

周期性阶坎的特征及其对深水沉积研究的意义

许小勇¹, 吕福亮¹, 王大伟², 王彬¹, 孙辉¹, 邵大力¹, 鲁银涛¹, 马宏霞¹

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国科学院深海科学与工程研究所

摘要 周期性阶坎(Cyclic Steps)是指浊流沉积中的长波状(波长/波高 ≥ 1)且向上游迁移的高流态底形,以内水跃为界,在海底陡坡和坡折位置常见。回顾了周期性阶坎及相关的超临界浊流底形研究的现状,并以高分辨率多波束测深数据和地震资料为基础,重点介绍了美国、加拿大、及中国南海地区发育的周期性阶坎特征,同时展示了加拿大斯阔米什前三角洲的浊流监测情况和数值模拟结果,讨论了周期性阶坎形成的控制因素和分布范围。通常,发育在活跃海底峡谷-水道内的周期性阶坎相对较小(波长几十米,波高几米),而发育在非受限的天然堤漫溢区和水道-朵体过渡带的周期性阶坎相对较大(波长上千米,波高上百米)。周期性阶坎等超临界浊流底形对陆坡区深水沉积的发育具有重要影响,开展相关研究有助于更好地理解水道-天然堤沉积体系的形成和演化过程,对深水油气储层结构的研究和预测具有指导意义。

关键词 周期性阶坎; 超临界浊流; 底形; 深水沉积

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

1 概况

随着全球深水油气勘探的不断发展,深水沉积储层越来越多地受到各国际石油公司的密切关注,最近十年全球超过一半的新增可采储量来自于深水区。但是,深水沉积的研究一直存在着一个巨大的难点——

无法直接对深水沉积的过程进行观察^[1-3],这导致了对深水沉积过程的理解不够深入。随着技术水平不断提升,目前已经利用先进的技术在全球多个位置开展了深水沉积的直接观测研究^[4-12],且主要针对峡谷-水道沉积结构单元。关于海底底形的研究比较多^[13](图1),其中大型波状底形是海底最为明显、分布最广且

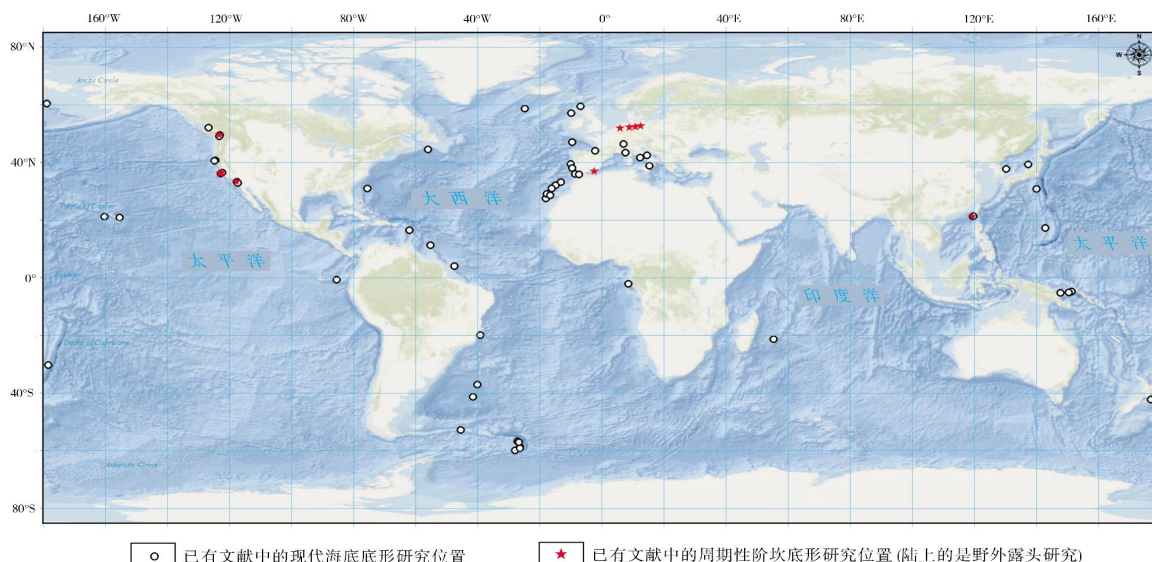


图1 全球海底底形研究分布图(据文献[13]修改)

收稿日期: 2017-11-12; 改回日期: 2018-03-23

本文受中国石油集团科技项目“海外海域油气地质条件与关键评价技术研究”(编号:2016D-4303)和国家自然科学基金项目“琼东南盆地深水重力流沉积演化规律与形成机理”(编号:41576049)资助

许小勇: 1983年生,2008年获中国地质大学(北京)硕士学位,工程师,主要从事深水沉积方面的研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: xuxy_hz@petrochina.com.cn

经常被描述的特征之一^[7,13-15],目前针对这些底形的类型划分和形成机理,仍然缺乏统一的认识。通过对海底的直接观测,以及近年来随着海洋深水油气勘探的深入,海上地震勘探和多波束测深数据等资料的精度不断提高,人们发现在海底峡谷-水道中常常发育一系列台阶状的底形,虽然规模大小不一,但都规律性地向上游迁移,这类底形最初被解释为沉积物波^[14],最近的研究表明,它们可能是超临界浊流形成的周期性阶坎(Cyclic Steps)^[16]。这类长波状(波长/波高 $\gg 1$)且向上游迁移的底形^[7,10-11,13-19],往往成串分布在海底的峡谷、水道和水道-朵体过渡带等结构单元中^[20](图2)。

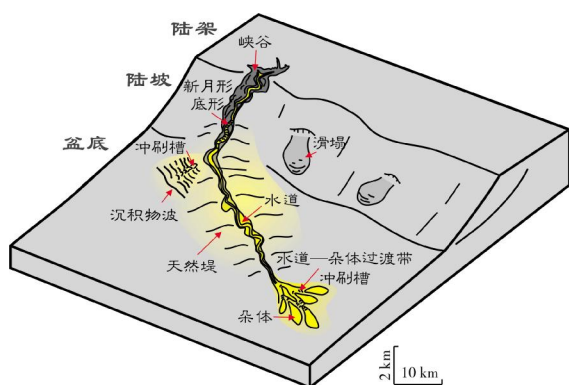


图2 大陆边缘深水沉积体系结构单元的一般模式
(据文献[20]修改)

周期性阶坎是近几年海底底形研究的热点。本文将主要阐述周期性阶坎底形的特征以及与其他底形的区别,回顾北美、南海等地区周期性阶坎的研究实例,并讨论分析周期性阶坎形成的控制因素,以及它们在大陆边缘深水沉积中的普遍性和重要性。

2 周期性阶坎的特征

2.1 超临界浊流

超临界流(Supercritical Flow),流体的速度超过波的传播速度,流体力学中用弗劳德数(Froude Number,用 Fr 表示)来判断:当 $Fr > 1$ 时,流体为超临界流;当 $Fr < 1$ 时,流体为亚临界流。水跃(Hydraulic Jump)是流体力学中的一种现象,当明渠中流体从高速的超临界流状态进入低速的亚临界流状态时,流体的速度突然变慢,流体的部分动能被紊流消散而转换为势能,造成液面明显升高的现象,称为水跃。

浊流的流体力学特征可以通过密度弗劳德数(Fr_d)来表征, Fr_d 是一个无量纲数,是流体惯性力和浮力的比值。这里将无量纲的密度弗劳德数简单地视为弗劳德数。浊流流体,当 $Fr_d > 1$ 时,称为超临界浊流;当 $Fr_d < 1$ 时,称为亚临界浊流。超临界浊流至亚临界浊流的转换,通过内水跃(Internal Hydraulic Jumps)这个不连续过程来实现^[21]。内水跃是指当浊流流体处在一个密度更低的环境流体中时所发生的水跃。超临界浊流在海底峡谷和水道陡坡处较常见,亚临界浊流在盆底和陆隆区的水道和朵体中常见^[22-23]。

2.2 周期性阶坎特征

周期性阶坎一词最早由Parker在1996年提出^[24],他和助手在进行明渠水槽模拟实验时,注意到在一定条件下会形成一系列向上游迁移的台阶状底形,且每一个台阶代表了一个超临界流区域,并在之后发生水跃,他们将这种底形称为周期性阶坎。

海底周期性阶坎由超临界浊流形成,表现为长波状(波长/波高 $\gg 1$),波长范围较广(几十米至几千米),剖面具向上游迁移的特征,阶坎之间以内水跃为界,内水跃发生在阶坎背流面和迎流面的坡折位置^[17,25](图3)。浊流在周期性阶坎的陡坡位置加速成为超临界浊流,使陡坡遭受侵蚀,随后在坡折位置发生内水跃,流速减缓形成亚临界浊流,并在缓坡处接受沉积。这类底形之前也被称为沉积物波或冲刷槽^[13-14]。

