



## 河流—波浪—潮汐混合作用过程研究进展

彭旸, 龚承林, 李顺利

引用本文:

彭旸, 龚承林, 李顺利. 河流—波浪—潮汐混合作用过程研究进展[J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 957–978.

PENG Yang, GONG ChengLin, LI ShunLi. Recent Advances in River-Wave-Tide Mixed Processes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(4): 957–978.

### 相似文章推荐（请使用火狐或IE浏览器查看文章）

#### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

##### 河控三角洲生长的动力和沉积模式

Dynamic and Sedimentary Models of River-dominated Delta Growth

沉积学报. 2021, 39(2): 374–382 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.029>

##### 长江远端三角洲多源沉积分异作用及其动力机制

Sedimentary Differentiation and Hydrodynamic Environment of Multi-sourced Sediment in the Changjiang Distal Delta

沉积学报. 2020, 38(3): 528–537 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.064>

##### 西湖凹陷渐新世层序地层格架与沉积充填响应

Oligocene Sequence Framework and Depositional Response in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin

沉积学报. 2017, 35(2): 299–314 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.009>

##### 海相三角洲沉积单元划分及其对勘探砂体对比的意义——基于现代珠江三角洲沉积水动力综合研究

Depositional Elements Definition of Marine Delta and Significance to Sand Body Correlation in Petroleum Exploration: From hydrodynamic analysis on modern Pearl River Delta

沉积学报. 2016, 34(3): 555–562 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.03.013>

##### 潮汕地区全新世障壁海岸三角洲沉积演化与砂体展布

Sedimentary Evolution and Sand-Body Distribution of Holocene Period, Barrier-Coast Delta, Chaoshan Region

沉积学报. 2015, 33(4): 706–712 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.04.009>

文章编号:1000-0550(2022)04-0957-22

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.154

# 河流—波浪—潮汐混合作用过程研究进展

彭旸<sup>1,2</sup>, 龚承林<sup>2</sup>, 李顺利<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

**摘要** 河流、波浪和潮汐混合作用过程是当前沉积学的热点问题。通过梳理三角洲与其他一些海(湖)陆过渡沉积体系中关于河流—波浪、河流—潮汐、波浪—潮汐和河流—波浪—潮汐相互作用的相关研究, 归纳总结了目前几种沉积过程的相互作用以及相应的沉积特征。河流和波浪的相互作用一般发生在河口附近, 两者的相对强度以及波浪入射方向共同控制三角洲的形态和沉积物分布。长期的河流和波浪共同作用能够形成非对称性三角洲以及浪控复合斜坡型三角洲。河流和潮汐的相互作用通常发生在强潮汐或中潮汐区域的三角洲或河口湾的河流—海洋过渡带; 随着相对海平面升降、沉积物供给变化和气候变化等因素的影响, 潮汐和河流相互作用的三角洲和河口湾沉积体系经常反复叠加发育。潮汐和波浪的相互作用主要体现在潮汐不仅直接控制沉积物的沉积过程, 而且间接性地移动波浪带进而影响相应的沉积相带。尽管目前河流、波浪、潮汐混合作用过程已经有一定程度的研究, 但无论是短期小尺度的相互作用过程, 还是长期受宏观因素(包括沉积物供给、海平面升降、构造沉降等)影响下的相互作用与演化过程, 均有待进一步研究。

**关键词** 混合作用过程; 河流; 波浪; 潮汐; 三角洲; 河口湾; 潮坪

**第一作者简介** 彭旸, 女, 1988年出生, 博士, 讲师, 沉积学和层序地层学, E-mail: ypeng@cup.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标志码** A

## 0 引言

三角洲等海(湖)陆过渡沉积体系不仅是沉积学研究领域的重要组成部分, 而且是油气勘探中重要的油气富集储层之一, 其沉积物扩散搬运模式、沉积地层平面几何形态和空间结构、砂体规模和展布规律等与河流、波浪和潮汐沉积过程息息相关<sup>[1-4]</sup>。基于对现代三角洲沉积的认识, 河流、波浪和潮汐作用的相对强弱对三角洲的形成和发育起直接控制作用<sup>[5-6]</sup>。以河流作用为主的三角洲, 沉积物在河口区的堆积速度远大于波浪或者潮汐对沉积物的改造速度, 所以通常形成向海(湖)突出、增长速度快、砂泥比低的鸟足状或朵状形态沉积体<sup>[6]</sup>。当波浪、潮汐或其他海流的改造能力大于河流输入沉积物的能力时, 河口区堆积的沉积物被海洋(湖泊)中水动力强烈破坏和改造, 形成浪控和潮控三角洲等一些海(湖)陆过渡沉积体系<sup>[5-6]</sup>。在波浪为主导的沉积环境

下, 三角洲分流河道通常比较少, 其沉积物被改造和再分配到河口两侧, 形成一系列平行于海岸的海滩和沙坝, 所以三角洲平面形态多呈鸟嘴状。在潮汐为主导的沉积环境下, 三角洲主要呈港湾状, 河口区发育有散射且不连续的潮汐沙坝。

然而, 现代很多三角洲等海(湖)陆过渡体系都是由河流、波浪、潮汐中两种或者三种沉积过程共同作用<sup>[7-9]</sup>, 这些沉积过程作用于沉积体系的不同部位, 而且其相对强度在时间和空间上不断变化<sup>[2,10]</sup>。全球现代沉积海岸线中, 至少有三分之一受到河流、波浪、潮汐混合作用过程的影响<sup>[11]</sup>。例如, 我国现代珠江三角洲的北部主要是由潮汐与河流混合作用控制, 而南部主要受波浪与河流的共同影响<sup>[12]</sup>。美国密西西比三角洲的多个朵叶(Sale-Cypremort, Teche, St. Bernard, Lafourche)在几千年内由向前进积的河控三角洲逐渐演化成以波浪作用为主的三角洲, 并最终转化成障壁岛<sup>[10]</sup>。在空间上, 密西西比三角洲中的

收稿日期: 2021-10-12; 收修改稿日期: 2021-11-23

基金项目: 中国石油大学(北京)科研基金项目(2462021BJRC002) [Foundation: Science Foundation of China University of Petroleum (Beijing), No. 2462021BJRC002]

Belize 和 Atchafalaya 朵叶主要受河流作用影响,而与其同一时期的三角洲朵叶多数受波浪作用控制。东南亚湄公河三角洲(Mekong delta)沉积在过去 6 ky 到 3 ky 之间以潮汐作用为主,但随后一些沙脊开始平行于海岸线发育并且距离越来越近,这表明三角洲沉积作用逐渐从潮汐作用为主过渡到波浪作用为主<sup>[13]</sup>。

随着对三角洲等沉积体系研究的不断深入,学者们发现单一沉积作用无法解释沉积记录中复杂的砂体内部构型和空间分布。近年来,河流、波浪、潮汐混合作用过程在三角洲等海(湖)陆过渡沉积体系的研究日益增多<sup>[14-19]</sup>。因此,本文旨在总结受河流、波浪、潮汐沉积过程(两种或者三种)共同作用的混合作用过程沉积体系。首先介绍以三角洲为主的海(湖)陆过渡相按沉积过程划分的分类方案,以及河流、波浪与潮汐沉积作用在地层中的识别,然后着重通过现代、古代、模拟等方面实例来阐述河流、波浪、潮汐混合作用过程的研究进展,最后简要探讨混合作用过程在沉积体系中的表征与量化。通过梳理河流、波浪、潮汐混合作用过程的相关研究,以期进一步推动混合作用过程在沉积记录中的识别和预测,并对今后的油气勘探和开发提供理论依据。

## 1 三角洲等海(湖)过渡沉积体系的划分

目前最为广泛接受和应用的三角洲分类方案是 20 世纪 70 年代由 Coleman *et al.*<sup>[20]</sup> 和 Galloway<sup>[6]</sup> 所提出的三分方案,这种分类方案按照主要沉积过程(即河流、波浪、潮汐),将现代三角洲分为河控、浪控、潮控三个端元(图 1a)。例如,美国密西西比三角洲为典型的河控三角洲,巴西圣弗朗西斯科三角洲为典型的浪控三角洲,新几内亚岛弗莱河三角洲为典型的潮控三角洲(图 1a)。三角洲的平面形态和内部地层结构主要由河流沉积物供给、波浪和潮汐改造作用的相对强度所控制。因为该分类方案针对沉积过程中的主要控制作用,所以应用此种分类方案的三角洲体系(尤其是古代三角洲)通常得出较为简单的沉积模式。在 Galloway<sup>[6]</sup> 的基础上,薛良清等<sup>[21]</sup>强调扇三角洲、辫状河三角洲与正常三角洲类似,同样受到海洋中波浪和潮汐或者湖盆中波浪作用的改造,所以将三种三角洲按照沉积物粒度和沉积过程等因素归纳出一个三角洲沉积体系分类的连续谱系图

(图 1b)。值得注意的是,由于离物源区较近且蓄水体波浪、潮汐能量较弱,辫状河三角洲和扇三角洲受波浪或潮汐的影响没有正常三角洲明显。

Orton *et al.*<sup>[22]</sup> 强调除了河流流量、波浪的能量和潮差等水动力参数外,沉积物粒度也是三角洲形成和发育过程中重要的影响因素。沉积物粒度主要影响:1)三角洲平原中河流体系的坡度和河道形态;2)沉积物汇入河口时与周围水体的混合方式;3)海岸线的类型(反射或耗散的)以及对波浪和潮汐作用的响应;4)水下三角洲前缘的滑塌变形和再沉积过程。此外,Orton 按照沉积物粒度粗细将三角洲分为砾、砂砾、砂和粉砂/泥质为主的四种类型,其中每一类型进一步应用 Galloway<sup>[6]</sup> 和 Coleman *et al.*<sup>[20]</sup> 的分类方案中河控、浪控和潮控三个端元(图 1b)。该研究指出目前仅将三角洲分为河控、浪控和潮控三个类别是不够的,三角洲体系对沉积物供给的响应同样需要探究。除了三角洲,其他海(湖)陆过渡体系同样受到河流、波浪和潮汐的影响,所以在 Galloway<sup>[6]</sup> 的三角洲三分方案的基础上,进一步将河口湾、潟湖、滨岸和潮坪等沉积体系按照这三种沉积作用的影响程度归纳到一起,得出三角洲等海(湖)陆过渡体系的三端元分类方案(图 1c)<sup>[5,23-24]</sup>。

## 2 河流、波浪与潮汐作用的识别

河流、波浪和潮汐作用在沉积物粒度、沉积构造、生物扰动、有机质含量等方面对沉积体系产生不同的影响<sup>[25-27]</sup>。河流作用的沉积地层粒度突然变粗、单层粒度呈正韵律到反韵律,通常发育槽状或板状交错层理、冲刷充填构造、双向流水沙纹、爬升沙纹,并且富含有机质(例如植物碎片)等(图 2)。在有河流注入的环境中,水流流速较强、沉积物供给速度较大且河口附近水体盐度较低,不利于生物的寄居和发育,所以一般生物扰动较少<sup>[25-26]</sup>。波浪和风暴浪作用为主的沉积环境通常可见对称性浪成沙纹、丘状一洼状交错层理、低角度交错层理等(图 2)。一般情况下,波浪作用形成的地层具有大量且丰富的遗迹化石。潮汐作用的环境下所形成的岩石记录通常发育有序的交错层理(如 S 形交错层理、复合交错层理)、羽状交错层理(双向交错层理)、双向流水沙纹、砂泥互层的韵律层理、透镜状一波状一脉状层理等(图 2),在个别保存较好的地层,可观察到由大潮一小潮交替形成的韵律层<sup>[15]</sup>。此外,由于潮汐的枯水期

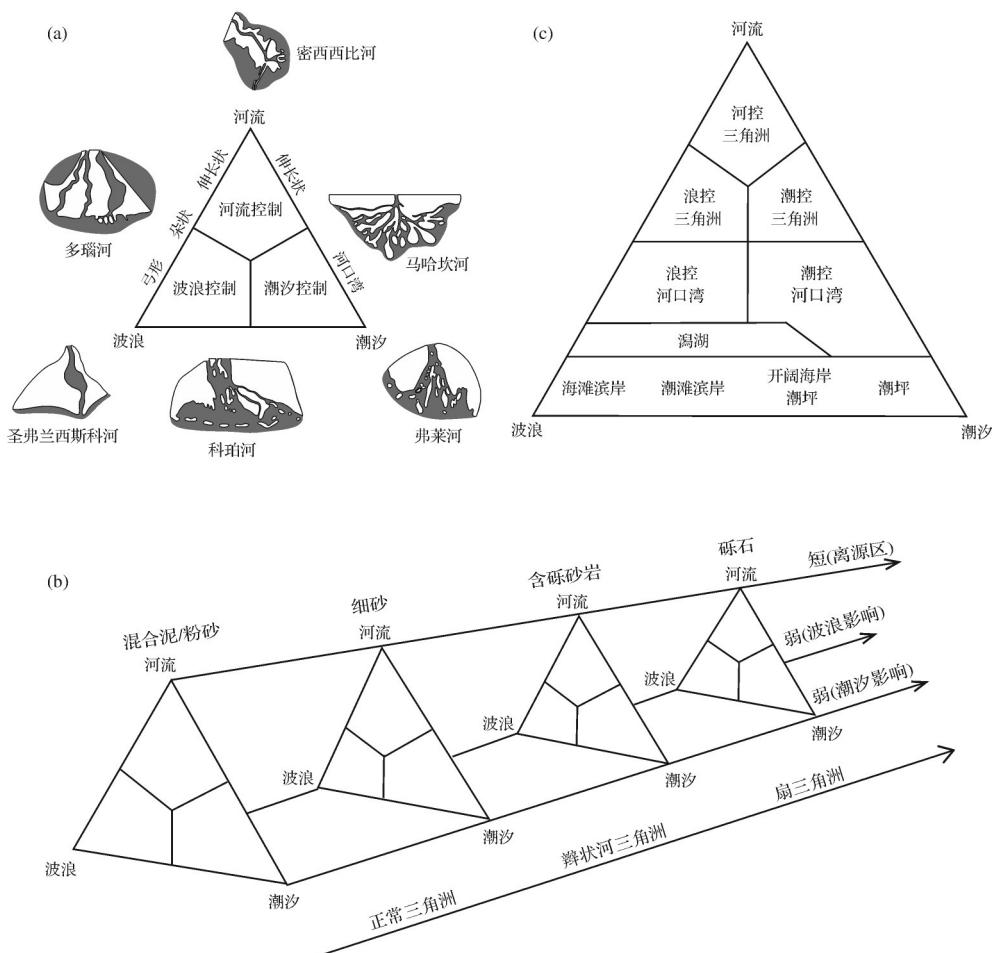


图1 (a) 浅海三角洲按照河流、波浪、潮汐的三分方案(据Galloway<sup>[6]</sup>修改);(b)三角洲按照沉积过程(河流、波浪和潮汐)和沉积物粒度的分类方案(据薛良清等<sup>[21]</sup>;Orton *et al.*<sup>[22]</sup>修改);(c)海陆过渡体系按照沉积过程的三端元分类方案(据Dashtgard *et al.*<sup>[23]</sup>修改)

