

引用格式: 窦鲁星, 张伟庆, 马震, 等. 2026. 陆相湖盆三角洲“水下分流河道”成因探讨——来自异重流沉积理论的启示[J]. 沉积学报. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.008.

DOU LuXing, ZHANG WeiQing, MA Zhen, et al. 2026. Formation Mechanisms of Subaqueous Distributary Channels in Lacustrine Deltas: Insights from hyperpycnal flow depositional models [J]. Acta Sedimentologica Sinica, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.008.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.008

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.008

# 陆相湖盆三角洲“水下分流河道”成因探讨

## ——来自异重流沉积理论的启示

窦鲁星<sup>1</sup>, 张伟庆<sup>1</sup>, 马震<sup>2</sup>, 孙栋<sup>3</sup>, 李刚<sup>4</sup>, 张莉<sup>5</sup>, 孙鹏宇<sup>1</sup>, 叶昊<sup>4</sup>, Carlos Zavala<sup>6</sup>

1. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100
2. 中国石油长庆油田分公司第十二采油厂, 甘肃合水 745400
3. 中国石油长庆油田勘探开发研究院, 西安 710018
4. 长庆油田第一采气厂, 陕西靖边 718500
5. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100
6. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

**摘要** 【意义】陆相湖盆河控三角洲水下分流河道的成因机制长期存在争议, 传统河流沉积动力学理论难以合理解释其形成过程与展布规律。本研究在梳理基本概念的基础上, 结合国内外研究进展, 重点分析了异重流沉积理论对水下三角洲沉积过程与沉积模式的启示, 进而探讨水下分流河道的成因机制。【进展】异重流发育于三角洲前缘河口区, 能够将陆源沉积物经前三角洲和浅湖输送至深水沉积环境。目前, 深水异重流沉积研究已取得突破性进展, 而针对三角洲—浅湖异重流沉积记录的描述和解释仍较薄弱。异重流三角洲新概念将三角洲河口区与深水重力流沉积过程联结, 揭示了异重流水道可作为连接三角洲与深水沉积的重要纽带。现代与古代异重流沉积实例揭示了三角洲前缘—浅湖或浅海沉积环境中可发育异重流水道。异重流可能为三角洲前缘水下分流河道形成提供关键动力。异重流水道的形成机理可能与超临界异重流(密度弗劳德数  $Frd$  超过临界值)侵蚀作用密切相关。【结论与展望】陆相湖盆三角洲水下分流河道并非三角洲平原分流河道在水下自然延伸形成, 而是受事件性洪水异重流作用控制形成。该认识对经典三角洲沉积模式提出了重要修正, 进一步揭示了洪水期间高密度异重流是控制三角洲沉积的一种关键地质营力。基于异重流动力学机制更新原有的解释模型, 可以为陆相湖盆三角洲沉积模式研究提供新的理论框架与研究思路。未来研究应加强定量沉积物理模拟与古代沉积记录分析结合, 深化三角洲前缘异重流沉积动力学机制研究, 为陆相湖盆沉积学提供坚实理论支撑。

**关键词** 三角洲; 水下分流河道; 陆相湖盆; 异重流; 沉积模式

**第一作者** 窦鲁星, 男, 1991年出生, 博士, 副教授, 沉积学、油气田开发地质学, E-mail: luxingdou@yangtzeu.edu.cn

**通信作者** 张莉, 女, 副教授, E-mail: zhangx0522@qq.com

中图分类号: P512.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2026)00-0000-00

## 0 引言

三角洲沉积在我国鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地等陆相含油气盆地中广泛发育, 形成了大量油气储层(裘亦楠, 1992; 郭英海等, 1998; 张昌民等, 2010)。尽管目

收稿日期: 2025-09-19; 收修改稿日期: 2026-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202177); 国家科技重大专项(2025ZD1405402)

前陆相湖盆三角洲沉积模式研究已较为深入,但针对三角洲水下沉积单元的成因机制与沉积模式仍存在若干争议。这些争议主要体现在以下两个方面:(1)分流河道入湖后维持其稳定水下延伸的沉积动力条件尚不明确;(2)水下分流河道沉积与陆上分流河道的差异缺乏系统认识。上述争议导致“水下分流河道”概念在应用中仍存在分歧,直接制约了三角洲相油气储层预测精度及油气勘探成效。上述问题表明,传统河流动力学理论在解释水下分流河道成因方面存在不足,亟须新的理论突破。近年来,异重流沉积理论不断发展,起源于三角洲前缘的异重流搬运沉积过程及其沉积动力学机制(Mulder and Syvitski, 1995; 杨仁超等, 2015; Zavala *et al.*, 2024)可能为三角洲沉积模式和水下分流河道的成因解释提供新启示。沉积学领域的异重流(hyperpycnal flow)是指洪水期河流注入盆地,沿盆地底部流动的高密度流体,本质上是一种洪水成因的重力流(Bates, 1953; 杨仁超和田源, 2020; 窦鲁星等, 2023)。Bates (1953)将其命名为异重流(hyperpycnal flow),也有学者将其译为高密度流或超密度流(汪品先, 2009; 何起祥, 2010)。当洪水期携泥沙河水的密度超过盆地水体密度时,即触发异重流。近年来,我国鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、塔里木盆地等大型含油气盆地中均已发现异重流沉积(潘树新等, 2017; 梁国强等, 2018; 李相博等, 2019)。异重流沉积理论持续发展,三角洲前缘河口区异重流的搬运过程与沉积动力学机制(杨仁超等, 2015)可能为三角洲沉积模式和水下分流河道的成因解释带来了新启示(Zavala *et al.*, 2024)。值得关注的是,异重流沉积不仅能够形成常规油气储层,还与多种页岩油气储层具有密切成因联系(Cao *et al.*, 2024; 冯有良等, 2024)。

携带沉积物的异重流进入河口区后,流体由三角洲前缘出发,通过前三角洲—浅湖或浅海以后最终进入深水环境。这一认识在现代沉积研究中已得到证实(Okay *et al.*, 2011; Fabbri *et al.*, 2021; Jin *et al.*, 2021)。以往异重流沉积研究主要对象是深水沉积记录,随着异重流沉积研究不断深入,浅水环境中的异重流水道—朵叶体沉积的发现(Steel *et al.*, 2018; Dou *et al.*, 2020; Olariu, 2023),更新了经典异重流沉积模式,揭示了三角洲沉积与重力流沉积之间可能存在密切联系。上述研究对陆相湖盆三角洲研究具有重要启示。传统观点认为,水下分流河道主要受河流动力学控制,是河流入湖后因流速降低而发生沉积的结果,也有观点质疑水下分流河道发育的可能性(金振奎等, 2014; 毛小平等, 2024)。而异重流理论为水下分流河道的成因解释提供了新视角:在具有高沉积物供给的事件性洪水背景下,异重流可能在湖盆三角洲水下沉积单元的形成和演化过程中发挥关键控制作用。然而,以往三角洲沉积模式对异重流的考虑仍显不足,古代三角洲—浅湖沉积记录中异重流沉积单元的相关描述和解释仍较匮乏。

基于以上问题,本文从异重流沉积理论视角出发,结合国内外最新研究成果,开展调研和综述,将以往深水沉积领域重点关注的异重流沉积与湖盆三角洲沉积模式建立关联,尝试运用新的理论框架解释三角洲水下沉积单元的成因,并探讨异重流控制下的陆相湖盆

三角洲水下分流河道可能的成因机制。本文首先阐述异重流三角洲新概念及其理论进展；然后通过典型实例分析异重流对三角洲水下沉积单元的控制作用，总结异重流沉积理论对湖盆三角洲模式的新启示；进而讨论异重流对水下分流河道成因、沉积模式及空间分布的影响；最后探讨目前待解决的关键问题与未来研究方向。本文旨在为陆相湖盆三角洲沉积记录的描述和解释提供新的理论参考。

## 1 三角洲水下分流河道的定义与争议

三角洲是河流携带碎屑物质进入蓄水盆地时，由于水流扩散、流速骤减导致沉积物大量堆积而形成的扇形沉积体（Gilbert, 1885；科尔曼和普赖尔, 1987）。根据沉积环境和水深变化，完整的三角洲体系可划分为三个主要相带：三角洲平原亚相，主要发育分流河道、天然堤和泛滥平原沉积微相；三角洲前缘亚相，位于浪基面之上的浅水区，发育水下分流河道、河口砂坝和席状砂等典型沉积单元；前三角洲亚相，处于浪基面以下的较深水环境，以泥质沉积为主。这种三元结构反映了河流动力与蓄水盆地能量相互作用的沉积响应，也是识别古代三角洲沉积的重要标志。在经典模式中，三角洲前缘亚相的关键单元——水下分流河道，被视为陆上分流河道向水下的自然延伸，其形成受河流动力、沉积物供给及盆地水动力三重控制。近年来，关于河控三角洲前缘是否发育水下分流河道的争议在沉积学界日益凸显，争议核心在于其形成机制是否符合沉积动力学理论。通过对国内外沉积学经典文献的梳理，可以发现学术界在此问题上存在显著的观点分歧，这种分歧主要体现在以下两个方面：。

(1) 国内经典教材对水下分流河道的存在与否及其形成机制存在观点分歧。我国陆相盆地沉积研究普遍认为，水下分流河道是河控三角洲的关键沉积单元，亦是含油气储层的重要发育部位。然而，部分教材对此经典认识提出了不同见解。例如，部分经典沉积学教材中并未针对性介绍水下分流河道这一概念。在介绍三角洲前缘亚相时，主要提及河口坝、远砂坝和席状砂等，而未介绍水下分流河道微相，亦未开展相关的分析（孙永传和李蕙生, 1986；曾允孚和夏文杰, 1986；陈家良等, 2004；陈建强等, 2004）。据此推断，上述编著者倾向于认为三角洲前缘不存在水下分流河道微相。例如，孙永传教授（1986）在《碎屑岩沉积相和沉积环境》中明确将三角洲前缘划分为河口坝、远砂坝等沉积单元，但并未包含水下分流河道沉积单元，尤其是三角洲沉积模式的垂向序列上，也没有绘制水下分流河道沉积。近来，部分学者结合古代地层沉积记录、现代沉积、物理模拟展开多角度论证，提出了类似观点，即真正意义上的水下分流河道难以形成，可能由陆上分流河道在低水位期下切形成，而后因水位上升被淹没而成（金振奎等, 2014；付金华等, 2019；毛小平, 2024）。其次，针对水下分流河道形成机制方面的认识存在差异。部分经典模式认为，水下分流河道是由河流入湖（海）后，在惯性作用下继续向前流动并下蚀冲刷形成，形成过

程中河道加宽，深度减小，分叉增多。上述观点在许多经典沉积学教材中均有体现（表1），前人研究也提出了水下分流河道的沉积序列和识别标志（表1）。值得注意的是，这些支持水下分流河道沉积模式的观点也有一些差异，例如李思田等（2004）认为水下分流河道与河口坝沉积联系密切，具有共同发育的特点（表1）。这些研究成果为沉积学的发展做出了显著贡献。然而，基于对现有认识的梳理，水下分流河道在沉积动力机制的特殊性、发育延伸过程及最大延伸距离等方面仍有待更为深入和详细的论证。

表1 我国经典沉积学教材中对三角洲水下分流河道的相关论述对比  
Table 1 Comparative analysis of subaqueous distributary channels in deltaic facies from classical academic textbooks in China

论著名称	作者/出版年份	主要观点	水下分流河道沉积特征
沉积岩石学	刘宝珺, 1980	位于三角洲平原水下部分, 支流河道延伸入海, 河道加宽, 变浅, 并分叉, 最后消失, 流速减慢, 堆积速度加快。	普遍见交错层理, 流水波纹层理, 冲刷—充填构造, 侵蚀面。河流晚期黏土层保存良好, 上表面显示冲刷, 产生泥砾, 常见变形构造。
中国含油气盆地沉积学	吴崇筠和薛叔浩, 1993	水下分流河道是三角洲平原上分流河道向湖内的继续延伸, 由于河道强烈地向下切蚀冲刷, 形成水下河道条带状砂体。河流作用愈强, 水下河道愈长, 呈条带状垂直岸线分布。	岩性剖面为多层正韵律砂层叠合形成的叠合砂岩, 周围泥岩为浅灰、灰绿至暗紫色含湖相化石的滨浅湖相泥岩, 不同于岸上的分流河道。
沉积学	姜在兴, 2003	水下分流河道为陆上分流河道的水下延伸分, 也称为水下分流河床。在向海延伸过程中, 河道加宽, 深度减小, 分岔增多, 流速减缓, 堆积速度增大。	沉积物以砂、粉砂为主, 泥质极少。常发育交错层理、波状层理及冲刷—充填构造, 并见层内变形构造。垂直流向剖面上呈透镜状, 侧向则变为细粒沉积物。
沉积盆地分析基础与应用	李思田等, 2004	水下分流河道被包围于河口坝砂体之中, 通常由一系列侧向叠置的透镜状河道单元组成。	其沉积构造或者以复合层理为主, 或者以小型槽状交错纹理为主。规模小、冲刷能力弱、粒度细、杂基含量高。
沉积岩石学 (第四版)	朱筱敏, 2008	水下分支河道为陆上分支河道的水下延伸部分, 在向海延伸过程中, 河道加宽, 深度减小, 分叉增多, 流速减缓, 堆积速度增大。	积物以砂、粉砂为主, 泥质极少。常发育交错层理、波状层理及冲刷—充填构造, 并见层内变形构造和水生化石。在垂直流向剖面上呈透镜状, 侧向则变为细粒沉积物。
沉积地质学基础	杜远生, 2022	水下分流河道是三角洲前缘重要沉积单元, 是三角洲平原水系延续。	发育水流成因沉积构造, 冲刷面、水流波浪和流水交错层理等。
碎屑岩沉积相和沉积环境	孙永传和李蕙生, 1986	重点论述了三角洲前缘分支河口沙坝、远沙坝、前缘席状砂(未论述水下分流河道, 河控三角洲沉积序列中未包含水下分流河道)。	未论述水下分流河道微相。
沉积岩石学	曾允孚和夏文杰, 1986	三角洲前缘主要发育分流河口砂坝、远砂坝和席状砂。	未论述水下分流河道微相。
能源地质学	陈家良等, 2004	三角洲前缘沉积主要由分流河口坝砂及前缘席状砂构成。	未论述水下分流河道微相。
沉积学及古地理学教程	陈建强等, 2004	重点论述了三角洲前缘分支河口沙坝、远沙坝、前缘席状砂, 未论述水下分流河道, 河控三角洲沉积序列中未包含水下分流河道(引用孙永传)。	未论述水下分流河道微相。