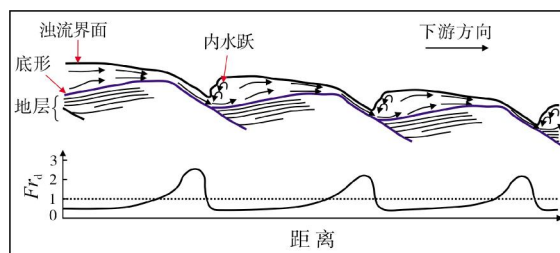


图3 周期性阶坎形成与密度弗劳德数(Fr_d)对应变化示意图(据文献[17,25]修改)

沉积物波是一个形态的概念,广泛应用于描述大型的(波长上百米至上千米,波高几米至上百米)、对称或不对称的、向上游迁移的波状底形^[14,26-32]。沉积物波通常发育在非限制性海底环境中,包括水道、天然堤等位置^[33-34],在活动峡谷中也可见新月形沉积物波^[15](图2)。Wynn等^[29]按沉积物波形成的流体机制细分出3类:底流成因,浊流成因和其他流体成因,

并进一步根据沉积物的粒度将前两者再分别细分出细粒和粗粒2类:(1)细粒底流沉积物波,波长可达10 km,波高可达150 m;(2)粗粒底流沉积物波,波长较小,一般小于200 m,波高几米;(3)细粒浊流沉积物波,波长可达7 km,波高可达80 m;(4)粗粒浊流沉积物波,波长通常达1 km,波高达10 m。Symons等^[13]也将陡坡侵蚀而缓坡沉积的混合波状底形和以沉积为主的波状底形统称为沉积物波。

总的来讲,沉积物波的概念比较宽泛,强调的是具有向上游迁移特征的地貌形态,但是并没有深入解释地貌形成的动力学机制。根据Wynn等的分类^[29],周期性阶坎应该属于浊流成因的沉积物波。周期性阶坎概念的引入,则从动力学角度解释了其形成过程以及周期性出现的原因,它对这类底形的描述更为精确。

冲刷槽是一种侵蚀型底形,切入海底,呈新月

形—近圆形的凹槽,通常形成于天然堤和水道—朵体过渡带,表现为一系列不对称的波状底形(波长几百至几千米,波高几十至上百米)^[13,16]。冲刷槽在现今海底,特征较为明显,但在地层记录中却很难保存下来。最近,通过数值模拟和地貌演变动态模拟(一种根据实际底形演化所进行的动态模拟)的研究表明,冲刷槽也可能是海底浊流形成的侵蚀型周期性阶坎^[16,35]。

Fildani等^[16]对美国蒙特雷水道谢波德湾(Shepard Mender)外侧的冲刷槽和沉积物波进行了研究,认为谢波德湾外侧的冲刷槽和沉积物波实际上都是超临界浊流形成的周期性阶坎,并通过地貌演变动态模拟的手段,模拟出了沉积型周期性阶坎和侵蚀型周期性阶坎^[16,35](图4)。随着时间推移,沉积型周期性阶坎在缓坡位置不断向上堆积,而侵蚀型周期性阶坎却在缓坡位置不断向下侵蚀。

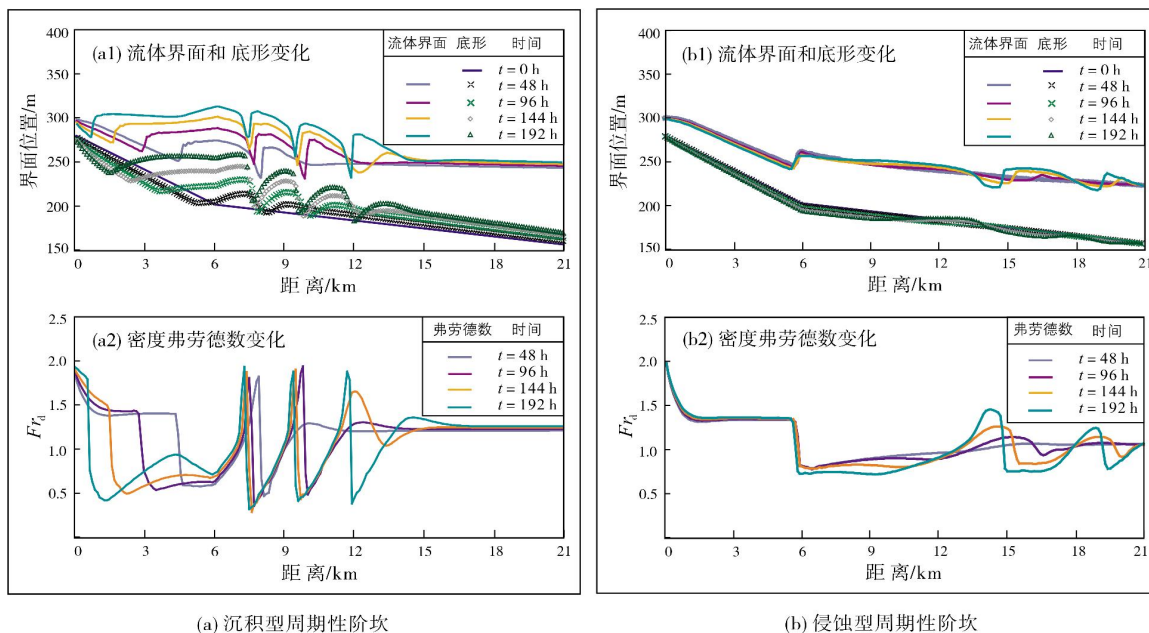


图4 地貌演变动态模拟结果证实存在沉积型和侵蚀型周期性阶坎(据文献^[16,35]修改)

海底周期性阶坎底形的发育,表明浊流的超临界状态并不一定沿陆坡维持很长的距离,而是通过内水跃,超临界浊流转变为亚临界浊流,然后再加速转变为超临界浊流的循环往复过程。内水跃导致海底周期性阶坎的产生,已经通过数值模拟^[16,35]、地貌演变动态模拟^[12,16]、物理实验模拟^[36-37]以及直接浊流监测^[10-12]等不同的技术手段得到证实,其中直接监测海底峡谷-水道浊流的数据还没有很多^[38],而针