Fig.1 (a) The threefold division of shallow-marine deltas into fluvial-dominated, wave-dominated, and tide-dominated types with modern examples (modified from Galloway<sup>[6]</sup>); (b) Delta classification based on dominant process (river, wave and tide) of sediment dispersal and grain size at the delta front (modified from Xue *et al.*<sup>[21]</sup>; Orton *et al.*<sup>[22]</sup>); (c) Ternary diagram of coastal environments with prevailing physical processes (modified from Dashtgard *et al.*<sup>[23]</sup>)

使水流速度周期性降低,使得沉积地层富含大量泥质披覆层、双黏土层。潮汐作用的沉积环境中,由于河流和海水不断混合形成的盐度一般只适合有限种类的生物遗迹化石发育。值得注意的是,一些沉积构造或者特征不能指示单个沉积过程和环境,例如,平行层理在河流、波浪、潮汐三种沉积环境中均可发育。正粒序递变层理可以由河流作用的异重流或者波浪作用(如浪控沉积物重力流)形成。因此,正如 Rossi *et al.*<sup>[27]</sup>所提出的常见沉积构造以及对应的沉积过程概率所示,沉积过程和沉积环境的解释应考虑沉积过程的多解性并综合考虑其他指示性特征。

### 3 河流、波浪、潮汐混合作用过程及沉积特征

很多混合作用沉积体系中的河流、波浪和潮汐沉积过程是同时存在的,这里我们主要总结沉积体系中相对主导的沉积过程的相互作用。

#### 3.1 河流和波浪混合作用过程

河流和波浪的相互作用主要发生在河流与海洋(或者湖泊)交汇的河口处,河流和波浪的相对强度以及波浪的入射方向决定三角洲被波浪改造的程度<sup>[28]</sup>。在河流喷流较弱的情况下,波浪斜交岸线产生明显单向的沿岸流,强烈改造沿岸流上游和河口坝

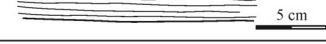
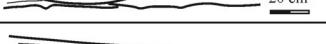
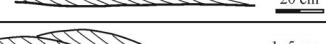
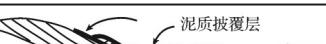
沉积构造(浅海)				
沉积构造	素描	河流作用概率	波浪作用概率	潮汐作用概率
爬升波纹	 5 cm	54%	8%	38%
粒序递变层	 1-10 cm	78%	18%	4%
软沉积变形	 1-20 cm	61%	13%	26%
平行层理	 5 cm	42%	28%	30%
单向交错层理	 40 cm	33%	19%	48%
对称性沙纹	 1 cm	—	100%	—
丘状/洼状交错层理	 20 cm	8%	92%	—
低角度交错层理	 10-50 cm	24%	52%	24%
透镜状、波状、脉状层理	 5 cm	27%	31%	42%
双向交错层理	 20 cm	15%	10%	75%
潮汐束	 潮汐束 1-5 cm	11%	6%	83%
韵律层理	 1 cm	6%	13%	81%
S形交错层理	 10 cm	22%	7%	71%
泥质披覆层	 泥质披覆层 1 cm	8%	6%	86%
复合交错层理	 20 cm	21%	5%	74%

图2 浅海沉积环境中的主要沉积构造和相应的沉积过程的概率(据 Rossi *et al.*<sup>[27]</sup>修改)

该图基于广泛的文献调研,其中每个沉积构造的百分比代表该构造由河流、波浪或潮汐沉积过程形成的概率

Fig.2 Main sedimentary structures and probability of processes in shallow marine deposits from extensive literature review  
(modified from Rossi *et al.*<sup>[27]</sup>)

Percentage = probability that a given structure results from fluvial, wave or tidal process

并向下游搬运沉积物;而当波浪垂直岸线入射时,则形成由河口向两侧分散的双向沿岸流,对河口坝进行改造,并将沉积物向河口两侧搬运(图3a,b)<sup>[29]</sup>。较强的河流喷流会对波浪进行阻挡并且对沿岸流产生干扰和破坏,河口处沉积物的稳定性得到增强,最终对河口坝的形成起到促进作用(图3c,d)<sup>[30]</sup>。此外,波

浪可以通过改变河流喷流方向、增加河口底部剪切应力、增强喷流延展程度<sup>[31]</sup>,间接影响三角洲河口坝和分流河道的发育<sup>[29]</sup>。数值模拟结果表明,较弱的波浪通过增强喷射流的扩散程度,以及波浪与水流相互作用导致底部摩擦增加,都能够促使河口坝快速形成<sup>[31]</sup>,这种情况下形成的河口坝离河口的距离比没

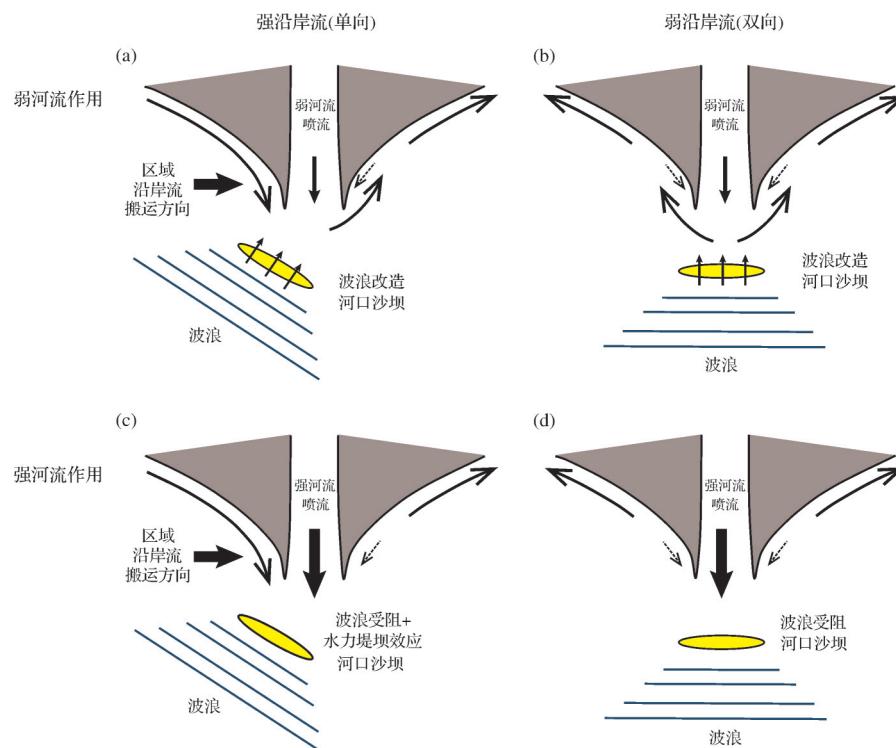


图3 河流和波浪在河口处相互作用示意图(据 Anthony<sup>[29]</sup>修改)

波浪在弱河流作用下改造河口沙坝(a,b),但在强河流作用下,波浪受到阻挡,沿岸流被扰乱(水力堤坝效应—hydraulic groyne effect),从而促进形成河口坝的发育(c,d)

Fig.3 Simplified interactions between river currents and waves at a deltaic river mouth (modified from Anthony<sup>[29]</sup>)

(a, b) waves re-work river mouth bar under weak river influence; (c, d) strong river jets block waves and disrupt longshore currents, promoting formation of a river mouth bar

有波浪参与的情况下会近35%,而且形成速度会快40%<sup>[32]</sup>。较强的波浪导致河流喷流偏转或者喷流不稳定,从而阻碍河口坝的形成<sup>[32-33]</sup>。波浪通过抑制河口坝沉积控制分流河道的发育,使得小规模的分流河道很难形成<sup>[32-34]</sup>。河口坝沉积速率相对较大使得波浪无法及时搬运疏散,或者波浪与河口沉积底部摩擦而能量快速损耗,可导致河口处的流水通道被泥沙堵塞,最终河道改道<sup>[35-36]</sup>。

河流与波浪相互作用可形成非对称性浪控三角洲,沿岸流上游由于波浪的反复冲刷和改造形成分选较好、以砂质沉积物为主的海滩沙脊,而下游由于河流喷流对沿岸流起到水力堤坝效应以及早期波浪建造的障壁岛对波浪的遮挡作用,发育偏泥质的湾顶三角洲(bayhead delta)、障壁岛、潟湖等沉积环境(图4)。现代很多波浪作用为主的三角洲海岸都呈现不对称性特征,例如,黑海中的多瑙河三角洲<sup>[37-38]</sup>、意大利的波河三角洲<sup>[39]</sup>、澳大利亚的米切尔河三角洲<sup>[40]</sup>。Bhattacharya *et al.*<sup>[7]</sup>通过对现代河流和波浪相互作用形成非对称三角洲的研究,指出古

沉积地层同样存在地貌和内部结构较为复杂的非对称三角洲沉积(图4)。自此以后,许多古代地层被解释成非对称性三角洲,根据沉积学和遗迹化石方面的记录,大多数研究发现浪控滨岸和河流作用为主的三角洲前缘沉积沿地层走向分布,进而推测非对称三角洲的存在<sup>[18,26,41-43]</sup>。譬如,Hampson *et al.*<sup>[44]</sup>和Charvin *et al.*<sup>[45]</sup>将美国犹他州晚白垩纪 Book Cliff 地层解释成一个非对称结构三角洲沉积体系。研究区地层的准层序下部是以波浪作用为主的临滨—浅海陆架沉积,上部是以河流作用为主的三角洲前缘沉积,Charvin *et al.*<sup>[45]</sup>认为该准层序代表非对称三角洲的沿岸流上游和下游周期性改变沉积位置所形成的沉积地层。我国很多湖盆存在河流和波浪相互作用,比如现代的青海湖<sup>[46]</sup>、塔里木盆地<sup>[47]</sup>、渤海湾盆地东营凹陷<sup>[48]</sup>。波浪在湖盆滨岸带普遍存在,河流搬运沉积物输入到湖盆形成三角洲时,较强的波浪作用能够改造以河流作用为主的河口坝、水下分流河道以及三角洲前缘砂体,逐渐形成沿岸砂坝<sup>[46,49]</sup>和席状砂<sup>[48]</sup>。

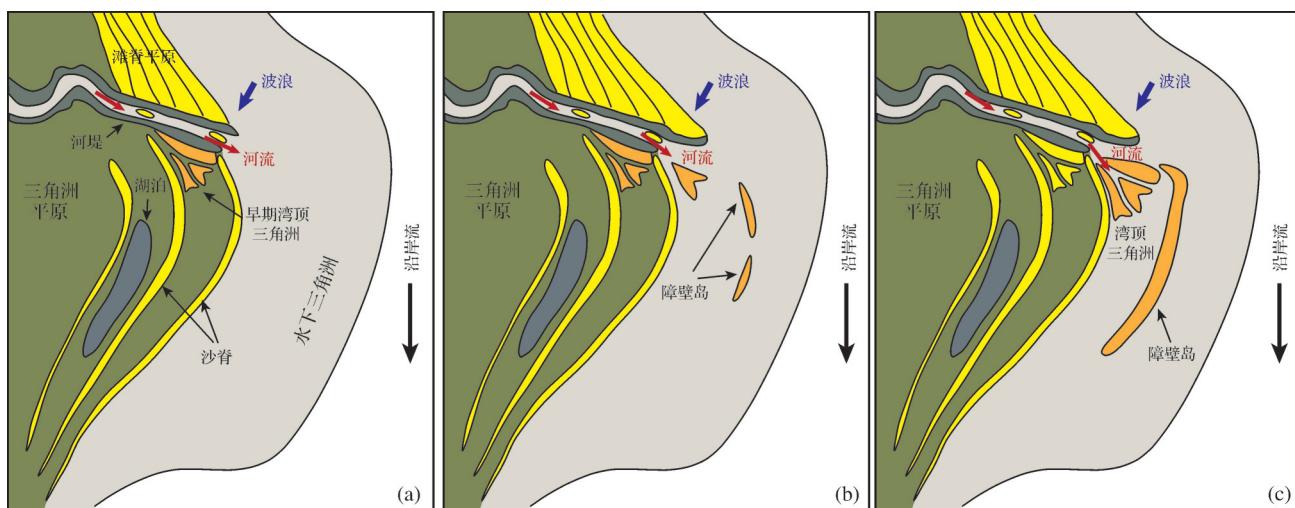


图4 河流和波浪沉积过程影响下的非对称三角洲的概念演化模型(据 Bhattacharya *et al.*<sup>[7]</sup>修改)

沿岸流上流由海滩沙脊组成,下游由湾顶三角洲、潟湖和障壁岛组成

Fig.4 Conceptual evolution model for asymmetric deltas influenced by river and wave processes (modified from Bhattacharya *et al.*<sup>[7]</sup>)  
Updrift flank consists of beach ridge plain; downdrift flank consists of bayhead deltas, lagoons and barrier islands

