

文章编号: 0253-2697(2017)06-0607-15 DOI:10.7623/syxb201706001

超临界沉积物重力流形成演化及特征

操应长^{1,2} 杨田¹ 王艳忠^{1,2} 李文强¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室 山东青岛 266071)

摘要:超临界沉积物重力流是指在深水环境中弗洛德数大于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。超临界沉积物重力流作用的沉积识别标志主要包括牵引毯作用形成的分层构造,即后积层理、短波状上攀交错层理、假前积层等层理构造;水力跳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。理想条件下,超临界沉积物重力流作用在垂向上由下至上形成砾质旋回坎、砾质流槽-凹坑沉积充填、砂质不稳定逆行沙丘沉积、砂质分层沉积和沙纹沉积及正常沉积的有序组合。旋回坎可分为侵蚀型和沉积型,从盆地边缘向盆地中心,呈现侵蚀型向沉积型的演化。超临界沉积物重力流作用沉积演化过程主要受流体沉积物浓度、流体流量、沉积物粒度、沉积速率等内部因素和地形坡度、坡折带位置、水深及可供侵蚀的沉积物特征等外部因素的综合控制。超临界沉积物重力流作用的相关研究加深了对沉积物重力流水道形成机理、深水块状粗碎屑成因、重力流沉积演化过程的认识;现阶段关于超临界沉积物重力流的流体动力学特征、沉积识别标志及形成演化过程的系列问题还有待深入研究。

关键词:沉积物波;旋回坎;水力跳跃;牵引毯;超临界沉积物重力流;形成演化;沉积特征

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity-flow

Cao Yingchang^{1,2} Yang Tian¹ Wang Yanzhong^{1,2} Li Wenqiang¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Shandong Qingdao 266071, China)

Abstract: Supercritical sediment gravity-flow refers to the high-density flow with Froude number more than 1, transporting from underwater slope towards basin center, able to frequently transform between supercritical flow and subcritical flow under hydraulic jump mechanism, so as to form large wave-shaped cyclic steps easy to be preserved. The sedimentary identification marks of supercritical sediment gravity-flow mainly include the cyclic step integrative identification mark and the local identification marks including the stratification structures caused by traction carpets, the lamination structures such as backset bedding, short-wavelength climbing cross bedding and pseudo-foreset bed, and the erosion and soft-sediment deformation structures caused by hydraulic jump. Under the ideal conditions, supercritical sediment gravity-flow leads to a sequential assemblage composed of pebbly cyclic steps, gravely chutes-pool sedimentary fillings, unstable antidune sediments, stratified sandy sediments, sandy rippled sediments and normal sediment from top to bottom in the vertical direction. Cyclic steps can be divided into erosional type and sedimentary type. From basin edge to center, the erosional cyclic step is evolved to sedimentary type. The sedimentary evolution process of supercritical sediment gravity-flow is jointly controlled by internal factors, such as fluid sediment concentration, flow discharge, sediment granularity and sedimentary rate, and external factors, such as topographic slope, slope break position, water depth and the characteristics of sediments available for erosion. The related research on supercritical sediment gravity-flow has deepened the understanding of the formation mechanism of sediment gravity-flow channels, the genesis of deep-water massive coarse-grained sandstones and the evolution process of gravity flow. In current stage, a series of problems require further research, including the fluid dynamic characteristics, sedimentary identification marks and formation-evolution processes of supercritical sediment gravity-flow.

Key words: sediment wave; cyclic step; hydraulic jump; traction carpet; supercritical sediment gravity-flow; formation and evolution; sedimentary characteristic

引用:操应长,杨田,王艳忠,李文强.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.

Cite: CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong, LI Wenqiang. Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity-flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(6): 607-621.

基金项目:国家重大科技专项(2016ZX05006-007)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(14CX06070A)资助。

第一作者:操应长,男,1969年1月生,1992年获石油大学(华东)沉积地质学专业学士学位,2003年获中国科学院广州地球化学研究所博士学位,现为石油大学(华东)教授、博士生导师,主要从事沉积学、层序地层学及油气储层地质学方面的教学与科研工作。Email: cyc8391680@163.com

通信作者:杨田,男,1989年9月生,2011年获石油大学(华东)地质学专业学士学位,现为石油大学(华东)博士研究生,主要从事沉积学和油气储层地质学研究工作。Email: yangtian9645@126.com

作为陆上沉积物向深水盆地输运的主要动力机制,重力流对形成深水盆地规模宏大的碎屑沉积体和塑造盆地底形厥功至伟^[1-8]。研究重力流砂体的形成和分布,对于全球沉积物的搬运过程、稳定的碳循环过程、高效的油气勘探、战略性电缆通讯网络的潜在危害防护、地震等自然灾害再发周期的研究意义重大^[4,7,9-13]。由于沉积物重力流事件的突发性和破坏性,对其形成和沉积过程开展实际监测研究相对困难^[5,11,14],因而以露头 and 岩心沉积物为基础的重力流沉积及其演化研究还存在较多问题^[10-11],但是超临界沉积物重力流的发现,为沉积物重力流的相关研究提供了新的机遇^[5]。

1 研究进展及挑战

近年来关于沉积物重力流流体类型、成因机制、演化过程及沉积模式的研究取得了丰硕的成果^[4-5,14-19]。围绕砂质碎屑流(sandy debris flow)、异重流(hyperpycnal flow)、混合重力流(hybrid flow)、超临界重力流(supercritical gravity flow)的对比研究加深了对重

力流搬运及沉积动力机制的理解^[14-15,17-18,20];多种触发机制作用下的沉积物再搬运和沉积物持续供给的重力流成因机制研究揭示了重力流沉积广泛发育的本质^[12,21-22](图1);沉积物浓度控制下的碎屑流与浊流相互转化过程阐述了重力流砂体分布复杂的原因^[6,17,23];重力流水道形成过程控制下的砂体沉积模式研究为重力流砂体的准确预测提供了可能^[5,24-26]。重力流沉积模式研究中,无论是传统的扇模式,包括现代扇^[27]、古代扇^[28]、海底扇^[29],还是现阶段的水道-堤岸沉积模式^[30]、深水斜坡模式^[31],重力流水道都是其重要的组成部分,但是对水道的成因机制还存在诸多争议^[5,24,31](图2);同时,在先进的科学技术手段支撑下,部分用现有的沉积物重力流沉积相关理论无法合理解释的沉积现象被相继发现:如广泛发育于海底与湖底的连续波状起伏底形^[19,32-34][图3(a)、图3(b)],发育于盆地斜坡的规则或不规则排列的冲刷槽^[19,25]、野外露头中发现的后积层理发育的厚层块状粗碎屑重力流沉积等^[35-37][图3(c)、图3(d)]。

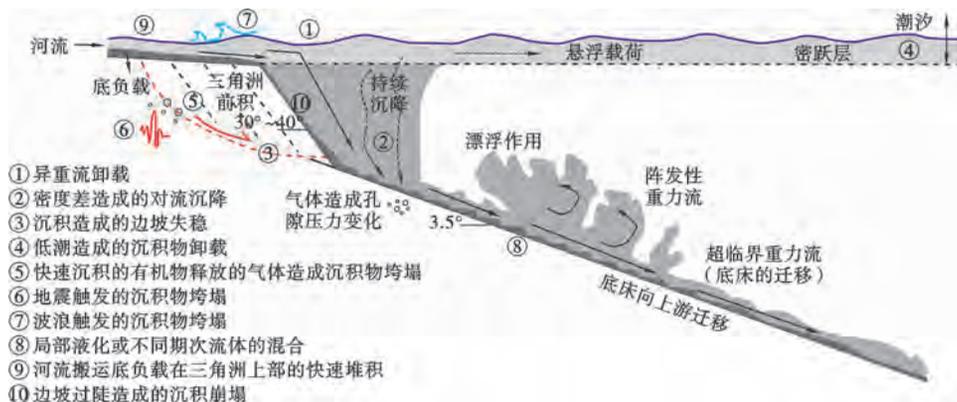


图1 沉积物重力流成因机制及搬运演化过程(据文献[12]修改)

Fig. 1 Genesis and transport mechanisms of sediment gravity-flows

对深水盆地底部连续波状起伏底形的认识始于海底沉积物波的研究^[32,38-39]。研究早期,通过地震剖面显示的大型沉积物波主要归因于深海底流作用成因^[40];随着地震研究分辨率的提高和海底声呐测深技术的进步,发育于不同粒度沉积物中、具有不同几何形态及迁移特征的沉积物波被相继发现,浊流作用成为沉积物波形成的另一种解释^[19,40-41]。但是,大量沉积物波表现出的向斜坡上游迁移的规律并未得到合理解释^[33]。得益于沉积物重力流形成的水槽模拟实验、数值模拟实验及水下实际监测综合研究,超临界重力流的发现为合理解释大规模向斜坡上游迁移的沉积物波、重力流水道成因机制、盆地斜坡发育的冲刷槽和后积层理发育的厚层块状粗碎屑沉积等问题提供了有利契机^[11,14,19,35-36,42-43]。美国伊利诺斯大学 Parker^[44]及

其团队在超临界沉积物重力流搬运及沉积的物理和数值模拟方面的贡献是这一认识的基础;荷兰乌得勒支大学 Postma^[45]及其团队在超临界沉积物重力流搬运及沉积的物理和数值模拟与野外识别标志的研究是这一认识的核心;加拿大新布伦瑞克大学 Hughes Clarke^[11]为代表的超临界沉积物重力流搬运及沉积的实际监测及大量深水盆地波状底形的研究是这一认识的有利佐证。大量海底与湖底高精度测深数据及超临界沉积物重力流搬运和沉积监测表明[图3(e)—图3(h)]:广泛发育于海底与湖底向斜坡上游迁移的沉积物波、盆地斜坡发育的规则或不规则排列的冲刷槽均是超临界沉积物重力流在水力跳跃机制作用下的沉积底形^[11,19,33,34],统称为旋回坎(cyclic steps);后积层理发育的厚层块状粗碎屑沉积则是超临界沉积物重