(2) 国内外学者之间的认识也存在明显分歧, 主要表现为国外学者并未提出或者大范围地推广水下分流河道沉积模式。例如, 国外学者 Boggs (2006) 和 Nichols (2009) 编著的经典沉积学教材中, 并未提及三角洲前缘存在水下分流河道沉积微相, 而是认为分流河口沙坝才是三角洲前缘的主要沉积单元。Jain (2024) 在近年出版的《沉积学基础》(Fundamentals of Sedimentology) 一书中, 亦未提及三角洲前缘水下分流河道的概念(图1)。国外经典三角洲模式多源自现代海洋三角洲研究(图2), 例如在 Coleman and Galinano (1964) 提出的经典海相三角洲沉积模式中, 分流河道仅于水下短距离延伸后即过渡为河口坝。上述观点与前文所述的一部分国内学者(孙永传和李蕙生, 1986)观点基本一致。然而, 这些国外教材中的三角洲沉积模式与国内学者提出包含三角洲前缘水下分流河道的三角洲沉积模式存在显著差异。核心分歧就是三角洲前缘是否发育水下分流河道沉积单元。上述国内外认识差异表明, 三角洲沉积学研究在水下沉积单元方面可能存在理

论缺失环节。不同学者关于三角洲前缘水下分流河道发育条件以及沉积机制等基础问题仍存在深刻分歧。

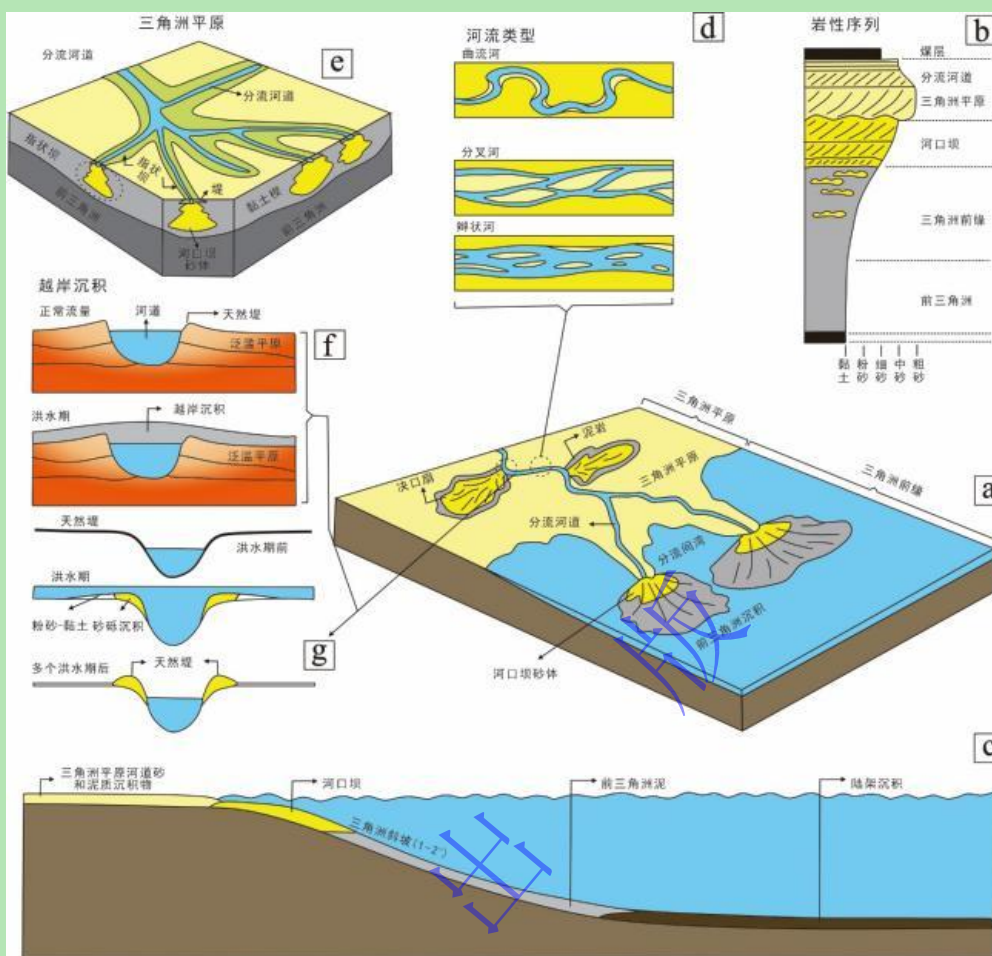


图 1 典型河控三角洲沉积单元和沉积模式 (据 Jain, 2024 修改)

(a~c) 三角洲的两个亚环境——三角洲前缘 (delta front) 和三角洲平原 (delta top/plain) 及其相关沉积物。前积作用 (progradation) 形成向上变粗的沉积序列 (coarsening-up sequence); (d) 三角洲平原中常见的河道类型 (channel types); (e) 三角洲平原中的指状沙坝 (bar-finger) 和分流河道 (distributary channels); (f, g) 溢岸沉积 (overbank deposits) 和天然堤 (levee) 的形成过程

Fig.1 Typical sedimentary units and a depositional model of a fluvial-dominated delta (modified from Jain, 2024) (a~c) the two subenvironments of a delta, deltafront and delta top/delta plain and associated sediments; progradation results in a coarsening-up sequence; (d) channel types noted in delta plains; (e) bar-finger and distributary channels in a delta plain; (f) formation of overbank deposits; (g) levee formation

综合以上分析，我国三角洲沉积学在起步阶段引入了海相三角洲沉积理论，国内经典教材对三角洲沉积模式的论述，部分参考了国外经典海相三角洲研究，但也在随后的实际应用中，对三角洲沉积理论进行了进一步发展和延伸，尤其是在陆相湖盆三角洲沉积学领域。水下分流河道的概念在湖盆三角洲沉积研究中已被广泛应用 (李志鹏等, 2012; 封从军等, 2014)。当前，陆相湖盆沉积学研究普遍将其成因解释为三角洲平原分流河道向水下延伸的产物，但对其下切侵蚀的动力机制尚缺乏系统阐明。此外，水下分流河道的概念在沉积序列与成因模式上与国外海相河控三角洲的经典模型存在显著差异，相关沉积序列的系统论述亦显不足，导致近年来有学者对其合理性提出质疑。上述问题反映出目前对三角洲前缘水下沉积单元，尤其是水下分流河道的沉积动力机制认识仍不够深入。具体而言，水下分流河道是否普遍发育、其触发机制及控制因素等关键科学问题尚未得到充分阐明，不仅

制约了三角洲沉积过程的理论认识，也直接影响三角洲相储层的精细刻画与准确解释，进而可能对油气勘探开发实践产生不利影响。因此，为突破这一理论瓶颈，亟须从沉积动力学的角度重新审视水下分流河道的形成机理。值得关注的是，近年来异重流沉积理论的迅速发展，为理解三角洲前缘水下沉积过程提供了新的思路。作为一种重要的水下沉积动力机制，异重流有望为水下分流河道及其他相关沉积单元的形成演化提供更具解释力的理论框架。

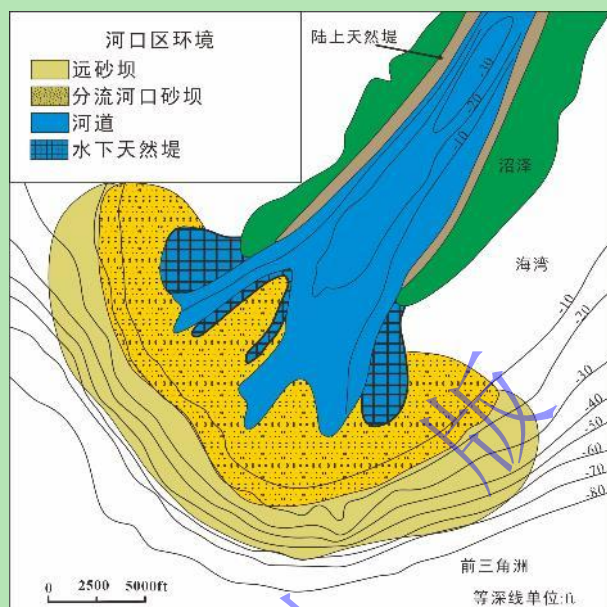


图2 典型海相河控三角洲前缘沉积模式 (据 Coleman and Galinano, 1964 修改)

Fig.2 Depositional model of a typical fluvial-dominated delta front (modified from Coleman and Galinano, 1964)

## 2 异重流基本概念及异重流三角洲新模式

### 2.1 异重流基本概念起源

如引言所述，异重流本质上是发源于三角洲河口区的携泥沙的高密度流体。异重流最早在沉积学中被提及，是作为三角洲河口区进入盆地的三类不同流体之一被介绍（图3）。当沿岸的河口区形成异重流后，流体经过三角洲前缘潜入前三角洲斜坡到达湖底或者海底（Mulder and Syvitski, 1995；杨仁超等，2023），最终形成细砂—粉砂—泥页岩同期异相共存的异重流沉积。随着研究的深入，异重流沉积理论已逐渐获得广泛关注，尤其在深水沉积领域。我国鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、塔里木盆地等大型含油气盆地中均发现报道了异重流沉积（潘树新等，2017；栾国强等，2018；李相博等，2019；陈雁雁等，2019；邱振和邹才能，2020；周立宏等，2020；杨田等，2021；刘海宁等，2022；孙浩南等，2023；仲米虹和唐武，2023）。石油工业出版社2020年出版的国家级规划教材《沉积岩石学（第五版）》，已经将异重流沉积补充纳入深水重力流沉积教学章节中。我国沉积学家也充分关注陆相湖盆深水异重流沉积，并建立了典型的异重流成因的水道—湖底扇沉积模式（潘树新等，2017；Yang *et al.*, 2017；Xian *et al.*, 2018；Liu *et al.*, 2022）。

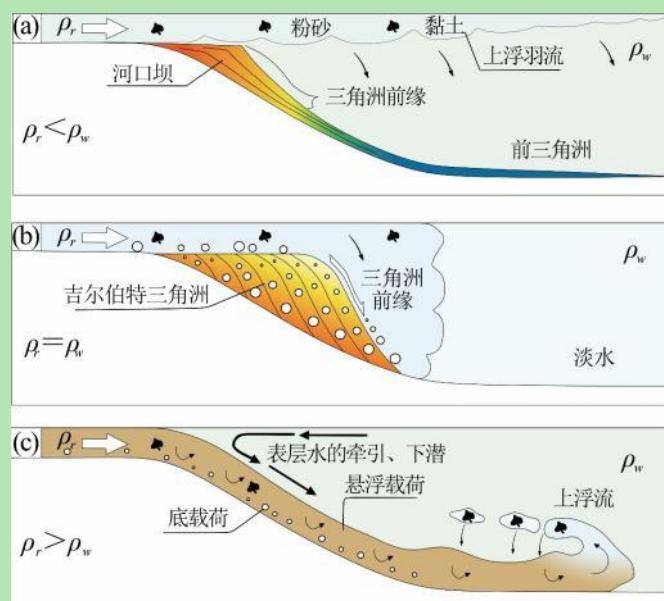


图3 三角洲的分类，体现了三角洲前缘河口区三种不同流体作用下的水下沉积特征（据 Bates, 1953; Zavala 和潘树新, 2018）

Fig.3 Classification of deltas reflecting subaqueous sedimentary characteristics influenced by three different fluid dynamics in a river-mouth zone (after Bates, 1953; Zavala and Pan, 2018)