值得注意的是,在重建古地理和古沉积环境过程中,河流和波浪沉积作用的共存并一定能够指示非对称性三角洲地层,尤其在数据控制点较少或者缺少足够古水流数据的情况下。通过对沉积学和遗迹化石方面的研究,Li *et al.*<sup>[42]</sup>认为美国犹他州Ferron砂岩段为非对称性三角洲沉积地层,其中一侧是以波浪作用为主的砂质滨岸并且含有大量丰富和形态多样的*Cruziana*和*Skolithos*遗迹相,另一侧为混合的河流和波浪/风暴浪作用沉积体系,地层中少量且形态简单的遗迹相指示沉积环境逐渐接近分流河道,由于河流和海水的混合使河口附近水体的盐度突变、沉积速率增加进而不利于生物发育。因此,沉积过程和遗迹化石沿走向差异分布的特征可能指示该地层代表非对称三角洲沉积体系。然而,经过后续的区域系统研究,Li *et al.*<sup>[50]</sup>发现该段地层代表规模较小、以河流作用为主的末端分流河道(2~3 m深,10~100 m宽)和河口坝(高为10 m左右,长度延伸<1 km),且类似规模的分流河道和河口坝延伸面积约为200 km<sup>2</sup><sup>[50-51]</sup>。由于这种较小规模的末端分流河道和河口坝与Li *et al.*<sup>[42]</sup>提出的非对称三角洲模式(河口坝长约4 km、宽约1 km)在规模上不符,所以该地层更有可能代表发育在下切谷内、以河流作用为主的对称性三角洲,周围障壁岛的存在使得河流相沉积地层免受波浪的破坏和改造。

河流和波浪的共同作用(波浪作用为主)能够形成复合斜坡型三角洲(compound-clinoform delta),

这种三角洲是由岸线斜坡(shoreline clinoform)和水下斜坡(subaqueous clinoform)通过水下台地(subaqueous platform)连接而形成复合斜坡形态(图5)。目前,这种复合斜坡型三角洲沉积模式在现代沉积<sup>[52-54]</sup>、古代沉积<sup>[9,15,55-59]</sup>、数值模拟<sup>[60-62]</sup>均已得到证实。河流沉积物供给和波浪—风暴浪之间的相互作用共同控制岸线斜坡和水下斜坡的沉积物分配<sup>[60-61,63]</sup>。波浪将河流带来的沉积物向远离岸线方向搬运,由于波浪在底床的剪切应力随着海水深度增加而逐渐减小,沉积物最终被堆积在水下斜坡的前积层。波浪对沉积物不断地侵蚀、改造和搬运,形成相对较平坦但沉积速率较低的水下台地<sup>[9,55]</sup>。这种浪控复合斜坡型三角洲在地层上呈现两分的进积叠加单元,由下细上粗再变细(CUFU)或者向上变粗(CU)的偏泥质单元,和一个上覆的向上变粗(CU)的偏砂质单元所组成,这两个单元分别代表水下斜坡和岸线斜坡地层。水下斜坡沉积以波浪—风暴浪作用为主,由较强生物扰动的泥岩和粉砂岩的底积层,向上逐渐过渡成以浪控沉积物重力流(WSGF, wave-enhanced sediment-gravity flow)沉积和薄层的丘状交错层理为主的前积层。岸线斜坡为河流和波浪混合作用的结果,主要由向上变厚的丘状—洼状和槽状、板状交错层理的砂岩与少量泥岩组成。连接两个斜坡的水下台地受频繁的波浪改造和再沉积作用,主要发育波浪冲刷的小型凹槽、泥质碎屑和一些WSGF沉积物<sup>[9]</sup>。

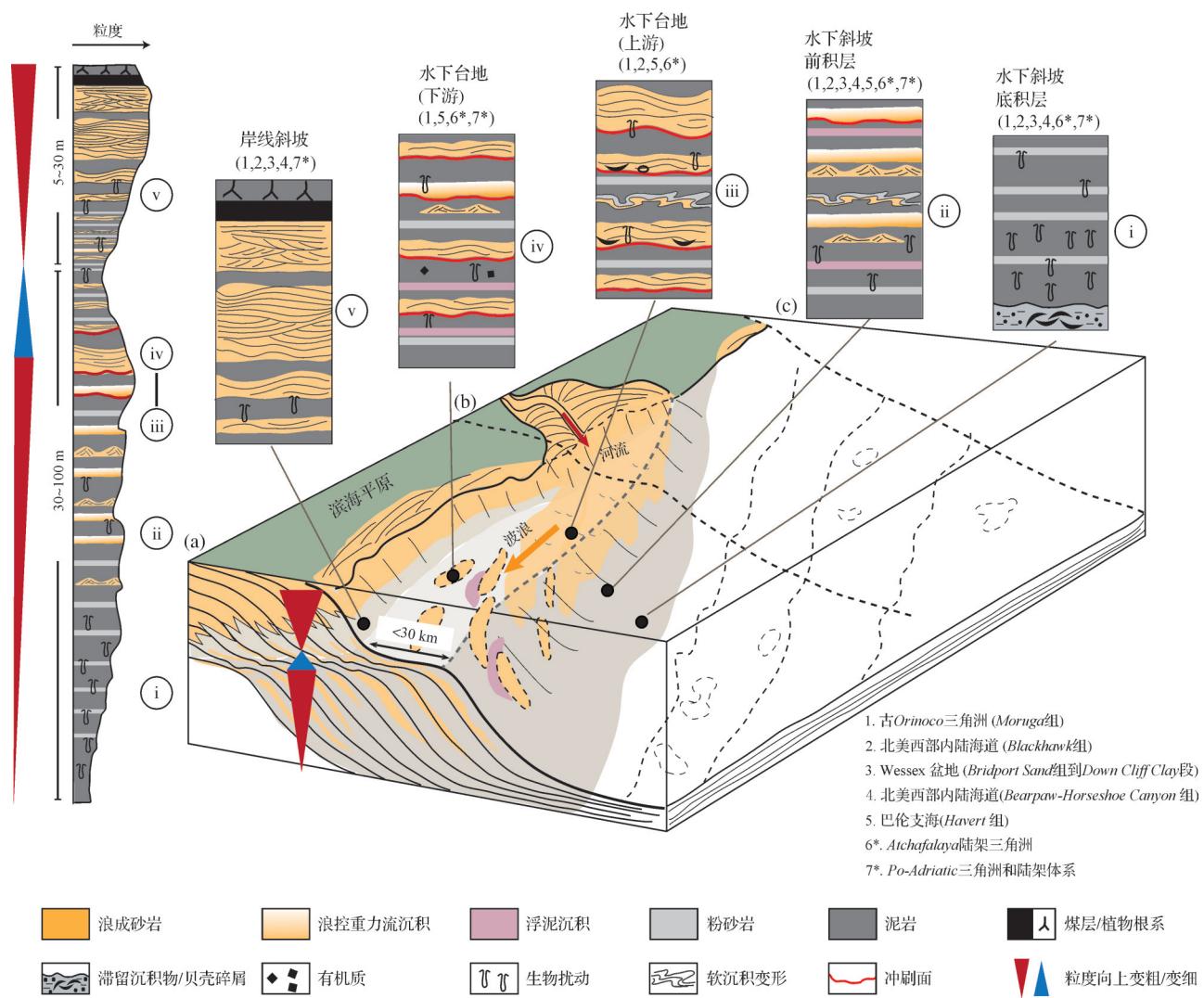


图5 基于现代(\*)和古代沉积地层研究得出的河流和波浪作用下的复合斜坡型三角洲的三维沉积相模式  
(据 Peng et al.<sup>[9]</sup>修改)

Fig.5 Three-dimensional block diagram of wave-and river-influenced compound-clinoform deltas with facies distribution based on modern (\*) and ancient examples (modified from Peng et al.<sup>[9]</sup>)

河流作用下的沉积地层能够在波浪作用为主的沉积环境得以保存需要特殊的沉积条件,这主要是由于大多数情况下强烈的波浪—风暴浪倾向于快速侵蚀和改造河流作用形成的沉积地层<sup>[64-66]</sup>。譬如,南非Karoo盆地的陆架边缘同时受河流和波浪的影响,但由于河流作用较强并且沉积物供给量很大,尤其是在主要的水下分流河道附近,波浪和风暴浪无法充分改造河流携带来的沉积物<sup>[67]</sup>,致使河流作用的沉积地层得以保存。另外,在海平面下降或者低位体系域晚期,由于受到水深的限制,波浪和风暴浪的影响可能不明显<sup>[68]</sup>,这种情况同样有利于河流作用为主的沉积地层的保存。例如,我国珠江口盆地中新世陆

架边缘保存了河流—波浪交互作用形成的陆架边缘三角洲地层,随着相对海平面的下降,陆架宽度减小,波浪能量衰减程度减小,导致波浪作用不断增强,进而在分流河道河口附近存在河流和波浪共同控制的沉积地层<sup>[69]</sup>。除此之外,风暴浪作用能够将沉积物改造成沿岸的障壁岛,从而对后期的风暴浪起到屏蔽作用,致使以河流作用为主的三角洲地层可在局部发育并保存<sup>[43,45]</sup>。南美洲上新世Orinoco陆架边缘浪控三角洲地层保留了部分由河流作用形成的三角洲前缘地层,可能是由于盆地较高的沉降速率和埋藏速率阻碍了地层被波浪和风暴浪的快速改造<sup>[70]</sup>。

### 3.2 河流和潮汐混合作用过程

河流和潮汐的相互作用通常发生在潮汐作用比较显著(强潮汐或中潮汐)的三角洲<sup>[71-72]</sup>或河口湾区域的河流—海洋过渡带(fluvial-to-marine transition zone)<sup>[73]</sup>。全球很多现代大型河流三角洲都存在较强潮汐作用的影响,比如亚马逊河、长江、恒河—雅鲁藏布江、弗莱河等。这些大型河流通常具有低坡度的地形,从而具有较大的纳潮量(tidal prism),因此特别容易受到潮汐的强烈影响。显著的潮汐作用使得一系列细长的潮汐沙坝和潮汐水道垂直海岸线分布(图6)。此类三角洲或者河口湾的河流—海洋过渡带可沿着河流延伸数百千米,延伸范围取决于河流和潮汐的相对强度和滨海平原的坡度<sup>[8,74]</sup>。通常,坡度向海变缓以及分流河道的分流作用,导致河流作用沿向海方向逐渐减小;而潮水涌入三角形海湾被压缩在一个逐渐减小的空间,使得潮差和潮流逐渐增大,所以潮汐作用向陆逐渐增强,到底床摩擦作用使其减弱;波浪作用从浅海陆架到岸线逐渐增强,在河口处达到最大值,随后因摩擦力而逐渐减弱(图6)。当然,河流、潮汐和波浪在河流—海洋过渡带的相对强度会随着季节、气候等因素有一定变化。

在洪水期一间洪期尺度上,潮汐与河流的混合作用主要在间洪期较为显著,这时洪水逐渐减弱而

潮汐作用相对增强,使得一些局部位置能够保存潮汐沉积的记录。例如,美国科罗拉多州 Campanian Loyd Sandstone 组地层发育在较浅的盆地,波浪作用相对不发育,其三角洲前缘和前三角洲主要保存河流和潮汐混合作用过程的沉积记录<sup>[75]</sup>。河流洪水期虽然相对短暂,但却输入大量泥沙并以平行层理砂岩沉积为主;而在河流流量减少的间洪期,河流作用下形成的三角洲沉积被潮汐不断改造并伴有强烈的生物扰动,形成具有泥质披覆层的砂泥互层,而且岩层通常含有大量且多样性的遗迹化石<sup>[75]</sup>。在季节尺度上,雨季期间的河流—海洋过渡带下游区域受河流和潮汐共同作用的影响,上游此时以河流作用为主;旱季期间的下游区域河流作用很小,潮汐作用相对较强,而上游的河流和潮汐作用都较弱<sup>[76]</sup>。通过对湄公河三角洲河流—海洋过渡带沉积过程和沉积物分布的研究,Gugliotta *et al.*<sup>[76]</sup>发现过渡带下游(约100 km)主要发育潮汐与河流共同作用形成的砂泥岩互层的韵律层,而上游发育以河流作用为主的含砾砂岩或砂岩。潮汐和河流共同作用的三角洲的典型沉积特征是以最粗和最细沉积物互层,河流冲刷河床底部并沉积砾石和交错层理砂岩,潮流周期性流速降低致使较厚泥层快速沉积。例如,现代弗莱河三角洲是典型的潮控三角洲,大潮时的潮差将近5 m,河床底部的潮流超过1 m/s<sup>[71]</sup>,分流河道底部常

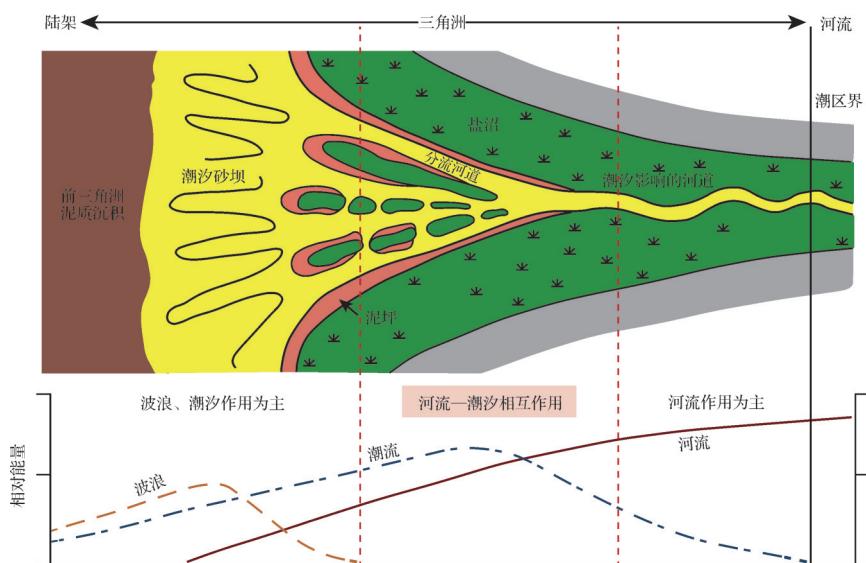


图6 潮控三角洲河流—海洋过渡带(上)与其相应的河流、潮汐和波浪的相对强度变化(下)  
(据 Dalrymple *et al.*<sup>[8]</sup>修改),其中中间区域河流和潮汐共同作用较为明显

Fig.6 (Upper) Schematic diagram of river-tide interaction in river-marine transition zone; (lower) Longitudinal variation of river currents, tidal currents and waves in tide-dominated deltas (modified from Dalrymple *et al.*<sup>[8]</sup>), highlighted zone indicates significant fluvial and tidal interaction