力流作用的典型沉积产物^[35-37]。

近年来,在中国南海^[46]和四川侏罗系半深湖环境^[47]的研究中也陆续出现有关超临界沉积物重力流沉积的报道,但总体认识水平与国际同行还存在一定差距^[48]。中国有辽阔的海域和漫长的海岸线,研究超临界沉积物重力流对陆缘斜坡及海底的改造作用、对理解海底地形及沉积物输运意义重大;同时,中国东部地区广泛发育的陆相断陷湖盆陡坡带和洼陷带是超临界沉积物重力流作用和沉积的有利场所,研究超临界沉积物

重力流对陡坡带和洼陷带重力流砂体沉积分布的控制作用对其高效的油气勘探预测意义重大;此外,由于超临界流沉积物保存相对困难,且分布规模大、研究难度大,国际上有关超临界沉积物重力流的研究也仅处于探索发展阶段,并且存在诸多问题亟待解决。笔者近期在山东灵山岛背来石剖面附近发现了特征鲜明的超临界异重流沉积^[49];因而有必要对国际上沉积物重力流沉积的最新研究进展进行系统总结,以期为中国沉积物重力流相关研究提供新的知识增长点。

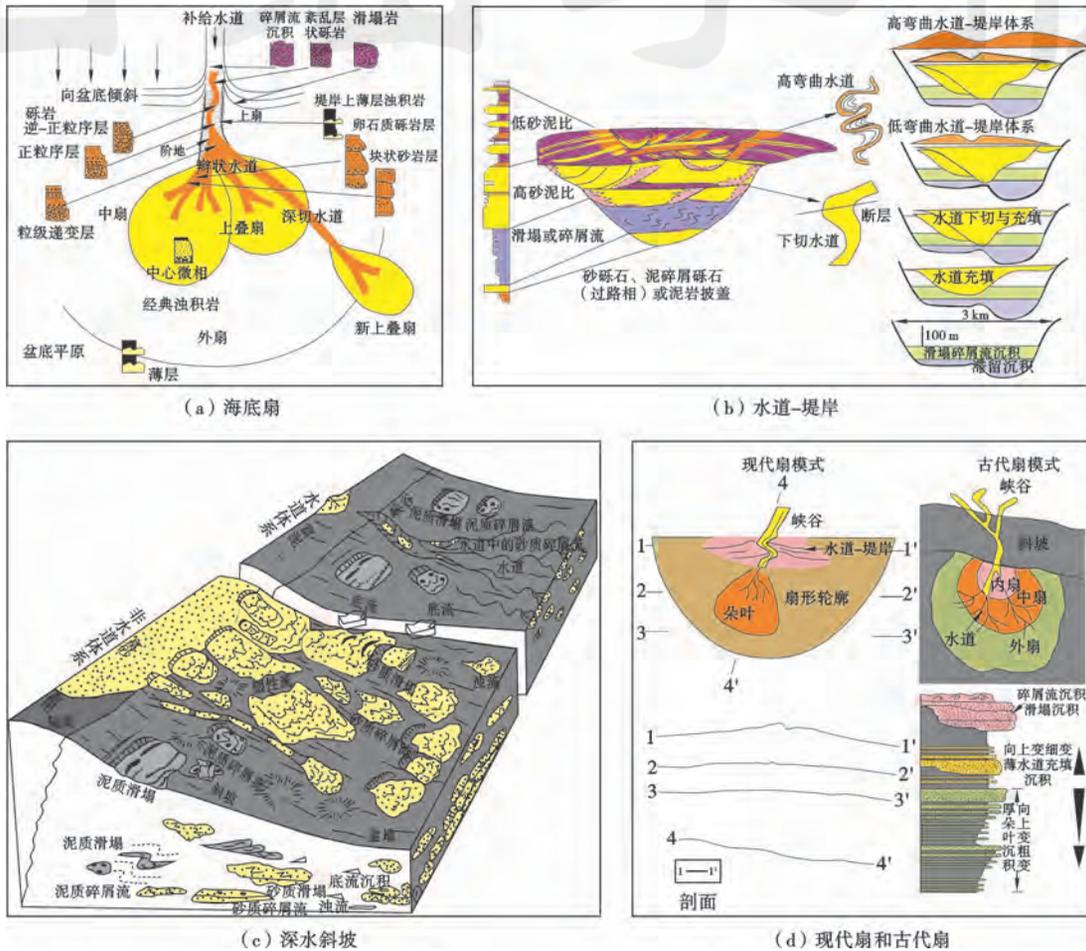


图 2 沉积物重力流主要沉积模式(据文献[27-31]修改)

Fig. 2 The main depositional model of sediment gravity-flow

2 相关概念

2.1 超临界沉积物重力流 (supercritical sediment gravity flows)

根据弗洛德数的定义:

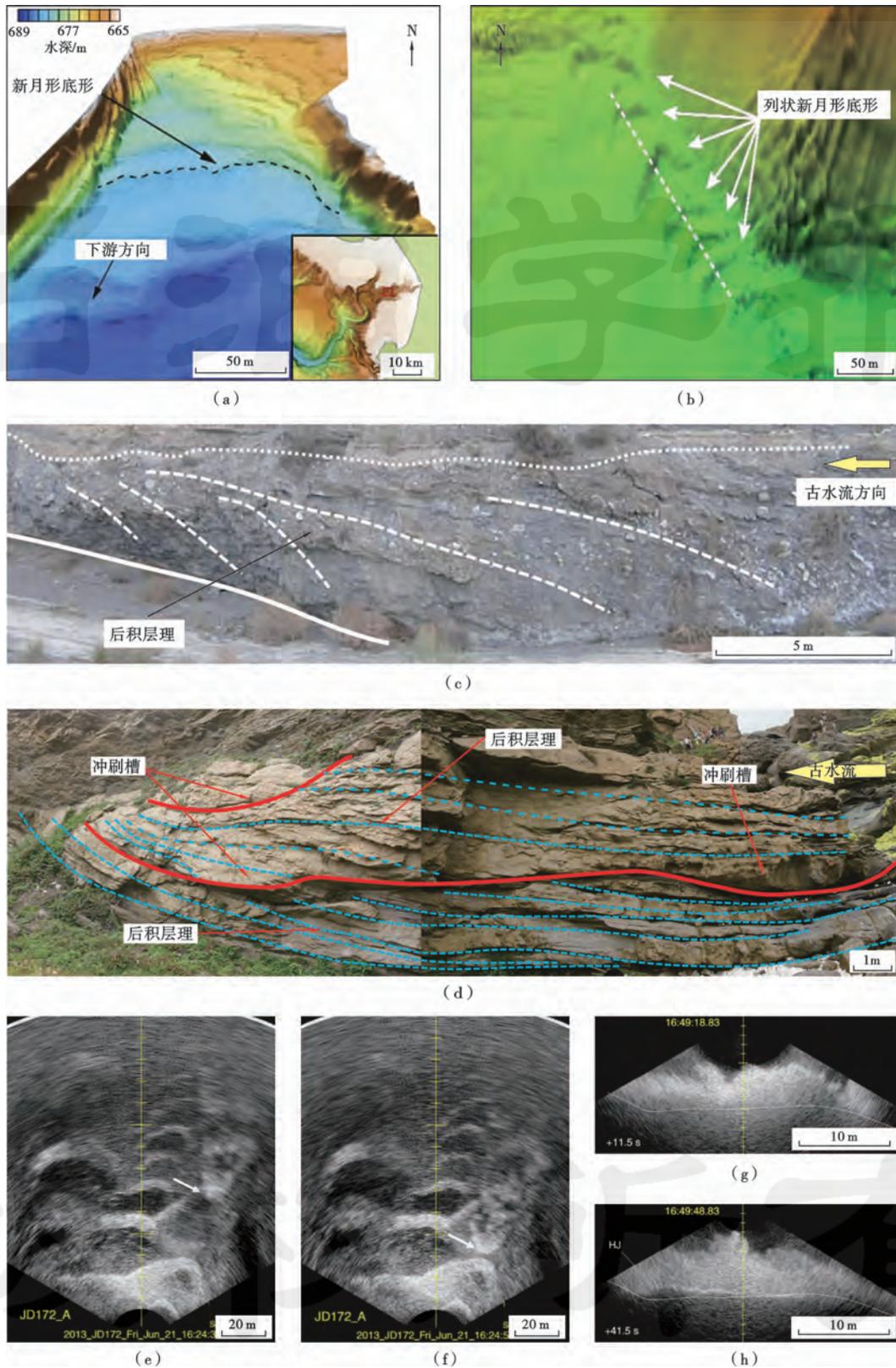
$$F_r = U / (gh)^{1/2} \quad (1)$$

可将流体分为 3 种类型,即:超临界流($F_r > 1$),临界流($F_r = 1$),亚临界流($F_r < 1$)。早期对超临界流的认识主要集中于近地表的明渠水流,而 Parker^[44]认为沉积物重

力流同样存在超临界状态,根据水下弗洛德数的定义:

$$F_{rd} = U / (gRChg)^{1/2} \quad (2)$$

可将沉积物重力流分为 3 种类型,即:超临界沉积物重力流(supercritical sediment gravity flows)($F_{rd} > 1$),临界沉积物重力流(critical sediment gravity flows)($F_{rd} = 1$),亚临界沉积物重力流(subcritical sediment gravity flows)($F_{rd} < 1$)^[42,50]。弗洛德数为 1 的临界状态很难保持,因而以超临界和亚临界沉积物重力流最为常见^[14]。



(a) 美国加利福尼亚 Monterey 峡谷底部新月形底形；(b) 加拿大东部地区 Schmon 河三角洲前缘深水环境列状新月形底形；(c) 西班牙 Tabernas 盆地块状粗碎屑重力流沉积中的后积层理；(d) 超临界流形成的旋回坎沉积，灵山岛背来石剖面附近；(e)、(f)加拿大 Squamish 河三角洲前缘深水环境超临界流向上游方向移动[(e)为 24 分 37.12 秒底形，(f)为 24 分 52.12 秒底形]；(g)、(h)加拿大 Squamish 河三角洲前缘超临界沉积物重力流水力跳跃过程[(g)为 49 分 18.83 秒流体剖面，(h)为 49 分 48.83 秒流体剖面]。

