

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.01.015

河口海岸沉积层理特征与形成机制

周曾^{1,2}, 刘瑶², 吴一鸣², 徐凡³, 范代读⁴, 张长宽²

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210024; 2. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏南京 210024;
3. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 4. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 河口海岸地处海陆交界带, 其沉积层理特征与形成机制是沉积动力学、动力地貌学和地层学等学科方向的研究热点, 对评价海岸工程环境效应、重建沉积古环境等具有重要参考价值。通过梳理河口海岸区域径流、潮汐、波浪等多种动力因子作用的研究成果, 归纳不同动力主导作用形成的沉积层理特征, 剖析3种基本动力对沉积层理塑造的动力学机制, 阐释洪水、风暴偶发动力因子以及生物扰动、海平面变化、围垦工程等其他影响因子对沉积层理形成和保存的作用机理。同时, 总结了数值模拟手段在沉积层理形成和破坏机制解译方面的应用及取得的机理认知, 提出在河口海岸沉积层理时空尺度认知、多因素耦合反演模型开发应用等方面有待进一步研究的科学问题。

关键词: 沉积层理; 河口海岸; 动力地貌; 形成机制; 数值模拟

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)01-0167-16

河口海岸的地貌形态与沉积特征不仅涉及其沉积历史过程和层序地层分析, 而且对沉积物、营养物和其他溶解、悬浮成分在地球表面的运动输送造成了主要限制^[1], 泥沙分层特性还可用于分析地貌演变、生态系统变化以及历史地理演替规律。近年来, 浅海区域沉积层理已经成为地质专业研究热点, 对解释古水流、沉积物通量类型以及沉积环境演变具有重要参考价值, 层序地层演化机制的梳理总结也能为古环境重建提供理论基础^[2-3]。例如, 通过分析连续沉积记录以及数值模拟, 重现新石器时代良渚文化由于海平面上升导致风暴水涝灾害从而崩溃衰变的发展过程^[4]。了解河口海岸区域的沉积层理形成机制有利于跨学科研究, 并作为未来河口水动力分析、沉积环境冲淤变化推断和河口海岸区域可持续管理的理论基础。

河口海岸区域通过相互连通的水流通道实现海陆间物质输送交换, 这一区域包括陆地-近海连续体的地貌特征以及整个沉积体的地质特征, 其演变是高度动态的。沉积层理是沉积物三维排列的表征, 由颜色、粒度、矿物组分、沉积结构等特征变化所产生的宏观特征。泥沙的起动、输送、沉积等过程是河流、海洋水动力条件的具体表现, 也是水动力作用于沉积层理形成过程的媒介。径流、波浪、潮汐、风暴潮等动力因素通过影响沉积物粒度、沉积物输运量、生物扰动等方面进一步改变沉积体系构成^[5]。除了不同水动力因素, 海平面上升、人类活动、泥沙自身的电化学特性及物理特性等也会影响泥沙运动模式^[6-7], 从而影响河口海岸沉积形态和层理特征^[8-9]。

由于不同类型水动力作用, 或是不同水动力相互作用的强度差异, 沉积混合过程往往反复叠加或者相互抵消, 使得沉积演变更复杂, 呈现不同的沉积层序特性。各组分沉积物的分带性、分层性会影响河口、潮滩等生态系统的分布以及健康状况^[10]。通过现场观测、钻孔取样分析等方法, 有关河口海岸潮滩层理形成破坏过程、作用因素的研究已有了大量讨论。作为沉积体系的重点分析内容, 早在1965年, Evans^[11]选取一系列60 cm长的短柱样对英国Wash潮滩的沉积环境进行研究, 将广阔的潮滩区域划分为7个具有不同表

收稿日期: 2023-08-17; 网络出版日期: 2023-11-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20231123.1110.002>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3106201); 国家自然科学基金资助项目(42376161)

作者简介: 周曾(1986—), 男, 江苏句容人, 教授, 博士, 主要从事河口海岸动力地貌学、潮滩系统生物动力过程等方面研究。E-mail: zeng.zhou@hhu.edu.cn

通信作者: 范代读, E-mail: ddfan@tongji.edu.cn

面特征、生物量、沉积物组合以及沉积结构的沉积亚环境。此后，有关世界各地河口海岸潮滩的沉积层理特征研究逐渐增加，如英国西威尔士 Dyfi 河口、澳大利亚南部、中国长江三角洲、韩国西海岸庆吉湾等^[12-15]，以及古今的对比研究，如挪威近海 Halten 阶地南部、美国犹他州 Ferron Notom 三角洲等^[16-17]。因此，本文旨在总结河口海岸区域沉积层理特征与形成机制，通过理论分析、数值模拟等来阐述沉积层理形成过程，以期进一步推进各动力作用在沉积层序影响机制的解译，并对本学科有待更深层次研究的科学问题进行探讨。

1 河口海岸沉积层理特征概述

河口海岸沉积物输送搬运模式、层序地层的三维构形、沉积层理分布及规律等都与潮汐、河流、波浪等水动力因素密切相关。现代研究者无法身临其境地观察历史地质沉积特征，通常依赖对现代环境中沉积相的深入研究来类比分析。虽然地层绝对年龄可以通过同位素衰变原理确定，但是由于底床差异、事件缺失等原因，同一时空的地层钻孔取样插值分析精度有限，地质历史的多解性仍然存在，层序地层时空尺度的认知有待加强。大量现场观测和沉积物岩芯取样分析表明，河口海岸地区存在砂泥交替堆积的沉积层序^[12,15]。由于多种动力共同影响，其沉积序列解释通常复杂且充满不确定性，不同动力条件下形成的沉积层理特征各异，典型潮汐沉积构造包括双向交错层理、潮汐韵律层、S 形交错层理、复合交错层理等(图 1，据文献^[15, 17-27]绘制)。