## 2.2 异重流三角洲新概念

从异重流基本概念起源来看，尽管三角洲沉积中很可能发育异重流沉积，但目前研究主要集中在深水重力流沉积领域。三角洲沉积模式研究中对于异重流沉积记录的描述和解释仍然不够充分。异重流沉积的识别与解释主要集中于深水沉积环境。然而，与经典的、多由滑塌触发的突发性重力流不同，异重流的本质是洪水期携沙河流直接入湖或入海后形成的持续下潜流体。这一成因机制决定了其沉积作用始于河口，并贯穿从三角洲前缘到深水盆地的完整搬运路径。现代沉积研究已证实，异重流在进入盆地后可形成特定的水道沉积单元（Okay *et al.*, 2011; Fabbri *et al.*, 2021; Jin *et al.*, 2021）。近年来，在浅海陆架和浅湖地层中识别出的异重流水道—朵叶体沉积记录（Steel *et al.*, 2018; Dou *et al.*, 2020, 2021; Dou, 2022; Olariu, 2023），突破了重力流仅发育于深水环境的传统认知。这些发现揭示了三角洲沉积体系与深水重力流沉积体系之间存在着一个被长期忽视的“传输带”，即异重流在三角洲前缘的活动记录。然而，目前针对陆相湖盆这一关键过渡带的研究仍十分薄弱，导致三角洲—浅湖沉积记录中的大量异重流沉积很可能被误判为其他类型，这直接阻碍了我们对三角洲水下沉积过程完整性的理解。

结合异重流沉积研究新认识，Zavala *et al.* (2024) 通过沉积盆地水体密度与注入盆地的携泥沙河流密度的对比，将异重流沉积与三角洲沉积作为一个整体，提出了一种新的异重流三角洲沉积系统分类方法，依据河口区沉积动力机制将三角洲划分成三个大类。当注入盆地的河流密度低于盆地水体密度时，就会形成异轻流三角洲（hypopycnal delta），当注入盆地的河流密度与盆地水体密度相似时，就会形成等密度流三角洲（homopycnal delta），即吉尔伯特型三角洲。异轻流三角洲和等密度流三角洲属于传统的三角洲概念范畴，形成的沉积物主要在河口区附近卸载，以三角洲前缘河口坝沉积为代表。当注入盆地

的携泥沙河流密度高于盆地中水体密度时，则形成异重流沉积体系，命名为异重流三角洲（hyperpycnal delta），其可以进一步详细划分为异重流沿岸三角洲（hyperpycnal littoral delta）、异重流水下三角洲（hyperpycnal subaqueous delta）、异重流扇三角洲（hyperpycnal fan delta）等三种子类型（图4）。其中异重流水下三角洲河口区的注入水体携带泥沙量大，具有相对较高的比重，异重流经由河口区沿盆底流动进入海洋或者湖泊，可以在浅海陆架区和深水区可以发育异重流水道，形成异重流水道—朵叶体沉积体系，具有盆外浊积岩的特征（Zavala and Arcuri, 2016; Zavala *et al.*, 2021, 2024）。在这样的沉积体系中，河口区受到异重流沉积过程的影响，河流洪水期间大量沉积物能够通过三角洲向盆地转移。异重流三角洲概念框架的提出，以异重流水道这一重要的沉积单元为重要纽带，将三角洲—浅湖沉积与深水沉积联系起来，形成了一个整体（图5），为全面认识异重流沉积提供了一种新的思路。

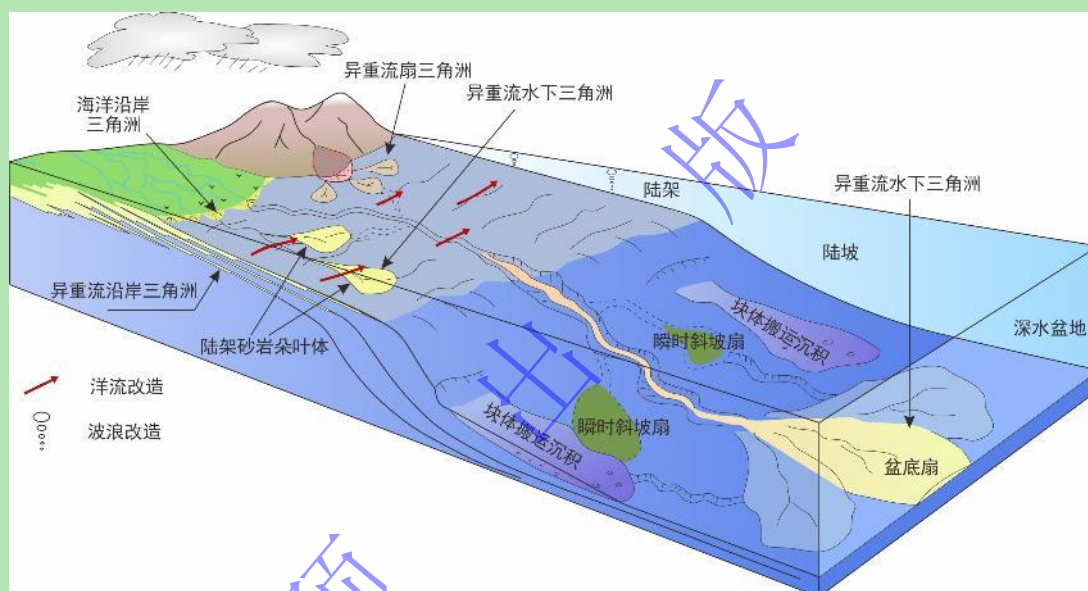


图4 陆架—斜坡—深水盆地异重流三角洲沉积概念模式（据 Zavala *et al.*, 2021 修改）

Fig.4 Conceptual model of hyperpycnal flow delta deposits in shelf-slope-deepwater environment (modified from Zavala *et al.*, 2021)

Zavala *et al.* (2024) 提出的异重流沉积体系概念模式认为，不同供给条件下的三角洲，其水下沉积单元的发育特征存在巨大差异。大致有三种情况：（1）一部分三角洲河口区不发育异重流沉积（对应图4、图5中的沿岸三角洲），这种三角洲水下沉积单元发育较少，大部分沉积物在河口区卸载；（2）另一部分三角洲具备异重流的发育条件，但这种异重流发育呈沿岸水下扩散沉积，并不发育下切水道（对应图4、图5中的异重流沿岸三角洲）；（3）另一部分三角洲河口区具备异重流水道发育条件，可以形成下切水道并在水下延伸一定距离（对应图4、图5中的异重流水下三角洲）。已有异重流沉积研究表明，异重流水道构成了三角洲与深水沉积环境之间的沉积纽带：部分水道延伸至深水区，其余则终止于浅湖或浅海。Zavala *et al.* (2024) 提出的这一新模式不仅扩展了经典三角洲沉积模式，还强调了三角洲水下沉积单元在水动力条件与沉积模式上具有多样性，为解释不同类型三角洲的沉积过程提供了新的理论框架。

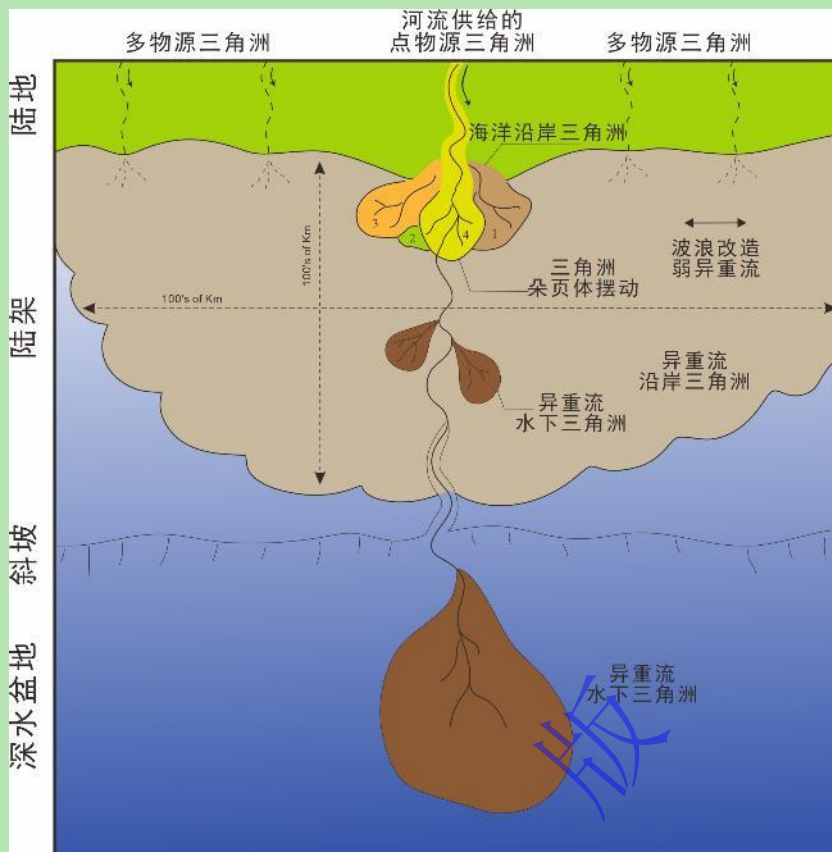


图5 考虑异重流沉积过程的异重流三角洲分布概念模式（据 Zavala *et al.*, 2024 修改）

Fig.5 Conceptual model of hyperpycnal flow delta distribution incorporating depositional processes (modified from Zavala *et al.*, 2024)

### 3 异重流对三角洲前缘水下沉积过程的影响

#### 3.1 异重流水道研究实例

基于上述概念模式，本文针对异重流水道—朵叶体的沉积实例进一步分析。近年来深水异重流沉积研究有很多实例。例如，鄂尔多斯盆地延长组长7段深湖异重流水道和松辽盆地北部嫩江组深湖异重流水道研究（潘树新等，2017；Yang *et al.*, 2017；Xian *et al.*, 2018），这些研究建立了深湖异重流沉积模式，认为异重流水道可从河口区远距离延伸至深水区。近年来，另一些研究发现有的异重流水道沉积在浅湖或者浅海沉积环境发育。这些实例说明异重流对三角洲前缘水下沉积过程有显著影响，因此以下选取三个实例来详细说明。

（1）阿曼大陆边缘的现代浅海异重流水道沉积实例（Bourget *et al.*, 2010），现代浅海环境中异重流沉积的典型代表（图6）。该研究通过高分辨率地震和多波束测深数据，揭示了完整的异重流水道—朵叶体过渡带（CLTZ），由三角洲河口区向水下延伸形成水道，其延伸距离超过25 km。水道末端朵叶体由多个厚度小于5 m的单期异重流沉积事件层叠加而成，呈现出明显的空间分异性：近端以侵蚀—过路沉积为主，中部为叠置的板状—透镜状砂体，远端则渐变为薄层浅海沉积。岩心分析揭示了异重岩（hyperpycnites）沉积特征，发育向上变粗沉积单元与向上变细沉积单元成对出现，两个单元之间发育侵蚀面。这

项研究证实了山地河流洪水事件对三角洲前缘—浅海沉积过程的重要控制作用，也完整展示了半干旱气候区异重流向浅海输送沉积物的过程，为气候—地貌耦合作用下的浅海异重流沉积研究提供了典型案例。

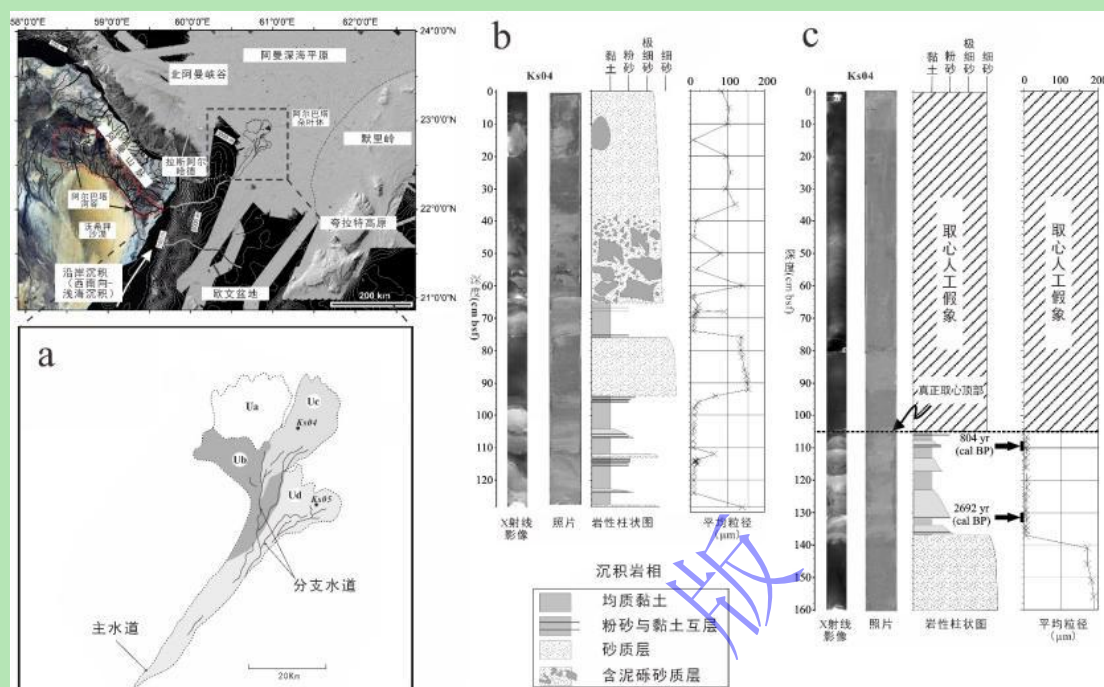


图6 阿曼大陆边缘的现代浅海异重流水道沉积特征 (据 Bourget *et al.*, 2010 修改)