图 3 超临界沉积物重力流沉积特征及实际监测的沉积迁移过程(据文献[11,19,34,35]修改)

Fig. 3 Sedimentary characteristics of supercritical sedimentary gravity flow and the migration processes by monitoring

2.2 水力跳跃(hydraulic jump)

水力跳跃是当超临界流体向亚临界流体流动时,发生在两者接触界面的流体明显抬高减速现象,并使超临界流体转化为亚临界流体^[51-53]。水力跳跃强度可以由流出的亚临界流厚度(h_2)与流入的超临界流厚度(h_1)的比值来定义,同时与能量的丢失程度(ΔH)成正比,主要受流入的超临界流弗洛德数(F_{r1})大小的控制^[53][图 4(a)]。当流入的超临界流 F_{r1} 在 1~1.7 时,能量丢失较少,以波状水跃为主[图 4(b)];随着流入流体 F_{r1} (1.7~2) 的增加,水跃形成的波浪开始破碎,循环的水流滚动在自由界面

开始形成[图 4(c)];当流入流体 F_{r1} 为 2~4 时,水力跳跃变得极不稳定,流入流体从底部向上快速混入,形成振荡性的射流以及强烈的水流滚动[图 4(d)];流入流体 F_{r1} 的进一步增加会形成稳定形态的水力跳跃,造成流体的强烈湍动和能量的丢失[图 4(e)、图 4(f)]。Postma^[45]关于水下重力流水力跳跃现象的水槽模拟实验进一步证实在深水环境超临界沉积物重力流发育及水力跳跃作用的广泛存在,特别是分层结构的密度流强烈的水力跳跃作用为解释深水粗碎屑重力流沉积提供了理论依据[图 4(g)、图 4(h)]。

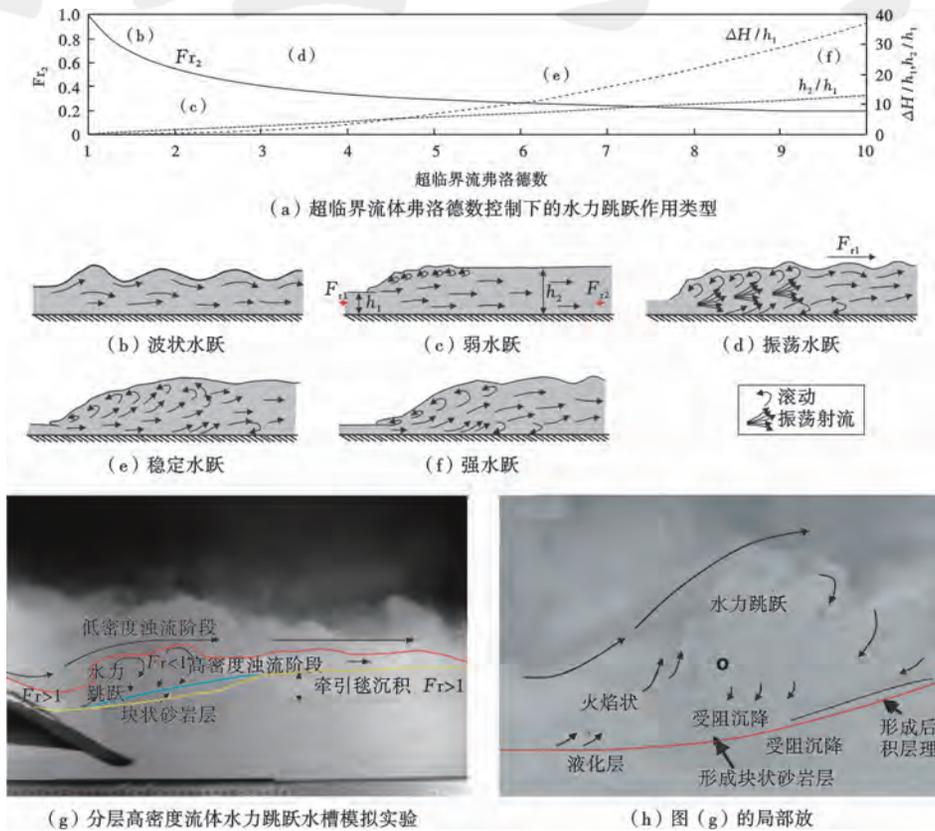


图 4 超临界流水力跳跃作用类型及重力流水力跳跃作用水槽模拟实验(据文献^[45,53]修改)

Fig. 4 Flume experiment of gravity flow hydraulic jump and the types of hydraulic jump of supercritical flow

2.3 沉积物波(sediment waves)

沉积物波主要指广泛发育于海底的大型(高数米,长几十到数千米)波状沉积底形^[40]。根据组成沉积物波的沉积物粒度大小,可分为粗粒沉积物波和细粒沉积物波 2 种类型^[39];据其成因,可分为底流沉积物波、浊流沉积物波和沉积物波(成因不明情况下) 3 种类型^[39];据其规模,分为小尺度沉积物波和大尺度沉积物波^[19]。

2.4 旋回坎(cyclic steps)和冲刷槽(scours)

旋回坎是指在高弗洛德数条件下形成的、一系列向上游方向移动的大型阶梯状沉积底形[图 3(e)、图 3(f)],迎流面主要是亚临界流卸载形成的宽缓状沉积,背流面主要是超临界流作用下的水力跳跃作用

形成的下降侵蚀陡坎^[33]。旋回坎多为不对称性底形,根据不对称样式可以进一步分为上游不对称和下游不对称旋回坎,前者多发育于低能沉积环境,后者发育于高能沉积环境^[33];根据旋回坎的沉积和迁移特征,可以分为侵蚀型和沉积型旋回坎^[33,50]。

冲刷槽是指局部发育少量沉积、位于深水盆地边缘、规模大于流槽-凹坑的侵蚀负地貌底形^[19]。根据排列方式,可进一步分为线列式、孤立状和复合式^[19,46]。

3 动力学特征

超临界沉积物重力流的形成主要受沉积物浓度、地形坡度、流体流量和流体厚度的综合控制^[14,34]。过

高的沉积物浓度会导致流体的流速较低,不利于达到超临界状态^[14];当地形坡度大于 0.6° 时,沉积物重力流就能达到超临界状态^[54],Fricke^[55]甚至认为地形坡度大于 0.07° 就能够形成超临界沉积物重力流;当沉积物的流量过低时,流体的动量不足以使流体保持超临界状态^[14,34];厚度较薄的流体由于具有较高的弗洛德数更容易达到超临界状态,这也是大部分底部分层的沉积物重力流更容易达到超临界状态的原因^[45,50]。

超临界沉积物重力流的搬运和沉降主要受其弗洛德数大小控制^[53]。随着弗洛德数不断增大,不同强度水力跳跃控制下的沉积底形发生从稳定逆行沙丘、不稳定逆行沙丘、流槽-凹坑到旋回坎的有序变化^[36,53,56-57](图5)。在稳定和 unstable 逆行沙丘的形成中,超临界沉积物重力流对沉积物的搬运和沉降起主要控制作用;在流槽-凹坑和旋回坎的形成中,超临界沉积物重力流主要起侵蚀和搬运作用,亚临界沉积物重力流进一步控制沉积物的搬运和沉降^[53]。

4 作用特征

关于超临界沉积物重力流作用的沉积识别标志还存在较大争议,虽然世界范围内大量发育的深海(深湖)波状沉积底形大部分被证实为超临界沉积物重力流作用的产物^[19,34],但由于超临界沉积物重力流的侵蚀破坏性和大范围分布特征,使野外露头或者钻井岩心中关于超临界沉积物重力流作用的沉积识别标志的研究还十分欠缺^[14,35-37,50,57-59]。水槽模拟实验为其沉积识别标志提供了一定依据,但自然条件与理想实验条件的差异使得需要谨慎对待实验结果。大量学者对实验条件中广泛发育的逆行沙丘沉积记录持否定态度,因为在实际沉积中这种沉积构造的保存十分困难^[33,50,56-57]。现阶段有关的沉积识别标志主要包括:分层构造、层理构造、侵蚀构造等局部识别标志和旋回坎综合识别标志^[35-37,57](图6)。

4.1 识别标志

4.1.1 分层构造

由于超临界沉积物重力流的流速快、侵蚀能力强,因而具有较强的粗碎屑搬运能力^[14,35-37,57],这种含大量粗碎屑的流体在强烈的水力跳跃作用下向亚临界流转化,并且以牵引毯的形式发生搬运和沉降,因而形成具有明显分层构造的粗碎屑沉积^[35,36,52]。由于强烈的侵蚀作用,沉积物中可含部分侵蚀成因、层状排列的泥质碎屑,泥质碎屑一般具有一定的磨圆^[14]。Cartigny^[35]和Postma^[52]对西班牙Tabernas盆地晚中新世浊积岩的研究认为分层构造是超临界沉积物重力流作用沉积的重要识别标志。

4.1.2 侵蚀充填构造

高弗洛德数的超临界沉积物重力流具有很强的侵蚀能力,其形成的流槽-凹坑和冲刷槽中保留的侵蚀充填构造是其沉积的有效识别标志^[14,35,36,57](图6)。Postma^[36]在