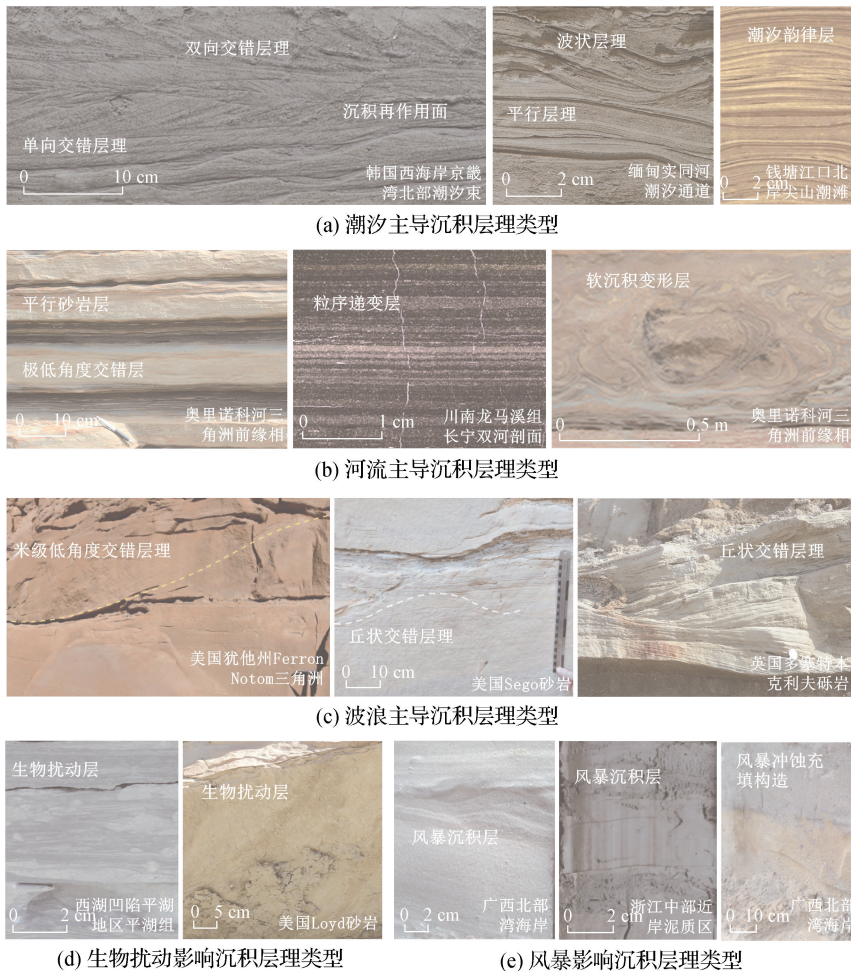


图 1 不同水动力主导形成的沉积层理类型

Fig. 1 Typical sedimentary structures by different dominant hydrodynamic forces

河口海岸通常向陆方向坡度变大, 潮汐受浅水效应影响潮差向陆增大, 潮汐能量聚集, 潮流作用向陆增强^[28]。在潮汐作用显著的河口海岸区域, 受涨落潮流速度或是大小潮周期性变化影响, 沉积物在沉积过程中常形成特殊的砂泥互层状层理, 被称为潮汐层理, 其纹层厚度随着基准面变化和沉积物通量等的相互作用而发展变化。在潮汐水道出现侧向加积的规律性砂质纹层, 被定义为潮汐束状体(tidal bundles)沉积层系^[29]。受潮汐影响时, 河口三角洲前缘环境中存在远端沉积, 输送到近海区域的泥沙被三角洲前缘和浅陆架上的潮流重新分配。潮汐层理是潮汐作用下横向、垂向的薄层细砂、粉砂和泥层交叠产生的沉积构造, 其层厚、粒度变化呈现出一定规律^[30]。在长江三角洲潮坪和江苏中部潮滩现场观测中发现, 半日潮产生的纹层为毫米级, 约1~5 mm, 半月潮产生的韵律层为厘米级, 约1~3 cm; 潮汐纹层数量理论上与涨落潮次数相等, 但由于不间断冲刷, 实际观测层数往往少得多, 推算百年尺度潮坪层偶保存率仅有0.74%^[31-32]。

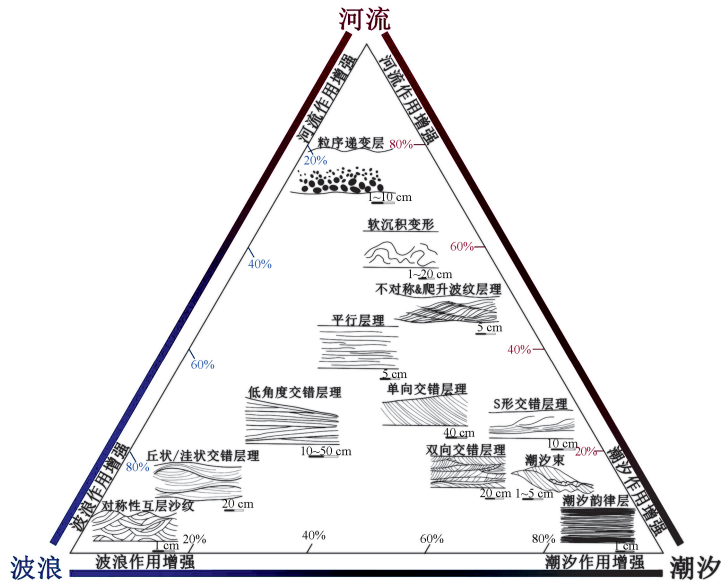
河流通过各分流通道向近海区域输送沉积物。径流作用强烈的河口流速大, 分流河道多, 泥沙通过固定河流通道向海方向淤积延伸, 如密西西比河三角洲。径流作用强, 相对较弱的波浪、潮汐作用不能完全对沉积地层进行再改造, 因此径流影响的地层层序得以保存, 相较潮汐层理厚度更大, 通常几厘米到十几厘米^[33]。三角洲沉积地层通常向上单层厚度增加、粒径变粗, 其上覆分流河道沉积的粒径最粗, 发育正粒序递变层理、槽状交错层理等。在远三角洲前缘出现的河口坝沉积相与末端分流河道有部分重叠, 常见的是粒径级配变化的板状交错层理。由于河流流量较大、河口处盐度向海单调递增以及高密度流导致的沉积物异重流, 都不利于底栖生物定居, 生物扰动程度较低^[5]。

波浪对河口海岸沉积层理的影响取决于海岸形态和近岸水深。河流流量减少和相对海平面上升都会加剧波浪对河口海岸的改造作用。波浪能量从陆架向海岸浅水区增加, 之后因破碎作用和底摩擦能量耗散等而快速衰减^[28]。波浪作用为主的沉积环境通常保存有丘状交错层理、低角度交错层理等。海洋环境中波浪作用主导的沉积往往砂层分选良好, 生物扰动程度中等到强烈, 并且存在贝壳碎片^[34]。前滨被破碎波浪冲刷和反冲, 形成独特的板状和楔状层理, 并且向海有2°~3°的倾斜^[35]。分流河口坝沉积物偏砂质, 该区域波浪作用导致细颗粒沉积物再悬浮而阻碍了泥质沉积^[28]。

生物扰动会造成层理间不同类型泥沙颗粒的搬运和掺混, 形成高多样性的生物扰动砂岩与粉砂岩或泥岩互层(图1(d))^[20]。风暴潮不断侵蚀平静天气累积的淤积, 也会在潮滩上部造成厚度大、含砂量高的淤积带。江苏中部潮滩现场观测表明, 滩面侵蚀一般为5~10 cm, 淤积层厚度为2 cm^[31]。而在其他近岸区, 台风事件沉积层厚为0.5~50 cm(图1(e))^[27]。河流洪水事件层的识别特点是黏土含量高(占总质量的20%~40%)、地层内部分层以及短期内沉积层沉积速率高^[36]。

2 不同动力条件下河口海岸沉积层理形成过程

河口海岸沉积层理的形态特征受控于动力条件, 最早的试验研究是 Terwindt 等^[37]通过管流试验验证近岸河道中波纹、透镜状等层理的形成机制, 测量流速和沉积物临界起切应力, 发现潮流临界速度的微小差异是形成不同层理形态的重要因素。后续 Sato 等^[38]同样利用管流试验探究层理的形成过程和保存潜力, 将层理形成过程描述为浓度高的 A 型泥层先因流速降低而沉降形成波纹状褶皱, 浓度低的 B 型泥层随后沉淀, 填充波纹凹槽。由于物理模型试验耗时长、水动力模拟困难, 因此相关试验研究较少。本节重点从现场观测角度阐释沉积层理的形成过程。河流入海流量、挟沙量和海洋水动力作用强弱都会改变其所在浅海陆架的沉积层序, 由于混合作用往往同时发生, 或是前者形成的沉积物被后者中断甚至再改造, 其沉积构造保存在同一地层中, 各动力作用的识别、判断复杂^[34], 学界常通过分析河口海岸主导水动力对沉积层理特征的塑造来阐述其形成和演变机制。Rossi 等^[34]考虑沉积构造形成的复杂性, 通过大量文献调研, 建立了描述混合过程的沉积层理岩相解释, 用沉积构造中每个主导过程所占概率或可能性来量化解释沉积过程的复杂多变性(图2)。以下基于这个思路, 分别介绍不同动力条件主导下河口海岸沉积层理形成、破坏等演变过程。