(a) 水道—朵叶体复合体的解释结果，图中标注了沉积取心位置；朵叶体内部四个沉积单元定名为 Ua - Ud；右图可见 Ks04 (b) 与 Ks05 (c) 的岩心摄影图像、X 射线照片及详细岩性描述记录，包括粒度分析结果和两处 AMS  $\delta^{14}C$  测年结果

Fig.6 Depositional characteristics of modern shallow-marine hyperpycnal channel systems on the Oman continental margin (modified from Bourget *et al.*, 2010)

(a) interpretation of channel-lobe complex, with core sampling locations marked on the diagram; Four sedimentary units within the lobe are designated as Ua-Ud; (b, c) core photographs, X-ray images and detailed lithological descriptions, including grain-size analysis and AMS radiocarbon dates for Ks04 and Ks05

(2) 异重流水道—朵叶体沉积的野外剖面实例。Steel *et al.* (2018) 在阿根廷内乌肯盆地侏罗系 Lajas 组野外剖面发现该地层发育典型浅海陆架异重流沉积 (图 7)。异重流沉积为分选良好的中粒砂岩，发育平行层理，形成延伸数百米的砂体，顶底为富含有机质的薄层砂泥岩互层沉积。代表了由小型河流供给、在陆架上沉积并发育微侧向迁移的砂岩朵叶体。Lajas 组异重流沉积典型特征包括：由异重流脉动作用形成的厚层水平纹层、因流体搬运能力下降而形成的粗粒砾石滞留沉积；由于流体上浮形成的泥质沉积。该研究提出的浅海陆架异重流沉积概念模式 (图 8) 说明，三角洲前缘—浅海沉积环境可能发育异重流水道—朵叶体沉积单元。在一定的条件下，河口区异重流可以向三角洲水下沉积单元供给沉积物，三角洲水下沉积单元比以往想象的更为复杂。

(3) 利用地下地质资料开展的三角洲前缘—浅湖异重流研究实例。在松辽盆地南部嫩江组嫩三段浅湖沉积序列中，利用岩心、测井和三维地震资研究发现浅湖沉积序列中发育异重流成因的水道—朵叶体沉积 (Dou *et al.*, 2021) (图 9)。岩心观察发现了流水交错层理、层内冲刷接触面、异地植物碎片、逆粒序—正粒序二元结构等沉积标志。这些异重流成因水道来自三角洲前缘河口区，具有下切浅湖细粒沉积水底延伸的特点。结合三维地震资料分析，建立了异重流成因的水道沉积模式 (图 10)。异重流水道由河口区延伸至浅

湖沉积环境，水道下切减弱逐渐过渡为水下朵叶体沉积。松辽盆地南部嫩江组异重流沉积研究不仅揭示了三角洲前缘—浅湖地区异重流水道的发育样式，还为三角洲前缘水下分流河道的成因提供了佐证。该案例中的异重流水道，在较早研究中曾被解释为三角洲前缘水下分流河道，而后续研究发现这些水下分流河道，实际具有较好的异重流水道沉积特征（Dou *et al.*, 2021）。这说明三角洲前缘水下分流河道的形成和发育过程，很可能与异重流沉积密切相关，异重流可能是形成水下分流河道的重要地质营力。

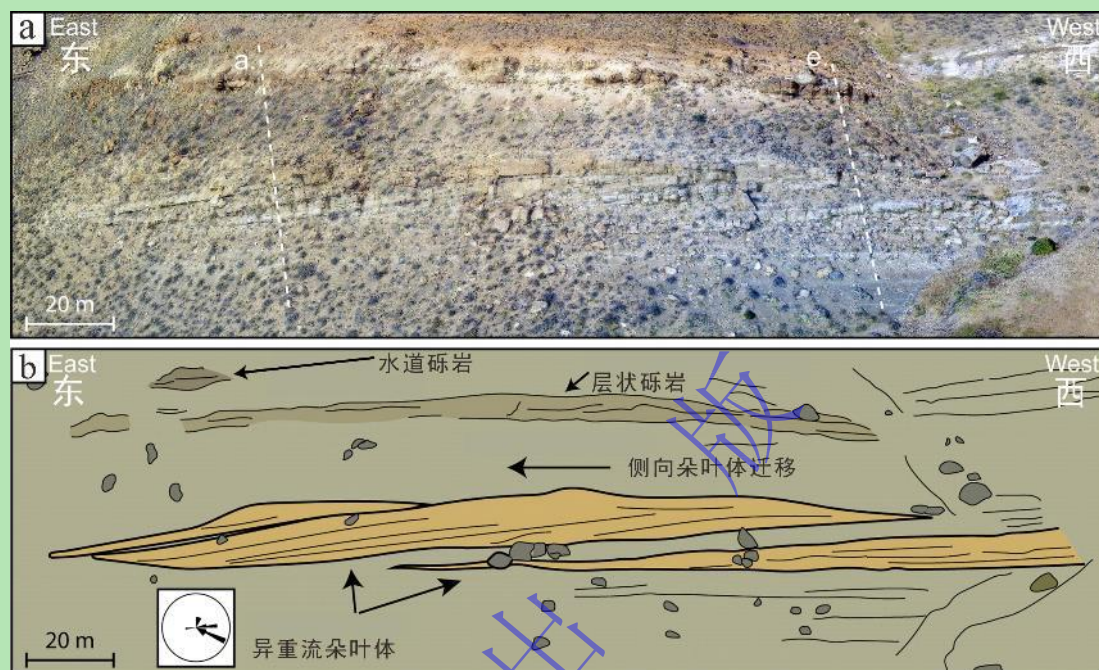


图 7 浅海异重流沉积露头剖面与解释（据 Steel *et al.*, 2018 修改）

(a) 露头照片，可见异重流砂质朵叶体向东进积的现象在剖面中部清晰可见。剖面顶部由粗粒砂岩和砾岩形成抗风化突出的岩层。(b) 露头沉积解释，异重流砂质朵叶体用黄色轮廓线标出，SC 和 CT 相组合用深绿色阴影表示，左上角 CC 相河道用灰褐色阴影标注。古水流方向测量玫瑰图 ( $n=13$ ) 显示古水流方向为东南—东

Fig.7 Outcrop profile and interpretation of shallow marine hyperpycnal flow deposits (modified from Steel *et al.*, 2021)

(a) outcrop photograph showing clear eastward progradation of sandy lobate bodies from density currents (visible in the central part of the section). The top of the profile consists of coarse-grained sandstone and conglomerate, forming a weathering-resistant layer; (b) sedimentary interpretation of the outcrop (sandy lobate bodies of density currents outlined in yellow; SC and CT facies associations shown by dark green shading; CC facies channel in upper left-hand corner shown by tan-brown shading). The paleocurrent rose diagram ( $n = 13$ ) indicates dominant SE-to-E flow direction

上述多个实例表明，异重流在由河口进入湖泊或海洋后后，能够形成多样化的沉积样式。异重流发育的地质条件不同导致水道在延伸距离上表现出显著差异。在发育异重流的三角洲河口区，洪水期异重流能够携带大量沉积物，在水下持续延伸，进而塑造出包括水道和朵叶体在内的完整水下沉积体系。

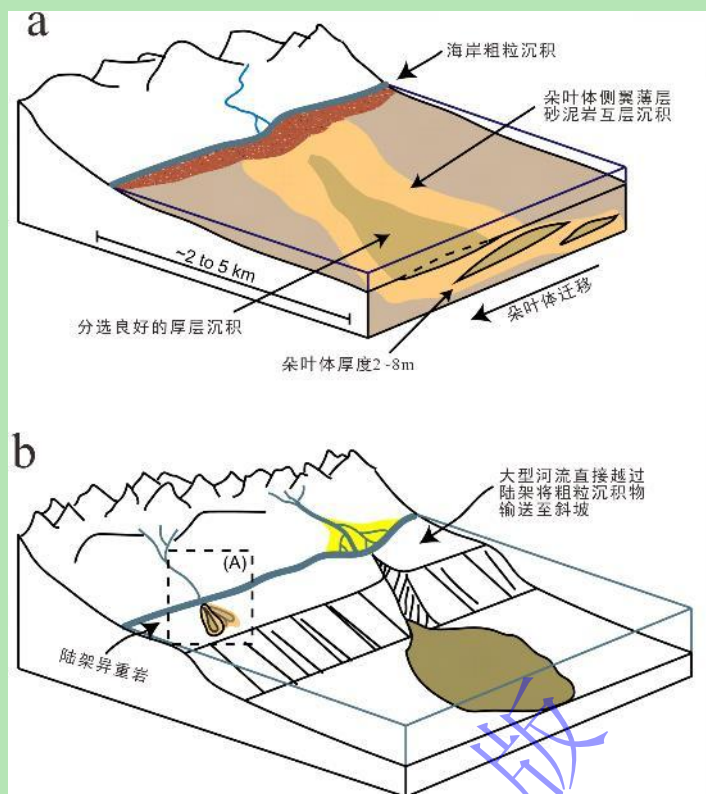


图8 陆架异重流体系古地理概念模式

(a) 小型河流在近海陆架上形成异重流朵叶体的沉积过程。由于流体搬运能力有限，粗粒沉积物主要堆积在近岸区域；(b) 大区域背景下的陆架异重流沉积体系展布；小型河流引发的异重流在陆架形成砂质朵叶体沉积；与之相邻的大型河流则直接越过陆架，将粗粒沉积物输送至斜坡或盆地底部（据 Steel *et al.*, 2018 修改）

Fig.8 Schematic paleogeography of hyperpycnal shelf systems

(a) deposition of hyperpycnal lobes on the continental shelf offshore from small rivers. Coarse-grained material remains near the coastline due to low flow competence (shown in red). Dimensions vary, but estimates based on modern systems and in this study are provided; (b) shelf hyperpycnites on a larger scale; Small rivers induce hyperpycnal currents and deposit sand lobes on the shelf. In lateral- to shelf-systems, larger rivers bypass the continental shelf and feed coarse-grained material directly onto the slope or basin floor (modified from Steel *et al.*, 2018)

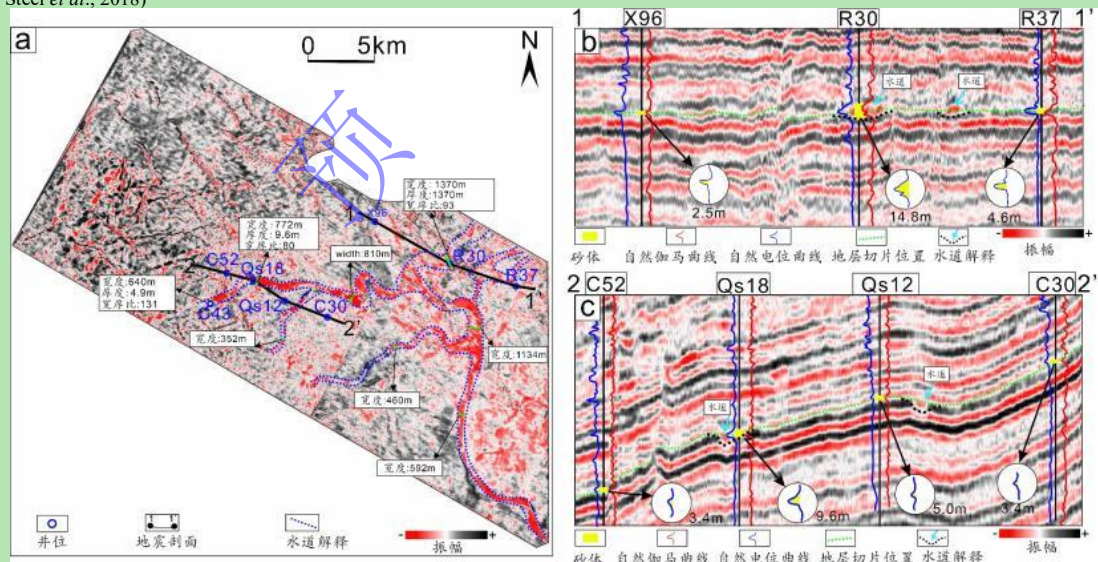


图9 松辽盆地南部嫩江组浅湖异重流水道发育特征（据 Dou *et al.*, 2021 修改）

(a) 嫩三段1砂组地层切片及分流河道平面分布及沉积规模，(b) 井震联合剖面1—1'，剖面显示了R30井附近水道的地震反射特征，剖面位置见a，(c) 井震联合剖面2—2'，显示了Qs18和Qs12井附近水道的地震反射特征，剖面位置见a