有较粗粒的砾石和浮泥沉积(fluid-mud deposits),泥层厚度一般大于1 cm。河道底部向上过渡为由河流和潮汐共同作用的沙坝,沙坝整体粒度向上变粗,从下到上由砂泥互层过渡成含薄泥层的砂层,整个序列至少含有50%的泥质沉积物<sup>[71]</sup>。

潮汐和河流作用共同影响的三角洲和河口湾沉积经常反复叠加发育<sup>[77-79]</sup>,二者的发育主要受沉积物供给、构造沉降和海平面升降等因素的控制。随着相对海平面上升或沉积物供给减少,沉积体系由进积型叠置模式的三角洲沉积转变成退积型叠置模式的河口湾沉积<sup>[80]</sup>。譬如,南美洲特立尼达晚上新世 Morne L'Enfer 组保存约 17 个河口湾相—三角洲相层序(单个层序厚度约 40~60 m),该地层主要由古 Orinoco 三角洲在陆架上随着海侵—海退旋回(持续时间约 90~120 ky)反复迁移所形成<sup>[77]</sup>。中国东海陆架西湖凹陷南部始新世平湖组保存河流和潮汐共同影响的三角洲地层,上覆的渐新世花港组由以潮汐为主、河流影响的河口湾沉积组成<sup>[78]</sup>。Li *et al.*<sup>[78]</sup>认为研究区在始新世晚期盆地的伸展使西湖凹陷成为具有一定沉降速率(163 m/My)的裂谷盆地,为三角洲层序的快速进积和叠加提供了可容空间;而盆地在渐新世早期沉积速率逐渐降低(110 m/My)形成相对平缓的陆架,使得河口湾沉积体系广泛发育。此外,当河流流入以潮汐作用为主的海峡时,同样存在河流和潮汐沉积过程的相互作用,但形成地层的沉积特征与典型河流—潮汐作用的三角洲有所不同。例如,意大利早更新世 Siderno 古海峡地层被认为保存了河流和潮汐相互作用的详细记录,河流作用为主的三角洲进入潮汐作用较强的海峡,潮流将沉积在海岸附近的大量沉积物沿着海峡搬运较远距离,导致三角洲前缘的沉积物沿着海岸线偏转并呈现明显的不对称性<sup>[81]</sup>。

河流和潮汐相互作用控制砂体的地层结构和空间展布,因此河流和潮汐沉积过程的相对重要性对储层的正确预测具有重要意义。河流作用下的河口沙坝主要沿着向海方向加积,形成地层的走向通常垂直于砂体延伸方向<sup>[51]</sup>;而潮汐作用使沙坝侧向加积的比例增加,导致地层的走向平行于砂体的长轴方向<sup>[71,82]</sup>。阿根廷中侏罗纪 Lajas 组野外露头保存河流作用为主和河流—潮汐相互作用形成的两种河口沙坝<sup>[83]</sup>。通过对 Lajas 组地层的研究,Kurcinka *et al.*<sup>[83]</sup>发现河口沙坝在河流作用为主的沉积环境中要比在有

潮汐作用影响下形成的斜坡地形更陡(河流作用下的河口沙坝坡度为 7°~10°,而潮汐影响下的河口沙坝为 4°~7°)。在砂体平面形态上,形成于河控作用和潮控作用的砂坝长宽比分别为 2:1<sup>[1]</sup> 和 10:1,河流和潮汐混合作用过程形成的砂坝长宽比则在两者之间,大约为 2:1 到 6:1<sup>[83]</sup>。此外,与河流作用下形成的河口沙坝相比,潮汐影响的河口沙坝地层含有大量的泥质夹层<sup>[71,84]</sup>,这些泥层可能会对储层流体起到潜在的隔挡作用。

### 3.3 潮汐和波浪混合作用过程

现代沉积表明,发育在较宽的大陆架环境下且具有较大港湾形态的沉积环境,潮汐和波浪混合作用比较明显。弱潮汐(microtidal)影响的浪控体系通常发育在狭窄和较陡的陆架;而强潮汐(macrotidal)影响的浪控沉积环境更容易发育在较宽且平缓的陆架。潮汐对波浪作用的滨岸具有直接性和间接性的影响。潮汐的直接性影响体现在直接控制滨岸沉积物的沉积过程,这种沉积过程通常发生在波浪影响较小、但潮汐作用较为强烈的沉积环境下,例如狭长的海湾或者海峡,潮流能够达到较大的流速(例如, Juan de Fuca 海峡的潮流有 1 m/s)<sup>[85]</sup>,进而对沉积物的搬运起主要作用。潮汐作用下的泥砂搬运和沉积在下临滨带最为显著,其次是中临滨带,在这些区域,潮流的速度一般超过波浪水质点的轨迹运动速度<sup>[85]</sup>。潮汐对波浪作用滨岸的间接性影响体现在涨潮和落潮能够移动波浪带。例如,Vakarelov *et al.*<sup>[57]</sup>通过对加拿大阿尔伯塔省 Campanian Bearpaw-Horseshoe Canyon 组地层的研究,并结合相关地貌学研究的调研,提出了潮汐对浪控海岸具有上下移动升浪、破浪—碎浪和冲浪带的作用(图 7),而且潮差越大影响越显著。强潮汐在水较浅且宽缓的陆架上下移动波浪带,导致沉积相带存在明显差异,从而使潮间带沉积的比例增大。因此,发育在波浪带、具有平行到低角度交错层理的沉积地层可能相对较厚,而发育在风暴浪影响区域、具有丘状—洼状交错层理的沉积地层可能相对较薄(图 7)。

潮控三角洲的远端接近陆架的区域通常有潮汐和波浪的相互作用(图 6)。例如,美国科罗拉多州白垩纪 Sego Sandstone 三角洲存在波浪和潮汐共同作用的记录<sup>[14]</sup>。三角洲近端潮汐沙坝中砂质沉积物的搬运以潮汐作用为主,而泥质沉积物则被波浪悬浮在水体中并被搬运到远离岸线的位置。向海方向过渡

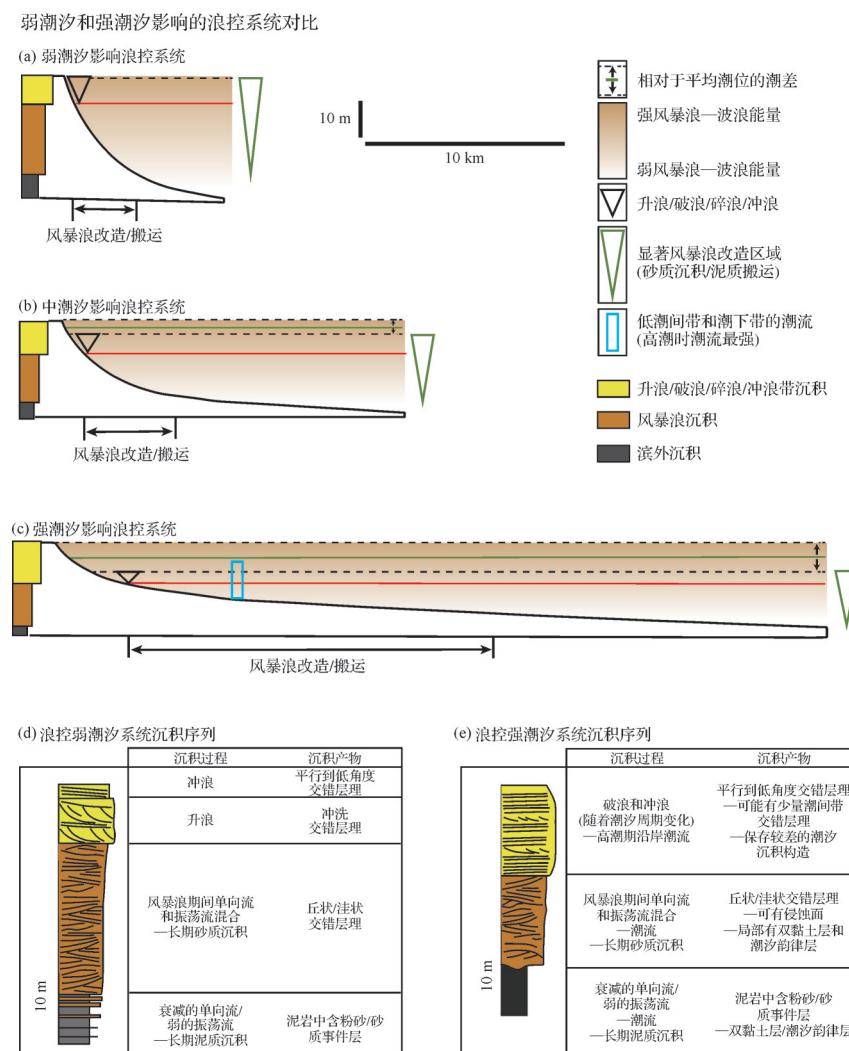


图7 弱潮汐、中潮汐、强潮汐对浪控沉积体系差异影响的概念模型(a~c)与弱潮汐和强潮汐影响的浪控滨岸沉积序列(d, e)对比(据Vakarelov *et al.*<sup>[57]</sup>修改)

Fig.7 (a-c) Conceptual model of key differences among microtidal, mesotidal and macrotidal wave-dominated environments; (d, e) Facies successions for microtidal and macrotidal wave-dominated shoreface systems (modified from Vakarelov *et al.*<sup>[57]</sup>)

的潮汐沙坝存在潮汐和波浪共同影响的沉积记录, 波浪作用逐渐增强导致潮汐沙坝顶部被风暴浪重新改造, 砂质沉积物向海搬运并再沉积形成低角度或丘状交错层理砂岩。在潮汐沙坝的远端, 沉积物主要是通过风暴浪被搬运, 但潮汐作用所引起的水深周期性变化能够使风暴浪的波高和强度随着潮汐周期性变化<sup>[86]</sup>, 所以局部位置保存丘状交错层理与小型丘状或浪成沙纹交错层理互层的周期性砂质韵律沉积(图8)。北海侏罗纪 Rannoch 组一直被传统地解释成浪控三角洲, 而 Wei *et al.*<sup>[87]</sup>在三角洲前缘地层中发现风暴浪和潮汐交互作用的存在。该组风暴浪形成的地层之间存在一些明显的潮汐作用产物, 比如, 双黏土层(double mud drapes)、潮汐束状体(tidal

bundles)、较好的砂泥互层等。因此, 潮汐沉积在风暴浪沉积之间的形成和保存揭示该地层可能发育在具有较大潮差的大型河口附近, 或者发育在沉积速率和沉降速率较高的环境中, 从而使风暴浪没有完全改造潮汐作用的沉积物。

开阔海岸潮坪(open-coast tidal flat)是典型的波浪和潮汐混合作用的沉积体系。在巴西寒武—奥陶纪 Lagarto 和 Palmares 组沉积地层, Basilici *et al.*<sup>[88]</sup>发现开阔海岸潮坪体系保存有风暴浪一波浪与潮汐相互作用的记录。该开阔海岸潮坪地层被细分成四个岩相组合, 分别代表从近端到远端、具有不同潮汐和风暴能量变化的潮间带区域。潮汐和风暴浪作用在各个相带基本都存在, 潮汐作用整体沿向陆方向增

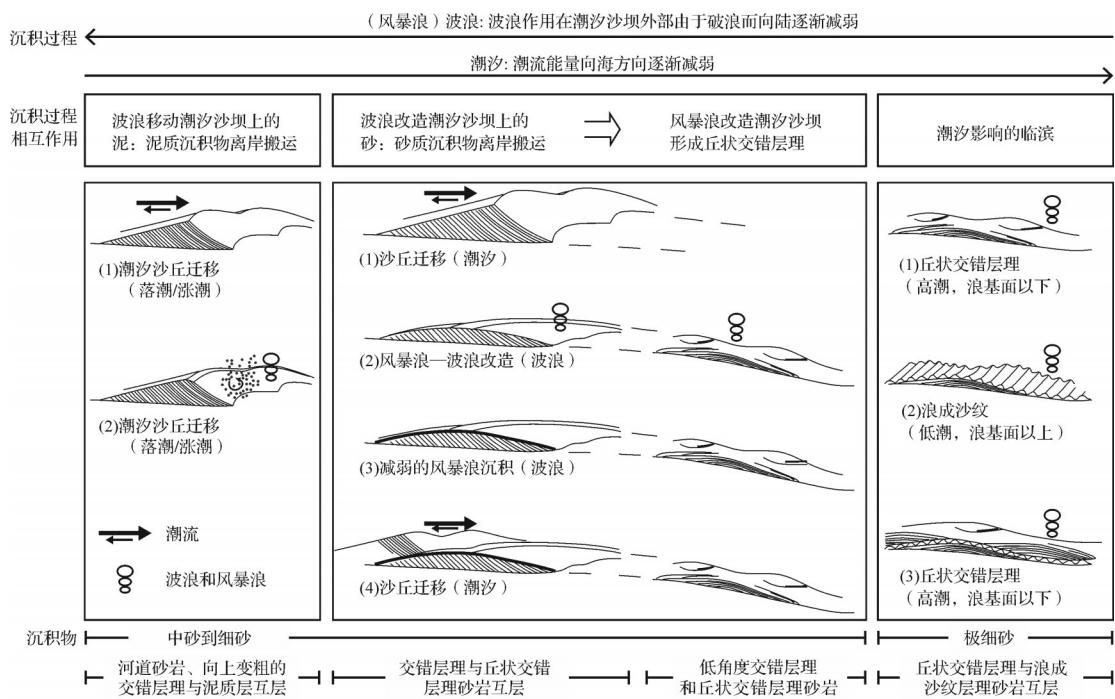


图8 波浪和潮汐沉积过程相互作用以及沿沉积方向从近(左)到远(右)相应的沉积产物(据 Legler *et al.*<sup>[14]</sup>修改)

Fig.8 Tide-wave interactions and resulting deposits from proximal (left) to distal (right) locations along a depositional dip section (modified from Legler *et al.*<sup>[14]</sup>)