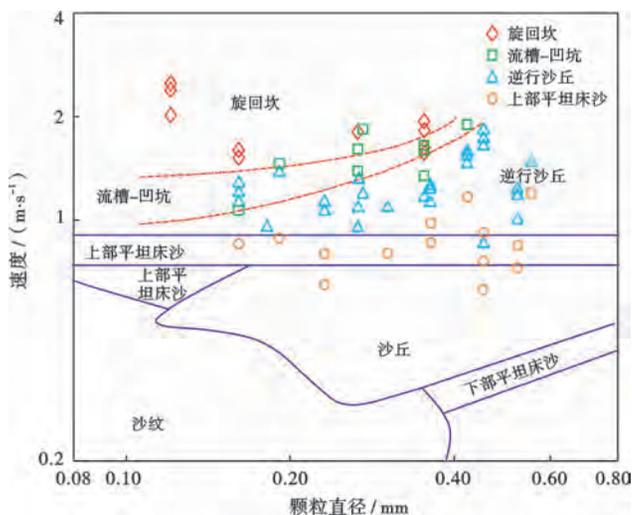
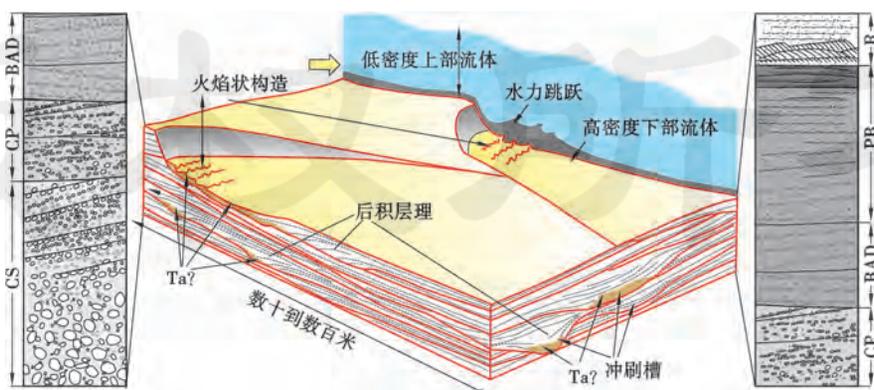


图5 超临界沉积物重力流动力学特征(据文献[35]修改)

Fig. 5 Dynamic of supercritical sediment gravity-flow



CS—砾质旋回坎;CP—砾质流槽-凹坑沉积充填;BAD—不稳定逆行沙丘沉积;PB—分层沉积;R—沙纹层理沉积;Ta—鲍马序列a段。

图6 超临界沉积物重力流沉积过程及其特征(据文献[35-36]修改)

Fig. 6 Sedimentary characteristics and depositional processes of supercritical sediment gravity-flows

西班牙 Tabernas 盆地浊积岩的研究中将大量发育于不同岩性界面的火焰状构造作为识别水力跳跃侵蚀作用的依据。Dietrich^[57]对加拿大魁北克圣劳伦斯河湾北岸上更新世超临界沉积物重力流的研究中同样发现了广泛发育的火焰状构造和透镜状冲刷槽充填构造。冲刷槽呈孤立状或多个断续状分布,底部多充填包含部分泥岩撕裂屑的块状粗碎屑沉积物^[36](图 6)。灵山岛背来石附近也发育典型的冲刷槽充填沉积[图 3(d)],充填沉积多呈透镜状,冲刷界面的岩性差异及充填沉积底部杂乱分布的深灰色泥岩撕裂屑指示了强烈的冲刷侵蚀作用。

4.1.3 层理构造

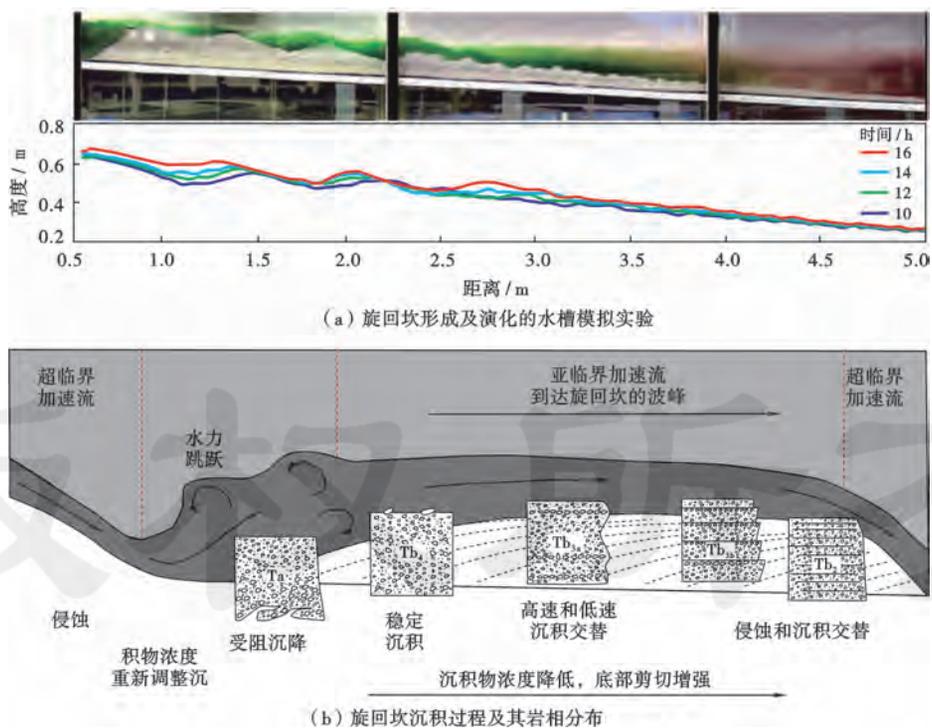
在超临界沉积物重力流作用下,向上游方向移动的沉积底形会形成一系列形态和规模各异的交错层理^[14,35-36,57,60]。后积层理主要是纹层从下层系界面向上层系界面逐渐变缓,沿上层系界面收敛,表现出向古水流上游方向迁移特征的沉积构造;后积层理一般规模较大,主要发育在粗碎屑沉积中,以相对粗碎屑沿纹层方向的定向或叠瓦状排列为特征[图 3(c)、图 6];西班牙 Tabernas 盆地、加拿大魁北克圣劳伦斯河湾北岸、德国北部地区的超临界沉积物重力流沉积中都有广泛发育的后积层理^[35-36,57,60]。规模较小的向古水流上游方向迁移的短波状上攀交错层理为逆行沙丘的沉积产物^[57,60],多与规模较大的后积层理相伴生,局部

小规模发育;沿古水流方向迁移的交错层理则为沙丘迁移的沉积产物^[60]。此外,超临界沉积物重力流在水力跳跃作用下表现出的大尺度向上游方向的侵蚀迁移特征会在局部范围内形成宽缓的侵蚀界面,后积层理沿侵蚀界面的超覆作用会形成局部的假前积层^[57]。

4.1.4 旋回坎沉积特征

由于沉积构造的多解性,依靠单一的沉积构造识别标志并不能准确识别超临界沉积物重力流作用下的沉积,不同沉积构造组合形成的旋回坎是识别超临界沉积物重力流作用沉积的最可靠标志^[14,35-36,57,59]。单一旋回坎主要由水力跳跃区、亚临界流加速区、超临界流加速区组成。沉积物主要在水力跳跃区和亚临界流加速区发生沉积,且沉积物组成和沉积构造随距水力跳跃区距离的增加而出现规律性的变化,从而形成旋回坎沉积整体可靠的识别标志^[14,35,36][图 3(d)、图 7]。

水力跳跃区以侵蚀充填为典型特征,大量发育的冲刷槽被厚层块状或粗尾正粒序粗碎屑沉积充填,沉积物底部火焰状构造发育,内部可含部分侵蚀成因的泥质碎屑,主要显示超临界沉积物重力流在水力跳跃作用下形成的高浓度亚临界流的快速沉积作用^[36,59][图 7(b)]。跨过水力跳跃区,高浓度的亚临界流在不断加速的过程中,底部沉积物主要以牵引毯的形式搬运沉降。紧邻水力跳跃区,由于沉积物浓度大,主要以



注:Ta—鲍马序列 a 段;Tb—鲍马序列 b 段;Tb₁—似块状构造;Tb_{3a}—弱分层构造;Tb_{3b}—一分层构造;Tb₂—平行层理(层理间隔小于 0.5 cm)。

图 7 超临界沉积物重力流形成的旋回坎组合特征(据文献[14,42]修改)

Fig. 7 Characteristics of cyclic steps caused by supercritical sediment gravity-flow

摩擦牵引毯的形式搬运和沉降,沉降速率较快,以块状粗碎屑沉积为主,内部可含少量漂砾^[36,45][图7(b)]。随着搬运加速过程中沉积物的卸载,沉积物的浓度不断降低,底部沉积物以碰撞牵引毯的形式搬运,形成具有牵引毯作用下的分层结构沉积物。流体的搬运速度和沉积速率控制了沉积相序的分层结构,随着搬运距离的增加,沉积速率逐渐降低,搬运和侵蚀速率逐渐减弱,分层结构从粗略分层向规则分层逐渐变化^[14,35-36]。

4.2 沉积序列

超临界沉积物重力流作用沉积序列主要受超临界沉积物重力流流量及其演化过程的综合控制^[35-36,57]。Cartigny^[35]以野外和实验研究为基础,对超临界沉积物重力流作用沉积序列进行了总结(图6)。根据超临界沉积物重力流从近端向远端搬运的过程中流量逐渐降低、沉积物粒度和浓度逐渐降低、由旋回坎向逆行沙丘逐渐演化的特征,认为近端的沉积以砾质旋回坎、砾质流槽-凹坑沉积充填和砂质不稳定逆行沙丘沉积的垂向有序组合为特征;在远端由于流体能量的减弱和演化,以砾质流槽-凹坑沉积充填、砂质不稳定逆行沙丘沉积、砂质分层沉积和沙纹沉积及正常沉积的垂向有序组合为特征^[35]。Dietrich^[57]在加拿大魁北克圣劳伦斯河湾北岸上更新世、Lang and Winsemann^[60]在德国北部中更新世都同样观察到了从旋回坎、流槽-凹坑沉积充填、砂质不稳定逆行沙丘沉积到砂质分层沉积和沙纹沉积及正常沉积的垂向有序组合的特征。

5 沉积演化及控制因素

5.1 沉积演化特征

目前,关于超临界沉积物重力流作用沉积的研究主要将旋回坎作为识别依据,因而沉积演化主要探讨旋回坎的演化特征^[19,34,50,61]。Fildani^[61]根据旋回坎迁移和沉积特征,将旋回坎划分为沉积型和侵蚀型两种类型,并且通过数值模拟分别对两者的演化特征进行了研究。

5.1.1 沉积型旋回坎演化

沉积型旋回坎主要指沉积物重力流成因的沉积物波^[19,50,61],根据其形成的大型波状底形对称关系,可进一步划分为上游不对称和下游不对称沉积型旋回坎^[33]。大量海底测深数据分析和数值模拟结果表明,沉积型旋回坎具有沿着流体传播方向波长逐渐变长,波高逐渐变小的演化趋势,并且旋回坎的对称性也可能对应出现由下游不对称向上游不对称演化^[33,50,61];Normandeu^[34]对加拿大东部地区湖盆发育的旋回坎的演化特征的研究也得到了相同的认识[图8(a)]。沉积型旋回坎的这种演化过程主要体现了随着流体能