注：该图基于文献调研，百分比表示每个沉积构造由河流、波浪、潮汐主导形成的概率

图2 河口海岸沉积构造按照河流、波浪、潮汐的三相分类方法(根据文献[34]修改)

Fig. 2 A threefold division of estuarine coastal sedimentary structure according to river, wave and tide

2.1 潮汐作用主导

河口海岸潮滩沉积物供应丰富，通常由非黏性砂(粉砂、细砂)和黏性沙共同组成，沉积形态多变，尺度跨越大，既有数十米的潮汐韵律岩和水下沙丘又有潮滩上毫米级的微型沉积层理。Reineck等^[39]首次将沉积层理按照几何形态和砂泥成分的不同进行分类，如压扁层理、波状层理(图1(a))和透镜状层理，这些较为常见的潮汐层理的形成与潮流或者波浪与潮汐憩流的交替作用有关。在潮流运动时，带动不同粒径的砂颗粒运动并沉积形成砂质层；而在涨停、落憩阶段，潮流近似停滞，粒径较小的黏土沉降形成泥质层。强潮流环境中的侵蚀和沉积变化将影响沉积相带和彼此堆叠模式的变化，反映在不同的沉积构造中。全球范围内受到强潮汐影响的部分大型河口，例如长江、恒河、亚马逊河等，宽敞的河-海汇流区域、低缓的坡度都为潮汐作用提供了基础^[28]。Klein^[40]发现优势潮流作用形成的床面在反方向非优势潮流侵蚀作用参与下的不连续沉积界面，可看作是潮流历时-速度不对称性的证据，并将其定义为沉积再作用面(图1(a))。

潮汐沉积保存往往与海侵相关。美国Sego砂岩保存有明显的潮汐沉积相，主要表现为泥质覆盖的复合沙坝，沙坝中常见水流波纹交错层理，少见平行砂质层与含有双壳软体动物化石的夹层交替沉积。潮汐主导的砂岩发育向上变粗沉积层序和波状交错层理。潮汐作用强烈的沉积构造中单、双黏土层分布广泛，横向分隔砂层，形成砂质和泥质层交替沉积这一典型潮控三角洲沉积特征^[41]。潮汐作用还体现在沉积体内部的非均质性，在砂层内部和层理间都留有更多泥质，内部泥质结构更复杂^[20]。泥沙表层粒径对于潮汐能量梯度向陆方向减弱的响应会导致强波浪缺失，仅有潮汐存在时，表层泥沙粒径向陆变细^[30]。而在垂直方向上，Archer^[42]将全球各地潮汐测站的数据应用于周期性潮汐韵律的建模研究，指出潮汐涨落速度和周期性变化倾向于形成垂向沉积层理。后续其他实地观测研究也指出垂向沉积物呈现分层特征。

此外，潮汐层理的韵律性被解释为对该地区周期性增减潮流的响应，如半日、半月、月、季度到年不等的潮汐周期，表现为不同潮汐层理序列、层纹厚度的循环变化。Visser^[29]开创性地将潮滩沉积层理与潮汐作用以及天体运动联系到一起，将单个砂/泥质层作为一个潮汐周期内的沉积产物。在韩国西海岸贡索湾观测中，半日潮形成日不均衡的厚薄交替层，叠加组成层纹厚度的正弦变化(大小潮周期)，且较厚层粒径更粗^[43]。任美镔等^[44]和李炎等^[45]分别在江苏王港地区、浙江大目涂潮坪的潮滩剖面进行周期性观测，发现单个潮周期的涨、落循环期间，高潮憩流时间过短不足以形成砂泥交替的薄互层理；半月大小潮循环期间，

大、小潮分别沉积砂和泥, 形成周期性的砂泥交替薄层层理; 并且受到季节性水动力影响, 滩面冬淤夏冲动态变化, 高潮位的季节变化会对潮间下带中上部造成不同程度的侵蚀。杨世伦等^[46]指出长江三角洲区域的季节性冲淤交替与潮差、风浪、来沙量等因素有关, 例如在雨季, 由于沙量增加形成异常厚的大小潮潮汐束。

2.2 河流作用主导

河流是河口海岸区域最重要的沉积物来源之一, 沉积物输入通量和持续时间差异是形成不同内部沉积特征的原因。Flaig 等^[20]尝试通过岩相分析探究美国科罗拉多州 Loyd 三角洲的沉积特征, 河流流量的季节性变化直接影响输沙量, 短期内输入的大量泥沙主要以平行层状砂岩为主(图 1(b)); 在长期的低河流量期间, 海洋动力改造和强烈生物扰动形成了细粒为主的泥质盖层。另一个典型的河控三角洲——美国犹他州 Panther Tongue 三角洲, 被认为泥沙以推移质形式向浅海推进, 虽然与 Loyd 三角洲一样都受到河流洪水期影响, 但主要发育平行层理、浪流复合波纹交错层理或有机质含量丰富的不对称波纹状粉砂层或砂层, 生物扰动强度较低, 泥质层稀少。软沉积变形构造出现在浊流和滑塌导致的重力沉积相中, 有卷曲层理、倒转褶皱等(图 1(b)), 表明河流作用下, 河口坝和上三角洲前缘的泥沙快速沉积负荷或是三角洲前缘坡度过大导致松散沉积物滑塌堆积^[47]。

河流中沉积物的存在会影响湍流强度从而进一步改变沉积过程, 即使在水流或砂层中添加少量黏土颗粒, 也会形成截然不同的床面形态^[48]。现代黄河三角洲研究中, 高密度流较为常见, 从河口到三角洲前缘呈现出特征性的浊积岩薄层沉积^[49]。河流洪水期, 高密度流携带的陆源有机碎屑会保存在波纹砂层中。波纹状砂质韵律层理、水平状泥质层与粉砂层的交替都是由类似水动力反复作用形成的。Baas 等^[18]总结了水流流速迅速降低时砂、泥混合物在河床形成过程中的作用, 发现泥沙浓度高可能会在湍流较强时产生较大的水流波纹, 有利于保存坡度低缓的床面, 可能产生砂质和泥质混合的交错层理(这种交错层理往往出现在流速周期性变化时, 例如潮汐环境)。除了河流作用强烈阻碍了其他动力对沉积层理的改造之外, 地形地势的限制和变化也可能有利于河流作用为主的沉积地层的形成和保存。例如, 沉积层序发育晚期, 珠江口陆架边缘三角洲集中发育在开平地区, 使得后期该地区凹陷并为河流分流、沉积物沉积提供了场所^[50]。波浪作用的河口处, 波浪形成的障壁岛、沙洲也会阻挡后续风暴, 得以保留部分河流作用沉积地层。

偶发的洪水事件会导致沉积记录被大规模侵蚀或覆盖。洪水的特点是河流流量和含沙量的急速增长^[51]。洪水沉积和风暴泥沙再悬浮对三角洲最终地层保存形态影响重大。洪水期间, 异重流作为河流的水下延伸, 输送大量沉积物以密度驱动的底流形式进入海水, 产生的沉积相与正常情况显著不同。虽然大部分研究认为粒序递变层是河流作用的结果(图 1(b)), 但是也有部分研究认为粒序递变层是由风暴洪水造成的, 沉积物在风暴减弱阶段重新起动并被再改造^[17]。洪水过程的增强和短期内大量沉积物的供应, 从羽流沉降的沉积物形成了向海变薄和向海变细的沉积楔。洪水情况下的分层是湍流减少的结果, 虽然羽流回流有助于沉积物在近岸沉积, 在极端洪水排放期间, 仍可能发生高分层^[52]。河流洪水这一偶发事件引起的快速沉积会抑制泥沙颗粒在被埋藏前的改造作用。此外, 渐进交叉分层和爬升波纹的 S 形斜坡被看作是洪水对沉积环境造成影响的显著特征, 其中爬升波纹层理的形成与高悬沙量的湍流产生的牵引力和沉降过程有关^[53]。