加但在远端较为少见,而风暴浪强度从远端到近端呈逐渐减小趋势。Yang *et al.*<sup>[89]</sup>对韩国 Baeksu 和加拿大 Parksville Bay 现代开阔海岸潮坪进行详细研究,提出了波浪和潮汐相互作用形成的浪成潮汐束状体(wave-generated tidal bundle)的沉积序列特征和相关沉积机制。一个完整的浪成潮汐束状体是一个潮汐周期内波浪和潮汐相互作用的产物,具体包括三个不同的时段:1)最底层为涨潮时波浪和潮汐复合流(combined flow)所形成的向陆迁移的沙纹交错层理;2)中间层为高潮期波浪作用(潮流较弱)沉积的对称性浪成沙纹;3)最顶层为退潮时波浪—潮汐复合流产生的向海迁移的沙纹交错层理(图9)。由此可见,古代沉积地层可能存在比现有解释更加复杂的沉积过程相互作用,而这需要更多的研究来探明和揭示。

### 3.4 河流、波浪和潮汐混合作用过程

近年来,越来越多的研究表明浅海陆架沉积体系(尤其是三角洲)同时受河流、波浪和潮汐沉积作用的影响<sup>[12,15-18,26,70,90-94]</sup>。Ainsworth *et al.*<sup>[18]</sup>通过对加拿大阿尔伯塔省晚白垩纪 Bearpaw-Horseshoe Canyon 组的研究,识别混合作用过程下的河口坝体系,并展示了该体系与经典的河流作用为主的河口坝在沉积相、地层空间结构和平面几何形态等方面存在显著

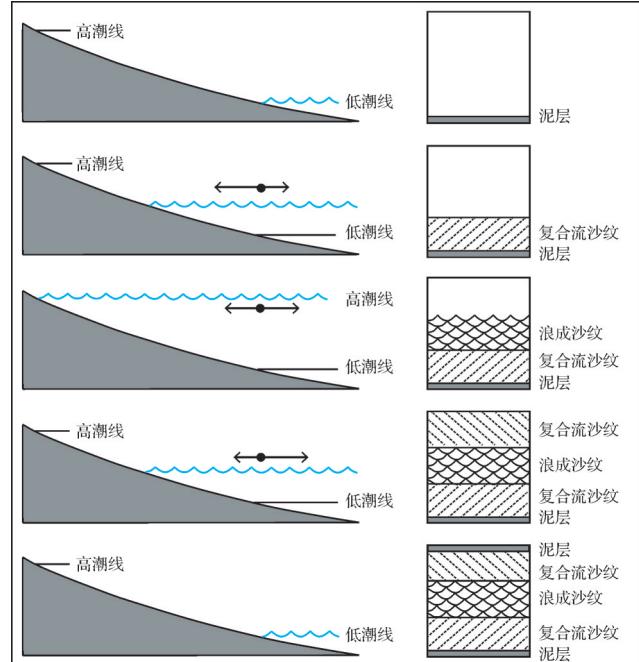


图9 左侧显示高潮和低潮期间沉积过程的变化以及相应的沉积物向陆和向海方向的移动,右侧为相应的由复合流沙纹和浪成沙纹组成的浪成潮汐束状体

(据 Yang *et al.*<sup>[89]</sup>修改)

Fig.9 (Left) Process changes between high-and low-tide periods, showing landward and seaward sediment movement; (right) Resulting rhythmical deposits of combined-flow ripples and wave ripples (modified from Yang *et al.*<sup>[89]</sup>)

不同的特征。该组的河口坝沉积地层保存和记录了混合作用随着潮汐周期的变化过程。在低潮期间,河流携带沉积物并堆积在河口,因此河口坝主要受河流和潮汐沉积作用;而在高潮期间,分流河道被上涨的潮流淹没,导致河流沉积物卸载在河口向陆方向的位置,所以河口坝位置主要受波浪和潮汐作用影响(图10)<sup>[18]</sup>。在这种情况下,河流作用形成的河口坝在波浪和潮流的参与下,其沉积构型也必然受到一定程度的影响。阿根廷侏罗纪 Lajas 组地层不同于典型河控和浪控三角洲地层, Rossi *et al.*<sup>[16]</sup>通过对沉积相、古水流和地层叠加模式的分析,不仅探明该地层代表河流、波浪和潮汐混合作用形成的三角洲,而且将三种沉积作用在地层中得以区分。整体地层反映波浪能量在三角洲远端和两侧区域较强,潮汐能量在三角洲前缘和水下台地区域作用较明显,河流主要作用在近端区域。东南亚加里曼丹岛中新世 Lambir 组沉积相、生物遗迹化石和地层结构综合反映一个从进积到快速加积的大型混合作用三角洲地层,其下三角洲平原以河流和潮汐作用为主,而三角洲前缘受河流和波浪—风暴浪作用为主并有微弱潮汐影响<sup>[92]</sup>。风暴浪、潮汐和较弱的河流作用的相关地层更容易保留在分流河道两侧的间湾区域。最新研究表明,古代地层中同样存在由河流—潮汐

一波浪混合作用(潮汐作用为主)所形成的复合斜坡型三角洲(图11),其中岸线斜坡和水下台地内部主要受河流和潮汐作用,而水下台地外部和水下斜坡主要受潮汐和波浪混合作用<sup>[9,15]</sup>。

河流、波浪和潮汐混合作用的沉积体系通常同时受沉积物供给、海平面升降、构造沉降等因素的影响。譬如,挪威侏罗纪 Halten Terrace 浅海地层保存并记录了混合作用的三角洲地层在 12.5 Myr 内的两次进积和一次加积过程<sup>[19]</sup>。进积阶段由河流和波浪作用为主并受潮汐影响的三角洲地层所组成,加积阶段则由更复杂的沉积地层组成,其中包括河流和潮汐作用为主并有波浪影响的三角洲、下滨岸、以及非三角洲海岸线沉积(潮汐水道、潮坪、沼泽)。van Cappelle *et al.*<sup>[19]</sup>指出该沉积序列由下到上粒度逐渐减小,总体上呈现河流作用减弱、潮汐作用增强的过程,这一演化过程主要受裂谷盆地构造活动所引起的可容空间增长速率加快(相对于沉积物供给速率)的影响。过去一直认为墨西哥湾晚古新世 Lower Wilcox 组是典型的河控三角洲地层,而最新研究表明该三角洲地层是由明显的河流、波浪和潮汐混合作用所形成<sup>[90]</sup>。在该地层中,波浪和风暴浪形成的地层与河流洪水期发育的异重流沉积、以及潮汐作用形成的泥质韵律层存在着频繁互层。

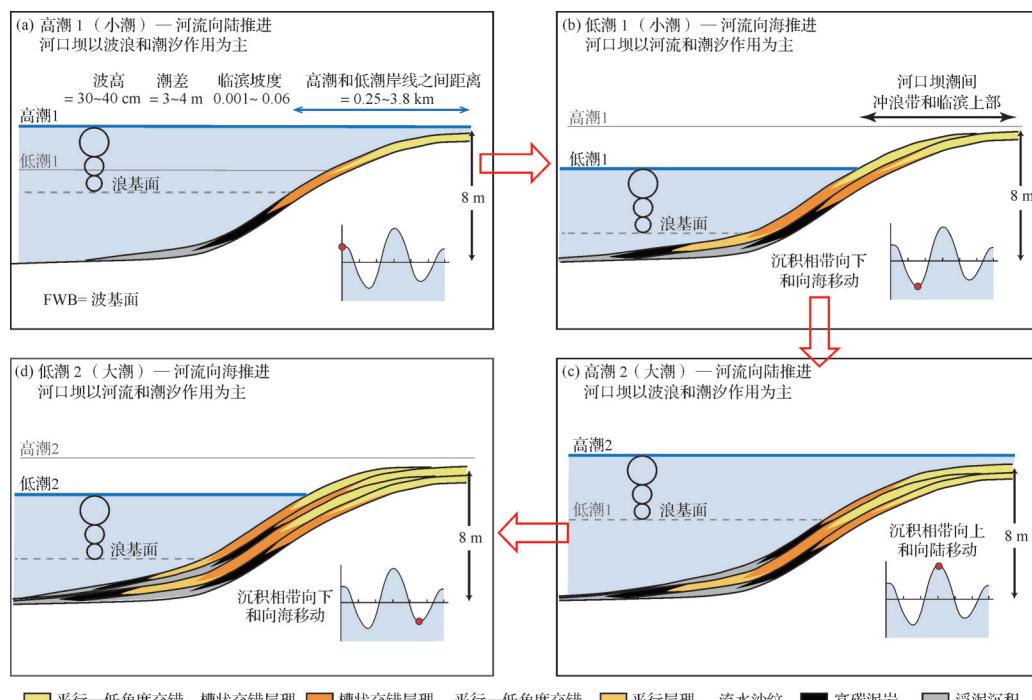


图 10 潮汐周期期间河流、波浪和潮汐在河口沙坝位置的相互作用以及相应沉积产物(据 Ainsworth *et al.*<sup>[18]</sup>修改)

Fig.10 River, wave and tidal process interactions and resulting deposits during tidal cycles observed on mouth-bar foresets  
(modified from Ainsworth *et al.*<sup>[18]</sup>)

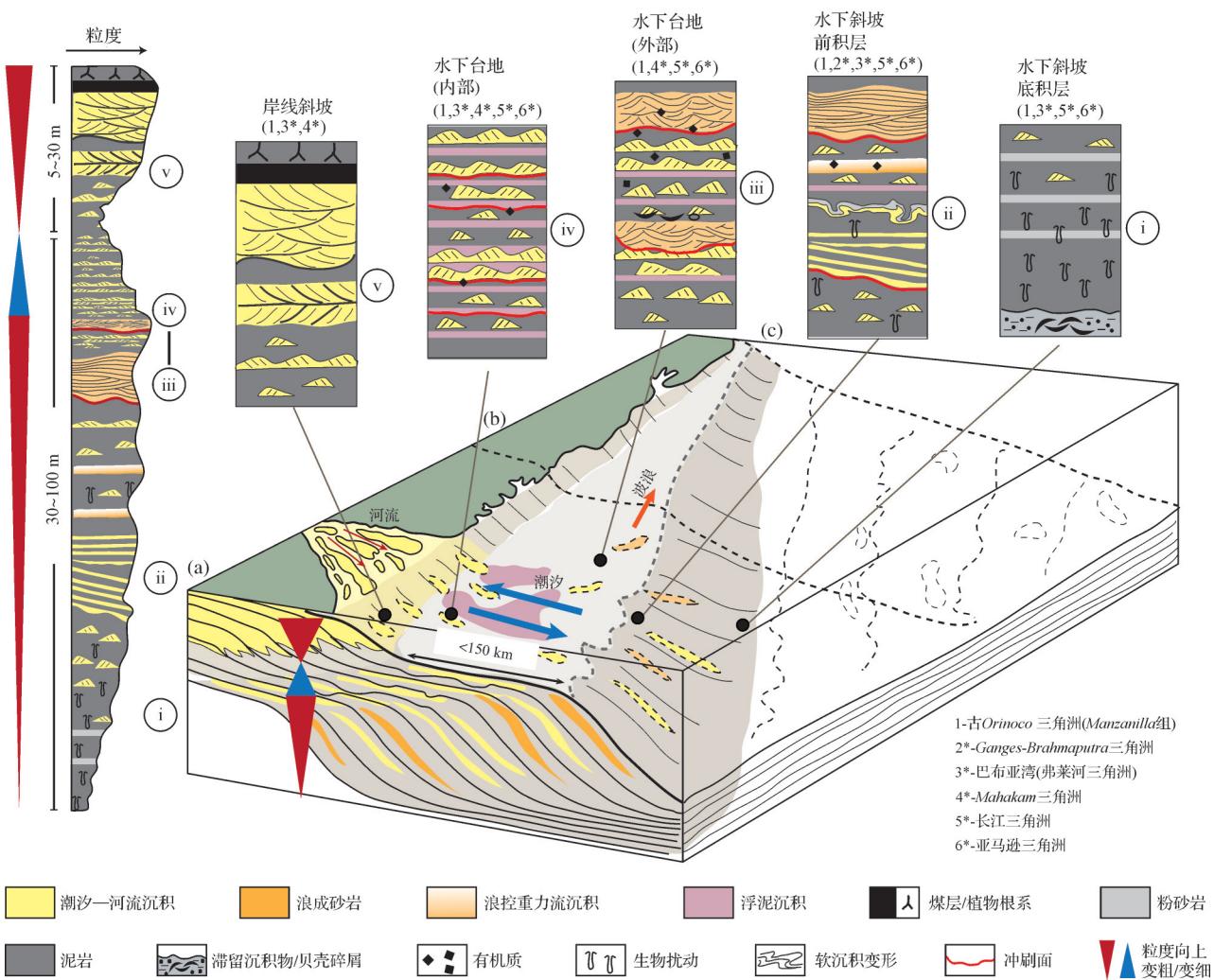


图11 基于现代(\*)和古代沉积地层研究得出的潮汐—河流—波浪作用的复合斜坡型三角洲的三维沉积相模式  
(据 Peng et al.<sup>[9]</sup>修改)

Fig.11 Three-dimensional block diagram of tide-, river- and wave-influenced compound-clinoform deltas, with facies distribution (modified from Peng et al.<sup>[9]</sup>)

Lower Wilcox 三角洲发育在较宽的浅海陆架和沉积物供给速率减小的背景下,从而使得强烈的波浪和潮汐作用与较弱的河流作用共同影响三角洲的形成和发育过程<sup>[90]</sup>。澳大利亚全新世米切尔河三角洲发育在低可容空间的陆表海,强制海退过程中形成了一个平面形态较复杂的混合作用过程体系<sup>[40]</sup>。三角洲进积过程从浪控的对称性三角洲(受河流影响和潮汐作用影响),演变成快速进积的潮控三角洲(受河流和波浪作用影响)。这种沉积过程的转变主要受可容空间和沉积物供给速率变化的控制,较高的可容空间与沉积物供给速率的比值(A/S)导致三角洲的进积过程更易受波浪作用的影响,而随着海平面逐渐降低,A/S减少导致后期三角洲进积主要受潮汐作用的影响<sup>[40]</sup>。

陆架边缘三角洲中同样存在河流、波浪和潮汐共同作用,但是河流和潮汐沉积能在波浪作用为主导的陆架边缘得以保存需要有特殊的沉积环境。在南美洲大西洋特立尼达陆架边缘的上新世 Orinoco 三角洲 Moruga 组,河流—潮汐—波浪混合作用和河流作用为主的三角洲前缘地层很好地保存在整体为波浪—风暴浪为主的沉积环境下<sup>[70]</sup>。混合作用过程的三角洲前缘地层发育河流和潮汐共同作用的双向流水沙纹和一些波浪作用形成的丘状/洼状交错层理,河流作用为主的三角洲前缘则发育平行层理、低角度交错层理、单向流水沙纹并伴有较薄的正韵律层。其他大部分陆架边缘地层受波浪—风暴浪控制,发育浪成沙纹和丘状/洼状交错层理。Peng et al.<sup>[70]</sup>