对周期性阶坎野外露头的观察^[39]正在逐步展开,但对野外露头中沉积特征的识别还有待进一步深入。

2.3 周期性阶坎与其他超临界浊流底形的关系

海底周期性阶坎的形成与超临界浊流有关,但是超临界浊流形成的底形并不局限于这一种。Cartigny等^[40]通过精细的水槽模拟实验,归纳总结了超临界浊

流可能形成的底形类型, 包括稳定逆行沙丘(Stable Antidune)、不稳定逆行沙丘(Unstable Antidune)、槽

池(Chutes and Pools)和周期性阶坎(Cyclic Steps), 并对各类底形的特征进行了详细阐述(图5)。

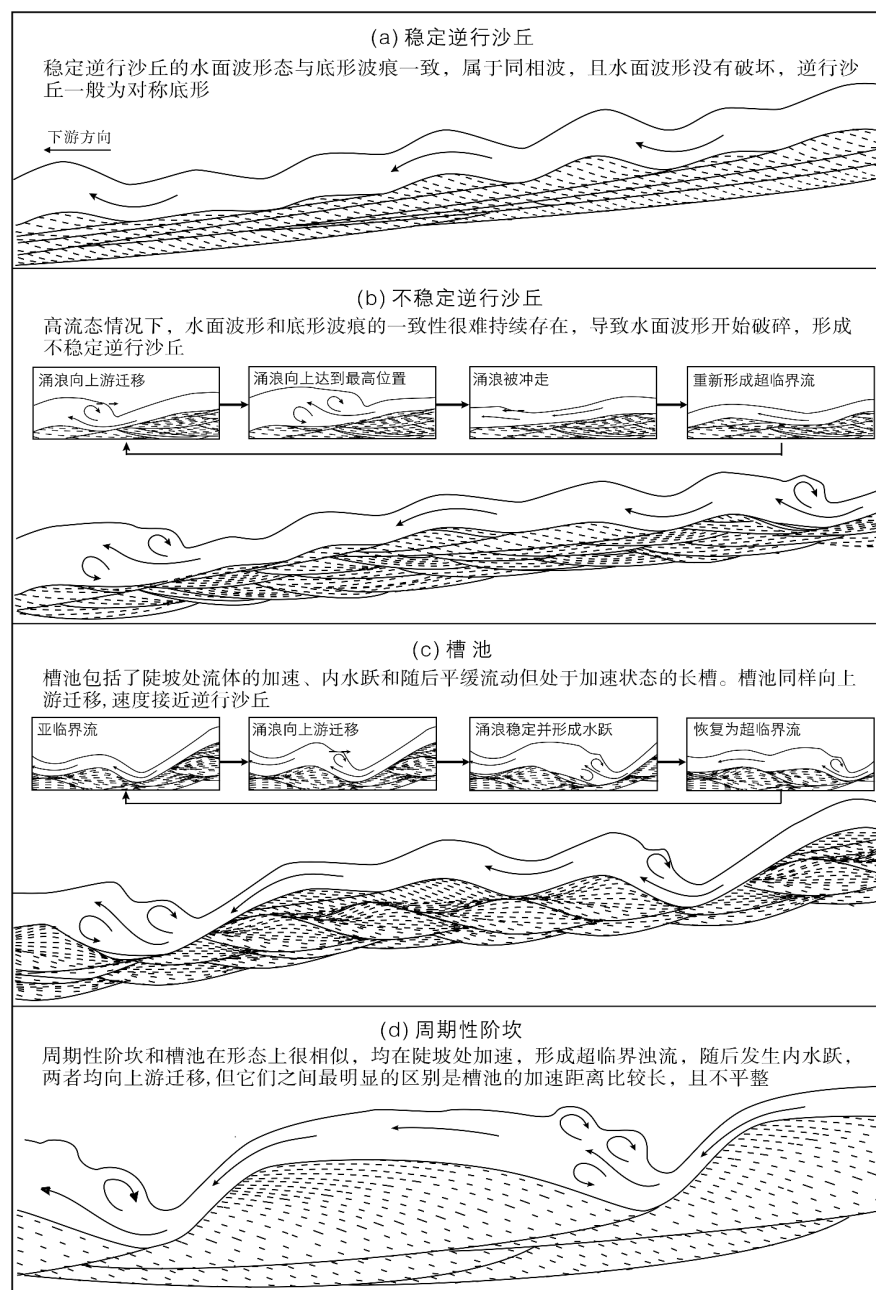


图5 超临界浊流底形分类及模式图(据文献[40]修改)

Cartigny等^[40]收集了前人发表的有关超临界流底形的文献资料, 结合自己水槽模拟的结果, 扩展讨论了底形与流体速度、沉积物粒度的关系(图6), 并用虚线绘制了周期性阶坎和槽池形成的速度和粒度范围^[40]。由图6可见, 超临界浊流形成的底形均属于

高流态底形, 速度一般大于上平行层理形成所需的速速, 通常形成周期性阶坎所需的速度要求最高, 而形成逆行沙丘所需的速度相对较低。水槽模拟实验中, 也观察到了上部发育周期性阶坎的底形, 而下部过渡为逆行沙丘底形^[37]。

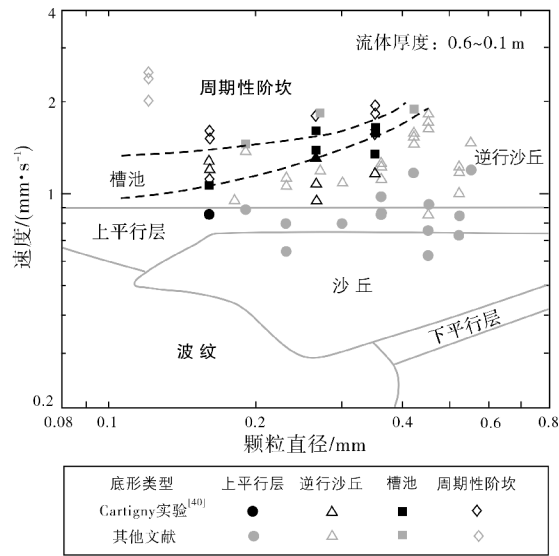


图6 超临界流底形与流速、沉积物粒度关系图(据文献[40]修改)

虽然在水槽实验中可以将逆行沙丘、槽池和周期性阶坎分别识别出来,但是由于它们形态相似,且都

具备向上游迁移的特征,故在实际资料中仅依据地貌特征要将它们区分开来并不容易。因此在实际研究中,往往将它们统称为周期性阶坎。Taki等^[41]曾提出可将槽池视为周期性阶坎的一种极限情况,其底形最陡的位置出现在内水跃位置的上游。

3 周期性阶坎研究实例

这里着重回顾北美和南海等地区发现的现代海底周期性阶坎的实例,以展示目前周期性阶坎底形的研究进展。

3.1 美国蒙特雷峡谷-水道体系

20世纪70年代以来,人们就开始研究加利福尼亚大陆边缘的沉积物波^[34,42]。由美国国家海洋和大气管理局采集的多波束测深数据,展示了与蒙特雷天然堤沉积相关的沉积物波(图7a,黄色框内),沉积物波围绕蒙特雷高弯度的谢波德湾展布,波长约几千米。沉积物波与水道方向略有倾斜,表明可能是由

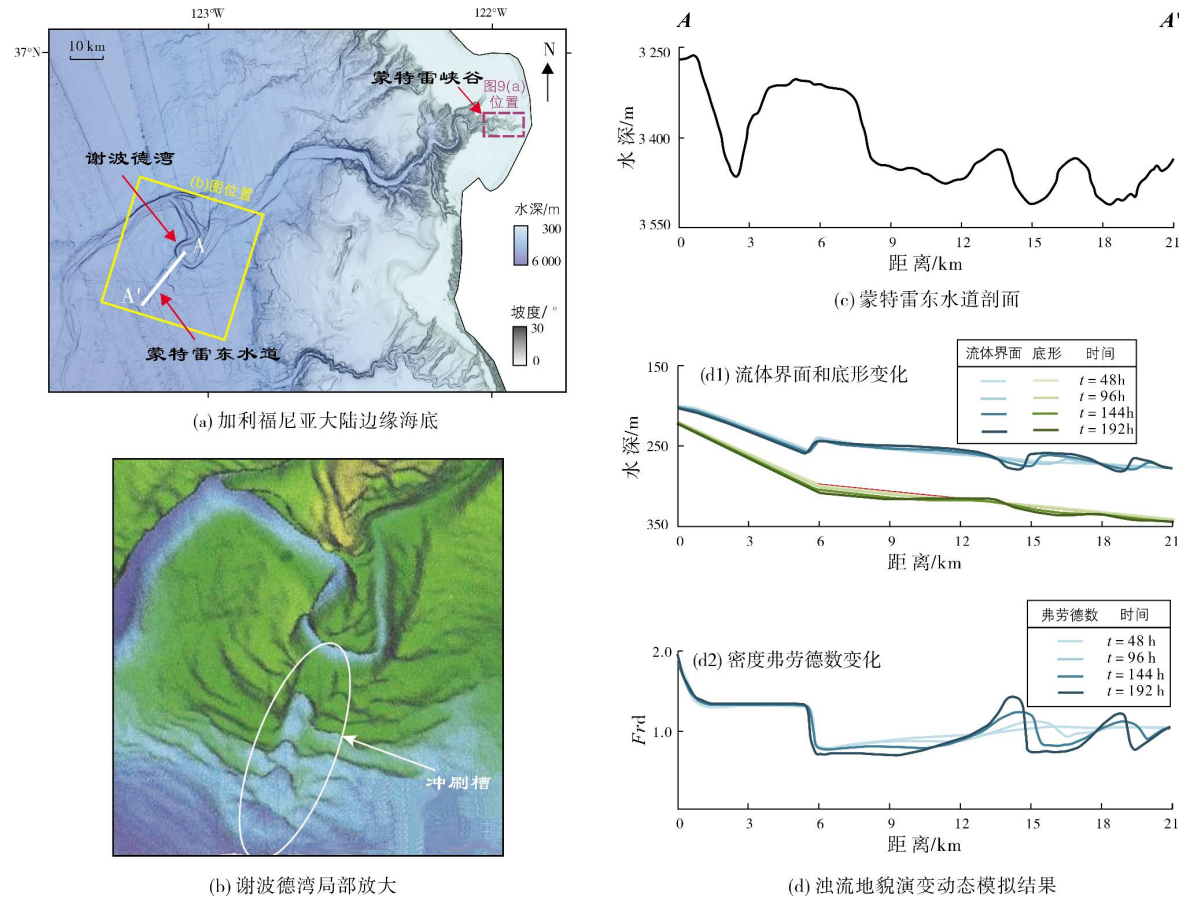


图7 美国蒙特雷东水道的周期性阶坎实例(据文献[20]修改)

天然堤漫溢出的水流形成的^[26]。Normark等^[34]认为谢波德湾天然堤发育的沉积物波是由超临界浊流形成的逆行沙丘。

Fildani等^[16]应用Kostic等^[43]建立的数值模型,证明了蒙特雷扇的谢波德湾周围的沉积物波是沉积型周期性阶坎。谢波德湾周围的沉积物波被一系列大型冲刷槽(宽3~5 km,长3~6 km,深80~200 m)切断,该地貌被命名为蒙特雷东水道(图7a, 7b)。Fildani等^[16]又将高分辨率地震反射数据与数值模拟结合起来,将蒙特雷东水道的冲刷槽解释为侵蚀型周期性阶坎(图7c, 7d),由水道中漫溢出的浊流侵蚀谢波德湾周围较老的沉积物波。Fildani等^[16, 44]将蒙特雷东水道的侵蚀型周期性阶坎进一步解释为新水道形成的初始阶段(图8a),随着漫溢浊流的不断发展,侵蚀型周期性阶坎可能逐渐演化为顺直水道(图8b),并最终演化为成熟的弯曲水道(图8c)。