Fig.9 Characteristics of shallow lacustrine density current channels in the Nenjiang Formation, southern Songliao Basin (modified from Dou *et al.*, 2021)

(a) stratigraphic slice of Sand Unit 1 in Member 3, Nenjiang Formation, showing planar distribution and depositional scale of distributary channels; (b) well-seismic composite profile 1—1', showing seismic reflection characteristics of channels near well R30, profile location in (a); (c) well-seismic composite profile 2—2', showing seismic reflection features of channels near well Qs18 and well Qs12, profile location in (a)

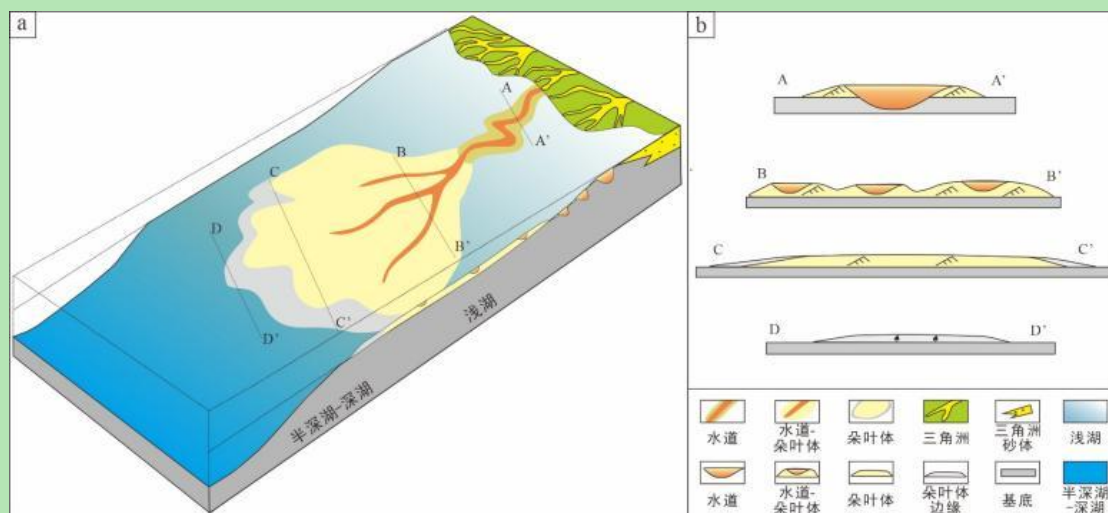


图 10 浅湖地区异重流水道—朵叶体沉积概念模式 (据 Dou *et al.*, 2021 修改)

(a) 三角洲—浅湖区异重流水道—朵叶分布概念模式; (b) 从上游到下游异重流沉积剖面概念模式

Fig.10 Conceptual model of hyperpycnal flow channel-lobe deposits in shallow lacustrine environments (modified from Dou *et al.*, 2021)

(a) density current channel-lobe distribution in delta-shallow lacustrine environments; (b) density current deposits from upstream to downstream

### 3.2 异重流理论解释水下分流河道的成因机制

现代沉积观察与古代地层研究实例说明，异重流具有从河口区向盆地大规模输送沉积物的能力。三角洲前缘—浅湖或者浅海环境中，异重流水道与经典意义上的“水下分流河道”具有相通之处。具体而言，源自三角洲前缘河口区的异重流水道，具有明显的下切侵蚀特征，具有水道—朵叶过渡的沉积体系结构，发育典型的异重流相关沉积构造。基于此，传统观点认为的“水下分流河道”很可能就是异重流在三角洲水下区域保存的沉积记录。阿曼大陆边缘的现代沉积实例与松辽盆地、内乌肯盆地的古代沉积记录共同为这一观点提供了有力佐证：异重流机制可以解释三角洲前缘—浅湖（海）沉积环境中下切水道的形成过程，以及其空间展布规律和内部沉积结构。上述认识为重新审视水下分流河道的成因机制提供了新的理论视角，暗示许多经典理论解释为三角洲前缘水下分流河道的沉积记录，实质上可能由异重流形成。例如，前述松辽盆地南部嫩江组异重流水道沉积单元（图 9）曾被解释为三角洲前缘水下分流河道（Dou *et al.*, 2021）。实际上这些“水下分流河道”是洪水事件触发形成的事件性水下沉积单元，其平面发育样式和内部沉积充填与三角洲平原分流河道沉积具有差异。

需要强调的是，异重流水道的发育需满足特定的触发条件，具有显著的事件性。因此，并非所有三角洲前缘都会发育此类沉积单元。一部分三角洲前缘可能更符合经典沉积模式，即前文所述的异轻流或等密度流三角洲，三角洲前缘仅存在三角洲平原分流河道的短距离水下延伸——这类河道可被称为末端分流河道（Terminal Distributary Channels; Cornel and Janok, 2006）。而另一类受异重流主导的三角洲（即异重流三角洲）则可能发育水下延伸的水道—朵叶体单元，其沉积特征大致对应于传统意义上的“水下分流河道”。二者在沉积样式和垂向序列上仍可能存在细微差异，未来研究需进一步厘清异重流水道与传统三角洲分流河道在流体性质、沉积动力学过程等方面的异同，从而完善三角洲前缘沉积模式。

### 3.3 三角洲平原分流河道与异重流相关水下沉积机理差异

陆上发育的三角洲平原分流河道与水下分流河道的沉积过程受控于不同的流体动力学条件。以往针对平原分流河道与水下沉积特征描述，并未重点关注沉积机理的差异。目前针对陆上和水下沉积环境中形成的沉积构造的差异方面，已有学者开展讨论（Zavala 和潘树新，2018），可作为参考。

三角洲平原分流河道内部沉积主要受单向水流（如河流）或间歇性水流（如季节性洪水）控制，是一种明渠水流。在大多数非洪水期，这些河道输送的水流含沙量极低，大部分沉积物主要依靠水流底部的剪切力以推移质形式进行输移。这种沉积条件下，受流动分离机制控制形成高角度的沙丘（Leclair, 2002; de Álvaro, 2015）。水流在流经河床时，因底部剪切应力作用，常发生流动分离（flow separation），并在下游形成逆流漩涡区，从而在河道底部塑造出沙丘（dunes）等底形。这些沙丘的迁移通过推移质（bedload）搬运实现，形成交错层理等典型沉积构造。沙丘背流面，发育颗粒流沉积，导致粗颗粒易于沉积在坡脚处，细颗粒易于沉积在坡顶（图 11a）。这样的沉积过程，导致这类沙丘形成的交错层理组具有整体向上变细的趋势，底部边界陡峭且呈高角度（常为侵蚀面）。

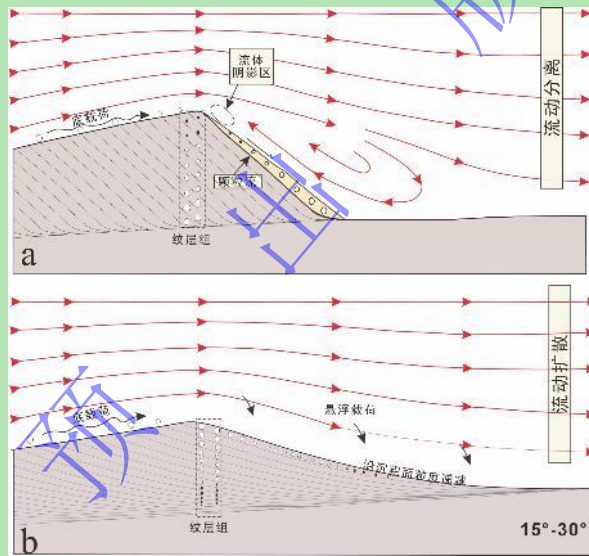


图 11 陆上河流与水下异重流形成的交错层理差异对比

(a) 单向明渠水流作用下形成的颗粒流沙丘；(b) 水下携泥沙紊流（异重流）作用下形成的颗粒沉降沙丘

Fig.11 Comparative analysis of cross-bedding formed by open fluvial and subaqueous hyperpycnal currents  
(a) fluvial dune formation due to tractive current at river base (particle flow regime); (b) subaqueous dune formation by sediment-laden turbulent flow (hyperpycnal flow) in particle settling regime

与之不同的是，水下形成的水道单元（如海底水道或湖底水道）的沉积则主要由洪水期携带沉积物的高密度浊流（例如异重流）或持续性底流驱动形成。其沉积过程以湍流主导，悬浮载荷（suspended load）占比较高。当湍流强度减弱时，悬浮颗粒发生沉降，并在底部形成沉积物波（sediment waves）或沙丘。与陆上沙丘不同，水下沙丘的形成更依赖于浊流的整体能量衰减导致的流体扩散，而非局部流动分离机制（图 11b）。前积层处的流体扩散导致流速逐渐降低，悬浮物质随之在背流面沉积。这种沿沙丘前缘的沉积物降落形成纹层向底部收敛的低角度交错层理，其下部前积层常伴生大量植物碎屑和黏土碎片。低角度交错层理通常构成向上增厚变粗的序列，反映下部前积层以悬浮负载为主，而上部前

积层以底负载为主。综上，三角洲平原分流河道与水下沉积单元的差异可以体现在流体性质、颗粒搬运方式以及形成的交错层理结构特征等方面，这些因素共同控制了两类不同沉积单元的沉积特征。但目前这方面研究仍不完善，今后还有待进一步结合实例探索。

## 4 三角洲前缘异重流水道成因探讨

### 4.1 异重流水道可能的触发机制

尽管异重流可能是陆相湖盆三角洲水下分流河道的成因机制，但根据现代沉积研究，并非所有三角洲河口区都能发育异重流水道，并在水下延伸形成“水下分流河道”沉积。这一现象引发了对异重流水道形成机制的深入思考：这种发源于三角洲前缘，在水下延伸的异重流水道的发育机制是什么？异重流水道触发条件、发育过程及延伸距离的控制因素有哪些？目前这些问题尚未得到充分解释。

梳理经典深水重力流沉积学研究成果，发现前人针对滑塌成因深水重力流水道的形成机理开展了一系列探索，认为水道的形成与超临界沉积物重力流密切相关。超临界沉积物重力流的形成演化及其作用下的沉积特征研究是目前重力流沉积学热点问题。超临界沉积物重力流起源于经典海相重力流研究（Parker *et al.*, 1987; Sequeiros *et al.*, 2009; Kostic *et al.*, 2010），目前研究主要通过水槽实验、数值模拟和野外观察揭示其流动特性、沉积构造及演化规律（Cartigny *et al.*, 2014; Wahab *et al.*, 2022）。根据基本定义，超临界沉积物重力流（supercritical sediment gravity flow）是指密度弗劳德数（densimetric Froude number, Frd）大于临界值，具有上部流态（upper flow regime）的重力流类型，本质是一种超临界流体。密度弗劳德数的表达式为：

$$Frd = U / (gRh)^{1/2}$$

式中： $R$ 为重力流与环境水体的密度差， $R = \rho_s / \rho - 1$ ， $U$ 为流体速度， $g$ 为重力加速度， $h$ 为流体的厚度， $\rho_s$ 为重力流流体密度， $\rho$ 为环境水体密度（Parker *et al.*, 1987; 操应长等, 2017; 杨田等, 2021）。随着密度弗劳德数增加，超临界流依次可以形成稳定逆行沙丘、不稳定逆行沙丘、急滩—深潭（chutes-and-pools）和旋回坎（cyclic steps）等沉积底形。深水重力流沉积学研究揭示，海底重力流水道的形成受控于超临界流的沉积过程（Hoyal *et al.*, 2003），超临界沉积物重力流具有很强的侵蚀能力，可以形成侵蚀充填构造，伴随水跃作用下形成旋回坎，旋回坎经过阶段性发育形成海底重力流水道（图 12）（Fildani *et al.*, 2013）。因此，具有较高密度弗劳德数的超临界流体与重力流水道成因密切相关。

对比分析发现，异重流的本质是洪水成因的一种重力流，具有浊流的流体性质，也可以达到超临界的流动状态。因此，超临界流很可能也是形成异重流水道的关键沉积动力机制。当异重流达到超临界状态（密度弗劳德数大于一个临界数值）时，其流体动力特性可能发生显著改变：侵蚀能力大幅增强，能够在下游方向形成明显的下切水道；产生周期性水跃现象，形成旋回坎等特征底形；维持长距离搬运能力，促使水道向盆地内部延伸。超

临界流理论的应用，可以将异重流水道的研究从单纯的沉积相描述和解释提升到流体动力学机制的解析层面，为理解水道的形成过程提供了量化的研究思路。

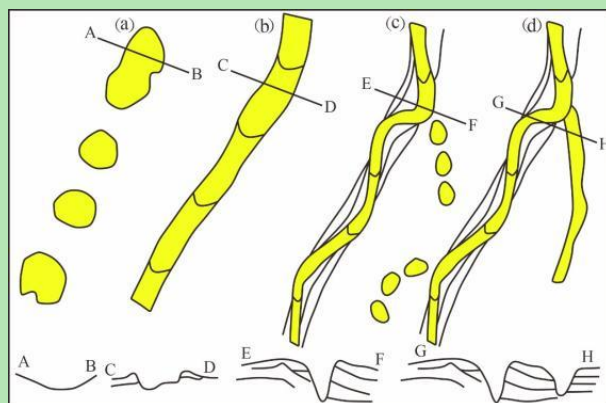


图 12 旋回坎经过阶段性发育形成海底重力水道 (据 Fildani *et al.*, 2013; 杨田等, 2021 修改)

