N J, Sumner E J, et al. Flume experiments reveal flows in the Burgess Shale can sample and transport organisms across substantial distances[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 104.
- [27] Partheniades E, Kennedy J F. Depositional behavior of fine sediment in a turbulent fluid motion[C]//Coastal engineering 1966. Tokyo: American Society of Civil Engineers, 1966: 707-729.
- [28] Mehta A J. Depositional behavior of cohesive sediments[D]. Gainesville: University of Florida, 1973: 16.
- [29] Winterwerp J C, Kranenburg C. Erosion of fluid mud layers. II: Experiments and model validation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(6): 512-519.
- [30] Stone M, Krishnappan B G. Transport characteristics of tile-drain sediments from an agricultural watershed[C]//Proceedings of the 7th international symposium on the interactions between sediments and water. Baveno: Springer, 1997: 89-103.
- [31] Teisson C, Ockenden M, Le Hir P, et al. Cohesive sediment transport processes[J]. *Coastal Engineering*, 1993, 21(1/2/3): 129-162.
- [32] Kuenen P H, Humbert F L. Grain size of turbidite ripples[J]. *Sedimentology*, 1969, 13(3/4): 253-261.
- [33] Kuenen P H, Sengupta S. Experimental marine suspension currents, competency and capacity[J]. *Geologie en Mijnbouw*, 1970, 49(2): 89-118.
- [34] Kuenen P H. Matrix of turbidites: Experimental approach[J]. *Sedimentology*, 1966, 7(4): 267-297.
- [35] Banerjee I. Experimental study on the effect of deceleration on the vertical sequence of sedimentary structures in silty sediments [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1977, 47(2): 771-783.
- [36] Buls T, Anderskov K, Friend P L, et al. Physical behaviour of Cretaceous calcareous nannofossil ooze: Insight from flume studies of disaggregated chalk[J]. *Sedimentology*, 2017, 64(2): 478-507.
- [37] Ogbuagu C C, Kassem H, Udiba U U, et al. Role of saltmarsh systems in estuarine trapping of microplastics[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 15546.
- [38] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506(1): 135-145.
- [39] Yang Z Q, Baptista A, Darland J. Numerical modeling of flow characteristics in a rotating annular flume[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2000, 31(1/2/3/4): 271-294.
- [40] 徐啸. 细颗粒粘性泥沙沉降率的探讨[J]. 水利水运科学研究, 1989(4): 93-104. [Xu Xiao. Approaching of fine cohesive sediment depositional rate[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1989(4): 93-104.]
- [41] Yao P, Su M, Wang Z B, et al. Experiment inspired numerical modeling of sediment concentration over sand-silt mixtures[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 105: 75-89.
- [42] 陈永平,乔中行,许春阳,等. 粉砂含量对环形水槽混合床面冲刷特性的影响[J]. 泥沙研究, 2021, 46(5): 1-8. [Chen Yongping, Qiao Zhongxing, Xu Chunyang, et al. Influences of sediment composition on scour of silt-sand mixture bed[J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(5): 1-8.]
- [43] 沈承烈,阮文杰. 长江口河床质冲淤特性的试验研究[J]. 泥沙研究, 1986(3): 62-72. [Shen Chenglie, Ruan Wenjie. Experimental research of the Yangtze Estuary bed material erosion and deposition characteristics[J]. *Journal of Sediment Research*, 1986(3): 62-72.]
- [44] 阮文杰. 细颗粒泥沙动水絮凝的机理分析[J]. 海洋科学, 1991(5): 46-49. [Ruan Wenjie. Mechanistic analysis on hydrodynamic flocculation on fine sediments[J]. *Marine Sciences*, 1991

- (5): 46-49.]
- [45] 阮文杰. 长江口南支河床质的运动规律[J]. 海洋科学, 1992(4): 44-48. [Ruan Wenjie. Transportation patterns of bed load in South Branch of the Changjiang River Estuary[J]. Marine Sciences, 1992(4): 44-48.]