量的逐渐减弱,超临界流体在发生水力跳跃之后重新达到超临界状态的加速过程逐渐变长的特征^[33-34]。

5.1.2 侵蚀型旋回坎演化

侵蚀性旋回坎主要是指呈线性排列的冲刷槽^[19,50,61],由于冲刷槽的类型和分布多样,对于非线性排列的冲刷槽是否属于旋回坎还存在一定的争议^[19]。在加利福尼亚 Monterey 东部水道外侧发育的线性排列的冲刷槽就属于典型的侵蚀型旋回坎构造,侵蚀型旋回坎沿着流体搬运方向传播,形成的冲刷槽深度和长度逐渐减小,宽度逐渐增加[图8(b)]。Fildani^[61]认为侵蚀性旋回坎的这种演化规律主要受超临界流体侵蚀能力的控制,随着搬运距离的增加,超临界流体能量逐渐减小、侵蚀性减弱、沉积作用增强,从而形成上述演化特征。

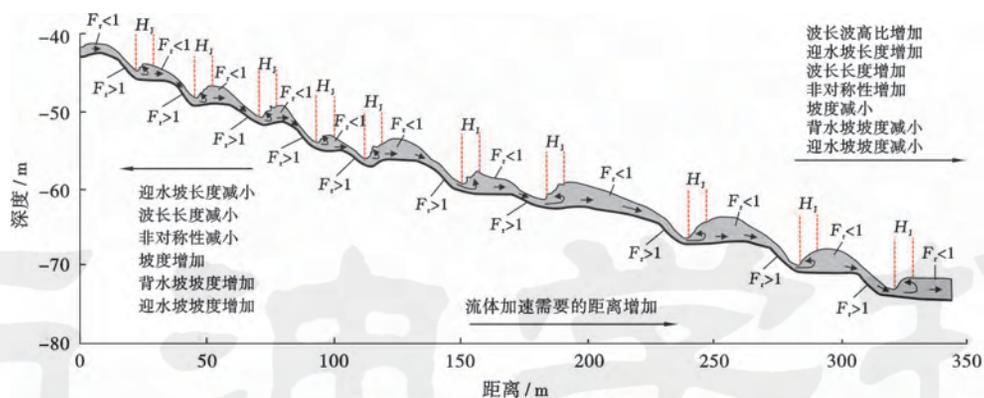
Symons^[19]通过对全球已报道的82处旋回坎沉积特征的统计学分析认为,旋回坎的形成和分布可能是一个有序过程,随着超临界流体能量的减弱,侵蚀性旋回坎可以转化为大尺度再转化为小尺度。笔者也认为这种有序转化是可能的,并且可能呈现从大尺度侵蚀型旋回坎转化为小尺度侵蚀型旋回坎,再转化为小尺度沉积型旋回坎,最后演化为大尺度沉积型旋回坎并最终过渡为稳定的亚临界流沉积的过程。这种理想的有序演化过程还有待后续研究的检验,发育于中国南海的一处连续分布的旋回坎为这一演化过程提供了一定佐证^[62][图8(c)]。

5.2 控制因素

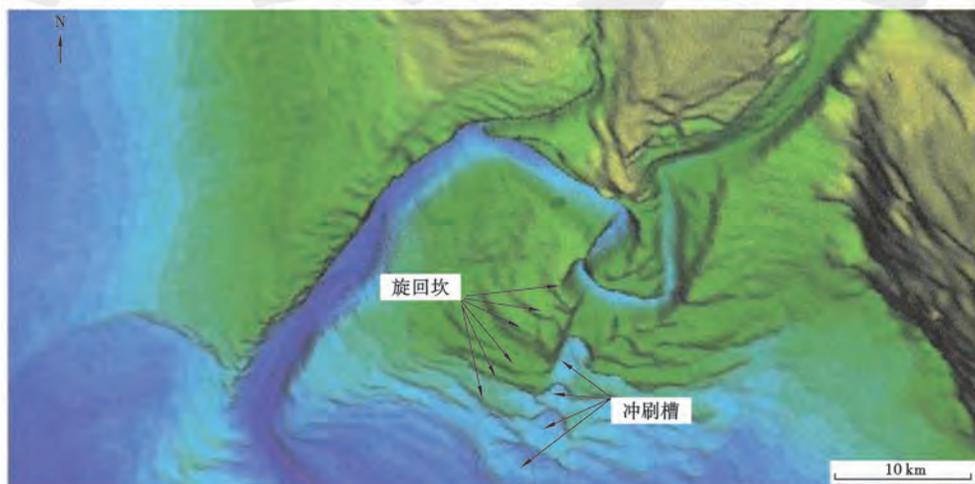
5.2.1 内部因素

超临界沉积物重力流作用沉积演化过程主要受流体沉积物浓度、流体流量、沉积物粒度、沉积速率的综合控制^[19,33-34,50,53,61]。流体沉积物浓度是控制超临界沉积物重力流形成及演化的重要因素^[14,34,61],过高沉积物浓度导致流体不易达到超临界状态^[61],而过低沉积物浓度的流体不易发生分层,很难形成稳定的超临界状态^[14];只有适当浓度条件下的分层流体才能形成稳定的超临界状态^[34,45,50];数值模拟的结果表明在能够发生水力跳跃的沉积物浓度范围内,浓度越大,形成的旋回坎的个数越多,规模越大^[50]。

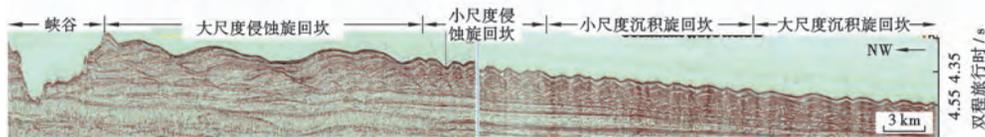
流体流量是控制超临界流作用沉积及演化的另一重要因素^[33-34,36]。在流体沉积物浓度较低(体积浓度小于9%)时需要较大的流量才能形成超临界流,而当流体沉积物浓度升高出现分层时,较低的流量就能形成超临界流^[36]。Cartigny^[33]的数值模拟实验表明单位流量从0.5 m²/s增加到1.5 m²/s,超临界流的侵蚀能力明显增强。因而,在限制性水道中,高单位流量的超临界沉积物重力流以形成侵蚀性旋回坎为主,随着传播过程中流量的降低,在水道下游和漫溢中以形成



(a) 加拿大东部地区 Gravel 河三角洲前缘



(b) 美国加利福尼亚 Monterey 东部水道外侧发育的线性排列的冲刷槽及旋回坎



(c) 台湾西南部中国南海

图 8 超临界沉积物重力流作用沉积演化特征(据文献[34,61-62]修改)

Fig. 8 Sedimentary evolution processes of supercritical sediment gravity-flow

波长波高比逐渐增大的沉积型旋回坎为主^[33-34,36]。

沉积物粒度也是控制旋回坎规模及分布演化的重要因素^[19,33,57]。Symons^[19]对全球已发现的 82 例有关旋回坎沉积特征的分析发现,旋回坎发育的规模与沉积物粒度之间存在密切联系,沉积物粒度较粗的旋回坎波长最大可达 1km,波高最高可达 10m,主要分布在沉积近端如峡谷和近端水道中;沉积物粒度较细的旋回坎波长在 1~7km 范围内,波高最高可达 80m,主要分布在沉积远端的深水平原和水道两侧的漫溢中^[19,33]。Dietrich^[57]对超临界沉积物重力流形成的旋回坎与沉积物粒度的关系研究则认为沉积物粒度的增加会导致旋回坎的长高比减小(图 9)。

Cartigny^[53]关于超临界沉积物重力流作用沉积的水槽模拟实验研究表明,沉积速率是控制超临界流沉积特征及规模的重要因素。沉积速率控制了超临界流

沉积内部层理和整体沉积特征的保存,较高的沉积速率能够使逆行沙丘和流槽-凹坑等构造得到较好的保存^[53];沉积速率同样控制了旋回坎的几何形态,较高的沉积速率多容易形成下游不对称旋回坎,反之则易形成上游不对称旋回坎^[33]。

5.2.2 外部因素

地形坡度、坡折带位置、水深及可供侵蚀的沉积物特征同样对超临界沉积物重力流作用沉积演化过程起着明显的控制作用^[19,34,50,57,63]。地形坡度是控制超临界流体能量变化的重要因素,地形坡度与沉积物粒度和旋回坎的规模之间存在着密切联系。地形坡度较大时,由于沉积物沿斜坡向下的分力较大,利于加速形成具有较强侵蚀能力的高能量流体,因而以形成侵蚀型旋回坎和粒度较粗的沉积型旋回坎为主;快速的流体加速过程使得水力跳跃作用频繁,

旋回坎的长高比较小^[50,57]。随着沉积物坡度的减小,流体的搬运能力逐渐减弱,水力跳跃后需要形成超临界流的加速距离增大,逐渐形成沉积物粒度较细、长高比不断增大的沉积型旋回坎^[46,57][图9(a)]。此外,局部形成的坡折带能够增强水力跳跃作用,利于较强侵蚀作用的进行,从而促进旋回坎形成^[50]。水深同样与旋回坎规模之间存在密切联系,水深越大,形成的旋回坎波长越大,沉积的沉积物粒度也越

细^[19],但是水深的变化可能与坡角的变化存在一定联系,在相同的坡角条件下,不同水深的旋回坎沉积规模之间是否存在差异还有待进一步研究^[19,57][图9(b)]。可供侵蚀的沉积物特征也一定程度上影响旋回坎的形成,可供侵蚀的沉积物量越多,越有利于形成侵蚀型旋回坎,并且可供侵蚀的沉积物孔隙度越高,形成的旋回坎的规模越大;反之可供侵蚀沉积物越少,越有利于形成沉积型旋回坎^[50,64]。