(a) 初始阶段侵蚀形成旋回坎; (b) 持续侵蚀形成顺直水道; (c) 水道弯曲并在曲率较大处溢出侵蚀形成次一级旋回坎; (d) 次一级旋回坎持续侵蚀形成分支水道

Fig.12 Development of cyclic steps in submarine channels (modified from Fildani *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2021)  
(a) initial stage: erosion forms cyclic steps; (b) sustained erosion develops straight channels; (c) meandering channel leads to overflow erosion at high-curvature points, generating secondary cyclic steps; (d) continued erosion of secondary cyclic steps results in channel bifurcation

尽管超临界重力流沉积是具有普遍性的，但目前对于超临界重力流沉积的识别和解释仍处于探索阶段 (钟广法, 2023; Englert *et al.*, 2024)。超临界沉积物重力流可以形成上部流态底床，在沉积记录中保存了后积层理、短波状上攀交错层理、假前积层等层理构造，以及由水跃作用形成的侵蚀和软沉积物变形构造等局部识别标志和旋回坎综合识别标志 (操应长等, 2017; Gong *et al.*, 2017; Lang *et al.*, 2021)。目前来看，这些沉积标志在重力流沉积记录中是可以识别的，但是在陆相湖盆异重流沉积记录中研究还不够深入，仍然有待进一步开展描述和解释工作。

#### 4.2 来自超临界流体水槽实验的证据

如前文所述，超临界流理论可以帮助解释三角洲前缘异重流水道的成因，但目前研究主要集中在沉积记录识别，相关的数理验证研究较少。目前超临界重力流的数值模拟和物理模拟技术已有进展 (耿军阳等, 2025; 赖孟涛等, 2025; 卢心炜等, 2025)。在数值模拟技术方面，目前已有多个可以应用于重力流数值模拟软件，目前常用的软件包括 Delft 3D、Flow-3D、OpenFOAM、Fluent、SedSim 等。这些软件平台基于 Navier-Stokes 方程或浅水方程，结合湍流模型和沉积物输运模型，能够模拟重力流的流动特性、沉积过程及地形演化 (Ge *et al.*, 2017, Zhao *et al.*, 2018)。海相沉积物重力流数值模拟研究已初步揭示，沉积物重力流密度弗劳德数和流动状态与重力流水道沉积样式密切相关。Wahab *et al.* (2022) 根据数值模拟研究提出了密度弗劳德数 (前文已述及) 和 Rouse 数 (沉积物沉降速度与剪切速度之比，该参数与密度弗劳德数具有密切相关性) 控制的海底扇的重力流水道发育样式。这些数值模拟研究可以为陆相湖盆异重流水道的沉积机理研究提供思路参考，但从目前调研结果来看，数值模拟方法对于重力流水道下切侵蚀相关的过程可以提供验证，但模拟效果不能体现水道的发育过程细节，与野外剖面和岩心沉积记录可对比性较弱。

与数值模拟不同的是，水槽物理模拟实验可以探索和再现超临界流的沉积特征，并且与野外沉积记录具有可对比性 (Cartigny *et al.*, 2014)。在传统实验观测基础上，流速测量、沉积物浓度测量和沉积地貌激光扫描技术 (冯文杰等, 2025) 在水槽沉积模拟中已得到逐步应用。在水利工程领域，前人通过合理的水动力参数选取，已经可以在水槽实验中再现异重流流体 (范家骅等, 2018)，选取合适的异重流流体介质 (例如染色盐水) 和流动条件即可初步观察到超临界异重流对底床的侵蚀作用 (许少华等, 2010)。上述研究利用染色盐水控制异重流展开实验 (图 13)，配合流体定量观测和密度弗劳德数计算，认为密度弗劳德数与异重流对底床侵蚀作用密切相关，并直接观测到密度弗劳德数大于 1 的超临界异重流对黏土质底床侵蚀形成一系列的半圆形小凹坑 (图 14 红色区域)。笔者认为类似旋回阶坎现象。

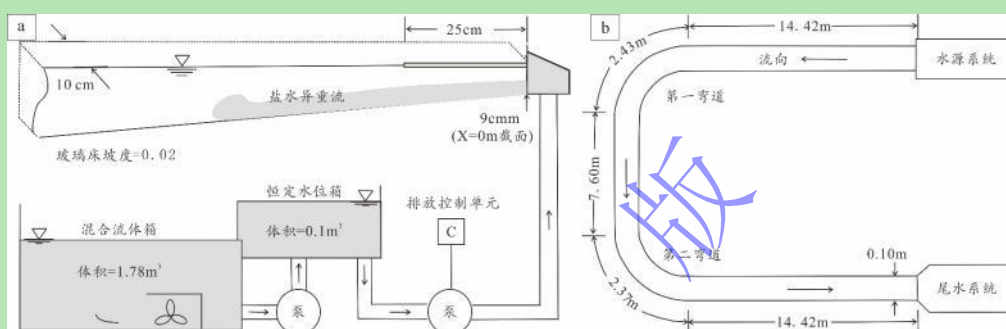


图 13 异重流物理模拟水槽实验设备

(a) 侧视图; (b) 俯视图 (许少华等, 2010)

Fig.13 Experimental arrangement for physical simulation of hyperpycnal flows in a flume (a) side view; (b) top view (Xu *et al.*, 2010)

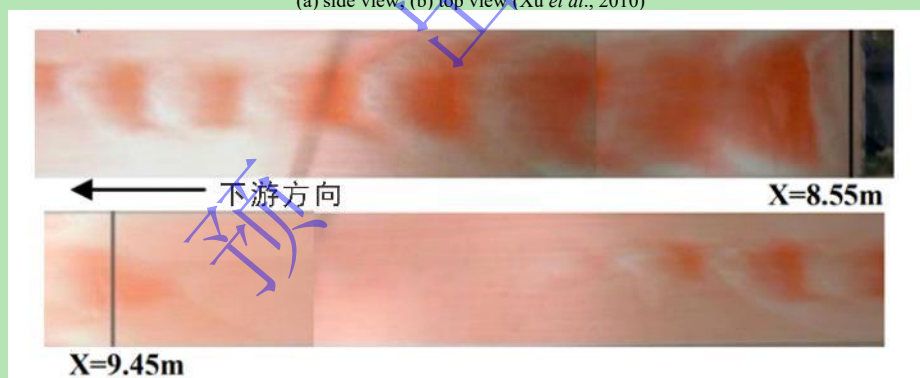


图 14 超临界异重流作用下底床形态俯视图，水槽宽 0.1 m (许少华等, 2010)

Fig.14 Top view of experimental results from physical simulation of supercritical hyperpycnal flows (flume width: 0.1 m) (Xu *et al.*, 2010)

由以上分析，可以初步建立一个三角洲前缘异重流水道概念模式 (图 15)。在沉积供给中等时期，河流携带沉积物进入盆地水体形成亚临界异重流 (图 15a)，控制了异重流沿岸三角洲的发育。水下异重流在三角洲前缘、前三三角洲至深水区呈延伸扩散沉积，异重流水道并不发育。与之不同的是，在沉积供给极强时期 (特殊沉积背景)，河流提供的沉积物形成事件性的超临界异重流，进入盆地水体后可形成不同规模和延伸距离的异重流水道—朵叶体。(图 15b)。异重流三角洲河口区在超临界异重流控制下形成水道充填沉积，其与三角洲平原分流河道沉积机理、沉积过程和沉积序列具有明显差异。

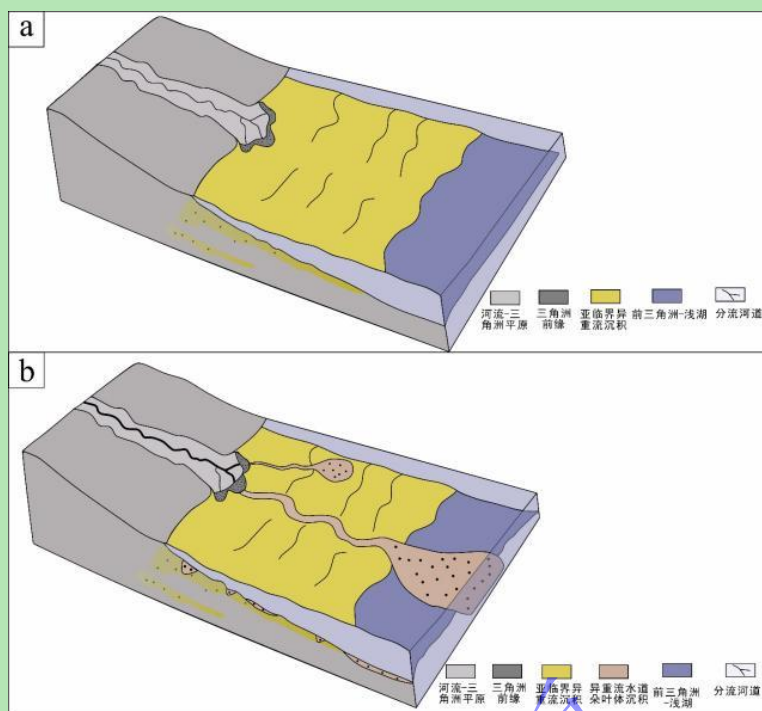


图 15 不同类型异重流沉积概念模式图

(a) 亚临界异重流，无水道水下扩散沉积；(b) 超临界异重流发育，形成水道沉积单元

Fig.15 Conceptual models of different types of hyperpycnal flow deposits

(a) subcritical hyperpycnal flow with unchannelized subaqueous dispersion deposits; (b) supercritical hyperpycnal flow, forming channelized depositional units

上述概念模式中探讨了超临界异重流的发育的重要性，也说明超临界流沉积理论可从沉积动力学机理的角度，为湖盆异重流水道的成因机制探索提供重要理论支撑。异重流能否在特定条件下处于超临界流动状态，并由此产生对底床的侵蚀作用，是揭示异重流水道形成机理的关键。今后还需要开展相关的沉积记录分析进一步佐证以及实验论证。然而，以往超临界流相关的沉积物理模拟或数值模拟工作，并未针对洪水成因的异重流开展针对性的研究。异重流是否更容易形成超临界流还需要探索。在异重流沉积学研究领域，尽管密度弗劳德数在控制异重流的流动状态和沉积特征中具有重要作用，以往开展的沉积模拟实验（刘芳君，2023）尚未关注密度弗劳德数（ $Frd$ ）这一关键无量纲参数。密度弗劳德数反映了惯性力与浮力的相对重要性，直接影响异重流的超临界与亚临界流动状态的转换以及沉积物的搬运和沉积过程。后续异重流沉积研究还需要更加关注异重流流体的密度弗劳德数，通过设计水槽模拟实验并精确控制实验条件（如流速、密度差和流体厚度）来调整密度弗劳德数，从而系统研究其对沉积特征的影响。实验观测细节方面，借鉴可以通过高速摄像技术记录异重流的流动形态和沉积过程，同时结合多普勒测速仪或粒子图像测速仪测量流场速度分布，进一步分析密度弗劳德数与底床侵蚀、沉积物搬运效率之间的关系，从而更全面地揭示密度弗劳德数在沉积过程中的作用机制。开展这些研究将有助于更好地理解超临界异重流的动力学特征及其在自然环境中的沉积记录。

目前，沉积物理模拟技术已能够有效再现超临界流沉积，且超临界流沉积研究涉及的基本理论与实验技术已趋于成熟和完善。若将超临界流沉积记录的识别与室内沉积物理模拟相结合，系统探讨三角洲前缘异重流水道的成因机制，可推动三角洲水下沉积单元的发

育理论框架的构建，并为相关沉积体系的解释提供全新的研究视角。通过超临界流沉积理论的指导，结合沉积学解释与沉积模拟实验研究，有望在湖盆三角洲水下分流河道成因机理及沉积过程等关键科学问题上取得突破性进展。

### 4.3 未来研究方向

三角洲入湖后，异重流流体达到了下切水道的某种触发条件（目前认为是达到了超临界流条件导致侵蚀下切），由三角洲前缘向湖泊延伸发育。因此，湖盆沉积记录中可能发育有不同延伸距离的异重流水道。但是，当前研究对于异重流沉积处于识别、解释和表征阶段，对于异重流水道触发条件、延伸距离、沉积样式以及与三角洲沉积的关系等方面的相关规律还未掌握清楚。

异重流水道的形成机制与展布规律对油气勘探，特别是细粒沉积岩中的油气储层预测具有重要意义。起源于三角洲前缘的异重流水道则可能形成砂—泥互层的混合沉积体系，这类细粒沉积既可作为烃源岩，又可作为非常规油气储层。明确异重流水道的触发条件、延伸距离及沉积样式，将有助于预测优质储层的空间分布，指导油气勘探开发。当前，由于异重流水道成因机理和地质模式尚未完全厘清，导致对细粒沉积体系展布规律的认识存在较大不确定性。