Paull等^[15]通过振动取心、自主水下扫描等手段,研究了蒙特雷峡谷底部的沉积物波(图9),位于水深300 m左右,沉积物波的波长约50 m,波高几米。振动取心获取的沉积物中包含了重力流的沉积,Paull等^[15]认为,沉积物波可能是蒙特雷峡谷滑塌和滑动的结果,也可能是超临界浊流和亚临界浊流交

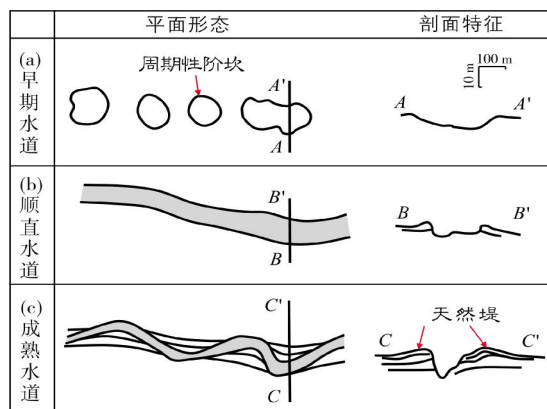
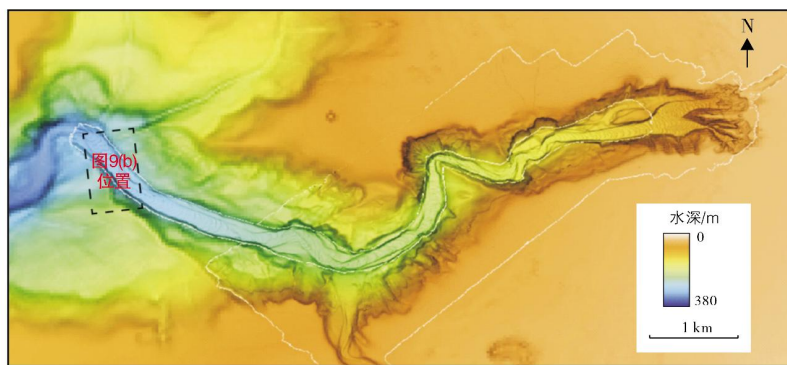
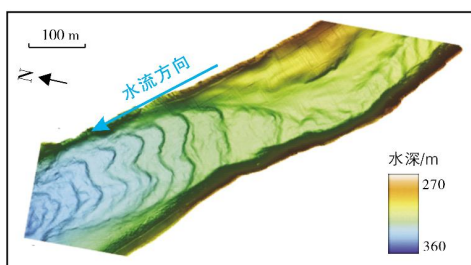


图8 侵蚀型周期性阶坎到成熟弯曲水道的演化示意图
(据文献[44]修改)

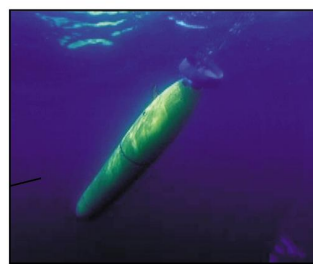
替产生的周期性阶坎。这一认识主要是基于蒙特雷峡谷沉积物波和沉积型周期性阶坎在形态上的相似性,以及与重力流沉积的相关性得出的。Cartigny等^[25]利用简化的重力流数值模型测试了周期性阶坎假说,证明了蒙特雷峡谷沉积物波的形态与超临界流和水跃产生的周期性阶坎的形态相一致。蒙特雷湾水族馆研究人员随后在加利福尼亚海底峡谷中也发现了类似的沉积物波^[45],这表明周期性阶坎很可能在维持海底峡谷形态的过程中发挥了重要作用。



(a) 蒙特雷峡谷上部的海底地貌图(位置见图7a中的紫色虚线框)



(b) 峡谷底部周期性阶坎局部放大



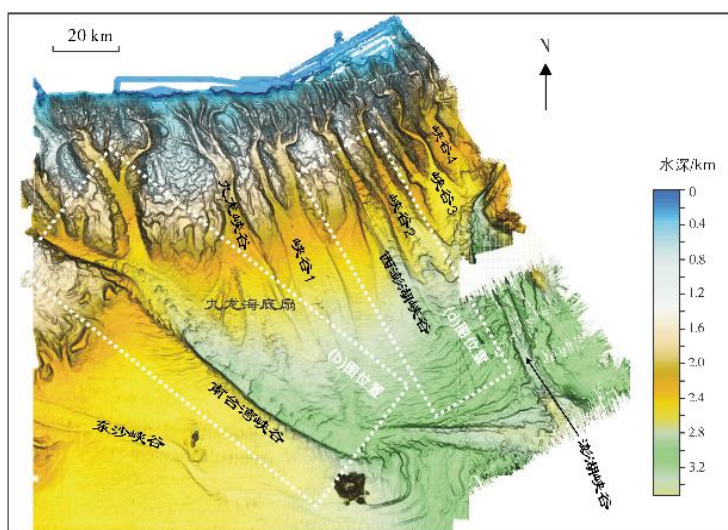
(c) 获取海底地形的自主水下航行器

图9 蒙特雷峡谷底部的周期性阶坎实例(据文献[15]修改)

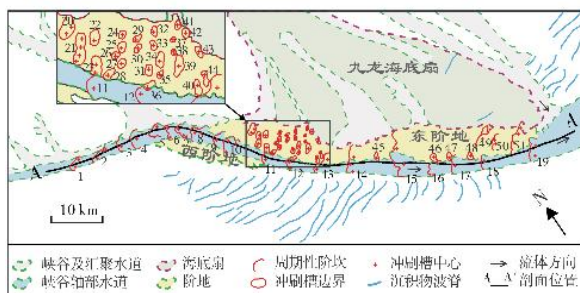
3.2 中国南海东北部陆坡峡谷

南海是亚洲大陆与太平洋之间的边缘海之一,盆地裂谷期为始新世—中新世。针对南海沉积物波的研究可以追溯到20世纪60年代末期,Fox等^[46]于1968年首次提到了南海沉积物波的存在。随着数据的不断丰富,过去10年间发表了众多有关南海波状底形的研究成果^[7,30-32]。

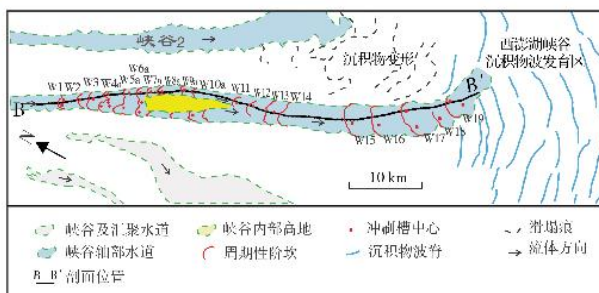
最近,Zhong等^[19]通过高分辨率多波束海底测深数据和地震资料,在南海东北部(东沙群岛与台湾岛之间)陆坡的南台湾峡谷和西澎湖峡谷发现了大量阶坎状底形^[35](图10a)。这些底形的波长1.2~10 km,波高5.4~80.9 m。Zhong等^[19]根据这些底形发育的特点(峡谷内呈列状分布,较大的波长/波高值,以及典型的向上游迁移特征),将其解释为超临界浊流形成的周期性阶坎。其中:在南台湾峡谷识别出了一列19个



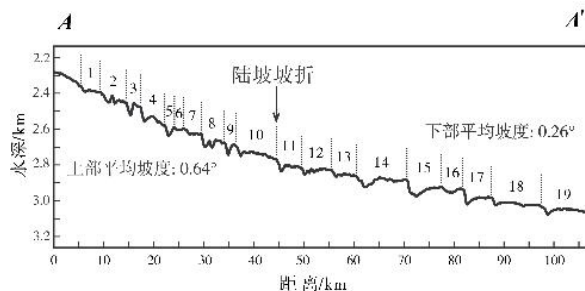
(a) 南海东北部峡谷多波束海底测深图



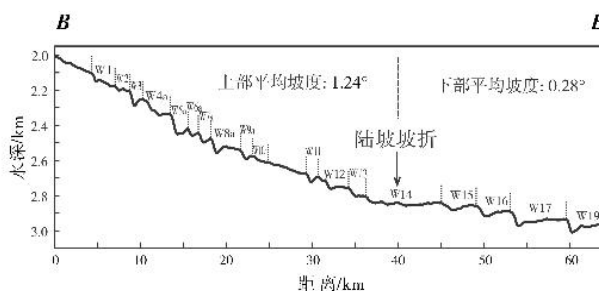
(b) 南台湾峡谷内发育的周期性阶坎及主要地貌特征线描图



(d) 西澎湖峡谷内发育的周期性阶坎和主要地貌特征线描图



(c) 南台湾峡谷内周期性阶坎的剖面特征及陆坡坡折的平均坡度变化



(e) 西澎湖峡谷内周期性阶坎的剖面特征及陆坡坡折的平均坡度变化

图10 南海东北部陆坡峡谷周期性阶坎实例(据文献^[19]修改)