提出导致河流和潮汐沉积地层在强波浪控制的环境下保存的原因可能包括古海岸形态对波浪有一定屏蔽作用,或者在地层发育时期强风暴浪出现频率较低,但更有可能的是,盆地快速的沉降和埋藏速率使得河流和潮汐地层没有被风暴浪完全改造。

#### 4 沉积体系混合作用过程的表征与量化

通过上述研究可见,河流—波浪—潮汐混合作用过程无论是在古代还是现代沉积体系都十分常见,但是研究混合作用过程具有一定难度和挑战性。这主要是由于一方面识别沉积构造和沉积特征所对应的沉积过程有一些不确定性,另一方面缺少适当的量化和表征方法。Ainsworth *et al.*<sup>[2]</sup>针对碎屑岩海陆过渡沉积体系提出一种描述和预测沉积过程的半定量分类方法(图12)。这种方法在Galloway(1975)三角洲三端元分类的基础上扩展到包括无河流注入的海岸体系,并根据河流、波浪、潮汐作用的相对强度进行排列组合得出15种海岸沉积体系的可能组合。Ainsworth *et al.*<sup>[2]</sup>通过决策树(图12)或者矩阵(如Ainsworth *et al.*<sup>[2]</sup>中图9),并且同时考虑盆地地形、海岸线形态、可容空间、沉积物供给、陆架宽度等参数,来综合描述和预测沉积体系的沉积过程。但是,该方法比较复杂且不够直观,当应用在古代沉积地层

时,很多需要考虑的参数无法确定或者被推测。

在古代或现代沉积地层的研究中,一个实际的问题就是在同一段地层中可能同时保存河流、波浪和潮汐两种或三种沉积作用形成的沉积构造和特征<sup>[15-16]</sup>,而且一些沉积构造或特征并不能作为指示单一某种沉积作用或者沉积环境的标志。因此,Rossi *et al.*<sup>[27]</sup>提出了新的量化方法,通过沉积构造和其他沉积特征对岩层或地层单元计算出三个百分比,分别代表该单元可能由河流、波浪、潮汐作用所形成概率。这种量化方法是基于对大量古代、现代沉积和物理模拟实验等的调研总结,每个沉积构造得出一组百分比数值,分别代表该沉积构造可能由河流、波浪和潮汐这三种沉积过程形成的概率(图2)。如果岩层或地层单元呈现多于一种沉积构造或特征,可对河流、波浪、潮汐过程的百分比值分别取平均值来获得该层的最终沉积过程概率。在一段地层中将每个岩层或地层单元相应的沉积过程概率整合起来即可得出沉积过程随地质时间变化的概率图(图13)。通过应用此方法在已研究区域(比如阿根廷侏罗纪Las Lajas组和美国白垩纪Sego Sandstone)(图13),并与之前研究结果进行比较,不仅此方法的有效性得到验证,而且其系统性和直观性一目了然。此方法有效量化了古代沉积体系中沉积过程随地质时间的变化过程,并且改进了预测沉积环境演化的表征方式。

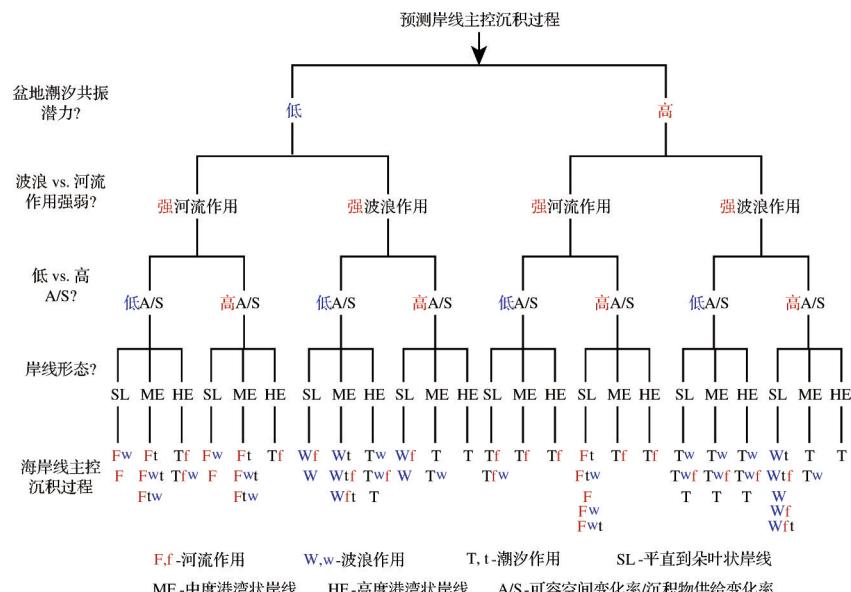


图 12 使用决策树对海岸沉积体系沉积过程的预测(据 Ainsworth *et al.*<sup>[2]</sup>修改)

Fig.12 Decision tree to predict dominant depositional process for coastal systems (modified from Ainsworth *et al.*<sup>[2]</sup>)

通过运用此方法,Peng *et al.*<sup>[15]</sup>重建了上新世Orinoco三角洲一段沉积地层中河流、波浪和潮汐的相互作用沉积过程。此研究识别了古三角洲地层中混合作用过程下的沉积特征,并从米和厘米—分米两种尺度来量化河流、波浪和潮汐相互作用过程。研究结果表明,Manzanilla组的研究层段代表复合斜坡型三角洲(compound-clinoform delta),该三角洲沉积体系受到波浪、潮汐和河流混合能量的改造,并同时受到周围大量泥质沉积物的影响。在准层序尺度(30~50 m)上,波浪沉积记录先从三角洲水下斜坡向水下台地外部增加,然后向水下台地内部减少,而潮汐记录则呈相反的趋势变化(详见Peng *et al.*<sup>[15]</sup>)。这种沉积过程变化趋势表明风暴浪沉积作用主要改造了远端河口坝和潮汐

沙坝,并将沉积物输送到水下台地外部和水下斜坡。三角洲水下台地的大量泥质沉积物减弱了风暴浪的影响,导致三角洲水下台地的河流和潮汐沉积记录得以保存,而且泥质沉积物对海岸起到一定的稳固作用,从而使得三角洲复合斜坡体系能够快速向前推进。在此基础上,该研究在三角洲复合斜坡上选取个别层段进行精细(厘米到分米尺度)描述和量化,探明波浪、潮汐和河流在三角洲复合斜坡不同位置上高频的相互作用过程(图14)。由此可见,该方法可有效地运用到具有岩心或者露头数据的古沉积体系或者现代沉积体系,而且通过对具有多变性的沉积地层更系统地描述和解释,能够允许不同沉积体系或者储层之间的比较。

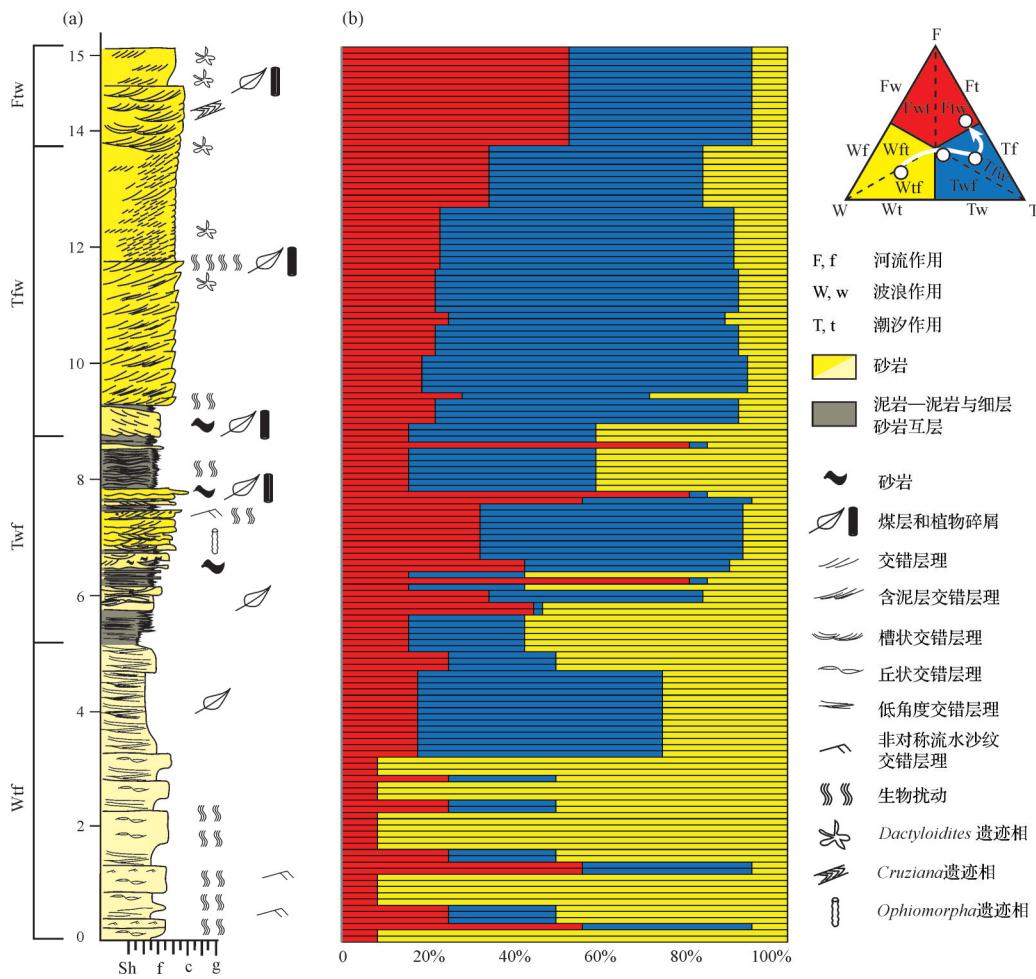


图13 一种新的量化方法通过观察和描述古沉积环境保存的沉积记录来表征沉积序列和其相应的混合作用过程  
(据 Rossi *et al.*<sup>[27]</sup>修改)

(a) 阿根廷侏罗纪Las Lajas组三角洲地层中的一个准层序的传统地层描述;(b) 波浪、河流和潮汐随时间变化的混合作用过程的概率图

Fig.13 Quantitative approach to characterize a sedimentary succession and the influence of mixed processes from recorded paleo-environmental signals (modified from Rossi *et al.*<sup>[27]</sup>)

(a) classical sedimentological log of a parasequence from Jurassic Las Lajas (Argentina) deltaic strata; (b) probability graph showing mixed wave, fluvial and tidal processes over time

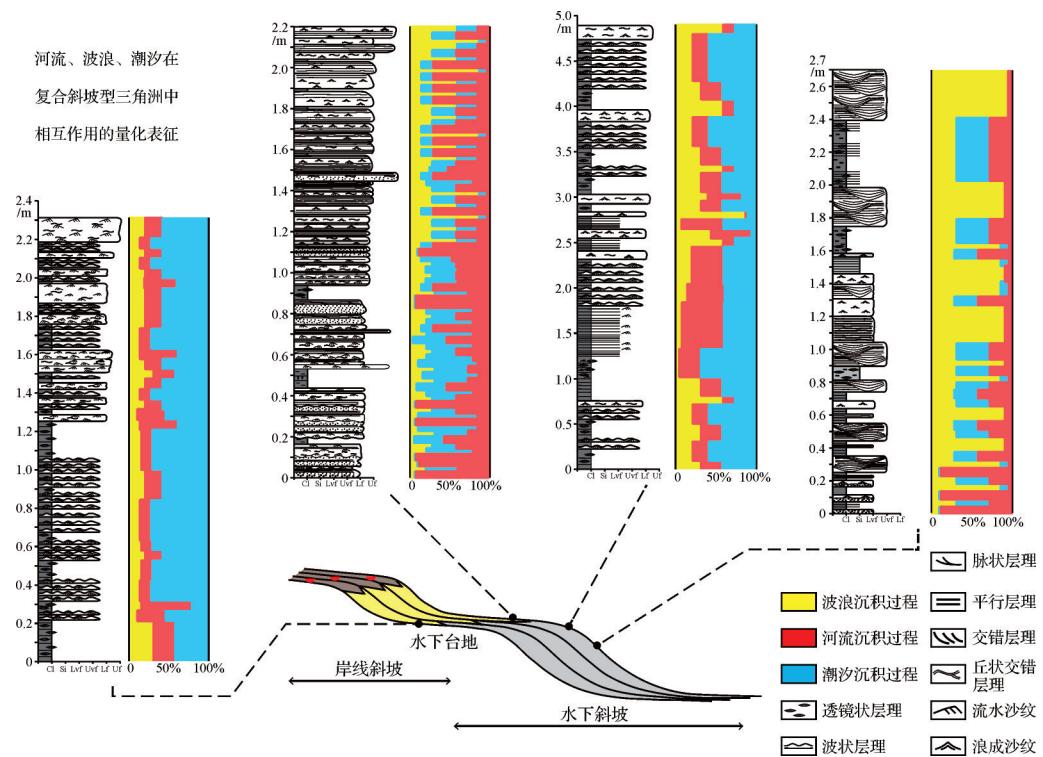


图 14 古 Orinoco 地层通过应用 Rossi *et al.*<sup>[27]</sup>的新量化方法,表征复合斜坡型三角洲不同位置的河流、波浪和潮汐相互作用过程(据 Peng *et al.*<sup>[15]</sup>修改),其中每个位置由传统地层描述(左)和混合作用过程的概率图(右)表示

Fig.14 Sedimentary successions (left) and probability graphs of mixed processes over time (right) using the quantitative approach proposed in reference [27], illustrating variable interaction of river, wave and tidal processes at different locations in a compound-clinoform delta (modified from Peng *et al.*<sup>[15]</sup>)