2.3 波浪作用主导

波浪对河口沉积层理的改造体现在对河流输入到沿海和近岸堆积的沉积物的再搬运。在潮滩、海湾实地观测中, Janssen-Stelder^[54]和 Allen 等^[55]实地测量水位、流速、悬沙浓度以及泥沙沉积等数据并进行分析, 发现在荷兰 Wadden 海域潮滩和英国 Severn 河口都出现弱波浪作用时, 沉积物向岸输移, 发生淤积; 而强波浪作用时, 沉积物中的细颗粒则大多向海运动, 发生潮滩侵蚀。Lee 等^[56]在韩国西海岸半封闭的 Garolim 湾布置潮汐沉积动力学监测系统, 监测历时 15d 的冬季泥沙输移过程, 结果显示, 波浪的存在会引起底部沉积物的再悬浮, 使得悬沙浓度增高, 从而在退潮过程中随水流畅向海输移, 造成侵蚀。

波浪从海到陆相对强度变化, 对沉积层理作用呈现出空间差异性。受波浪影响较大的区域, 如巴西圣弗朗西斯科河三角洲, 一维模型显示向海岸进积时产生了以砂为主的向上粗化序列。通过对现代三角洲实例的调查, Bhattacharya 等^[57]发现受波浪影响的三角洲在平面形态和地层沉积相方面都表现出不同的非对称性。

非对称三角洲上下游不同叶瓣之间存在泥沙分布和岩相结构的差异,上游叶瓣泥沙供给多通常发育成滩脊平原,前三角洲泥质层和三角洲下游叶瓣有关,下游侧形成波浪主导的沙嘴和沙坝,保护泻湖和海湾,保留内部径流和潮汐沉积过程,避免波浪再改造。Li等^[22]研究美国犹他州 Ferron 砂岩沉积学时发现,波浪主导的滨海剖面粒径向上变粗,层内生物扰动程度为轻度到中度,近海陆架为泥质沉积物,下滨面沉积有丘状交错层理(图1(c)),上滨面则为米级、分米级低角度交错砂岩层(图1(c))。由于波浪冲刷和沉积物输入匮乏,相对海平面、沉积物供应和波浪气候在10~1000 a尺度的微小变化,可能会在海岸陆架形成独立的斜坡表面,生成的斜坡可以帮助识别外侧的控制因素。在波浪作用强的河口前缘序列中观察到沉积记录中断,河流洪水事件层厚和混合急速减少,且生物扰动强度增加。

风暴潮等极端气象条件也会造成垂向泥沙重组现象^[23]。风暴具有高能量和偶发性,携带的泥沙通量可能比平静天气下的泥沙通量大几个数量级。极端风暴贡献的沉积物增加量甚至足以抵消几十年来由于海平面上升而导致的预计海岸线退缩^[58]。突发风暴引起床面剪切应力增加,决定沉积物通量和扩散模式,可以将较粗的沉积物带向近岸沉积,在沉积物水平分布和垂直沉积层理特征上都具有明显影响效果^[59]。风暴期间,水流和波浪组合产生的高床层剪切应力会带走洪水期间沉积的物质^[52]。Fan等^[60]分析长江三角洲泥沙沉积层理时,指出强风浪和潮流会形成厚层、粗粒径层理;并且越靠近海侧,风暴影响的沉积越显著,形成更厚的单层沉积和更多的风暴沉积层。王建等^[31]观测江苏中部潮滩,收集风暴潮期间柱状样,通过粒度统计分析得到泥沙构造变化情况,台风期间泥沙的沉积变化随深度增大,粒径递增以及泥沙层理都发育显著。Budillon等^[61]在意大利萨勒诺湾的岩石地层和地震勘测研究中指出,风暴沉积也会呈现出砂质层占比多、底接触面突变、与泥质层互成层理的现象。

风暴引起的迅速增水与强潮共同作用会改变海岸沉积物的运输格局,在潮滩和沙质海岸呈现出明显的演变特征差异^[62],并且存在向陆方向砂层厚度减小、出现非常态的砂砾质层和生物扰动迹象等其他特征。Peng等^[23]对Orinoco三角洲的地层结构及演替进行了分析,佐证了河流、潮汐、波浪的相互作用,并且风暴潮改造占主导作用时,三角洲前缘泥沙组成向上变粗、加厚,形成波纹状分层砂岩,由于该地区异常快速的沉降(平均大于1 km/Ma)会阻碍风暴潮对河流、潮汐形成沉积层的再改造。白令海以北的育空河呈现出粗颗粒砂和粉砂、陆源淤泥交错的夹层,厚度为厘米/分米级,该夹层被认为是风暴或者风海流引发的泥沙通量变化记录。偶发的高能量风暴事件造成的沉积往往呈现出厚层状(可达60 cm)的丘状交错层理,台风期间的强浪会使得底床受到强烈侵蚀,风暴会造成砂岩层之间泥岩夹层的丢失,丘状交错层理和含有生物扰动迹象的砂岩层交替是平静天气和风暴交替情况下风暴占主导地位的沉积特征^[5]。

2.4 波浪、潮汐、河流共同作用

随着对河口海岸沉积体系以及沉积层理研究的不断深入,一些研究发现,现代很多河口区域的沉积特征不仅仅受到单一水动力因素控制^[28,63],混合过程在时间和空间尺度上的共同作用使得沉积系统更为复杂。例如,潮汐运动抵消了河流向海岸输沙能力的降低,使沉积重心向海移动,并且受潮汐影响的分流河道迁移率较低,潮汐的存在减少了三角洲分流河道流量分配的不对称性^[64]。潮汐和径流的共同作用往往会使三角洲河口的沉积层反复叠加。河流主导的沉积在经历较强潮汐变化时,径流和沉积物输入保持在较低水平,可能会在砂质前积层之间呈现出更厚、更细、更广泛的生物扰动互层^[20]。基于动力过程的三端元法现代海岸地貌分类中,有近3成的海岸受到波浪、潮汐、河流混合作用的控制^[65]。由于河口海岸的存在历时久,覆盖范围广,其沉积过程也会随着动力作用在时间和空间上的差异性而有所不同。在全新世三角洲演替过程研究中发现,大型三角洲由于水动力强度交替变化,可能经历3种常见的动力过程变化:从径流主导转变为波浪主导,如密西西比河三角洲;从潮汐主导转变为波浪主导,如湄公河三角洲;从径流主导转变为潮汐主导,如印度尼西亚马哈坎三角洲^[66]。波浪控制的三角洲或者滨海沉积物通常被受河流、潮汐影响的分流河道阻断,而后被潮汐形成的砂泥互层和陆架沉积物覆盖^[67]。不同强度的潮汐和波浪作用会在潮滩底床产生交错层理,如双向或人字交错层理、沉积再作用面。珠江口水动力特征研究指出,径流作用和潮汐作用在河口处相互对立,此消彼长,丰、枯水期,径流和潮汐交替占主导地位^[68]。空间位置不同也会导致动力因素差异,例如,珠江三角洲西北部分流河口是以河流作用为主的径流动力体系,而北部和中部则是潮汐为主导