连续的阶坎状底形,呈线状排列,长达100km(图10b, 10c),可能是迄今为止发现的最长的阶坎状底形;而西澎湖峡谷发育的阶坎状底形,可能属于逆行沙丘和周期性阶坎的过渡底形^[19](图10d, 10e)。这两处峡谷的平均坡度范围0.26°至1.24°(图10c, 10e)。粗略估计古流体厚度有100~300m,最大流速可达10m/s,估计的流体厚度与地貌分析推断的流体深度相吻合^[19]。

3.3 加拿大斯阔米什三角洲

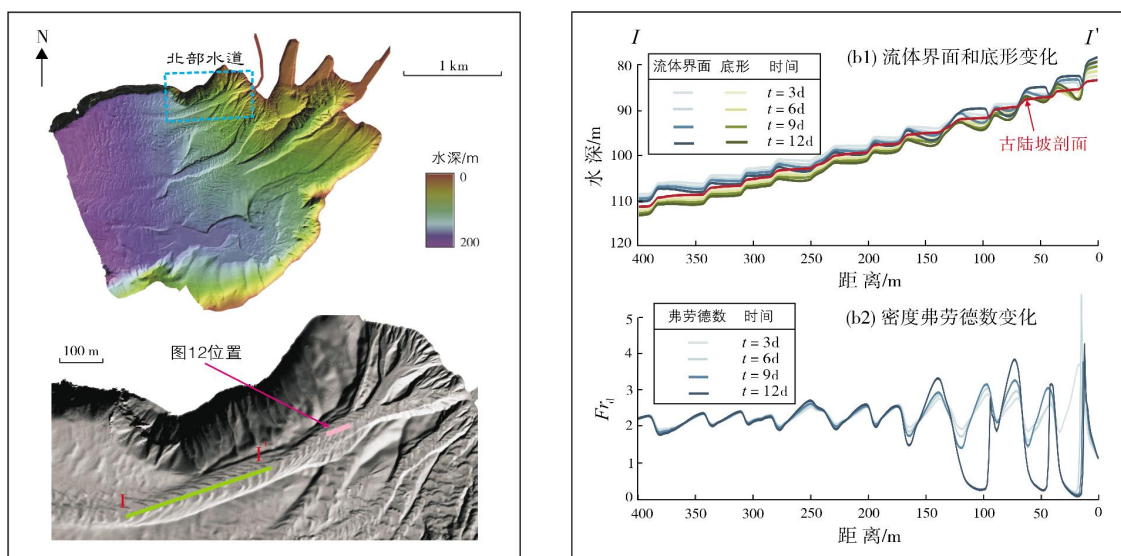
蒙特雷和南海的周期性阶坎实例的研究,主要是通过高分辨率海底地貌的观察以及结合数值模拟。而加拿大不列颠哥伦比亚省的斯阔米什三角洲的水下地形的持续测深分析(水深10~200m),则展示了高分辨率的地貌动态演变^[10-12]。斯阔米什三角洲的水下监测,主要用来记录海底滑塌产生的时间和特征^[11]。每年斯阔米什河都要向豪湾湖输送约 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的沉积物^[47]。

通过对斯阔米什前三角洲重复的(每隔1~3天,共4个月)、高分辨率的测量(频率 $(7 \sim 10) \times 10^4 \text{ Hz}$;水平分辨率1m,垂直分辨率约30cm),确定了海底滑塌的类型和范围,并观察到前三角洲水道内新月形沉积物波

向上游迁移的过程^[10-12](图11a)。监测期间,在水道内共监测到103次滑塌,有相当部分(49次)发生在北部的水道中。北部水道内的小型沉积物波(波长30~70m,波高2~3m)非常发育,水道的平均坡度约有 6° ^[10-12]。

2012年,采用多波束声纳水柱影像技术(Multibeam Water Column Imaging),直接记录到了浊流发生期间沉积物波的向上游迁移情况^[12]。水柱影像显示浊流与海底沉积物波相互作用,在地形坡折位置经历了明显的内水跃,随后在迎流面沉积,并受到过路流体的改造^[12]。此外,水柱影像还显示了流体的分层:底部高密度层和上部低密度层^[12,48]。这些过程非常类似于周期性阶坎之上的浊流。

通过对水道内底形地貌演变动态模拟分析(图11b),认为斯阔米什前三角洲北部水道内的新月形沉积物波,可能是介于周期性阶坎和逆行沙丘之间的高流态底形^[20]。由图11b可见,最上游的3个沉积物波是缓慢向上游迁移的周期性阶坎,其特征在于浊流的内水跃以及弗劳德数的变化;下游的沉积物波可能是逆行沙丘(底形和浊流界面的起伏相一致,流体为超临界流)。这与物理实验和数值模拟的结果一致,表明逆行沙丘和周期性阶坎可以同时出现^[37,43]。



(a) 斯阔米什前三角洲测深图(上图)及北部水道放大平面图(下图)

(b) 浊流地貌动态模拟结果($t-t'$ 剖面位置见图11a)

图11 加拿大斯阔米什前三角洲的周期性阶坎(据文献[20]修改)

海底直接监测的结果,同时还揭示了浊流对海底水道改造的巨大潜力,即便是在相对较短的时间内,水道也能发生较为明显的变化^[12](图12)。例如,2013年6月21日监测到了一次浊流事件,通过对比浊

流前后水道内底形的变化,可以明显观察到底形向上游迁移了大约5m的距离,同时水道内迎流面沉积厚度增加了约1m,而背流面遭受了侵蚀,最大侵蚀厚度达1.5m。

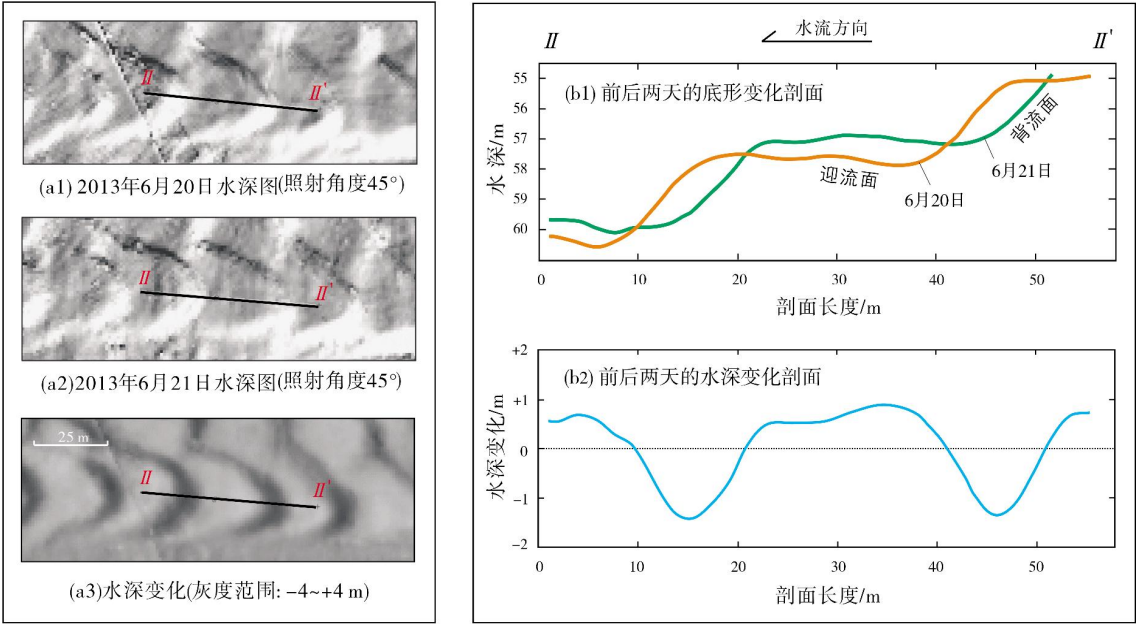


图12 加拿大斯阔米什三角洲浊流发生后水道底形的变化(据文献[12]修改)

4 讨论与分析

4.1 陆坡环境的超临界浊流

早在1971年,Komar^[21]就提出浊流在路过海底时应该处于超临界流状态,而在海底扇的上部水道内为亚临界流状态。随后,Komar结合密度弗劳德数公式和Middleton^[49]的稳定、均一浊流的平均速度公式,推算出当陆坡的坡度达到0.5°时,就可能具备产