## 5 地质意义与展望

现代沉积体系研究表明,很多海(湖)岸系统是相对复杂并且由分散的沉积单元组成,每个沉积单元可能代表河流、波浪和潮汐不同程度相互作用的产物。这些混合作用过程不仅在空间上的不同沉积单元之间存在变化,而且在时间(天、季节、年或者更长的时间尺度)上也是不断变化。然而,目前的碎屑岩海(湖)岸体系的沉积模式相对简单,学者们通常只关注沉积体系最主要的沉积过程。以主控沉积过程对三角洲的朵叶复合体进行描述和分类虽然是可行的,但却忽略了参与三角洲构建的其他沉积过程、以及沉积过程之间的相互作用和变化,而且不能解决重建三角洲朵叶级别或者更小规模的复杂沉积构型的难题<sup>[10]</sup>。尤其是随着油气勘探和生产实践的发展,对沉积相精细刻画的要求日益提高,对油田一个区带开展评价时,需要对砂组级别甚至是单砂体级别开展沉积微相的刻画<sup>[46]</sup>。因此,对三角洲沉积单元或者砂组的河流、波浪和潮汐混合作用过程以及相

应的沉积构型进行精细研究和分析,是目前推动沉积学发展和满足油气藏评价以及开发需求非常重要的一步。

虽然近年来对三角洲沉积体系中河流、波浪和潮汐的混合作用过程的研究逐渐增多,但是绝大多数研究仍然处于对沉积体系中沉积作用过程定性的描述。未来对三角洲混合作用过程的研究需要逐渐由定性描述转为定量研究,这需要对岩心、野外露头、现代沉积、密井网或者高频地震区域开展精细描述和定量分析。对沉积盆地进行定量的沉积过程分析,可揭示不同盆地地形、海岸线形态、可容空间、沉积物供给、陆架宽度等因素的影响下沉积过程的相互作用,推动沉积学领域研究进展。同时,在定量沉积过程的约束下,对三角洲沉积单元的内部构型和空间分布进行解析,建立一系列定量的、可预测三角洲沉积单元或者砂体的沉积构型模式,也可对油气勘探和开发实践提供有力的指导和理论支持。

## 6 结论

无论在现代还是古代沉积体系,河流、波浪和潮汐的混合作用过程是普遍存在的,本文对目前河流、波浪和潮汐的混合作用过程的研究进展进行了梳理和总结。

(1) 河流和波浪的相互作用一般发育在河口附近,两者的相对强度以及波浪入射方向控制三角洲被改造的程度。波浪垂直入射岸线形成向河口两侧分散的双向沿岸流,对河口坝进行改造,将沉积物向两侧搬运;而波浪斜交岸线可产生明显的单向沿岸流,可改造沿岸流上游和河口坝,并向下游搬运沉积物。

(2) 河流和潮汐的相互作用通常发生在潮汐作用比较显著的三角洲或河口湾区域的河流—海洋过渡带。在河流间洪期,河流作用逐渐减弱,而潮汐作用相对增强,此时潮汐与河流的混合作用较为显著,一些局部沉积环境能够保存潮汐沉积记录。在河流—海洋过渡带的下游区域,河流和潮汐共存的沉积过程在雨季时比较普遍,而旱季期间河流作用很小,潮汐作用相对较强。随着相对海平面升降、沉积物供给变化和气候变化等因素的影响,潮汐和河流作用共同影响的三角洲和河口湾沉积通常反复叠加发育,形成由进积叠加模式的三角洲沉积转变成退积叠加模式的河口湾沉积。

(3) 潮汐和波浪的相互作用主要体现在潮汐直接控制波浪作用体系中沉积物的沉积过程,以及通过涨潮和落潮间接性移动波浪带和相应的沉积相带。

(4) 很多浅海三角洲同时存在河流、波浪和潮汐的沉积作用,这些沉积体系的发育受沉积物供给、海平面升降、构造沉降等因素的影响,其相互作用过程有待通过不同区域进行深入研究。

(5) 沉积环境中河流、波浪、潮汐混合作用过程的研究具有复杂性和一定的挑战性,这主要是由于识别沉积构造和沉积特征以及与其相对应的沉积过程的不确定性,和缺少适当的表征和量化方法。通过沉积构造和其他沉积特征对岩层或地层单元计算可能的河流、波浪、潮汐作用过程的概率是目前较为适用的量化方法,此方法可较为有效地表征沉积体系中沉积序列及其相对应的沉积过程随地质时间的演化过程。

**致谢** 此篇文章是基于作者在美国德克萨斯大学奥斯汀分校攻读博士期间的研究工作,感谢导师Ronald J. Steel教授和Cornel Olariu研究员在此方向的引导。鲜本忠教授提供了有启发意义的讨论,两位审稿专家对文章的内容和图件提出了建设性修改意见和建议,在此一并感谢。

## 参考文献(References)

- [1] Reynolds A D. Dimensions of paralic sandstone bodies [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(2): 211-229.
- [2] Ainsworth R B, Vakarelov B K, Nanson R A. Dynamic spatial and temporal prediction of changes in depositional processes on clastic shorelines: Toward improved subsurface uncertainty reduction and management [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(2): 267-297.
- [3] 于兴河,李胜利,李顺利. 三角洲沉积的结构:成因分类与编图方法[J]. 沉积学报,2013,31(5):782-797. [ Yu Xinghe, Li Shengli, Li Shunli. Texture-genetic classifications and mapping methods for deltaic deposits [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 782-797. ]
- [4] 姜在兴,王俊辉,张元福. 滩坝沉积研究进展综述[J]. 古地理学报,2015,17(4):427-440. [ Jiang Zaixing, Wang Junhui, Zhang Yuanfu. Advances in beach-bar research: A review [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 427-440. ]
- [5] Boyd R, Dalrymple R, Zaitlin B A. Classification of clastic coastal depositional environments [J]. Sedimentary Geology, 1992, 80(3/4): 139-150.
- [6] Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [M]//Broussard M L. Deltas: Models for exploration. Houston: Houston Geological Society, 1975: 87-98.
- [7] Bhattacharya J P, Giosan L. Wave-influenced deltas: Geomorphological implications for facies reconstruction [J]. Sedimentology, 2003, 50(1): 187-210.
- [8] Dalrymple R W, Choi K. Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 81(3/4): 135-174.
- [9] Peng Y, Olariu C, Steel R J. Recognizing tide- and wave-dominated compound deltaic clinothems in the rock record [J]. Geology, 2020, 48(12): 1149-1153.
- [10] Olariu C. Autogenic process change in modern deltas: Lessons for the ancient [M]//Martinus A W, Ravnås R, Howell J A, et al. From depositional systems to sedimentary successions on the norwegian continental margin. Hoboken: Wiley Blackwell, 2014: 149-166.
- [11] Nyberg B, Howell J A. Global distribution of modern shallow

- marine shorelines. Implications for exploration and reservoir analogue studies [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 83-104.
- [12] 李小平, 柳保军, 丁琳, 等. 海相三角洲沉积单元划分及其对勘探砂体对比的意义: 基于现代珠江三角洲沉积水动力综合研究 [J]. *沉积学报*, 2016, 34(3): 555-562. [Li Xiaoping, Liu Baojun, Ding Lin, et al. Depositional elements definition of marine delta and significance to sand body correlation in petroleum exploration: From hydrodynamic analysis on modern Pearl River Delta [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 555-562.]
- [13] Tamura T, Saito Y, Lap Nguyen V, et al. Origin and evolution of interdistributary delta plains; insights from Mekong River Delta [J]. *Geology*, 2012, 40(4): 303-306.
- [14] Legler B, Hampson G J, Jackson C A L, et al. Facies relationships and stratigraphic architecture of distal, mixed tide-and wave-influenced deltaic deposits: Lower sego sandstone, western Colorado, U. S. A [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(8): 605-625.
- [15] Peng Y, Steel R J, Rossi V M, et al. Mixed-energy process interactions read from a compound-clinoform delta (paleo-orinoco delta, trinidad): Preservation of river and tide signals by mud-induced wave damping [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2018, 88(1): 75-90.
- [16] Rossi V M, Steel R J. The role of tidal, wave and river currents in the evolution of mixed-energy deltas: Example from the Lajas Formation (Argentina) [J]. *Sedimentology*, 2016, 63(4): 824-864.
- [17] Collins D S, Johnson H D, Allison P A, et al. Mixed process, humid-tropical, shoreline-shelf deposition and preservation: Middle Miocene-modern baram delta province, northwest Borneo [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2018, 88(4): 399-430.
- [18] Ainsworth R B, Vakarelov B K, MacEachern J A, et al. Process-driven architectural variability in mouth-bar deposits: A case study from a mixed-process mouth-bar complex, Drumheller, Alberta, Canada [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(5): 512-541.
- [19] van Cappelle M, Ravnås R, Hampson G J, et al. Depositional evolution of a progradational to aggradational, mixed-influenced deltaic succession: Jurassic Tofte and Ile formations, southern Halten Terrace, offshore Norway [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 1-22.
- [20] Coleman J M, Wright L D. Modern river deltas: Variability of processes and sand bodies [M]//Broussard M L. *Deltas: Models for exploration*. Houston: Houston Geological Society, 1975: 99-149.
- [21] 薛良清, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类 [J]. *地质学报*, 1991, 65(2): 141-153. [Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems [J]. *Acta Geological Sinica*, 1991, 65(2): 141-153.]
- [22] Orton G J, Reading H G. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size [J]. *Sedimentology*, 1993, 40(3): 475-512.
- [23] Dashtgard S E, Gingras M K, MacEachern J A. Tidally modulated shorefaces [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(11): 793-807.
- [24] Yang B C, Dalrymple R W, Chun S S. Sedimentation on a wave-dominated, open-coast tidal flat, south-western Korea: Summer tidal flat - winter shoreface [J]. *Sedimentology*, 2005, 52(2): 235-252.
- [25] MacEachern J A, Bann K L, Bhattacharya J P, et al. Ichnology of deltas: Organism responses to the dynamic interplay of rivers, waves, storms, and tides [M]//Giosan L, Bhattacharya J P. *River deltas: Concepts, models, and examples*. Tulsa: SEPM Special Publication, 2005, 83: 49-85.
- [26] Buatois L A, Santiago N, Herrera M, et al. Sedimentological and ichnological signatures of changes in wave, river and tidal influence along a Neogene tropical deltaic shoreline [J]. *Sedimentology*, 2012, 59(5): 1568-1612.
- [27] Rossi V M, Perillo M M, Steel R J, et al. Quantifying mixed-process variability in shallow-marine depositional systems: What are sedimentary structures really telling us? [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(10): 1060-1074.
- [28] Ashton A D, Giosan L. Wave-angle control of delta evolution [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13405.
- [29] Anthony E J. Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: A review [J]. *Marine Geology*, 2015, 361: 53-78.
- [30] Dodet G, Bertin X, Bruneau N, et al. Wave-current interactions in a wave-dominated tidal inlet [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(3): 1587-1605.
- [31] Nardin W, Fagherazzi S. The effect of wind waves on the development of river mouth bars [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12): L12607.
- [32] Nardin W, Mariotti G, Edmonds D A, et al. Growth of river mouth bars in sheltered bays in the presence of frontal waves [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(2): 872-886.
- [33] Geleynse N, Storms J E A, Walstra D J R, et al. Controls on river delta formation; insights from numerical modelling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302 (1/2): 217-226.
- [34] Jerolmack D J, Swenson J B. Scaling relationships and evolution of distributary networks on wave-influenced deltas [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23402.
- [35] Edmonds D A, Hoyal D C J D, Sheets B A, et al. Predicting delta avulsions: Implications for coastal wetland restoration [J]. *Geology*, 2009, 37(8): 759-762.