因素, 纳潮量是径流量的3.6倍。

Flaig 等^[20]对美国科罗拉多州 Campanian 三角洲在河流、潮汐交替影响下的沉积特征进行分析, 在河流洪水期大量泥沙输入河口区, 洪水期结束河流流量逐渐减小, 泥沙被潮汐改造并受到强烈生物扰动, 形成生物多样性丰富的砂泥互成层理。Gugliotta 等^[69]采集湄公河三角洲在河流-海洋过渡带的沉积物样本, 分析沉积过程, 结果表明, 上游河道砂较多, 泥沙供应和沉积受径流影响; 下游河道悬浮泥沙受潮汐主导、径流次要影响, 出现泥砂交替的潮汐韵律层, 且旱季雨季沉积变化显著。波浪和径流相互作用的影响由波浪强度和入射方向决定。波浪相对较弱时, 将河口沉积物向两侧搬运, 并且水流的掺混运动会增加河口底床切应力, 增加射流扩散; 波浪作用过强时, 会带走河流沉积物, 限制河口坝发育。有波浪情况和无波浪情况相比, 形成的河口坝距离河口近35%, 且形成速度快40%^[70]。Zhang 等^[67]重新解释了墨西哥湾 Lower Wilcox 三角洲的地层变化过程。过去认为该三角洲是典型的河控三角洲, 而最新研究发现, 因为沉积物供应减少, 相对海平面上升, 以及陆架边缘不断进积形成的宽阔陆架, 晚期 Lower Wilcox 三角洲受到河流、波浪和潮流的复杂相互作用, 波浪影响形成的向上变粗层序会被河流洪水期异重流沉积和潮汐韵律层改造。

2.5 其他因素作用

除了上述水动力作用, 生物扰动、相对海平面变化以及人类活动等因素也会在各类水动力作用形成的沉积层理基础上叠加偶发事件沉积, 或是造成层序间断缺失等。由于潮流混合作用周期性将富氧的表层水输送至底层, 三角洲前缘的沉积物可能受到高度生物扰动, 生物扰动增加了细粒互层中的砂岩含量, 并提供了砂导管, 增加了床层之间的连通性^[20]。以螃蟹、蛤类为主的底栖动物的挖洞行为会直接影响海岸沉积物稳定性, 甚至可能造成对沉积历史记录的错误解读^[71]。在大型底栖动物建造及维持其洞穴期间, 底床下层沉积物被带到地表再沉积, 增加海岸沉积物周转率并改变沉积层理结构。底栖生物还可以分泌胞外聚合物, 和微生物共同构成生物膜 (Biofilms)。生物膜增强沉积物凝聚力并降低底床糙率, 使得底床沉积物更难被侵蚀, 被称为“生物稳定剂”^[72]。

海侵期间相对海平面的持续上升, 特别是在陆架边缘附近, 往往会导致更强的波浪和潮汐影响。相对海平面变化通过改变各位置水动力条件间接影响河口沉积特征。在珠江口盆地陆架边缘三角洲的研究中, 相对海平面下降, 陆架边缘的波浪和沿岸流作用增强, 大部分沉积由波浪作用控制; 而相对水平面的上升, 岸线向陆侧移动, 水深的增加削弱了波浪能, 河流逐渐占主导地位^[50]。

人类活动引起的河流流量减弱将不可避免地导致三角洲受到更强的波浪改造作用, 形成沿岸流重新分布河口三角洲的沉积物。大规模、高频次的人类活动, 尤其是围垦工程和防波堤等海工结构物的建设对海陆水动力环境、泥沙输移格局等的改变也不可忽视^[73]。张长宽等^[74]对滩涂围垦等大规模工程对近海环境的影响展开探讨。大规模人类活动会对近海生态系统造成不同程度的破坏, 特别是围垦工程, 需要考虑到近海水动力以及泥沙等自然条件。Wang 等^[75]通过对比江苏大丰港区围垦前后各参数变化, 分析围垦工程对泥沙输移的影响。围垦后潮间带的潮流作用减小, 泥沙输移情况更加复杂; 泥质区域会向海方向延伸, 潮滩下部沙粒径增大。目前, 沉积动力学重点探究沉积物在流体环境下的起动、输运过程和堆积产物, 并对整体沉积体系的宏观演化规律进行讨论, 缺乏对其他因素影响的综合考虑。结合实际观测数据, 建立多种动力共同作用、多因素耦合作用的反演模型, 最小化观测数据和模型模拟之间的差异, 以获得最匹配实际情况的模型, 在环境勘测、预测领域都能发挥重要作用。

3 河口海岸沉积层理形成机制的数值模拟

河口海岸沉积层理的形成涉及多个复杂的物理过程, 如水流输运、沉积颗粒起动、输移、沉降等。收集整合大量实测数据并以此进行数学建模和数值模拟是探究复杂沉积过程、揭示层理形成机制的重要手段之一。相较现场观测和钻孔资料分析, 目前对于河口海岸沉积层理形成机制的数值模拟较少, 但由于数值模拟成本低, 可设计性高, 现阶段正蓬勃发展。目前用于泥沙输运和沉积模拟的模型主要分为概念模型和基于动力过程的数学模型, 这些模型旨在描述和预测河口、海岸、湖泊等地形地貌演变。概念模型用于探究长周期

地形地貌变化,通过概念理论框架来解释泥沙输移和沉积过程,能够提供对长周期地貌演化的定性洞察,但是用于处理短时或细节的泥沙运动时效果有限;基于动力过程的数学模型主要通过计算水体和泥沙颗粒的运动参数,探究短期或中长期泥沙输运和地形变化,通过数学方程来描述波浪、潮汐、径流动力学过程以及泥沙悬浮输运,由于考虑水-沙耦合以及其他相互关联的因素,数学模型能够提供更精确的定量分析。已有的数学模型更多聚焦于宏观地貌演变,对于准确描述各影响因子对沉积层理耦合作用的研究仍处于起步阶段。然而,沉积层理的模拟相对于上述2种模型而言要更复杂,计算要求更精确细致,目前很难实现,对于多因子相互作用的长周期时间尺度的沉积层理模拟更是难上加难。

3.1 数值模拟简述

在地质学和地球物理学中常用地层正、反演模型来估计地质结构和物化参数,数值模拟则是用数学控制方程来描述水动力、泥沙运动、层理形成、底床地貌变化过程中不同关键因子的相互作用、守恒关系和动态演化。越来越多的研究采用基于动力过程的数值模型,通过考虑水动力、泥沙输运和地貌演变对水动力的反馈机制(图3(a)),模拟沉积物颗粒在水体中的输运和沉积,更准确地描述水流、泥沙与底床相互作用,建立基于过程的沉积层理分析数值模型。

一般而言,基于过程的河口海岸沉积层理模型通常考虑水动力、泥沙输运、底床分层、地貌演化等模块的相互耦合作用,不同的模块采用相应的控制方程^[78-79]。

(1) 水动力模块。在一维条件下,通过求解描述质量守恒和动量守恒的一维浅水方程来模拟流体运动。风浪的公式描述则是根据风区长度、风速和水深估算浪高和周期,可以很好地描述风浪对浅海潮湾和滩地的影响。对于浅水波浪,采用线性波理论计算底部最大波轨道速度。在水动力模块中,潮汐和风浪的联合床切应力通常超出两者作用的线性总和,但是简化计算考虑假设为线性总和。潮汐和波浪共同作用产生的最大底部切应力驱动泥沙输移^[78-79]。

(2) 多组分泥沙输移模块。在评估泥沙输运时,黏性沙和非黏性沙组分采用不同的计算公式,忽略了不同泥沙组分混合后再悬浮阈值与单一泥沙组分黏性沙临界值的差异,且不考虑黏性沙和非黏性沙之间的相互作用。

黏性沙采用经典的 Patheniades-Krone 公式^[80]计算,对于非黏性沙,可采用 Soulsby-VanRijn 公式^[81]来解释各项水动力作用的综合效应,总输沙量为推移质和悬移质输沙量之和。