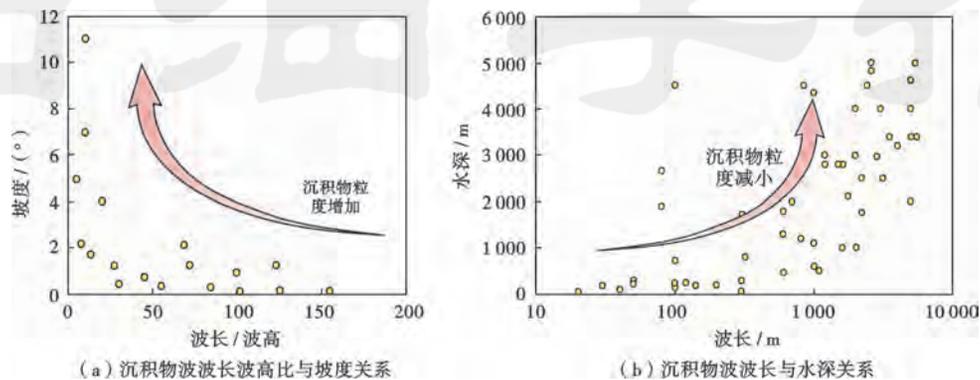


图9 超临界沉积物重力流作用沉积演化控制因素(据文献[19,57]修改)

Fig. 9 Controlling factors of sedimentary evolution processes of supercritical sediment gravity-flow

6 研究意义及问题

6.1 研究意义

超临界沉积物重力流的发现及其相关理论的完善极大拓展了对沉积物重力流动力学机制的认识,将研究者从深水环境不发育超临界流的传统桎梏中解放出来^[65],在合理解释深水沉积底形的基础上,也为解决沉积物重力流研究中长期存在争议的问题提供了新的视角,为推动沉积物重力流沉积理论的完善提供了有利契机^[14,61,36-37]。

6.1.1 沉积物重力流水道形成机理新解释

发育在加利福尼亚 Monterey 东部水道外侧线状排列的侵蚀性旋回坎和世界范围内大量发育于重力流水道中的旋回坎为沉积物重力流水道的形成和演化过程提供了新解释^[19,24,61,66]。早期发育于深水盆地边缘的局部低地势地区会造成超临界沉积物重力流的汇聚,超临界流强烈的侵蚀作用首先形成一系列线状排列的不连续冲刷槽;随着不同期次超临界流的持续作用及迁移演化,不连续的冲刷槽逐渐形成连续性水道;水道内部超临界流作用形成的旋回坎的演化使得上游以侵蚀为主,下游以沉积为主^[19,24,61,67-69]。水道内部在次生环流的作用下发生侧向的迁移和弯曲^[5],较强的重力流作用使部分超临界流体沿着局部弯曲部位溢出水道,并沿漫溢中的局部低部位汇聚、侵蚀形成不连续的冲刷槽,相同的演化过程形成次级的水道^[24,61,67-68],最

终演化形成复杂交错的水道分布。

6.1.2 深水块状粗碎屑成因争议新视角

沉积物重力流沉积中的粗碎屑块状砂岩成因解释一直存在争议^[36,70-72]。浊流理论早期主要用于解释深水细碎屑(粉细砂)沉积,而对随后发现的深水粗碎屑沉积并不能很好的解释,Low^[70]为了解释这一现象提出高密度浊流的概念,随后 Shanmugam^[72]又提出用砂质碎屑流的概念来解释这些粗碎屑沉积,并对高密度浊流的概念提出了批判。超临界沉积物重力流的发现又让这一问题被重新审视,在超临界状态下快速运动的浊流完全有能力搬运粗碎屑,并且这些沉积物以逐层叠加的方式发生沉淀,而并非砂质碎屑流的整体固结方式^[14,35-36,57]。在大量的沉积物重力流沉积研究中确实发现很多牵引毯构造发育的粗碎屑砂体,将其解释为砂质碎屑流沉积显然不妥^[35-36,57,73]。实际上,砂质碎屑流和高密度浊流可能在自然界均有发育, Talling^[3]提出的沉积物重力流类型划分方案就将砂质碎屑流和高密度浊流作为2种不同流体类型。砂质碎屑流和高密度浊流的沉积物在大多数情况下可以被区分,但是这两种流体都能形成分层构造不发育的纯净块状砂岩^[3,74],如何区分到底是何种成因,现在仍然还是难题。

6.1.3 沉积物重力流搬运演化过程新认识

传统观点认为沉积物重力流沉积是垮塌沉积物或者洪水携带的沉积物沿盆地斜坡先加速搬运,然后减速

沉降的过程^[75],在搬运过程中随着环境水体的卷入会发生碎屑流向浊流的转化^[73]。近年来,混合沉积物重力流、超临界沉积物重力流的发现使研究者意识到沉积物重力流的搬运和沉降过程远比想像的要复杂^[17,19,23]。不同“源-汇”系统控制下的沉积物重力流在搬运的过程会呈现复杂的演化过程^[73],理想条件下沉积物重力流在搬运传输过程中可能会经历以下演化过程:碎屑流→侵蚀型高密度浊流(侵蚀型旋回坎)→小尺度沉积型高密度浊流(沉积型旋回坎)→大尺度沉积型高密度浊流(沉积型旋回坎)→侵蚀成因混合重力流→低密度浊流→流体减速成因混合重力流^[14,17,19,23,36],并且在演化的过程中高密度重力流形成的旋回坎沉积会往复出现,直到能量衰减向下一个阶段演化^[12,34]。

6.1.4 油气勘探开发新思路

全球深水勘探实践表明在墨西哥湾、巴西东部边缘、非洲西海岸、孟加拉湾、澳大利亚西北陆架及中国南海等主要的深水含油气盆地储集层均以重力流砂体为主,包含重力流水道和浊积扇两种主要类型^[76]。上文所述,超临界流作用是重力流水道的主要成因,重力流水道的发育及其改道是形成大型扇形储集体的有利条件^[77-79],如在孟加拉湾缅甸若开盆地油气勘探中发现了典型的重力流水道改道,发育分支水道的现象^[77]。在明确超临界流作用特征的基础上,分析重力流水道发育及改道的控制因素,能够为深水重力流水道及大型扇形储集体的分布预测提供科学依据^[24,78]。前期对重力流水道沉积内幕结构的研究主要集中于垂向叠置及侧向迁移特征,超临界沉积物重力流作用下的沉积物迁移演化特征表明,沿着流体搬运方向砂体的形态和规模同样发生明显变化^[25,53]。对沿着流体搬运方向重力流砂体分布的精细刻画能进一步加深对重力流水道砂体内幕结构的认识,为深水油气的高效勘探和开发提供理论指导。此外,陆相湖盆中发育的重力流水道及重力流扇体沉积可能与超临界沉积物重力流的作用存在密切关系^[10,49,80],重新审视超临界流作用下重力流砂体的沉积及分布规律,可能为湖相重力流砂体油气勘探提供新的活力。

6.2 存在的问题及攻关方向

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沉积学界的热点问题,由于研究起步相对较晚,加之重力流相关问题的复杂性,现阶段关于超临界沉积物重力流的流体动力学特征、形成演化过程及沉积识别标志等系列问题都还存在诸多争议^[5,11,14,34,36,57]。

6.2.1 存在的普遍性

Hughes Clarke^[11]对水下超临界沉积物重力流的实际监测进一步明确了超临界沉积物重力流发育的必

然性[图4(e)—图4(h)],但是超临界沉积物重力流存在的普遍性还有待具体证实^[5]。什么条件下才能形成超临界沉积物重力流,高密度的流体是否是产生超临界流的必要条件、低密度流体能否产生超临界流体、超临界流是否只在沉积近端斜坡边缘较陡部位发育、不同成因的沉积物重力流是否都能够产生超临界流体等问题还有待进一步的研究^[5,14,34,36,57]。就形成的沉积物特征来看,超临界沉积物重力流与异重流形成的粗碎屑沉积物特征十分相近^[18,36,57],并且已发现的大多数超临界沉积物重力流沉积都证实与洪水形成的异重流之间存在密切联系^[12,34,57,59-60]。虽然也有部分滑塌成因的超临界沉积物重力流的报道^[50],是否洪水成因的沉积物重力流较滑塌成因的沉积物重力流更容易达到超临界状态是值得进一步研究的问题。

6.2.2 识别标志

超临界沉积物重力流作用的准确识别标志,特别是野外或者岩心的沉积识别标志还有待进一步的完善^[5,14,36,57]。旋回坎构造目前被用来解释大多数深水盆地中的新月形波状底形^[19,33],实际上,关于这些波状底形的成因还存在沿铲式断层滑塌^[81]、基底地形影响^[82]、沉积物蠕变^[83]、底流改造^[84]等多种成因解释。因而,不同尺度的新月形波状底形是否都是水力跳跃作用形成,抑或是新月型的波状底形促进了水力跳跃作用^[5,19]?重力流水道及其内部的砂、砾质波状底形是否都为超临界流形成,是如何形成和演化的,大型线状排列的冲刷槽是否为超临界流形成的旋回坎抑或是局部过陡的沉积物垮塌^[5,19,24,61,67-68,85]?更重要的,超临界沉积物重力流形成的沉积物识别标志是什么,是如何保存的^[5,14,36,57]。Cartigny^[35]和Postma^[36]强调了分层构造、后积层理、侵蚀构造及软沉积物变形构造作为超临界沉积物重力流作用识别标志;Dietrich^[57]进一步识别出上攀交错层理、假前积层等识别标志,是否还有其他的识别标志有待于进一步的发现。

6.2.3 “源-汇”控制下的重力流演化过程

沉积物重力流的搬运演化过程是控制重力流砂体形成与分布的核心^[15,17,19,73,86]。随着异重流、混合沉积物重力流、超临界沉积物重力流的发现,对认识沉积物重力流的搬运演化过程提出了新的挑战^[17,19,23,87]。“源-汇”的沉积学基本原理是解释沉积现象的重要准则^[88]，“源-汇”系统的差异也是造成相同的沉积物重力流砂体演化过程差异性和多样性的根本原因^[4,5,10]。在认识到沉积物重力流类型及其成因多样性的基础上^[1,4,7,14,17-18,22,75],开展“源-汇”系统控制下的沉积物重力流流体演化及沉积过程综合研究,可能是解决现阶段沉积物重力流研究困惑的有效方法^[4,5]。