生超临界流的条件^[50]。

Covault等^[20]根据美国海岸深度数据,计算了坡度大于0.544 3°的分布范围(图13),这一结果表明,在构造多变的美国海岸,浊流在穿过陆坡时非常容易形成超临界浊流。但是,在实际应用该结论时,仍然需要更谨慎一些^[20],因为推算出的结果是基于稳定的、均一的浊流假设,而自然环境中的浊流都是不稳定的、不均一的。

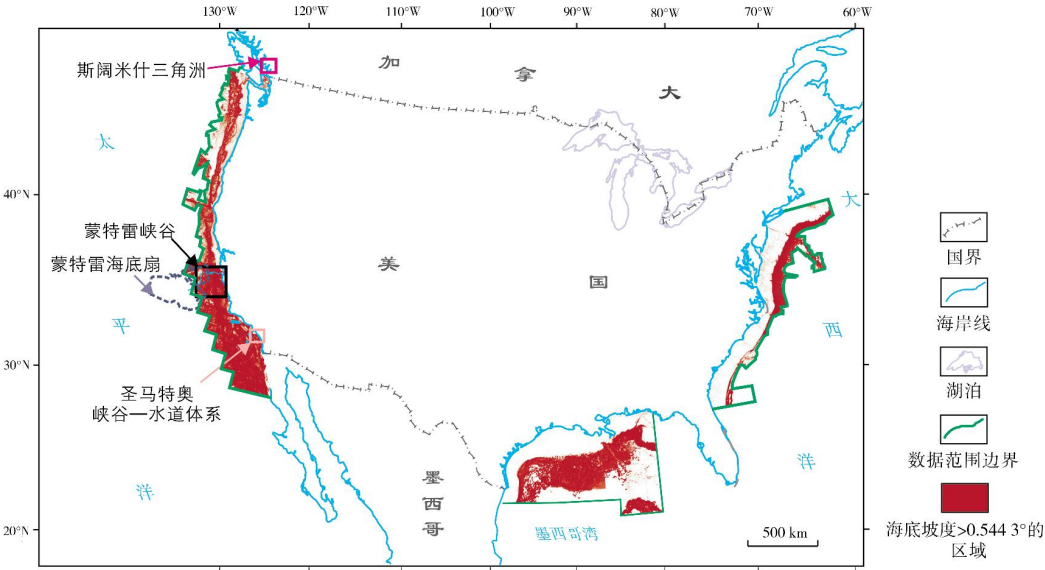


图13 美国海岸海底坡度大于0.544 3°的平面分布(据文献[20]修改)

4.2 周期性阶坎形成的控制因素

通过数值模拟的方法来分析,Kostic^[35]总结了关于沉积型周期性阶坎底形演变的控制因素,包括初始坡度、沉积物抗侵蚀能力、河床孔隙度、陆坡坡折长度、流体浓度、密度弗劳德数等6个方面(参见图14a—14f)。设定基础方案:流体深度20 m,颗粒大小80 μm ,抗侵蚀能力系数0.04(范围从0~1,分别对应固结岩床到未固结松散沉积物),河床孔隙度50%,陆

坡坡折长度6 km,流体(悬浮沉积物)浓度1%,地貌动态模拟结果如图14g所示。通过改变单因素变量(图14a—14f)的分析发现:坡度越陡,产生的周期性阶坎波长越短;沉积物浓度和河床孔隙度增加会导致产生周期性阶坎的数量增多。这与实际观察到的结果相符:近端峡谷和水道中,坡度较陡,沉积物浓度较高,产生了众多短波长的周期性阶坎;而在坡度相对较低的天然堤和远端水道-朵体过渡带,产生的周期性阶坎波长较长且数量较少。

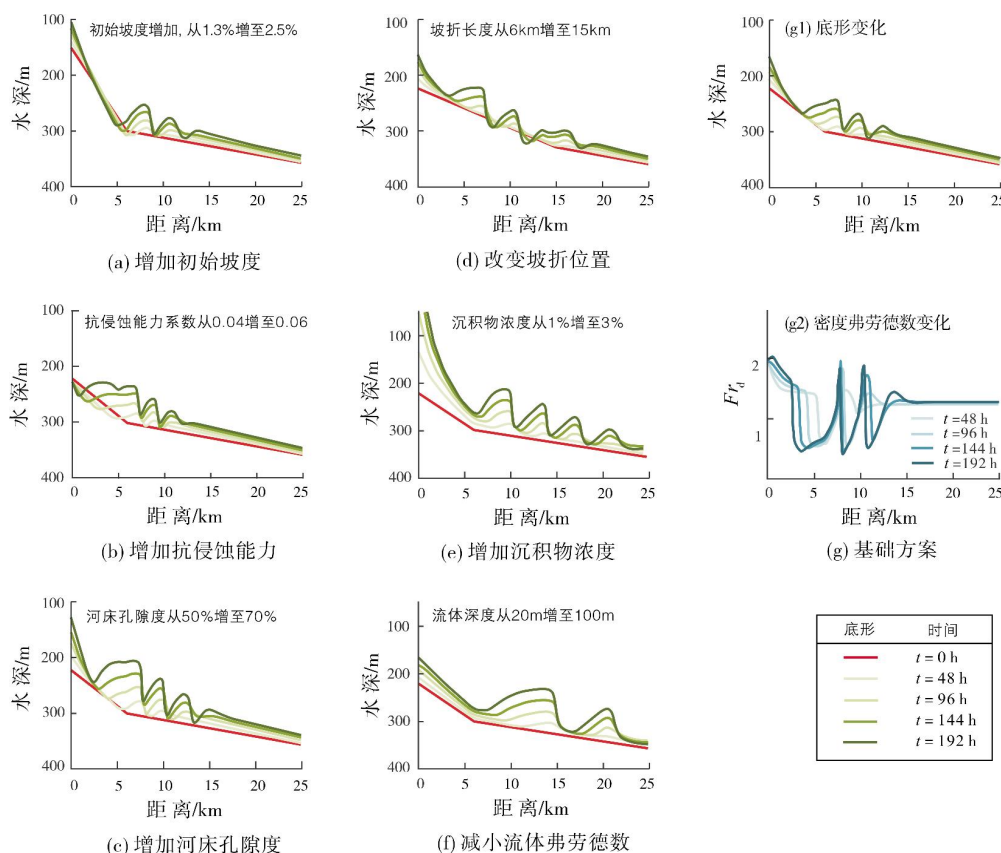


图14 改变不同因素的地貌动态模拟结果(据文献[35,20]修改)

4.3 对深水沉积储层预测的意义

Mutti等^[22]1987年根据浊流主要颗粒的大小,提出了水道-朵体过渡带的2个沉积模式:(1)粗粒沉积为主的浊流,在陆坡坡折的位置发生内水跃,产生大型冲刷槽。由于水跃期间的能量损失和水流能力的降低,使砂体沉积在陆坡坡折刚过一点的位置(图15a);(2)砂泥混合浊流,不会剧烈冲刷海底,且由于大量泥质的存在降低了沉降速度,使大部分沉积物搬运至更远的位置沉积(图15b)。这些早期沉积模式阐述了浊

流的演化和沉积,说明它们与流体的转换(内水跃期间由超临界浊流转变为亚临界浊流)相关。

Wynn等^[29]又根据海底成像和海底浅层资料,支持了上述水道-朵体过渡带的早期沉积模式,包括V形冲刷(宽2.5 km,深20 m)、叠合冲刷(宽达9 km)、沉积物波(波长1~2 km,波高4 m)等各种侵蚀和沉积特征。这些资料也展示了水道-朵体过渡带的各种形态特征可能与内水跃相关(图15c)。