(3) 底床分层与地貌演变模块。不同于传统的泥沙均匀底床模块,多组分泥沙分层效应模拟需要构建底床分层模块对每个薄层沉积物组成变化的详细记录来实现对沉积层理演变的模拟。该模块将初始底床分为数

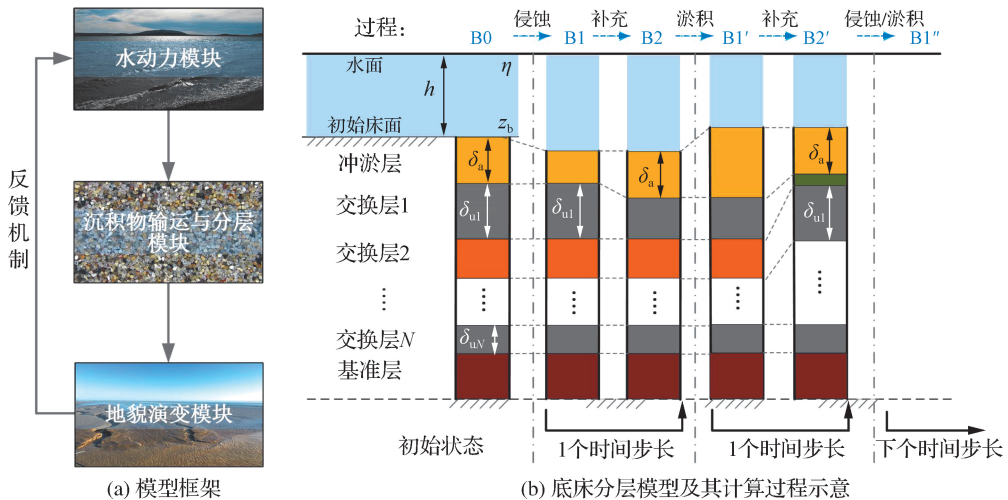


图3 沉积层理模型框架与底床分层模型示意(根据文献[76-77]修改)

Fig.3 Sedimentary bedding model framework and schematic diagram of bed stratigraphy model

个薄层, 薄层数量和厚度均可按需设置, 最上层为冲淤层, 层厚为 δ_a , 最下层为基准层, 中间所有薄层共同组成交换层。在计算过程中, 1 个时间步长内仅由最上层活动层与水体进行泥沙交换, 当冲淤层的厚度小于 δ_a 或者大于 δ_a 时, 即床层状态变为 B1 或 B1', 累计发生的侵蚀或淤积在下一个时间步长开始前由交换层进行补充, 恢复成 B2 或 B2' 状态, 确保每个时间步长计算开始时冲淤层厚度恒定, 在整个形态动力学模拟中重复该过程, 当交换层的泥沙厚度达到设定最大厚度 δ_0 时, 会产生新的交换层, 或是当交换层的泥沙全部补充至冲淤层后, 该交换层消失, 以此来反映整个底床的泥沙冲淤变化(图 3(b), h 为水深, z_b 为床面高程, η 为水位, $\delta_{u1}, \dots, \delta_{uN}$ 分别为交换层第 1 层至第 N 层的厚度)。

除此之外, Viparelli 等^[82]以三角洲前缘沉积物粒度分布函数构建数学模型。将静水水域、倾斜基底情况下进积三角洲的一维迁移模型和实验三角洲地层观察结果进行了比较。假设三角洲前缘沉积过程以颗粒流为主, 三角洲前缘的迁移和顶部沉积采用总质量和粒度质量守恒进行建模。通过模型记录三角洲沉积物粒度随空间的分布变化, 描述三角洲前缘颗粒流沉积和向上变细以及三角洲顶部的河流沉积。数值和实验结果表明, 虽然粒度分布与推移质公式存在小幅偏差, 但是该模型为三角洲前缘进积和三角洲顶部、前缘沉积物粒度分布的现场和实验室研究提供了理论基础。Leonardi 等^[83]在河口潮汐层理的数值模拟研究方面开展了一些开创性的工作, 基于河口湍流射流的理论框架, 提出了一个基于过程的河口坝相分布分析模型, 并与数值模型比较, 量化河口坝潮汐层理的层纹特征。从海洋泥沙动力学角度, Gao 等^[84]、高抒^[85]对已有的全新世大陆架泥沙输运及沉积体系形成过程进行了考察, 发现沉积记录通常是对单个片层进行高分辨率分析, 每个记录分辨率在 10 a 内, 涵盖时期较短。根据沉积过程-结果的关系理解, 将不同沉积记录按照一定时间顺序连接在一起, 制定沉积记录形成的建模方法, 则可以将记录涵盖时间延长。

通过各类数值模拟分析方法, 模拟不同物理过程的相互作用, 探究各因素对沉积层理形成的影响, 进一步评估沉积系统的形成机制和保存潜力, 预测沉积地层的演变趋势。在研究和工程应用中意义重大, 有助于理解和解释沉积层理的形成机制和演化过程。

3.2 沉积韵律层理的形成机制模拟

沉积层序这类复杂自然现象的解译工作困难并且具有很大不确定性, 不论是理论概念模型的建立还是数值模拟都需要经过一定简化, 随着计算机技术和现场测量取样技术的飞速发展, 河口三角洲沉积层理、沉积过程的数值模拟工作取得了一系列研究成果^[86]。Boudet 等^[87]对罗纳河三角洲的风暴和洪水事件下的泥沙输送进行了模拟, 发现河流入海口的总输沙量仅受河流流量影响, 而河口坝处的总输沙量取决于风暴、洪水影响和偶发事件的连续性。洪水不仅在大量降雨导致江河水位急速上涨时出现, 还可能由于风暴潮引起河口异常增水。Leonardi 等^[83]对河口坝的潮汐层理进行模拟, 以解释潮汐层理的特征并量化其在河口坝中的范围, 分析结果表明, 无潮汐时, 从陆向海依次分布砂为主区域、砂泥混合区、泥为主区域; 随着潮汐作用的增强, 原本砂泥混合区会被交替潮汐层理的分层带取代(图 4); 采用分层区域的范围和相邻粗、细砂泥层的含泥量差值来描述河口坝的层理特征, 这 2 个量都随着潮汐振幅的增加而增加。徐孟飘等^[77]通过数值模拟的方式证明了潮汐层偶结构会在一个大小潮周期中产生, 并且在大潮期间会形成以粗颗粒沉积物为主导的砂质沉积层, 在小潮期间会形成以细颗粒沉积物为主导的泥质沉积层。Chen 等^[88]以江苏潮滩为参考, 模拟了围垦对潮滩形态和泥沙粒度分布的影响, 发现持续地围垦会改变潮滩剖面形态并且使得潮滩泥沙粒径变粗。Vona 等^[89]运用数值模拟技术量化了不同波浪条件下防波堤对沉积物输送和潮滩演变的影响, 指出防波堤可以保护海岸, 减少波浪冲击, 但是同样也会阻碍沉积物的向岸运输, 长期来看, 需要平衡其抵御波浪和海岸线泥沙供给的作用。目前大尺度的沉积地貌演化理论蓬勃发展, 也能够通过钻孔取样分析了解历史沉积特征, 但是微观层序特征与宏观演化理论之间关于过程和机制的关联探讨较为缺乏。

在潮汐和风浪对泥沙沉积层理作用的数值模拟方面, Geleynse 等^[90]指出仅在河流动力下形成的三角洲通过河口坝诱发的水流分叉和上游河道转移而向前发展, 风浪抑制了发育中的三角洲前缘细颗粒泥沙固存, 形成相对光滑的海岸线, 并受到分流河道扰动; 而受潮汐影响的河流三角洲通过延伸最初形成的相对稳定的分流河段, 并以沉积物的旋回性(砂和粉砂互层)为特征向前推进。Zhou 等^[78]在 Roberts 等^[91]开发的垂向一维潮滩地貌模型中加入底床分层模块, 耦合波浪运动, 模拟外边界无泥沙补给时泥沙在波浪下的分布, 发现