- [46] 张志南, 周宇, 韩洁, 等. 生物扰动实验系统(AFS)的基本结构和工作原理[J]. 海洋科学, 1999(6): 28-30. [Zhang Zhinan, Zhou Yu, Han Jie, et al. The basic structures and operational principles of the annular flux system (AFS)[J]. Marine Sciences, 1999(6): 28-30.]
- [47] 彭进平, 逢勇, 李一平, 等. 水动力条件对湖泊水体磷素质量浓度的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 388-392. [Peng Jin-ping, Pang Yong, Li Yiping, et al. The effect of water dynamical condition on phosphorus in lake[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(4): 388-392.]
- [48] 童亚莉, 梁涛, 王凌青, 等. 双向环形水槽模拟变化水位和流速下洞庭湖沉积物氮释放特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 59-67. [Tong Yali, Liang Tao, Wang Lingqing, et al. Characteristics of nitrogen release from Lake Dongting sediments under variable water level and velocity in the two-way annular flume[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 59-67.]
- [49] 吉飞, 李志伟, 赵汗青. 水动力作用下泥沙对磷的吸附特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 56-62. [Ji Fei, Li Zhiwei, Zhao Hanqing. Characteristics of adsorption of phosphorus by sediment under hydrodynamic action[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(1): 56-62.]
- [50] 金鹰, 张鹰. 灌河口泥沙的环形水槽试验[J]. 河海大学学报, 1993, 21(1): 48-54. [Jin Ying, Zhang Ying. Annular tank tests of sediment from Guanhe Estuary[J]. Journal of Hohai University, 1993, 21(1): 48-54.]
- [51] 冯学英. 环形水槽机理与应用研究[J]. 水道港口, 1998(3): 7-11. [Feng Xueying. On mechanism and application of circulating flume[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1998(3): 7-11.]
- [52] 王捷, 周晶晶, 张长宽. 双向环形水槽流速分布规律试验研究[J]. 泥沙研究, 2014(5): 32-37. [Wang Jie, Zhou Jingjing, Zhang Changkuan. Experimental study on velocity distribution of two-direction rotating annular flume[J]. Journal of Sediment Research, 2014(5): 32-37.]
- [53] Spork V, Ruland P, Schneider B, et al. A new rotating annular flume for investigations on sediment transport[J]. International Journal of Sediment Research, 1994, 9(3): 141-147.
- [54] Widdows J, Brinsley M D, Salkeld P N, et al. Influence of biota on spatial and temporal variation in sediment erodability and material flux on a tidal flat (Westerschelde, The Netherlands)[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 194: 23-37.
- [55] Bale A J, Widdows J, Harris C B, et al. Measurements of the critical erosion threshold of surface sediments along the Tamar Estuary using a mini-annular flume[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(10): 1206-1216.
- [56] Schieber J. Reverse engineering mother nature—Shale sedimentology from an experimental perspective[J]. Sedimentary Geology, 2011, 238(1/2): 1-22.
- [57] Hermidas N, Eggenhuisen J T, Jacinto R S, et al. A classification of clay-rich subaqueous density flow structures[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(5): 945-966.
- [58] Amos C L, Bergamasco A, Umgieser G, et al. The stability of tidal flats in Venice Lagoon—The results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 51(1/2/3/4): 211-241.
- [59] Liu H L, Jia Y G, Zhang S T, et al. Field measurement of the erosion threshold of silty seabed in the intertidal flat of the Yellow River delta with a newly-developed annular flume[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1177241.
- [60] Thompson C E L, Couceiro F, Fones G R, et al. In situ flume measurements of resuspension in the North Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 94(1): 77-88.
- [61] Aberle J, Nikora V, Walters R. Data interpretation for in situ measurements of cohesive sediment erosion[J]. Journal of Hy-draulic Engineering, 2006, 132(6): 581-588.
- [62] Manning A J, Friend P L, Prowse N, et al. Estuarine mud flocculation properties determined using an annular mini-flume and the LabSFLOC system[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(8): 1080-1095.]