7 结 论

(1) 超临界沉积物重力流是指在深水环境中弗洛德数大于1,沿斜坡底部搬运的高密度流。超临界沉积物重力流在向深水盆地搬运的过程中在水力跳跃机制作用下会发生超临界流体与亚临界流体频繁转化,形成一系列向上游方向移动的大型阶梯状旋回坎。旋回坎的迎流面主要为亚临界流加速卸载形成的宽缓状沉积,背流面主要为超临界流作用下的水力跳跃作用形成的下降陡坎。

(2) 超临界沉积物重力流作用的沉积识别标志主要包括牵引毯作用形成的分层构造、后积层理、短波状上攀交错层理、假前积层等层理构造,水力跳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。不同强度水力跳跃控制下的沉积底形发生从稳定逆行沙丘、不稳定逆行沙丘、流槽-凹坑、旋回坎的有序变化;垂向上形成砾质旋回坎、砾质流槽-凹坑沉积充填、砂质不稳定逆行沙丘沉积、砂质分层沉积和沙纹沉积及正常沉积的有序组合。超临界沉积物重力流作用沉积及演化过程主要受流体沉积物浓度、流体流量、沉积物粒度、沉积速率等内部因素和地形坡度、坡折带位置、水深及可供侵蚀的沉积物特征等外部因素的综合控制。

(3) 超临界沉积物重力流是形成深水粗碎屑块状沉积及重力流水道沉积的重要机制,控制了重力流砂体整体分布形态;其沉积产物也是重力流砂体中相对优质储层发育和油气富集的主要砂体类型,是未来重力流砂体勘探与开发中应重点关注的对象。

致谢 成文之前,笔者就文中的部分观点与荷兰乌得勒支大学 George Postma 教授,英国杜伦大学 Matthieu Cartigny 博士,德国汉诺威莱布尼兹大学 Jutta Winsemann 教授,加拿大拉瓦尔大学 Alexandre Normandeau 博士进行了有益交流,在此表示感谢!审稿专家和编辑提供了诸多有益建议,谨致谢忱!

符号注释: F_r —弗洛德数; F_{rd} —水下弗洛德数; F_{r1} —超临界流体弗洛德数; F_{r2} —亚临界流体弗洛德数; U —流体速度, m/s; g —重力加速度, m/s^2 ; h —为流体深度, m; h_g —重力流流体厚度, m; C —悬浮沉积物的体积浓度; R —水下悬浮沉积物比重, $R = \rho_s / \rho - 1$, 无量纲; ρ_s —沉积物密度, g/cm^3 ; ρ —环境水体密度, g/cm^3 ; h_1 —超临界流体厚度, m; h_2 —亚临界流体厚度, m; ΔH —超临界与亚临界流体厚度差, m; H_j —水力跳跃。

参 考 文 献

- [1] MULDER T, ALEXANDER J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits[J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 269-299.
- [2] TALLING P J, AMY L A, WYNN R B. New insight into the evolution of large-volume turbidity currents; comparison of turbidite shape and previous modelling results[J]. *Sedimentology*, 2007, 54(4): 737-769.
- [3] 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.
- [4] TALLING P J, PAULL C K, PIPER D J W. How are subaqueous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active flows[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 125: 244-287.
- [5] TALLING P J, ALLIN J, ARMITAGE D A, et al. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(2): 153-169.
- [6] TALLING P J. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow; deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models[J]. *Geosphere*, 2013, 9(3): 460-488.
- [7] TALLING P J. On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density flows in different settings[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 155-182.
- [8] AMY L A, MCCAFFREY W D, TALLING P J. Special issue introduction; sediment gravity flows - recent insights into their dynamic and stratified/composite nature[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1897-1899.
- [9] GALY V, FRANCE-LANORD C, BEYSSAC O, et al. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system[J]. *Nature*, 2007, 450(7168): 407-410.
- [10] YANG Tian, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Status and trends in research on deep-water gravity flow deposits[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2015, 89(2): 610-631.
- [11] CLARKE J E H. First wide-angle view of channelized turbidity currents links migrating cyclic steps to flow characteristics[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11896.
- [12] CLARE M A, CLARKE J E H, TALLING P J, et al. Preconditioning and triggering of offshore slope failures and turbidity currents revealed by most detailed monitoring yet at a fjord-head delta[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 450: 208-220.
- [13] ALLIN J R, HUNT J E, TALLING P J, et al. Different frequencies and triggers of canyon filling and flushing events in Nazaré Canyon, offshore Portugal[J]. *Marine Geology*, 2016, 371: 89-105.
- [14] POSTMA G, CARTIGNY M J B. Supercritical and subcritical turbidity currents and their deposits—a synthesis[J]. *Geology*, 2014, 42(11): 987-990.
- [15] SHANMUGAM G. New perspectives on deep-water sandstones: implications[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 316-324.
- [16] XU J P, SEQUEIROS O E, NOBLE M A. Sediment concentrations, flow conditions, and downstream evolution of two turbidity

- currents, Monterey Canyon, USA[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, 89: 11-34.
- [17] 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.
- [18] ZAVALA C, ARCURI M. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: origin and distinctive characteristics[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 337: 36-54.
- [19] SYMONS W O, SUMNER E J, TALLING P J, et al. Large-scale sediment waves and scours on the modern seafloor and their implications for the prevalence of supercritical flows[J]. *Marine Geology*, 2016, 371: 130-148.
- [20] MULDER T, SYVITSKI J P M. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans [J]. *The Journal of Geology*, 1995, 103(3): 285-299.
- [21] MUTTI E, BERNOULLI D, LUCCHI F R, et al. Turbidites and turbidity currents from Alpine 'flysch' to the exploration of continental margins[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(1): 267-318.
- [22] PIPER D J W, NORMARK W R. Processes that initiate turbidity currents and their influence on turbidites: a marine geology perspective[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(6): 347-362.
- [23] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制[J]. *地学前缘*, 2016, 23: 1-15.
CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong, et al. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23: 1-15.
- [24] FILDANI A, HUBBARD S M, COVAULT J A, et al. Erosion at inception of deep-sea channels[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 41: 48-61.
- [25] COVAULT J A, KOSTIC S, PAULL C K, et al. Submarine channel initiation, filling and maintenance from sea-floor geomorphology and morphodynamic modelling of cyclic steps[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(4): 1031-1054.
- [26] DE LEEUW J, EGGENHUISEN J T, CARTIGNY M J B. Morphodynamics of submarine channel inception revealed by new experimental approach[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10886.
- [27] NORMARK W R. Growth patterns of deep-sea fans[J]. *AAPG Bulletin*, 1970, 54(11): 2170-2195.
- [28] MUTTI E, RICCI LUCCHI F. Le torbiditi dell'Appennino settentrionale; introduzione all'analisi di facies[J]. *Societa Geologica Italiana Memorie*, 1972, 11: 161-199.
- [29] WALKER R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62(6): 932-966.
- [30] MAYALL M, JONES E, CASEY M. Turbidite channel reservoirs—key elements in facies prediction and effective development[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(8): 821-841.
- [31] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.
- [32] XU J P, WONG F L, KVITEK R, et al. Sandwave migration in Monterey submarine canyon, central California[J]. *Marine Geology*, 2008, 248(3/4): 193-212.
- [33] CARTIGNY M J B, POSTMA G, VAN DEN BERG J H, et al. A comparative study of sediment waves and cyclic steps based on geometries, internal structures and numerical modeling[J]. *Marine Geology*, 2011, 280(1/4): 40-56.
- [34] NORMANDEAU A, LAJEUNESSE P, POIRÉ A G, et al. Morphological expression of bedforms formed by supercritical sediment density flows on four fjord-lake deltas of the south-eastern Canadian Shield (Eastern Canada) [J]. *Sedimentology*, 2016, 63(7): 2106-2129.
- [35] CARTIGNY M. Morphodynamics of supercritical high-density turbidity currents[D]. Utrecht; Utrecht University, 2012.
- [36] POSTMA G, KLEVERLAAN K, CARTIGNY M J B. Recognition of cyclic steps in sandy and gravelly turbidite sequences, and consequences for the Bouma facies model [J]. *Sedimentology*, 2014, 61(7): 2268-2290.
- [37] POSTMA G, HOYAL D C, ABREU V, et al. Morphodynamics of supercritical turbidity currents in the channel-lobe transition zone[M]// LAMARCHE G, MOUNTJOY J, BULL S. *Submarine Mass Movements and their Consequences*. Switzerland: Springer, 2016: 469-478.
- [38] PIPER D J W, SHOR A N, CLARKE J E H. The 1929 "grand banks" earthquake, slump, and turbidity current [J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1988, 229: 77-92.
- [39] WYNN R B, STOW D A V. Classification and characterisation of deep-water sediment waves[J]. *Marine Geology*, 2002, 192(1/3): 7-22.
- [40] WYNN R B, MASSON D G, STOW D A V, et al. Turbidity current sediment waves on the submarine slopes of the western Canary Islands[J]. *Marine Geology*, 2000, 163(1/4): 185-198.
- [41] WYNN R B, HUVENNE V A I, LE BAS T P, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 451-468.
- [42] KOSTIC S, SEQUEIROS O, SPINOWINE B, et al. Cyclic steps: a phenomenon of supercritical shallow flow from the high mountains to the bottom of the ocean[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2010, 3(4): 167-172.
- [43] LINTERN D G, HILL P R, STACEY C. Powerful unconfined turbidity current captured by cabled observatory on the Fraser River delta slope, British Columbia, Canada [J]. *Sedimentology*, 2016, 63(5): 1041-1064.
- [44] PARKER G, GARCIA M, FUKUSHIMA Y, et al. Experiments on turbidity currents over an erodible bed[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1987, 25(1): 123-147.
- [45] POSTMA G, CARTIGNY M, KLEVERLAAN K. Structureless, coarse-tail graded Bouma Ta formed by internal hydraulic jump of the turbidity current? [J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 219(1/4): 1-6.
- [46] ZHONG Guangfa, CARTIGNY M J B, KUANG Zenggui, et al. Cyclic steps along the South Taiwan Shoal and West Penghu submarine canyons on the northeastern continental slope of the South China Sea [J]. *Geological Society of America Bulletin*,