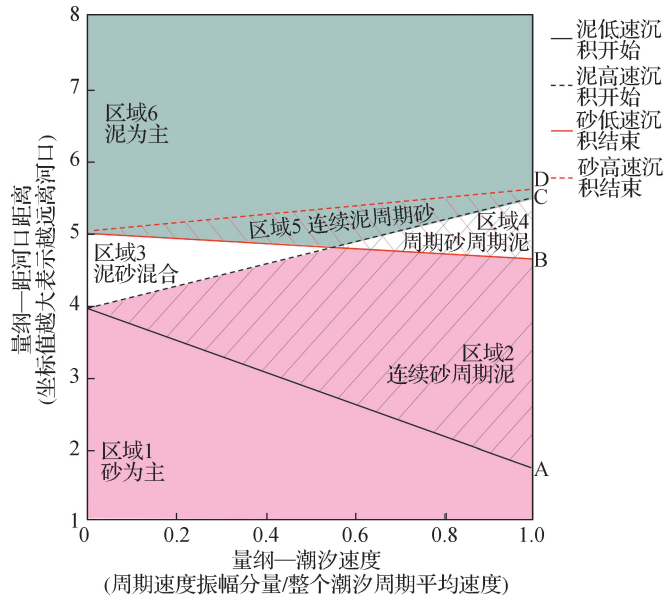
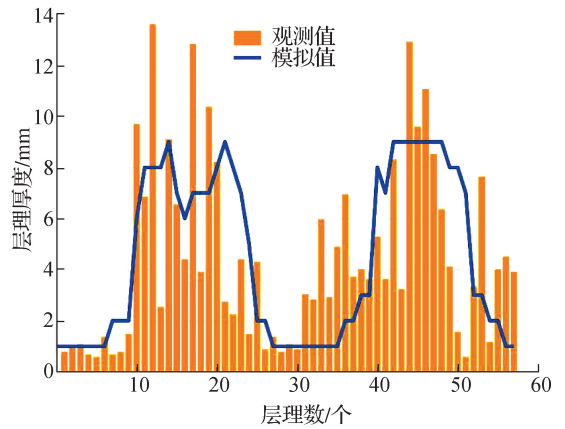
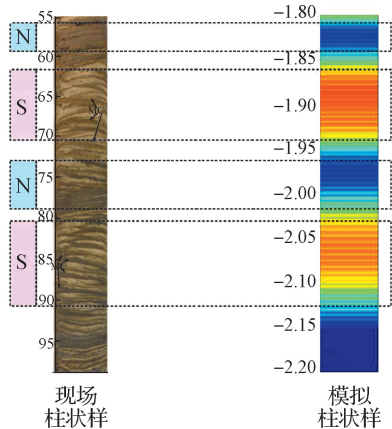


图4 基于分析模型提出的从岸到海的河口相模型(根据文献[83]修改)

Fig.4 Estuarine facies model from land to sea proposed based on the analysis model

潮流和风浪在泥沙分选过程中作用不同：风浪对潮间带沉积物的再悬浮作用明显，强风浪更有利于近海泥沙输移，更有效地侵蚀泥沙；潮流主导时，潮滩中下部的黏性泥沙易被携带至上部落淤。Zhou 等^[59,92]后续又分别探讨了不同潮汐、泥沙特性、风暴条件下的潮滩泥沙分选和层理特征，并与现场观测结果进行比较(图5)，数值模拟结果图(图5(a)，N为小潮，S为大潮，左侧数据表示柱状样在地面以下高程，cm，右侧数据表示模型中以水面为基准面的柱状高程，m)中颜色越红表示粗粒径粉砂含量越多，颜色越蓝表示层中细粒径黏土越多，很好地模拟长江三角洲现场柱状样中由大小潮周期形成的砂/泥质主导层交替沉积现象，模拟得出的沉积层理厚度变化也与柱状样观测厚度变化趋势一致(图5(b))。对潮滩形态动力演化机制进行深入探讨，指出风暴历时、强度、风暴频率和间隔等对潮滩层理形成和破坏具有重要影响，特别地，潮间上带的粗颗粒层理通常与风暴密切相关，可指征风暴事件。Guerin 等^[93]对法国大西洋沿岸的宽河口沙坝形态和地层演化进行了数值模拟，考虑了数十年来潮汐、波浪影响，发现波浪气候的季节性变化有效地解释了地震反射剖面中观察到的浅滩垂直于主流方向的韵律性侧向加积。



(a) 长江三角洲实测大小潮交替层理与数值模拟垂向层序特征对比

(b) 现场数据和模拟结果的层数、厚度比较

图5 风暴下潮滩沉积层理现场观测与数值模拟对比(根据文献[59]修改)

Fig.5 Comparison between field observation and numerical simulation of sediment stratification on tidal flats under storms

4 结论与展望

河口海岸沉积记录和层序特征研究为其发育过程中所处动力环境分析、沉积体系的不同时空演化提供了依据。海陆过渡带动力过程复杂,本文分析各主导动力在河口海岸沉积层理形成破坏过程中的作用,进一步阐述层理演变机制。一般来说,径流主导形成的沉积层理在河口附近发育,呈现粒径向上变粗的粒序递变层等,洪水期异重流的存在可能会形成爬升波纹。潮汐作用形成的层理构造和潮汐周期相关,通常为潮汐韵律层、潮汐束等。波浪作用时层理的形成受其相对径流强度差异影响,形成对称性互层沙纹等,偶发风暴潮会使层厚明显增加或是侵蚀造成部分层理特征缺失。径流、潮汐、波浪水动力的混合作用广泛存在,当单一动力不占据绝对主导时,混合水动力作用的讨论必不可少,需根据区域条件进行深入研究。

尽管河口海岸沉积层序及其沉积过程的研究已取得了一些进展,但为了更准确地探寻历史沉积地貌,预测全球变暖和海平面上升背景下的河口海岸层序地层和沉积体系的演变趋势,仍有以下几方面研究有待进一步深入:

(1) 宏观理论与微观特征之间的关联探讨。目前,虽然对气候、水动力、海平面变化等因素在沉积环境演化中的作用有了理论认识;并且已经能够通过钻孔取样、地层剖面仪等技术对地层中生物化石、岩芯岩性以及环境沉积物进行细致分析,提高了沉积特征时空分辨率。但由于地质历史的时空跨度大、演变分析复杂,微观层序特征与宏观演化理论之间缺乏过程和机制的探讨。未来有必要采用多尺度分析方法,与理论模型、地质剖面对比分析,将宏观理论与微观特征有机结合起来。

(2) 沉积特征及层序地层时空尺度的认知。加强多源数据整合,结合遥感、地球物理勘探、钻孔数据等现代观测技术,多学科协作,运用地质学、物理学、化学等知识多角度分析,构建更精确的时空尺度沉积特征演变认知框架。对河口海岸沉积体系的分类和主导沉积作用动力的识别需要在分析总体地层堆叠模式或是优势沉积相的基础上,进一步考虑复杂的内部地层变化和遗迹特征。

(3) 基于过程的、物理动力机制的多因素耦合作用反演模型的开发及应用。为了更好地理解不同作用因子(如水动力、生物过程、初始地形、海平面上升等)在时空尺度上对层序地层的影响,开发基于综合动力过程的沉积记录反演模型有助于分析不同作用因子耦合作用,揭示多因素作用下的层序构建机制,从而更准确地预测气候变化背景下突发事件(洪水、风暴)对沉积环境的改造及层序特征的长期演变趋势。