- [63] Piedra-Cueva I, Mory M, Temperville A. A race-track recirculating flume for cohesive sediment research[J]. Journal of Hydraulic Research, 1997, 35(3): 377-396.
- [64] Lara M, Bouma T J, Peralta G, et al. Hydrodynamic effects of macrophyte microtopography: Spatial consequences of interspecific benthic transitions[J]. Marine Ecology Progress Series, 2016, 561: 123-136.
- [65] 苏敏, 顾浩, 陈永平, 等. 基于ADV的底床切应力测量精度提升实验探究[J]. 泥沙研究, 2023, 48(4): 24-31. [Su Min, Gu Hao, Chen Yongping, et al. Experimental study on the measurement accuracy improvement of bed shear stress by ADV[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(4): 24-31.]
- [66] Wright J D, Baas J H. Despiking ultrasonic doppler velocity profiling data[J]. Journal of Sedimentary Research, 2013, 83(11): 954-961.
- [67] Ciutat A, Widdows J, Readman J W. Influence of cockle cerastoderma edule bioturbation and tidal-current cycles on resuspension of sediment and polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Marine Ecology Progress Series, 2006, 328: 51-64.
- [68] Hawley N. Flume experiments on the origin of flaser bedding [J]. Sedimentology, 1981, 28(5): 699-712.
- [69] Schieber J, Southard J B. Bedload transport of mud by floccule ripples-direct observation of ripple migration processes and their implications[J]. Geology, 2009, 37(6): 483-486.
- [70] Schieber J, Southard J, Thaisen K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples[J]. Science, 2007, 318(5857): 1760-1763.

- [71] Terwindt J H J, Breusers H N C. Experiments on the origin of flaser, lenticular and sand-clay alternating bedding[J]. *Sedimentology*, 1972, 19(1/2): 85-98.
- [72] Sato T, Taniguchi K, Takagawa T, et al. Generation of tidal bedding in a circular flume experiment: Formation process and preservation potential of mud drapes[J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(2): 101-108.
- [73] 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.
- [74] Postma H. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment[M]//Lauff G H. *Estuaries*. Washington, DC: American Association for Advancement of Science, 1967: 158-180.
- [75] Hizzett J L, Sumner E J, Cartigny M J B, et al. Mud-clast armoring and its implications for turbidite systems[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2020, 90(7): 687-700.
- [76] Haughton P, Davis C, McCaffrey W, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits: Classification, origin and significance[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1900-1918.
- [77] Baar A W, de Smit J, Uijtewaal W S J, et al. Sediment transport of fine sand to fine gravel on transverse bed slopes in rotating annular flume experiments[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 19-45.
- [78] 谈明轩, 朱筱敏, 耿名扬, 等. 沉积物重力流流体转化沉积—混合事件层[J]. *沉积学报*, 2016, 34(6): 1108-1119. [Tan Mingxuan, Zhu Xiaomin, Geng Mingyang, et al. The flow transforming deposits of sedimentary gravity flow-hybrid event bed [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1108-1119.]
- [79] Baas J H, Best J L, Peakall J, et al. A phase diagram for turbulent, transitional, and laminar clay suspension flows[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(4): 162-183.
- [80] 李胜利, 李顺利, 付超. 长试管静置沉降实验结果对湖盆细粒沉积纹层成因的启示[J]. *古地理学报*, 2022, 24(3): 405-414. [Li Shengli, Li Shunli, Fu Chao. Implication of the large-tube settling experiment results on genesis of fine-grained deposition lamination of lacustrine basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(3): 405-414.]
- [81] Allen J R L. Current ripples: Their relation to patterns of water and sediment motion[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1968: 1-433.
- [82] Dou L X, Best J, Bao Z D, et al. The sedimentary architecture of hyperpycnites produced by transient turbulent flows in a shallow lacustrine environment[J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 411: 105804.