未来需结合数值模拟、沉积物理模拟与野外实证研究，建立三维数值模拟—高精度水槽实验—野外露头实证三位一体研究框架，系统揭示三角洲前缘异重流水道的形成演化过程。目前需要从湖盆沉积记录剖析出发，结合沉积物理模拟实验探索沉积成因及主控因素，制定超临界异重流沉积的岩相—测井—地震识别标准，将不同类型异重流水道从概念模式逐步深化到机理层面走向落实。这不仅能为陆相湖盆沉积理论奠定更坚实的基础，也将为湖盆细粒沉积油气藏的勘探提供新的理论依据，解决传统认识中储层预测的一些争议与难题。

## 5 结论

(1) 三角洲前缘水下分流河道的成因机制存在争议，该概念是在引进经典海相三角洲理论的基础上，结合陆相湖盆沉积学研究提出的。然而，经典理论主要基于海相三角洲沉积环境建立，未能充分考虑陆相湖盆洪水事件触发高密度异重流的侵蚀—搬运作用，这可能是导致当前理论分歧的根源所在。最新研究将异重流沉积理论与三角洲模式相融合，发现下切侵蚀、水下延伸等关键特征并非陆上分流河道的简单延伸，而可能是异重流作用的产物，这一认识可能为陆相湖盆沉积过程提供新的动力学解释。

(2) 前期研究初步证实，超临界异重流可能是控制水下分流河道形成与演化的关键动力学机制。当异重流流体密度弗劳德数（ $Fr_d$ ）超过临界值时形成的超临界异重流，具备强烈的下切侵蚀能力，可导致水道向盆地方向长距离延伸，并在沉积记录中保留典型的超临界流沉积构造。这一发现为水下分流河道的成因机制提供了沉积动力学依据，也为陆相湖

盆三角洲储层分布预测提供了参考。

(3) 异重流成因水道的形成与展布规律对陆相湖盆油气勘探具有重要意义。当前对异重流成因的水下分流河道的触发条件、沉积样式及其与三角洲沉积的逻辑关系尚未完全掌握清楚。这导致针对三角洲沉积模式的认识还存在缺失环节。未来需建立“数值模拟—水槽实验—野外实证”三位一体的研究框架, 系统揭示三角洲前缘异重流水道的形成演化过程, 将不同类型异重流水道从概念模式逐步深化到机理层面, 为陆相湖盆沉积学研究提供新的理论依据。

致谢 感谢两位审稿专家提出的宝贵意见和建议!

#### 参考文献 (References)

- 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 2017. 超临界沉积物重力流形成演化及特征[J]. 石油学报, 38(6): 607-621. [Cao Yingchang, Yang Tian, Wang Yanzhong, et al. 2017. Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity-flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 38(6): 607-621.]
- 陈家良, 邵震杰, 秦勇. 2004. 能源地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社: 189. [Chen Jialiang, Shao Zhenjie, Qin Yong. 2004. Energy geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press: 189.]
- 陈建强, 周洪瑞, 王训练. 2004. 沉积学及古地理学教程[M]. 北京: 地质出版社. [Chen Jianqiang, Zhou Hongrui, Wang Xunlian. 2004. Sedimentology and paleogeography[M]. Beijing: Geological Publishing House.]
- 陈雁雁, 林承焰, 马存飞, 等. 2019. 博兴洼陷大芦湖油田沙三段中亚段二砂组异重流沉积特征[J]. 油气地质与采收率, 26(4): 33-42. [Chen Yanyan, Lin Chengyan, Ma Cunfei, et al. 2019. Sedimentary characteristics of hyperpycnal flows in the 2<sup>nd</sup> sand group of middle Es<sub>3</sub> member in Daluhu oilfield, Boxing subsag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 26(4): 33-42.]
- 窦鲁星, 张昌民, 张莉, 等. 2023. 过渡型流体转换对洪水型重力流沉积研究的启示及地质意义[J]. 地质论评, 69(5): 1952-1966. [Dou Luxing, Zhang Changmin, Zhang Li, et al. 2023. Transitional flow transformation mechanism: Implication for hyperpycnal flow sedimentary research and geological significance[J]. Geological Review, 69(5): 1952-1966.]
- 杜远生. 2022. 沉积地质学基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 227-231. [Du Yuansheng. 2022. Basics of sedimentary geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 227-231.]
- 范家骅, 祁伟, 戴清. 2018. 异重流潜入现象探讨I: 水槽实验与理论分析成果回顾[J]. 水利学报, 49(4): 404-418. [Fan Jiahua, Qi Wei, Dai Qing. 2018. Investigation of density current plunging I: Review of previous flume experiment works and theoretical analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 49(4): 404-418.]
- 封从军, 鲍志东, 杨玲, 等. 2014. 三角洲前缘水下分流河道储集层构型及剩余油分布[J]. 石油勘探与开发, 41(3): 323-329. [Feng Congjun, Bao Zhidong, Yang Ling, et al. 2014. Reservoir architecture and remaining oil distribution of deltaic front underwater distributary channel[J]. Petroleum Exploration and Development, 41(3): 323-329.]
- 冯文杰, 曹荆楚, 张昌民, 等. 2025. 砂质辫状河沉积演化机制与沉积构型模式: 量化水槽沉积模拟实验研究[J]. 沉积学报, 43(3): 782-796. [Feng Wenjie, Cao Jingchu, Zhang Changmin, et al. 2025. Sedimentary evolution mechanisms and architecture models of sandy braided rivers: A study based on quantitative flume experiments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(3): 782-796.]
- 冯有良, 邹才能, 杨智, 等. 2024. 中国断陷和拗陷湖盆高可容纳空间层序细粒重力流沉积及其页岩油意义[J]. 古地理学报, 26(4): 941-961. [Feng Youliang, Zou Caineng, Yang Zhi, et al. 2024. Fine-grained gravity flow deposits and their significance for shale oil within high-accommodation sequences in faulted and down-warped lacustrine basins of China[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(4): 941-961.]
- 付金华, 魏新善, 罗顺社, 等. 2019. 庆阳深层煤成气大气田发现与地质认识[J]. 石油勘探与开发, 46(6): 1047-1061. [Fu Jinhua, Wei Xinshan, Luo Shunshu, et al. 2019. Discovery and geological knowledge of the large deep coal-formed Qingyang gas field, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(6): 1047-1061.]
- 耿军阳, 鲜本忠, 刘振献, 等. 2025. 深水重力流沉积模拟研究进展与展望[J]. 沉积学报, 43(3): 827-845. [Geng Junyang, Xian Benzhong, Liu Zhenxian, et al. 2025. Progress and prospects for simulating deep-water gravity flow sedimentation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(3): 827-845.]
- 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 等. 1998. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化[J]. 沉积学报, 16(3): 44-51. [Guo Yinghai, Liu Huanjie, Quan Biao, et al. 1998. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 16(3): 44-51.]
- 何起祥. 2010. 沉积动力学若干问题的讨论[J]. 海洋地质与第四纪地质, 30(4): 1-10. [He Qixiang. 2010. A discussion on sediment dynamics[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 30(4): 1-10.]
- 姜在兴. 2003. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社: 384-385. [Jiang Zaixing. 2003. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 384-385.]
- 金振奎, 李燕, 高白水, 等. 2014. 现代缓坡三角洲沉积模式: 以鄱阳湖赣江三角洲为例[J]. 沉积学报, 32(4): 710-723. [Jin Zhenkui, Li Yan, Gao Baishui, et al. 2014. Depositional model of modern gentle-slope delta: A case study from Ganjiang Delta in Poyang Lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 32(4): 710-723.]
- 科尔曼 J M, 普赖尔 D B. 1987. 三角洲砂体[M]. 周祖勋, 译. 北京: 石油工业出版社. [Coleman J M, Prior D B. 1987. Deltaic sand bodies[M]. Zhou Zuxun, trans. Beijing: Petroleum Industry Press.]
- 赖孟涛, 王俊辉, 张春明. 2025. 浊流沿程特征的一维数值模拟研究[J]. 沉积学报, 43(3): 813-826. [Lai Mengtao, Wang Junhui, Zhang Chunming. 2025. One-dimensional numerical simulation of turbidity flow characteristics in the flow direction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(3): 813-826.]
- 李思田, 解习农, 王华, 等. 2004. 沉积盆地分析基础与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 140-143, 146. [Li Sitian, Xie Xinong, Wang Hua, et al. 2004. Sedimentary basin analysis: Principle and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 140-143, 146.]
- 李相博, 刘化清, 潘树新, 等. 2019. 中国湖相沉积物重力流研究的过去, 现在与未来[J]. 沉积学报, 37(5): 904-921. [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Pan Shuxin, et al. 2019. The past, present and future of research on deep-water sedimentary gravity flow in lake basins of China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(5): 904-921.]
- 李志鹏, 林承焰, 董波, 等. 2012. 河控三角洲水下分流河道砂体内部建筑结构模式[J]. 石油学报, 33(1): 101-105. [Li Zhipeng, Lin Chengyan, Dong Bo, et al. 2012. An internal structure model of subaqueous distributary channel sands of the fluvial-