- [36] Jerolmack D J. Conceptual framework for assessing the response of delta channel networks to Holocene sea level rise [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(17/18): 1786-1800.
- [37] Giosan L, Donnelly J P, Vespremeanu E, et al. River delta morphodynamics: Examples from the Danube delta [M]//Giosan L, Bhattacharya J P. River deltas: Concepts, models, and examples. Tulsa: SEPM Special Publication, 2005, 83: 393-411.
- [38] Giosan L. Morphodynamic feedbacks on deltaic coasts: Lessons from the wave-dominated Danube delta [C]//Proceedings of the sixth international symposium on coastal engineering and science of coastal sediment process. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 2007: 828-841.
- [39] Correggiari A, Cattaneo A, Trincardi F. Depositional patterns in the Late Holocene Po delta system [M]//Giosan L, Bhattacharya J P. River deltas: Concepts, models, and examples. Tulsa: SEPM Special Publication, 2005, 83: 365-392.
- [40] Nanson R A, Vakarelov B K, Ainsworth R B, et al. Evolution of a Holocene, mixed-process, forced regressive shoreline: The Mitchell River delta, Queensland, Australia [J]. *Marine Geology*, 2013, 339: 22-43.
- [41] Hansen C D, MacEachern J A. Application of the asymmetric delta model to along-strike facies variations in a mixed wave- and river-influenced delta lobe, Upper Cretaceous Basal Belly River Formation, central Alberta [M]//MacEachern J A, Bann K L, Gingras M K, et al. Applied ichnology. Tulsa: SEPM Special Publication, 2007: 255-271.
- [42] Li W G, Bhattacharya J P, Zhu Y J, et al. Evaluating delta asymmetry using three-dimensional facies architecture and ichnological analysis, Ferron ‘Notom Delta’, Capital Reef, Utah, USA [J]. *Sedimentology*, 2011, 58(2): 478-507.
- [43] Forzoni A, Hampson G, Storms J. Along-strike variations in stratigraphic architecture of shallow-marine reservoir analogues: Upper Cretaceous Panther Tongue delta and coeval shoreface, Star Point Sandstone, Wasatch Plateau, Central Utah, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(8): 968-989.
- [44] Hampson G J, Howell J A. Sedimentologic and geomorphic characterization of ancient wave-dominated deltaic shorelines: Upper Cretaceous Blackhawk Formation, Book Cliffs, Utah, U. S. A. [M]//Giosan L, Bhattacharya J P. River deltas: Concepts, models, and examples. Tulsa: SEPM Special Publication, 2005, 83: 133-154.
- [45] Charvin K, Hampson G J, Gallagher K L, et al. Intra-parasequence architecture of an interpreted asymmetrical wave-dominated delta [J]. *Sedimentology*, 2010, 57(3): 760-785.
- [46] 纪友亮, 刘君龙, 王天云, 等. 陆相湖盆三角洲—滩坝复合砂体分布模式及编图方法 [J]. 古地理学报, 2016, 18(4): 615-630. [Ji Youliang, Liu Junlong, Wang Tianyun, et al. Distributing pattern and mapping method of delta and beach-bar composite sand-bodies in continental lacustrine basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(4): 615-630.]
- [47] 李维禄, 徐怀民, 高思宇, 等. 三角洲改造背景的浪控滨岸砂体成因类型及展布特征:以塔里木盆地东河塘地区“东河砂岩”为例 [J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(9): 86-95. [Li Weilu, Xu Huaimin, Gao Siyu, et al. Genetic types and distribution features of wave-dominated shore deposits with reworked-delta background: A case of ‘Donghe Sandstones’ in Donghetang oil field, Tarim Basin [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(9): 86-95.]
- [48] 陈秀艳, 姜在兴, 杜伟, 等. 东营凹陷沙三中亚段东营三角洲沉积期次成因及对含油性的影响 [J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 344-353. [Chen Xiuyan, Jiang Zaixing, Du Wei, et al. Origin of depositional cycles and their influence on oil-bearing sandstone of Dongying delta in Mid-Es3, Dongying Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 344-353.]
- [49] 李顺利, 李竟, 陈彬滔, 等. 西湖凹陷渐新统花港组大型沿岸砂坝沉积特征及主控因素 [J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 493-503. [Li Shunli, Li Jing, Chen Bintao, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of large-scale longshore bar in the Oligocene Huagang Formation, Xihu Sag [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(3): 493-503.]
- [50] Li Y Y, Bhattacharya J P, Ahmed S, et al. Re-evaluating the paleogeography of the river-dominated and wave-influenced Ferron Notom Delta, southern Central Utah: An Integration of detailed facies-architecture and paleocurrent analysis [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2018, 88(2): 214-240.
- [51] Ahmed S, Bhattacharya J P, Garza D E, et al. Facies architecture and stratigraphic evolution of a river-dominated delta front, Turonian ferron sandstone, Utah, U. S. A [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(2): 97-121.
- [52] Neill C F, Allison M A. Subaqueous deltaic Formation on the Atchafalaya Shelf, Louisiana [J]. *Marine Geology*, 2005, 214(4): 411-430.
- [53] Pellegrini C, Maselli V, Cattaneo A, et al. Anatomy of a compound delta from the post-glacial transgressive record in the Adriatic Sea [J]. *Marine Geology*, 2015, 362: 43-59.
- [54] Amorosi A, Maselli V, Trincardi F. Onshore to offshore anatomy of a Late Quaternary source-to-sink system (Po Plain-Adriatic Sea, Italy) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 212-237.
- [55] Hampson G J. Sediment dispersal and quantitative stratigraphic architecture across an ancient shelf [J]. *Sedimentology*, 2010, 57(1): 96-141.
- [56] Hampson G J, Premwichein K. Sedimentologic character of ancient muddy subaqueous-deltaic clinoforms: Down Cliff Clay member, Bridport Sand Formation, Wessex Basin, U. K. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(9):

- 951-966.
- [57] Vakarelov B K, Ainsworth R B, MacEachern J A. Recognition of wave-dominated, tide-influenced shoreline systems in the rock record: Variations from a microtidal shoreline model [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 279: 23-41.
- [58] Patruno S, Hampson G J, Jackson C A L. Quantitative characterisation of deltaic and subaqueous clinoforms [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 142: 79-119.
- [59] Rossi V M, Paterson N W, Helland-Hansen W, et al. Mud-rich delta-scale compound clinoforms in the Triassic shelf of northern Pangea (Havert Formation, south-western Barents Sea) [J]. *Sedimentology*, 2019, 66(6): 2234-2267.
- [60] Pirmez C, Pratson L F, Steckler M S. Clinoform development by advection-diffusion of suspended sediment: Modeling and comparison to natural systems [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B10): 24141-24157.
- [61] Swenson J B, Paola C, Pratson L, et al. Fluvial and marine controls on combined subaerial and subaqueous delta progradation: Morphodynamic modeling of compound-clinoform development [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2005, 110(F2): F02013.
- [62] Willis B J, Sun T, Ainsworth R B. Contrasting facies patterns between river-dominated and symmetrical wave-dominated delta deposits [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2021, 91(3): 262-295.
- [63] Walsh J P, Nittrouer C A. Understanding fine-grained river-sediment dispersal on continental margins [J]. *Marine Geology*, 2009, 263(1/2/3/4): 34-45.
- [64] Deibert J E, Benda T, Løseth T, et al. Eocene clinoform growth in front of a storm-wave-dominated shelf, Central Basin, Spitsbergen: No significant sand delivery to deepwater areas [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(4): 546-558.
- [65] Uroza C A, Steel R J. A highstand shelf-margin delta system from the Eocene of West Spitsbergen, Norway [J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 203(3/4): 229-245.
- [66] Bowman A P, Johnson H D. Storm-dominated shelf-edge delta successions in a high accommodation setting: The palaeo-Orinoco Delta (Mayaro Formation), Columbus Basin, South-East Trinidad [J]. *Sedimentology*, 2014, 61(3): 792-835.
- [67] Gomis-Cartesio L E, Poyatos-Moré M, Flint S S, et al. Anatomy of a mixed-influence shelf edge delta, Karoo Basin, South Africa [J]. Geological Society, London, Special Publication, 2017, 444: 393-418.
- [68] Porębski S J, Steel R J. Deltas and sea-level change [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(3): 390-403.
- [69] 李文静, 王英民, 何敏, 等. 珠江口盆地中新世陆架边缘三角洲的类型及控制因素 [J]. 岩性油气藏, 2018, 30(2): 58-66. [Li Wenjing, Wang Yingmin, He Min, et al. Types and controlling factors of shelf margin delta of Middle Miocene in Pearl River Mouth Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(2): 58-66.]
- [70] Peng Y, Steel R J, Olariu C, et al. Rapid subsidence and preservation of fluvial signals in an otherwise wave-reworked delta front succession: Early-mid Pliocene Orinoco continental-margin growth, SE Trinidad [J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 395: 105555.
- [71] Dalrymple R W, Baker E K, Harris P T, et al. Sedimentology and stratigraphy of a tide-dominated, foreland-Basin delta (Fly River, Papua New Guinea) [M]//Sidi F H, Nummedal D, Imbert P, et al. Tropical deltas of southeast Asia: Sedimentology, stratigraphy, and petroleum geology. Tulsa: SEPM Special Publication, 2003, 76: 147-173.
- [72] 侯云东, 陈安清, 赵伟波, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组潮汐—三角洲复合砂体沉积环境 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 393-401. [Hou Yundong, Chen Anqing, Zhao Weibo, et al. Analysis on the depositional environment of Carboniferous Benxi Formation tidal-delta sand body complex, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(4): 393-401.]
- [73] 李阳, 金振奎, 朱小二, 等. 潮控河口湾岩相类型及沉积模式: 以厄瓜多尔 Oriente 盆地北部区块上白垩统 Napo 组 LU 段为例 [J]. 沉积学报, 2020, 38(4): 826-837. [Li Yang, Jin Zhenkui, Zhu Xiaoer, et al. Lithofacies and sedimentary model of tidal-dominated estuary: A case study of LU interval from Upper Cretaceous Napo Formation, northern Oriente Basin, Ecuador [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(4): 826-837.]
- [74] Shchepetkina A, Gingras M K, Mángano M G, et al. Fluvio-tidal transition zone: Terminology, sedimentological and ichnological characteristics, and significance [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 214-235.
- [75] Flaig P P, Hasiotis S T, Prather T J, et al. Characteristics of a Campanian delta deposit controlled by alternating river floods and tides: The Loyd Sandstone, Rangely Anticline, Colorado, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2019, 89(12): 1181-1206.
- [76] Gugliotta M, Saito Y, Nguyen V L, et al. Sediment distribution and depositional processes along the fluvial to marine transition zone of the Mekong River delta, Vietnam [J]. *Sedimentology*, 2019, 66(1): 146-164.
- [77] Chen S, Steel R J, Dixon J F, et al. Facies and architecture of a tide-dominated segment of the Late Pliocene Orinoco Delta (Morne L'Enfer Formation) SW Trinidad [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 208-232.
- [78] Li S L, Yu X H, Steel R, et al. Change from tide-influenced deltas in a regression-dominated set of sequences to tide-dominated estuaries in a transgression-dominated sequence set, East China Sea Shelf Basin [J]. *Sedimentology*, 2018, 65(7):

- 2312-2338.
- [79] 吴静, 张晓钊, 白海军, 等. 珠江口盆地阳江凹陷中新统潮流控体系及其岩性圈闭勘探意义 [J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3673-3689. [Wu Jing, Zhang Xiaozhao, Bai Haijun, et al. Miocene tidal control system and its exploration significance of lithologic trap in Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2021, 46(10): 3673-3689.]
- [80] Boyd R, Dalrymple R W, Zaitlin B A. Estuarine and incised-valley facies models [M]//Posamentier H W, Walker R G. Facies models revisited. Tulsa: SEPM Special Publication, 2006, 84: 171-235.
- [81] Rossi V M, Longhitano S G, Mellere D, et al. Interplay of tidal and fluvial processes in an Early Pleistocene, delta-fed, strait margin (Calabria, southern Italy) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 87: 14-30.
- [82] Olariu C, Steel R J, Dalrymple R W, et al. Tidal dunes versus tidal bars: The sedimentological and architectural characteristics of compound dunes in a tidal seaway, the Lower Baronia Sandstone (Lower Eocene), Ager Basin, Spain [J]. Sedimentary Geology, 2012, 279: 134-155.
- [83] Kurcinka C, Dalrymple R W, Gugliotta M. Facies and architecture of river-dominated to tide-influenced mouth bars in the Lower Lajas Formation (Jurassic), Argentina [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(5): 885-912.
- [84] La Croix A D, Dashtgard S E. Of sand and mud: Sedimentological criteria for identifying the turbidity maximum zone in a tidally influenced river [J]. Sedimentology, 2014, 61(7): 1961-1981.
- [85] Dashtgard S E, MacEachern J A, Frey S E, et al. Tidal effects on the shoreface: Towards a conceptual framework [J]. Sedimentary Geology, 2012, 279: 42-61.
- [86] Yang B, Dalrymple R W, Chun S, et al. Tidally modulated storm sedimentation on open-coast tidal flats, southwestern coast of Korea: Distinguishing tidal-flat from shoreface storm deposits [M]//Hampson G J, Steel R J, Burgess P M, et al. Recent advances in models of siliciclastic shallow-marine stratigraphy. Tulsa: SEPM Special Publication, 2008, 90: 161-176.
- [87] Wei X J, Steel R J, Ravnås R, et al. Variability of tidal signals in the Brent Delta Front: New observations on the Rannoch Formation, northern North Sea [J]. Sedimentary Geology, 2016, 335: 166-179.
- [88] Basilici G, De Luca P H V, Oliveira E P. A depositional model for a wave-dominated open-coast tidal flat, based on analyses of the Cambrian-Ordovician Lagarto and Palmares formations, north-eastern Brazil [J]. Sedimentology, 2012, 59(5): 1613-1639.
- [89] Yang B, Gingras M K, Pemberton S G, et al. Wave-generated tidal bundles as an indicator of wave-dominated tidal flats [J]. Geology, 2008, 36(1): 39-42.
- [90] Zhang J Y, Rossi V M, Peng Y, et al. Revisiting Late Paleocene Lower Wilcox deltas, Gulf of Mexico: River-dominated or mixed-process deltas? [J]. Sedimentary Geology, 2019, 389: 1-12.
- [91] MacEachern J A, Bann K L. The role of ichnology in refining shallow marine facies models [M]//Hampson G J, Steel R J, Burgess P M, et al. Recent advances in models of siliciclastic shallow-marine stratigraphy. Tulsa: SEPM Special Publication, 2008, 90: 73-116.
- [92] Collins D S, Johnson H D, Baldwin C T. Architecture and preservation in the fluvial to marine transition zone of a mixed-process humid-tropical delta: Middle Miocene Lambir Formation, Baram Delta province, north-west Borneo [J]. Sedimentology, 2020, 67(1): 1-46.
- [93] 李洋, 朱筱敏, 赵东娜, 等. 琼东南盆地崖13-1气田陵三段高分辨率层序地层及沉积体系研究 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 999-1010. [Li Yang, Zhu Xiaomin, Zhao Dongna, et al. High-resolution sequence stratigraphy and sedimentary system study of the 3<sup>rd</sup> member of Lingshui Formation in Ya13-1 gasfield, Qiongdongnan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 999-1010.]
- [94] 丁琳, 杜家元, 罗明, 等. 珠江口盆地惠州凹陷新近系珠江组K22陆架砂脊沉积成因分析 [J]. 吉地理学报, 2016, 18(5): 785-798. [Ding Lin, Du Jiayuan, Luo Ming, et al. Analysis of depositional genesis of K22 shelf sand ridges in the Neogene Zhujiang Formation in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Paleogeography, 2016, 18(5): 785-798.]

## Recent Advances in River-Wave-Tide Mixed Processes

PENG Yang<sup>1,2</sup>, GONG ChengLin<sup>2</sup>, LI ShunLi<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract:** Mixed-energy process interaction of river, wave and tidal currents is one of the main research questions in sedimentology. In this study, the interactions of river-wave, river-tide, wave-tide and river-wave-tide in deltas and other coastal depositional systems are reviewed, and the associated sedimentary features are summarized. Mixed river and wave processes usually occur near the river mouth, and the relative strength and angle of the waves influence the morphology and sediment distribution in deltas. Long-term mixed processes may result in asymmetrical deltas and wave-dominated compound-clinoform deltas. The combined processes of river and tide are seen in the fluvial-to-marine transition zone of deltas and estuaries, particularly in macrotidal and mesotidal regions. Deposits of deltas and estuaries tend to repeat vertical stacking as sea level, sediment supply and climate change. Tidal processes have a significant impact on wave-influenced environments, as they not only directly influence sediment deposition, but also shift wave zones along the shoreface profile when water depth varies with tidal cycle. Despite there have been some recent research on mixed-process depositional systems, the short-term and long-term interaction processes still need to be better understood.

**Key words:** mixed process; river; wave; tide; delta; estuary; tidal flat