- [83] Wu X X, Baas J H, Parsons D R, et al. Wave ripple development on mixed clay-sand substrates: Effects of clay winnowing and armoring[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, 123(11): 2784-2801.
- [84] Taniguchi K, Takagawa T, Masuda F. Forming conditions of Giant Ripples in a circular water flume[C]//Sekiguchi, Hideo (Hg.). *Proceedings 4th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-4)*. Tokyo, Japan. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society, 2008: 558-561.
- [85] Takagawa T. Experimental study on formative conditions of hummocky cross-stratification using circular flume[D]. Kyoto: Kyoto University, 2007.
- [86] Baar A W, Weisscher S A H, Kleinhans M G. Interaction between lateral sorting in river bends and vertical sorting in dunes[J]. *Sedimentology*, 2020, 67(1): 606-626.
- [87] 李华国, 袁美琦, 张秀芹. 淤泥临界起动条件及冲刷率试验研究[J]. *水道港口*, 1995(3): 20-26. [Li Huaguo, Yuan Meiqi, Zhang Xiuqin. Study on critical motion and erosion of cohesive sediment[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 1995(3): 20-26.]
- [88] 王兆印, 黄金池, 苏德惠. 河道冲刷和清水水流河床冲刷率[J]. *泥沙研究*, 1998(1): 3-13. [Wang Zhaoyin, Huang Jinchi, Su Dehui. River channel scour and scour rate of clear water flow [J]. *Journal of Sediment Research*, 1998(1): 3-13.]
- [89] Gurka R, Liberzon A, Hetsroni G. Detecting coherent patterns in a flume by using PIV and IR imaging techniques[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 37(2): 230-236.
- [90] Gharabaghi B, Inkratas C, Krishnappan B G, et al. Flow characteristics in a rotating circular flume[J]. *The Open Civil Engineering Journal*, 2007, 1(1): 30-36.
- [91] Scheingross J S, Hovius N, Dellinger M, et al. Preservation of organic carbon during active fluvial transport and particle abrasion[J]. *Geology*, 2019, 47(10): 958-962.

Progress and Prospects in the Sedimentological Applications of a Circular Flume Physical Simulation

SUN HaoNan^{1,2}, TAN MingXuan^{1,2}, YAO Peng³

1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: [Significance] Physical simulation experimentation in a circular flume is an effective means of simulating the sedimentary process and revealing its formation mechanism. It is of great significance to research directions such as hydraulic engineering, environmental science, sedimentology, and hydrocarbon exploration. The circular flume sustains continuous fluid flow under the influence of inertial and shear forces, and is considered to approximate the transport and deposition of sediment over an infinitely long distance. Therefore, it approximately reproduces aspects of transport distance and fluid velocity that occur in environmental fluid flow, breaking through the application limitations of traditional flume simulations. [Progress] To meet the research needs of different application scenarios, circular flumes have gradually evolved into four types: conventional circular flumes, *in situ* circular flumes, mini circular flumes, and racetrack flumes. To date, physical simulations using circular flumes have achieved fruitful results in studying depositional characteristics, bedform morphology, and depositional mechanisms, among other aspects. However, there is still a relative scarcity of research in sedimentary physical simulation. With the development of technology and equipment, research in sedimentary physical simulation has also made significant progress. For example, gravity flow deposition, the dynamics of fine-grained deposition transport, and tidal and wave deposition have become important research areas in physical simulations using circular flumes. It is recognized that there are several limitations in circular flume physical simulations, such as the influence of secondary circulation and the tracking of lateral deposition evolution, which will be optimized in subsequent research through improved experimental designs and enhanced measurement accuracy. [Conclusions and Prospects] In summary, systematically expanding the applicability of physical simulation with annular flumes based on sedimentology principles will contribute to the innovative development of basic sedimentological theories and many aspects such as fine-grained sedimentology and unconventional hydrocarbon sedimentology.

Key words: physical simulation; circular flume; sedimentary geology; sedimentary process; implications