另外,考虑到大陆边缘浊流中发生内水跃的可能性非常大,最近的研究已经在深水沉积露头的解释过

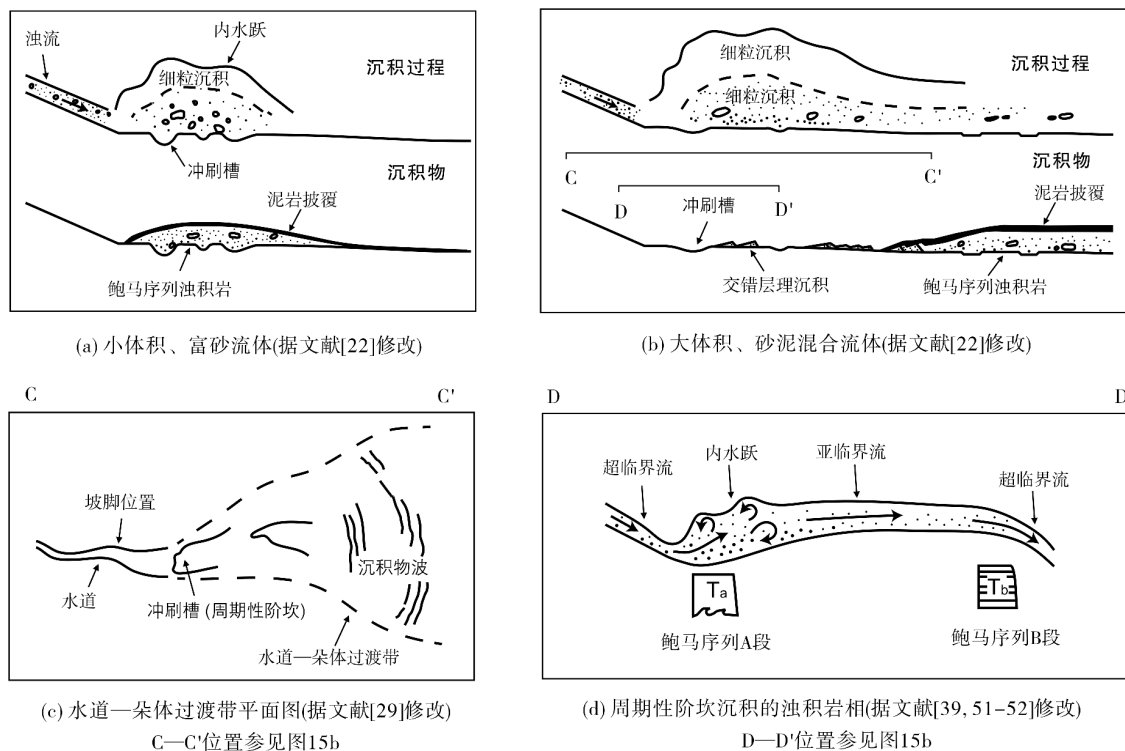


图15 水道—朵体过渡带超临界浊流经历内水跃的过程及其沉积物

程中考虑了周期性阶坎^[39, 51-52](图15d)。每个阶坎的岩相组合包括:块状、相对粗粒的砂岩层(T_a 段),底部可见塑性沉积变形,位于冲刷槽的下游,迎流面的上游;以及相对细粒、发育平行层理的砂岩(T_b 段)^[39, 53]。在野外露头中,周期性阶坎表现为平坦至透镜状的地层,单个阶坎可以发育几十米至上千米,退积层理发育并被侵蚀面截断^[39](图16,为简单起见,海底仅显示周期性阶坎中的一对冲刷槽内)。

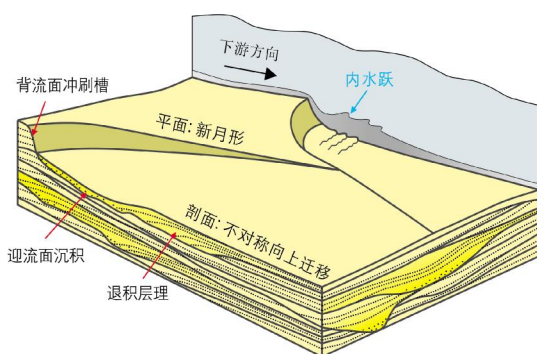
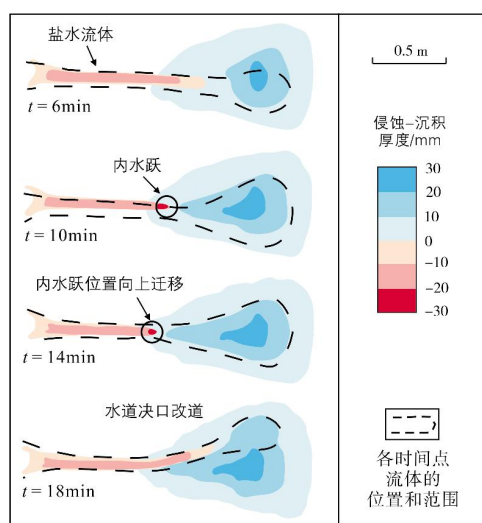


图16 周期性阶坎相关的沉积立体图(据文献[39]修改)

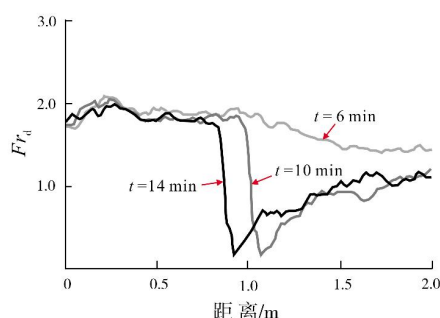
Hamilton等^[54]通过物理模拟实验,展示了水道—朵体过渡带浊流的地貌动态特征(图17)。图17是用

盐水密度流和塑料颗粒来模拟持续浊流过程及其沉积物的实验结果。超临界浊流在水道口发生内水跃产生沉积,水道口的沉积进一步促使内水跃的发生,导致沉积物在水道内向上游沉积充填,最终导致水流改道。这在一定程度上可用来解释为什么陡坡扇体往往比较小,陡坡位置通常容易发生超临界流和亚临界流的转化,从而形成周期性阶坎,而周期性阶坎的不断向上游迁移,进而导致水道的改道和扇体的迁移^[54]。

用岩相特征来识别野外露头长波状的周期性阶坎仍然存在巨大的挑战,因为许多露头的规模比较有限,能够完全展现波状几何形状的露头实例非常少。另外,浊积岩中层理的发育和缺失主要受沉降速率的影响^[55],厚层、粗粒、块状或正粒序的浊积岩可以沉积在任何位置(只要地层的沉积速率足以抑制其层理的发育),且这些位置并不一定需要与内水跃相关。研究表明,大量的深水砂岩沉积在坡度较低的广阔的盆底区^[56-57],但是在这些环境中,超临界浊流不可能占主导地位,即使是位于大型海底水道中的浊流,在坡度较低的陆隆和盆底位置也可能是亚临界流(例如亚马孙海底扇的水道)^[58]。



(a) 地貌动态模拟



(b) 密度弗劳德数的变化

图17 水道-朵体过渡带浊流地貌动态模拟实验
(据文献[20,54]修改)

5 认识与展望

目前,通过物理实验模拟、数值模拟、地貌动态模拟和海底直接监测等手段,已经证实周期性阶坎在高山、河流、深水盆地等沉积环境中普遍存在。周期性阶坎及相关超临界流底形正受到越来越多的关注,它们是陆坡区深水沉积体系地貌动态演化的重要组成部分。北美海域研究实例表明,周期性阶坎及其相关超临界流可能在水道的产生和演化中有着非常重要的作用。此外,针对野外露头中周期性阶坎的研究也在逐渐展开,但是,纯粹通过野外露头岩相特征来识别周期性阶坎仍然存在非常大的挑战。

未来周期性阶坎及超临界流沉积的研究方向包括:(1)针对浊流特征的直接观察和测量研究,进一步明确超临界浊流和亚临界浊流在深水沉积中各自扮演的角色;(2)加强国际合作,充分整合各方资料,

应对深海观察和测量大规模浊流存在的挑战;(3)加强野外露头研究,通过大范围野外露头剖面的对比,进一步解释周期性阶坎和超临界流沉积的岩相特征,以及它们在深水沉积体系演化过程中的重要性。通过对周期性阶坎的研究,可以揭示深水浊流的沉积过程,为深水油气储层预测提供理论研究基础。

参考文献

- [1] WEIMER P, SLATT R J. 深水油气地质导论[M]. 姚根顺, 吕福亮, 范国章, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [2] 徐景平. 科学与技术并进——近 20 年来海底峡谷浊流观测的成就和挑战[J]. 地球科学进展, 2013, 28(5): 552-558.
- [3] 徐景平. 海底浊流研究百年回顾[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(10): 98-105.
- [4] XU J P. Normalized velocity profiles of field-measured turbidity current[J]. Geology, 2010, 38(6): 563-566.
- [5] XU J P. Measuring currents in submarine canyons: technological and scientific progress in the past 30 years[J]. Geosphere, 2011, 7(4): 868-876.
- [6] XU J P, NOBLE M A, ROSENFELD L K. In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents[J]. Geophysical research letters, 2004, 31(9): 9311.
- [7] 钟广法, 李前裕, 郝沪军, 等. 深水沉积物波及其在南海研究之现状[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 907-913.
- [8] ANDRIEUX O, COOPER C K, WOOD J. Turbidity current measurements in the Congo Canyon[C]//Offshore Technology Conference, 2013, Houston, USA.
- [9] CARTER L, MILLIMAN J, WYNN R B, et al. Typhoon flood and earthquakes form long distance sediment flows through the deep ocean off Taiwan[J]. Geophysical research letters, 2012, 39(12): 12603.
- [10] HUGHES CLARKE J E, BRUCKER S, MUGGAH J, et al. Temporal progression and spatial extent of mass wasting events on the Squamish prodelta slope[M]//Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding. London: Taylor and Francis Group, 2012: 1091-1096.
- [11] HUGHES CLARKE J E, VIDERA MARQUES C R, PRATOMO D. Imaging active mass-wasting and sediment flows on a Fjord delta, Squamish, British Columbia[M]//Submarine mass movements and their consequences. Springer International Publishing, 2014: 249-260.
- [12] HUGHES CLARKE J E. First wide-angle view of channelized turbidity currents links migrating cyclic steps to flow characteristics[J]. Nature communications, 2016, 10(7): 11896.
- [13] 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.
- [14] WYNN R B, PIPER D J, GEE M J. Generation and migration of coarse-grained sediment waves in turbidity current channels and channel-lobe transition zones[J]. Marine geology, 2002, 192(1): 59-78.