- 2015,127(5/6):804-824.
- [47] 吴因业,张天舒,冯荣昌,等.四川侏罗系半深湖环境的超临界流浊积砂体沉积特征:2015年全国沉积学大会沉积学与非常规资源,武汉,2015[C].武汉:长江大学,2015.
- WU Yinye,ZHANG Tianshu,FENG Rongchang,et al. Sedimentary characteristics of supercritical flow turbidite sand body in semi deep lake environment from Jurassic Sichuan Basin;National Sedimentological Congress of Sedimentology and Unconventional Resources,Wuhan,2015[C].Wuhan:Yangtze University,2015.
- [48] 鲜本忠,朱筱敏,岳大力,等.沉积学研究热点与进展:第19届国际沉积学大会综述[J].古地理学报,2014,16(6):816-826.
- XIAN Benzong,ZHU Xiaomin,YUE Dali,et al. Current hot topics and advances of sedimentology;a summary from 19th International Sedimentological Congress[J].Journal of Palaeogeography,2014,16(6):816-826.
- [49] YANG Tian,CAO Yingchang,WANG Yanzhong. A new discovery of the early cretaceous supercritical hyperpycnal flow deposits on Lingshan island, East China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition),2017,91(2):749-750.
- [50] KOSTIC S. Modeling of submarine cyclic steps: controls on their formation, migration, and architecture [J]. Geosphere,2011,7(2):294-304.
- [51] ALEXANDER J,MCLELLAND S J,GRAY T E,et al. Laboratory sustained turbidity currents form elongate ridges at channel mouths [J]. Sedimentology,2008,55(4):845-868.
- [52] CARTIGNY M J B,EGGENHUISEN J T,HANSEN E W M,et al. Concentration-dependent flow stratification in experimental high-density turbidity currents and their relevance to Turbidite Facies models [J]. Journal of Sedimentary Research,2013,83(12):1046-1064.
- [53] CARTIGNY M J B,VENTRA D,POSTMA G,et al. Morphodynamics and sedimentary structures of bedforms under supercritical-flow conditions: new insights from flume experiments [J]. Sedimentology,2014,61(3):712-748.
- [54] SEQUEIROS O E. Estimating turbidity current conditions from channel morphology: a Froude number approach [J]. Journal of Geophysical Research:Oceans,2012,117(C4):C04003.
- [55] FRICKE A T,SHEETS B A,NITTROUER C A,et al. An examination of Froude-supercritical flows and cyclic steps on a subaqueous lacustrine delta, Lake Chelan, Washington, U. S. A [J]. Journal of Sedimentary Research,2015,85(7):754-767.
- [56] ALEXANDER J,BRIDGE J S,CHEEL R J,et al. Bedforms and associated sedimentary structures formed under supercritical water flows over aggrading sand beds [J]. Sedimentology,2001,48(1):133-152.
- [57] DIETRICH P,GHIENNE J F,NORMANDEAU A,et al. Upslope migrating Bedforms in a Proglacial Sandur delta: cyclic steps from river-derived underflows? [J]. Journal of Sedimentary Research,2016,86(2):113-123.
- [58] COVAULT J A,KOSTIC S,PAULL C K,et al. Cyclic steps and related supercritical bedforms: building blocks of deep-water depositional systems, western North America [J]. Marine Geology,2016,doi:10.1016/j. margeo. 2016. 12. 009.
- [59] VENTRA D,CARTIGNY M J B,BIJKERK J F,et al. Supercritical-flow structures on a Late Carboniferous delta front: sedimentologic and paleoclimatic significance [J]. Geology,2015,43(8):731-734.
- [60] LANG J,WINSEMANN J. Lateral and vertical facies relationships of bedforms deposited by aggrading supercritical flows: from cyclic steps to humpback dunes [J]. Sedimentary Geology,2013,296:36-54.
- [61] FILDANI A,NORMARK W R,KOSTIC S,et al. Channel formation by flow stripping: large-scale scour features along the Monterey East Channel and their relation to sediment waves [J]. Sedimentology,2006,53(6):1265-1287.
- [62] GONG Chenglin,WANG Yingmin,PENG Xuechao,et al. Sediment waves on the South China Sea Slope off southwestern Taiwan: implications for the intrusion of the Northern Pacific Deep Water into the South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology,2012,32(1):95-109.
- [63] FAGHERAZZI S,SUN Tao. Numerical simulations of transportational cyclic steps [J]. Computers & Geosciences,2003,29(9):1143-1154.
- [64] KOSTIC S,PARKER G. The response of turbidity currents to a canyon-fan transition: internal hydraulic jumps and depositional signatures [J]. Journal of Hydraulic Research,2006,44(5):631-653.
- [65] 何起祥.沉积动力学若干问题的讨论 [J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(4):6-15.
- HE Qixiang. A discussion on sediment dynamics [J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2010,30(4):6-15.
- [66] LAMB M P,PARSONS J D,MULLENBACH B L,et al. Evidence for superelevation, channel incision, and formation of cyclic steps by turbidity currents in Eel Canyon, California [J]. Geological Society of America Bulletin,2008,120(3/4):463-475.
- [67] MAIER K L,FILDANI A,PAULL C K,et al. The elusive character of discontinuous deep-water channels: new insights from Lucia Chica channel system, offshore California [J]. Geology,2011,39(4):327-330.
- [68] HUBBARD S M,COVAULT J A,FILDANI A,et al. Sediment transfer and deposition in slope channels: deciphering the record of enigmatic deep-sea processes from outcrop [J]. Geological Society of America Bulletin,2014,126(5/6):857-871.
- [69] NORMANDEAU A,LAJEUNESSE P,ST-ONGE G. Submarine canyons and channels in the Lower St. Lawrence Estuary (Eastern Canada): morphology, classification and recent sediment dynamics [J]. Geomorphology,2015,241:1-18.
- [70] LOWE D R. Sediment gravity flows: II depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. Journal of Sedimentary Research,1982,52(1):279-297.
- [71] POSTMA G,NEMEC W,KLEINSPEHN K L. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement [J]. Sedimentary Geology,1988,58(1):47-61.
- [72] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents: are they sandy debris flows? [J]. Journal of Sedimentary Research,1996,66(1):2-10.
- [73] MUTTI E. Turbidite sandstones [M]. Parma: Agip, Istituto di geolo-

- gia, Università di Parma, 1992.
- [74] KNELLER B C, BRANNEY M J. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands[J]. *Sedimentology*, 1995, 42(4): 607-616.
- [75] STOW D A V, MAYALL M. Deep-water sedimentary systems: new models for the 21st century[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 125-135.
- [76] 范玉海, 屈红军, 张功成, 等. 世界主要深水含油气盆地储层特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(5): 135-145.
FAN Yuhai, QU Hongjun, ZHANG Gongcheng, et al. Reservoirs in the major oil-gas-bearing deepwater basins of the world and their characteristics[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 135-145.
- [77] 孙辉, 范国章, 吕福亮, 等. 孟加拉湾缅甸若开盆地上新统斜坡水道复合体沉积特征[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4): 695-703.
SUN Hui, FAN Guozhang, LÜ Fuliang, et al. Sedimentary characteristics of Pliocene slope channel complexes in the Rakhine basin, Offshore Myanmar[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 695-703.
- [78] LANG J, BRANDES C, WINSEMANN J. Erosion and deposition by supercritical density flows during channel avulsion and backfilling: field examples from coarse-grained deepwater channel-levée complexes (Sandino Forearc Basin, southern Central America)[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 349: 79-102.
- [79] 张文彪, 陈志海, 刘志强, 等. 深水水道形态定量分析及沉积模拟——以西非 Gengibre 油田为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(1): 41-49.
ZHANG Wenbiao, CHEN Zhihai, LIU Zhiqiang, et al. Morphology quantitative analysis and simulation of deepwater channel: a case study of Gengibre oilfield in west Africa[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(1): 41-49.
- [80] 袁静, 梁绘媛, 梁兵, 等. 湖相重力流沉积特征及发育模式——以苏北盆地高邮凹陷深凹带戴南组为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(3): 348-359.
YUAN Jing, LIANG Huiyuan, LIANG Bing, et al. Sedimentary characteristics and development model of lacustrine gravity flow: a case study of Dainan Formation in deep sag belt of Gaoyou depression, Northern Jiangsu Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(3): 348-359.
- [81] PAULL C K, USSLER W III, CARESS D W, et al. Origins of large crescent-shaped bedforms within the axial channel of Monterey Canyon, offshore California [J]. *Geosphere*, 2010, 6(6): 755-774.
- [82] KUBO Y, NAKAJIMA T. Laboratory experiments and numerical simulation of sediment-wave formation by turbidity currents [J]. *Marine Geology*, 2002, 192(1/3): 105-121.
- [83] LEE S H, CHOUGH S K. High-resolution (2-7 kHz) acoustic and geometric characters of submarine creep deposits in the South Korea Plateau, East Sea [J]. *Sedimentology*, 2001, 48(3): 629-644.
- [84] FLOOD R D. A lee wave model for deep-sea mudwave activity [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1988, 35(6): 973-983.
- [85] CORELLA J P, LOIZEAU J L, KREMER K, et al. The role of mass-transport deposits and turbidites in shaping modern lacustrine deepwater channels [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 515-525.
- [86] HUNEKE H, MULDER T. Deep-sea sediments [M]. Amsterdam: Elsevier, 2010.
- [87] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 深水重力流类型、沉积特征及成因机制——以济阳坳陷沙河街组三段中亚段为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1048-1059.
YANG Tian, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Types, sedimentary characteristics and genetic mechanisms of deep-water gravity flows: a case study of the middle submember in Member 3 of Shahejie Formation in Jiyang depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1048-1059.
- [88] DRISCOLL N, NITTROUER C. Source to sink studies [M]. Hawaii: University of Hawaii, 2000, 5: 1-24.

(收稿日期 2017-01-12 改回日期 2017-05-10 编辑 宋宁)

版权所有