- dominated delta[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(1): 101-105.]
- 刘宝珺. 1980. 沉积岩石学[M]. 北京：地质出版社：385, 388. [Liu Baojun. 1980. *Sedimentary petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 385, 388.]
- 刘芳君. 2023. 湖相异重流物理沉积模拟实验：以吉木萨尔芦草沟组为例[D]. 荆州：长江大学, 1-64. [Liu Fangjun. 2023. *Physical deposition simulation experiment of hyperpycnal flow in lacustrine facies-Taking Lucaogou Formation in Jimsar as an example*[D]. Jingzhou: Yangtze University, 1-64.]
- 刘海宁, 韩宏伟, 操应长, 等. 2022. 东营凹陷东坡古近系沙三中亚段异重流沉积特征与沉积模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 46(1): 13-22. [Liu Haining, Han Hongwei, Cao Yingchang, et al. 2022. *Sedimentary characteristics and depositional model of hyperpycnites in the middle of the Third member of Paleogene Shahejie Formation in the east slope of Dongying Sag*[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 46(1): 13-22.]
- 卢心炜, 葛智渊, 许鸿翔, 等. 2025. 浊流对多段平行褶皱响应的二维数值模拟[J]. 沉积学报, 43(3): 912-938. [Lu Xinwei, Ge Zhiyuan, Xu Hongxiang, et al. 2025. *Two-dimensional numerical simulation of turbidity current responses to multi-segment folds*[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(3): 912-938.]
- 栾国强, 董春梅, 林承焰, 等. 2018. 异重流发育条件, 演化过程及沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 39(3): 438-453. [Luan Guoqiang, Dong Chunmei, Lin Chengyan, et al. 2018. *Development conditions, evolution process and depositional features of hyperpycnal flow*[J]. *Oil & Gas Geology*, 39(3): 438-453.]
- 毛小平, 陈修蓉, 李振, 等. 2024. 从水动力学角度看三角洲前缘的沉积特征[J]. 古地理学报, 26(3): 509-524. [Mao Xiaoping, Chen Xiurong, Li Zhen, et al. 2024. *Sedimentary characteristics of delta front from a hydrodynamic perspective*[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(3): 509-524.]
- 潘树新, 刘化清, Zavala C, 等. 2017. 大型拗陷湖盆异重流成因的水道—湖底扇系统：以松辽盆地白垩系嫩江组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 44(6): 860-870. [Pan Shuxin, Liu Huaqing, Zavala C, et al. 2017. *Sublacustrine hyperpycnal channel-fan system in a large depression basin: A case study of Nen 1 member, Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin, NE China*[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(6): 860-870.]
- 邱振, 邹才能. 2020. 非常规油气沉积学：内涵与展望[J]. 沉积学报, 38(1): 1-29. [Qiu Zhen, Zou Caineng. 2020. *Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect*[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 1-29.]
- 裘亦楠. 1992. 中国陆相碎屑岩储层沉积学的进展[J]. 沉积学报, 10(3): 16-24. [Qiu Yi'nan. 1992. *Developments in reservoir sedimentology of continental clastic rocks in China*[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(3): 16-24.]
- 孙浩南, 谈明轩, 付亦霖, 等. 2023. 西秦岭阜尼地区晚三叠世细粒重力流沉积过程及成因机制研究[J]. 古地理学报, 25(6): 1315-1329. [Sun Haonan, Tan Mingxuan, Fu Yilin, et al. 2023. *Sedimentary processes and genetic mechanisms of the Late Triassic fine-grained gravity flows in Zhuoni area of West Qinling orogenic belt*[J]. *Journal of Palaeogeography*, 25(6): 1315-1329.]
- 孙永传, 李蕙生. 1986. 碎屑岩沉积相和沉积环境[M]. 北京：地质出版社：154-157, 161-162. [Sun Yongchuan, Li Huisheng. 1986. *Sedimentary facies and sedimentary environment of clastic rocks*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 154-157, 161-162.]
- 汪品先. 2009. 深海沉积与地球系统[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(4): 1-11. [Wang Pinxian. 2009. *Deep sea sediments and earth system*[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(4): 1-11.]
- 吴崇筠, 薛叔浩. 1993. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京：石油工业出版社, 268-293. [Wu Chongyun, Xue Shuhao. 1993. *Sedimentology of petroliferous basins in China*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 268-293.]
- 许少华, 林正杰, 曾志民, 等. 2010. 异重流对粘性土抬升之起动力条件分析[J]. 中华水土保持学报, 41(2): 177-187. [Marko M S H, Lin C C, Tseng C M, et al. 2010. *The critical condition on disturbing cohesive clay by saline density current*[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41(2): 177-187.]
- 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 2015. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. 沉积学报, 33(1): 10-20. [Yang Renchao, Jin Zhiyun, Sun Dongsheng, et al. 2015. *Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin*[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(1): 10-20.]
- 杨仁超, 李作福, 张学才, 等. 2023. 异重流沉积研究进展与展望[J]. 沉积学报, 41(6): 1917-1933. [Yang Renchao, Li Zuofu, Zhang Xuecai, et al. 2023. *Advances and perspectives in the study of hyperpycnal flow deposition*[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1917-1933.]
- 杨仁超, 田源. 2020. 天文周期与异重流沉积前沿科学问题探讨[J]. 非常规油气, 7(5): 1-7. [Yang Renchao, Tian Yuan. 2020. *Discussion on the scientific issues in frontiers of astronomical cycles and hyperpycnal flow deposits*[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 7(5): 1-7.]
- 杨田, 操应长, 田景春. 2021. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识[J]. 沉积学报, 39(1): 88-111. [Yang Tian, Cao Yingchang, Tian Jingchun. 2021. *Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin*[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 88-111.]
- Zavala C, 潘树新. 2018. 异重流成因和异重岩沉积特征[J]. 岩性油气藏, 30(1): 1-18. [Zavala C, Pan Shuxin. 2018. *Hyperpycnal flows and hyperpycnites: Origin and distinctive characteristics*[J]. *Lithologic Reservoirs*, 30(1): 1-18.]
- 曾允孚, 夏文杰. 1986. 沉积岩石学[M]. 北京：地质出版社：229-231. [Zeng Yunfu, Xia Wenjie. 1986. *Sedimentary petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 229-231.]
- 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等. 2010. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 28(5): 933-944. [Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, et al. 2010. *Shallow-water deltas and models*[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 933-944.]
- 钟广法. 2023. 超临界浊流之地貌动力学和沉积特征[J]. 沉积学报, 41(1): 52-72. [Zhong Guangfa. 2023. *Morphodynamics of supercritical turbidity currents and sedimentary characteristics of related deposits*[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1): 52-72.]
- 仲米虹, 唐武. 2023. 塔北地区三叠纪拗陷湖盆异重流沉积特征及主控因素[J]. 新疆石油地质, 44(1): 1-8. [Zhong Mihong, Tang Wu. 2023. *Sedimentary characteristics and controlling factors of hyperpycnal flow in Triassic depressed lake basin, northern Tarim Basin*[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 44(1): 1-8.]
- 周立宏, 孙志华, 汤戈, 等. 2020. 孟加拉湾若开盆地 D 区块上新统异重流特征与沉积模式[J]. 石油勘探与开发, 47(2): 297-308. [Zhou Lihong, Sun Zhihua, Tang Ge, et al. 2020. *Pliocene hyperpycnal flow and its sedimentary pattern in D block of Rakhine Basin in bay of Bengal*[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 297-308.]
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京：石油工业出版社：298. [Zhu Xiaomin. 2008. *Sedimentary petrology* [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press: 298.]
- Bates C C. 1953. Rational theory of delta formation[J]. *AAPG Bulletin*, 37(9): 2119-2162.
- Boggs S, Jr. 2006. Principles of sedimentology and stratigraphy[M]. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Bourget J, Zaragosi S, Mulder T, et al. 2010. Hyperpycnal-fed turbidite lobe architecture and recent sedimentary processes: A case study from the Al Batha turbidite system, Oman margin[J]. *Sedimentary Geology*, 229(3): 144-159.
- Cao Y C, Lin M R, Xi K L, et al. 2024. Bedload transport and deposition of mud-grade sediments in deep-lacustrine settings: A case study in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Sedimentology*, 71(6): 1984-2008.
- Cartigny M J B, Venstra D, Postma G, et al. 2014. Morphodynamics and sedimentary structures of bedforms under supercritical-flow conditions: New insights from flume experiments[J]. *Sedimentology*, 61(3): 712-748.
- Coleman J M, Galinano S M. 1964. Cyclic sedimentation in the Mississippi River deltaic plain[J]. *Gulf Coast Association of Geological*

- Societies Transactions, 14: 67-80.
- Cornel O, Janok P B. 2006. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 76(2): 212-233.
- de Álvaro M J M. 2015. Architecture and origin of fluvial cross-bedding based on flume experiments and geological examples field case studies: Rillo de Gallo, Spain and Northumberland, UK[D]. Norwich: University of East Anglia, 415.
- Dou L X, Best J, Bao Z D, et al. 2021. The sedimentary architecture of hyperpycnites produced by transient turbulent flows in a shallow lacustrine environment[J]. *Sedimentary Geology*, 411: 105804.
- Dou L X, Hou J G, Song S H, et al. 2020. Sedimentary characteristics of hyperpycnites in a shallow lacustrine environment: A case study from the Lower Cretaceous Xiguayuan Formation, Luanping Basin, Northeast China[J]. *Geological Journal*, 55(5): 3344-3360.
- Englert R G, Hubbard S M, Romans B W, et al. 2024. Flow dynamics as Froude-supercritical turbidity currents encounter metre-scale slope minibasin topography[J]. *The Depositional Record*, 10(5): 527-558.
- Fabbri S C, Haas I, Kremer K, et al. 2021. Subaqueous geomorphology and delta dynamics of Lake Brienz (Switzerland): Implications for the sediment budget in the alpine realm[J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 114(1): 22.
- Fildani A, Hubbard S M, Covault J A, et al. 2013. Erosion at inception of deep-sea channels[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 41: 48-61.
- Ge Z Y, Nemeo W, Gawthorpe R L, et al. 2017. Response of unconfined turbidity current to normal-fault topography[J]. *Sedimentology*, 64(4): 932-959.
- Gilbert G K. 1885. The topographic features of lake shores[R]. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 5th Annual Report, 69-123.
- Gong C L, Chen L Q, West L. 2017. Asymmetrical, inversely graded, upstream-migrating cyclic steps in marine settings: Late Miocene-Early Pliocene Fish Creek-Vallecito Basin, southern California[J]. *Sedimentary Geology*, 360: 35-46.
- Hoyal D C J D, van Wagoner J C, Adair N L, et al. 2003. Sedimentation from jets: A depositional model for clastic deposits of all scales and environments[J]. *Search and Discovery*, 40082, 1-9.
- Jain S. 2024. Fundamentals of sedimentology[M]. Boca Raton: CRC Press.
- Jin L N, Shan X, Shi X F, et al. 2021. Hybrid event beds generated by erosional bulking of modern hyperpycnal flows on the Choshui River delta front, Taiwan Strait[J]. *Sedimentology*, 68(6): 2500-2522.
- Kostic S, Sequeiros O, Spinewine B, et al. 2010. Cyclic steps: A phenomenon of supercritical shallow flow from the high mountains to the bottom of the ocean[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 3(4): 167-172.
- Lang J, Le Heron D P, van den Berg J H, et al. 2021. Bedforms and sedimentary structures related to supercritical flows in glacial settings[J]. *Sedimentology*, 68(4): 1539-1579.
- Leclair S F. 2002. Preservation of cross-strata due to the migration of subaqueous dunes: An experimental investigation[J]. *Sedimentology*, 49(6): 1157-1180.
- Liu J P, Xian B Z, Tan X F, et al. 2022. Depositional process and dispersal pattern of a faulted margin hyperpycnal system: The Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 135: 105405.
- Mulder T, Syvitski J P M. 1995. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans[J]. *The Journal of Geology*, 103(3): 285-299.
- Nichols G. 2009. Sedimentology and stratigraphy[M]. 2nd ed. New Delhi: A John Wiley & Sons, Ltd.
- Okay S, Jupinet B, Lericolais G, et al. 2011. Morphological and stratigraphic investigation of a Holocene subaqueous shelf fan, north of the Istanbul Strait in the Black Sea[J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 20(3): 287-305.
- Olariu M I. 2023. Sedimentology and stratigraphy of the earliest deltaic shorelines of the Paleocene Lower Wilcox Group in the gulf of Mexico[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 93(8): 522-540.
- Parker G, Garcia M, Fukushima Y, et al. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1): 123-147.
- Sequeiros O E, Naruse H, Endo N, et al. 2009. Experimental study on self-accelerating turbidity currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114(C5): C05025.
- Steel E, Simms A R, Steel R, et al. 2018. Hyperpycnal delivery of sand to the continental shelf: Insights from the Jurassic Lajas Formation, Neuquén Basin, Argentina[J]. *Sedimentology*, 65(6): 2149-2170.
- Wahab A, Hoyal D C, Shringarpure M, et al. 2022. A dimensionless framework for predicting submarine fan morphology[J]. *Nature Communications*, 13(1): 7563.
- Xian B Z, Wang J H, Gong C L, et al. 2018. Classification and sedimentary characteristics of lacustrine hyperpycnal channels: Triassic outcrops in the south Ordos Basin, central China[J]. *Sedimentary Geology*, 368: 68-82.
- Yang R C, Jin Z J, van Loon A J, et al. 2017. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: Implications for unconventional petroleum development[J]. *AAPG Bulletin*, 101(1): 95-117.
- Zavala C, Arcuri M, Di Meglio M, et al. 2021. Deltas: A new classification expanding Bates's concepts[J]. *Journal of Palaeogeography*, 10(1): 23.
- Zavala C, Arcuri M, Zorzano A, et al. 2024. Deltas: New paradigms[J]. *The Depositional Record*, 10(5): 600-636.
- Zavala C, Arcuri M. 2016. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: Origin and distinctive characteristics[J]. *Sedimentary Geology*, 337: 36-54.
- Zhao L, Ouillon R, Vowinkel B, et al. 2018. Transition of a hyperpycnal flow into a saline turbidity current due to differential diffusivities[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(21): 11875-11884.

# Formation Mechanisms of Subaqueous Distributary Channels in Lacustrine Deltas: Insights from hyperpycnal flow depositional models

DOU LuXing<sup>1</sup>, ZHANG WeiQing<sup>1</sup>, MA Zhen<sup>2</sup>, SUN Dong<sup>3</sup>, LI Gang<sup>4</sup>, ZHANG Li<sup>5</sup>, SUN PengYu<sup>1</sup>, YE Hao<sup>4</sup>, Carlos Zavala<sup>6</sup>

1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. No. 12 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Heshui, Gansu 745400, China

3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

4. No. 1 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, Jingbian, Shanxi 718500, China

5. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

6. College of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

**Abstract: [Significance]** The genetic mechanism of river-dominated subaqueous distributary channels in deltas is a controversial topic. Traditional fluvial sediment dynamics fail to adequately explain their formation and distribution patterns. Based on recent advances in global research, this study systematically investigated the formation mechanism of subaqueous distributary channels in lacustrine deltas and explored new insights from hyperpycnal flow depositional theory related to deltaic depositional processes and sandbody distribution patterns.

**[Progress]** Hyperpycnal flows originate from the delta-front river mouth zone, transporting terrigenous sediments through the prodelta and shallow lake into deep-water depositional environments. Significant breakthroughs have been made in studies of deep-water hyperpycnal flow deposition, but few descriptions and interpretations of hyperpycnal flow deposits in delta-shallow lake systems are available. The concept of hyperpycnal deltas proposed in this study integrates river-mouth deposition with gravity-driven processes, and reveals that hyperpycnal channels serve as critical links between deltas and deep-water deposits. Modern and ancient hyperpycnal flow deposits indicate the development of hyperpycnal channels in delta-front to shallow-lake or marine environments, from which it is inferred that hyperpycnal flows may be a key dynamic force in subaqueous distributary channel formation. The erosional mechanisms of these channels are closely associated with supercritical hyperpycnal flows in which the Froude number exceeds the critical value (i.e.,  $Fr > 1$ ). **[Conclusions and Prospects]** It is proposed that subaqueous distributary channels are probably formed by episodic hyperpycnal flows rather than merely underwater extensions of delta plain distributaries. These findings challenge classical delta theories and highlight flood-generated high-density hyperpycnal flows as a dominant geological force influencing deltaic depositional processes. Revision of existing models based on hyperpycnal flow dynamics provides a novel theoretical framework for studying delta-front depositional patterns. It is recommended that, in future research, quantitative sedimentary physical simulations be integrated with analyses of ancient delta-front deposits to advance the understanding of the role of hyperpycnal flow dynamics in deltaic systems, thus offering new theoretical foundations for lacustrine sedimentology.

**Key words:** delta; subaqueous distributary channel; lacustrine basin; hyperpycnal flow; depositional model