- [15] PAULL C K, USSLER W, CARESS D W, et al. Origins of large crescent-shaped bedforms within the axial channel of Monterey Canyon[J]. *Geosphere*, 2010, 6(6): 755-774.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] BABONNEAU N, DELACOURT C, CANCOUËT R, et al. Direct sediment transfer from land to deep-sea: insights into shallow multibeam bathymetry at La Réunion Island[J]. *Marine geology*, 2013, 346: 47-57.
- [19] ZHONG G, CARTIGNY M J, KUANG Z, 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]. *GSA bulletin*, 2015, 127(5/6): 804-824.
- [20] 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, 393: 4-20.
- [21] KOMAR D P. Hydraulic jumps in turbidity currents[J]. *GSA bulletin*, 1971, 82(6): 1477-1488.
- [22] MUTTI E, NORMARK W R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: problems and concepts [M]// LEGGETT J K, ZUFFA G G. *Marine clastic sedimentology: concepts and case study*. Graham & Trotman, 1987: 1-38.
- [23] PIPER D J, NORMARK W R. Sandy fans—from Amazon to Hueneme and beyond[J]. *AAPG bulletin*, 2001, 85(8): 1407-1438.
- [24] PARKER G. Interaction between basic research and applied engineering: a personal perspective[J]. *Journal of hydraulic research*, 1996, 34(3): 291-316.
- [25] CARTIGNY M J, 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): 40-56.
- [26] MIGEON S, SAVOYE B, FAUGERES J C. Quaternary development of migrating sediment waves in the Var deep-sea fan: distribution growth pattern and implication for levee evolution[J]. *Sedimentary geology*, 2000, 133(3): 265-293.
- [27] WYNN R B, WEAVER P P, ERCILLA G, et al. Sedimentary processes in the selvage sediment-wave field NE Atlantic: new insights into the formation of sediment waves by turbidity currents[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(6): 1181-1197.
- [28] NORMARK W R, PIPER D J, POSAMENTIER H, et al. Variability in form and growth of sediment waves on turbidite channel levees[J]. *Marine geology*, 2002, 192(1): 23-58.
- [29] WYNN R B, STOW D A. Classification and characterisation of deep-water sediment waves[J]. *Marine geology*, 2002, 192(1): 7-22.
- [30] 王海荣,王英民,邱燕,等. 南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(9): 1235-1243.
- [31] 王海荣,王英民,邱燕,等. 南海东北部台湾浅滩陆坡的浊流沉积物波的发育及其成因的构造控制[J]. *沉积学报*, 2008, 26(1): 39-45.
- [32] 丁巍伟,李家彪,韩喜球,等. 南海东北部海底沉积物波的形态、粒度特征及物源、成因分析[J]. *海洋学报*, 2010, 32(2): 96-105.
- [33] DAMUTH J E. Migrating sediment waves created by turbidity currents in the northern South China Basin[J]. *Geology*, 1979, 7(11): 520-523.
- [34] NORMARK W R, HESS G R, STOW D A V, et al. Sediment waves on the Monterey Fan levee: a preliminary physical interpretation[J]. *Marine geology*, 1980, 37(1): 1-18.
- [35] KOSTIC S. Modeling of submarine cyclic steps: controls on their formation migration and architecture[J]. *Geosphere*, 2011, 7(2): 294-304.
- [36] TONIOLO H, CANTELLI A. Experiments on upstream-migrating submarine knickpoints[J]. *Journal of sedimentary research*, 2007, 77(9): 772-783.
- [37] SPINOWINE B, SEQUEIROS O E, GARCIA M H, et al. Experiments on wedge-shaped deep sea sedimentary deposits in minibasins and/or on channel levees emplaced by turbidity currents. Part II. Morphodynamic evolution of the wedge and of the associated bedforms[J]. *Journal of sedimentary research*, 2009, 79(8): 608-628.
- [38] 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.
- [39] POSTMA G, KLEVERLAAN K, CARTIGNY M J. Recognition of cyclic steps in sandy and gravelly turbidite sequences and consequences for the Bouma facies model[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(7): 2268-2290.
- [40] CARTIGNY M J, 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.
- [41] TAKI K, PARKER G. Transportational cyclic steps created by flow over an erodible bed. Part 1. Experiments[J]. *Journal of hydraulic research*, 2005, 43(5): 488-501.
- [42] HESS G R, NORMARK W R. Holocene sedimentation history of the major fan valleys of Monterey Fan[J]. *Marine geology*, 1976, 22(4): 233-251.
- [43] 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.
- [44] FILDANI A, HUBBARD S M, COVAULT J A, et al. Erosion at inception of deep-sea channels[J]. *Marine and petroleum geology*, 2013, 41(1): 48-61.
- [45] TUBAU X, PAULL C K, LASTRAS G, et al. Submarine canyons of Santa Monica Bay Southern California: variability in morphology and sedimentary processes[J]. *Marine geology*, 2015, 365: 61-79.
- [46] FOX P J, HEEZEN B C, HARIAN A M. Abyssal anti-dunes[J].

- Nature, 1968, 220: 470-472.
- [47] HICKIN E J. Contemporary Squamish River sediment flux to Howe Sound British Columbia[J]. Canadian journal of earth sciences, 1989, 26(10): 1953-1963.
- [48] TALLING P J, PAULL C K, PIPER D J. 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.
- [49] 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.
- [50] KOMAR P D. Supercritical flow in density currents: a discussion [J]. Journal of sedimentary research, 1975, 45(3): 747-753.
- [51] 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.
- [52] 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): 1-6.
- [53] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier, 1962.
- [54] HAMILTON P B, STROM K B, HOYAL D C. Hydraulic and sediment transport properties of autogenic avulsion cycles on submarine fans with supercritical distributaries[J]. Journal of Geophysical research: earth surface, 2015, 120(7): 1369-1389.
- [55] SYLVESTER Z, LOWE D R. Textural trends in turbidites and slurry beds from the Oligocene flysch of the East Carpathians Romania[J]. Sedimentology, 2004, 51(5): 945-972.
- [56] RICCI LUCCHI F, VALMORI E. Basin-wide turbidites in a Miocene over-supplied deep-sea plain: a geometrical analysis [J]. Sedimentology, 1980, 27(3): 241-270.
- [57] AMY L A, TALLING P J. Anatomy of turbidites and linked debrites based on long distance(120×30 km) bed correlation, Marnoso Arenacea Formation, Northern Apennines, Italy[J]. Sedimentology, 2006, 53(1): 161-212.
- [58] PIRMEZ C, IMRAN J. Reconstruction of turbidity currents in Amazon Channel[J]. Marine and petroleum geology, 2003, 20 (6): 823-849.

编辑:董庸

Cyclic steps and significance to deep water sedimentation

XU Xiaoyong, Lü Fuliang, WANG Dawei, WANG Bin,
SUN Hui, SHAO Dali, LU Yintao, MA Hongxia

Abstract: Cyclic steps refer to the bedforms of long-wave (the ratio of wavelength to wave height $\gg 1$), migrating upstream and being upper-flow-regime in turbidity current. They are bounded by internal hydraulic jump and commonly occur at steep slopes and slope breaks. This paper reviews the research status of cyclic steps and other related supercritical bedforms. Three examples from continental margins in United States, Canada, and South China Sea are presented based on high-resolution multi-beam sonar data and seismic data. This paper also present the results of monitoring and numerical modeling of turbidity currents in the Squamish prodelta, British Columbia, Canada. The controlling factors and the distribution of cyclic steps were discussed based on numerical modeling. The cyclic steps in active submarine canyon-channel system are relatively small (tens of meters in wavelength and few meters at height), while the cyclic steps in the unconfined levee system and the channel-lobe transition zone are relatively larger (above one kilometer in wavelength and hundreds of meters at height). Cyclic steps and related supercritical turbidity bedforms may have important influence for the deep water sediments in slope area, which can help to better understand the evolution of deep water channel-levee system, and to predict the oil and gas reservoirs of deep water.

Key words: cyclic steps; supercritical current; bedforms; deep water sediments

XU Xiaoyong: MSc, Geological Engineer, focused on deep water sedimentology. Add: No. 920, Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China