参考文献:

- [1] ESPOSITO C R, GEORGIU I Y, KOLKER A S. Hydrodynamic and geomorphic controls on mouth bar evolution[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(8): 1540-1545.
- [2] 范代读,李从先. 现代潮汐层偶与古环境解释[J]. *自然科学进展*, 2000, 10(12): 1109-1114. (FAN D D, LI C X. Modern tidal couple and paleoenvironmental interpretation[J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(12): 1109-1114. (in Chinese))
- [3] SALLES T, HUSSON L, REY P, et al. Hundred million years of landscape dynamics from catchment to global scale[J]. *Science*, 2023, 379(6635): 918-923.
- [4] ZHANG W T, ZHENG T T, WANG Z H, et al. Reconstruction of coastal flooding processes and human response at the end of the Liangzhu Culture, East China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 293: 107705.
- [5] 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.
- [6] LATRUBESSE E M, SINHA R. Human impacts on sediment and morphodynamics of large tropical rivers[M]//*Treatise on Geomorphology*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 187-213.
- [7] 龚政,葛冉,冯骞,等. 泥沙颗粒间黏结力作用及其对泥沙起动影响研究进展[J]. *水科学进展*, 2021, 32(5): 801-812. (GONG Z, GE R, FENG Q, et al. Cohesive forces between sediment particles and its impact on incipient motion of sedi-

- ment: a review[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 801-812. (in Chinese))
- [8] EDMONDS D A, SLINGERLAND R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 105-109.
- [9] FAGHERAZZI S, EDMONDS D A, NARDIN W, et al. Dynamics of river mouth deposits[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 642-672.
- [10] 张长宽, 徐孟飘, 周曾, 等. 潮滩剖面形态与泥沙分选研究进展[J]. *水科学进展*, 2018, 29(2): 269-282. (ZHANG C K, XU M P, ZHOU Z, et al. *Advances in cross-shore profile characteristics and sediment sorting dynamics of tidal flats*[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(2): 269-282. (in Chinese))
- [11] EVANS G. Intertidal flat sediments and their environments of deposition in the Wash[J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1965, 121(1/2/3/4): 209-240.
- [12] SHI Z. Tidal bedding and tidal cyclicities within the intertidal sediments of a microtidal estuary, Dyfi River Estuary, West Wales, UK[J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 73(1/2): 43-58.
- [13] WILLIAMS G E. Upper Proterozoic tidal rhythmites, South Australia: sedimentary features, deposition, and implications for the earth's paleorotation[J]. *Cspg Special Publications*, 1991: 161-177.
- [14] 李从先, 范代读. 全新世长江三角洲的发育及其对相邻海岸沉积体系的影响[J]. *古地理学报*, 2009, 11(1): 115-122. (LI C X, FAN D D. *Development of the Holocene Changjiang Delta and its influence on adjacent coastal sedimentary systems* [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(1): 115-122. (in Chinese))
- [15] CHOI K, KIM D H. Morphologic and hydrodynamic controls on the occurrence of tidal bundles in an open-coast macrotidal environment, northern Gyeonggi Bay, west coast of Korea[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 339: 68-82.
- [16] 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.
- [17] LI Z Y, BHATTACHARYA J, SCHIEBER J. Evaluating along-strike variation using thin-bedded facies analysis, Upper Cretaceous Ferron Notom Delta, Utah[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(7): 2060-2089.
- [18] BAAS J H, BEST J L, PEAKALL J. Predicting bedforms and primary current stratification in cohesive mixtures of mud and sand [J]. *Journal of the Geological Society*, 2016, 173(1): 12-45.
- [19] CHOI K, JO J, KIM D. Tidal and seasonal controls on the stratigraphic architecture of blind tidal channel deposits in the fluvial-tidal transition of the macrotidal Sittaung River Estuary, Myanmar[J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 426: 106029.
- [20] 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, USA[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2019, 89(12): 1181-1206.
- [21] 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, USA[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(8): 605-625.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 刘英辉, 蔡华, 段冬平, 等. 西湖凹陷平湖地区平湖组海侵体系域潮控三角洲-潮坪沉积特征及模式[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(1): 33-40. (LIU Y H, CAI H, DUAN D P, et al. *The sedimentary characteristics of tidal delta and tidal flat in transgressive system tract of Pinghu Formation in Pinghu area, Xihu Sag*[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(1): 33-40. (in Chinese))
- [25] 施振生, 邱振. 海相细粒沉积层理类型及其油气勘探开发意义[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 181-196. (SHI Z S, QIU Z. *Main bedding types of marine fine-grained sediments and their significance for oil and gas exploration and development*[J].

- Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 181-196. (in Chinese))
- [26] 司月君, 李保生, 王丰年, 等. 广西北部湾海岸风沙记录的千年来风暴潮演化的阶段性[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1181-1194. (SI Y J, LI B S, WANG F N, et al. Evolution stages of storm surges over the past millennia recorded by aeolian sands along the coast of Beibu Gulf, Guangxi[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(5): 1181-1194. (in Chinese))
- [27] 田元, 印萍, 段晓勇, 等. 浙江中部近岸泥质区台风沉积记录[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(2): 92-96. (TIAN Y, YIN P, DUAN X Y, et al. Reconstruction of typhoon records in mud area of Central Zhejiang Coast[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(2): 92-96. (in Chinese))
- [28] 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.
- [29] VISSER M J. Neap-spring cycles reflected in Holocene subtidal large-scale bedform deposits: a preliminary note[J]. Geology, 1980, 8(11): 543-546.
- [30] FRIEDRICHS C T. Tidal flat morphodynamics[M]//Treatise on Estuarine and Coastal Science. Amsterdam: Elsevier, 2011: 137-170.
- [31] 王建, 柏春广, 徐永辉. 江苏中部淤泥质潮滩潮汐层理成因机理和风暴沉积判别标志[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 562-569. (WANG J, BAI C G, XU Y H. Mechanism of silt-mud couplet of mud tidal flat and discrimination criteria of storm surge sedimentation in the Middle Jiangsu Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 562-569. (in Chinese))
- [32] 范代读, 李从先, 陈美发, 等. 长江三角洲泥质潮坪沉积间断的定量分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4): 1-6. (FAN D D, LI C X, CHEN M F, et al. Quantitative analyses on diastems of the mudflat deposits in the Yangtze River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(4): 1-6. (in Chinese))
- [33] 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 Publications, 2017, 444(1): 393-418.
- [34] 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.
- [35] WALKER R G. Wave- and storm-dominated shallow marine systems[J]. Facies Models-Response to Sea Level Change, 1992: 219-238.
- [36] BENTLEY S J, NITTROUER C A. Emplacement, modification, and preservation of event strata on a flood-dominated continental shelf: Eel shelf, Northern California[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23(16): 1465-1493.
- [37] TERWINDT J H J, BREUSERS H N C. Experiments on the origin of flaser, lenticular and sand-clay alternating bedding[J]. Sedimentology, 1972, 19(1/2): 85-98.
- [38] SATO T, TANIGUCHI K, TAKAGAWA T, et al. Generation of tidal bedding in a circular flume experiment: formation process and preservation potential of mud drapes[J]. Geo-Marine Letters, 2011, 31(2): 101-108.
- [39] REINECK H E, WUNDERLICH F. Classification and origin of flaser and lenticular bedding[J]. Sedimentology, 1968, 11(1/2): 99-104.
- [40] KLEIN G D. Depositional and dispersal dynamics of intertidal sand bars[J]. SEPM Journal of Sedimentary Research, 1970, 40: 1095-1127.
- [41] BURTON D, FLAIG P P, PRATHER T J. Regional controls on depositional trends in tidally modified deltas: insights from sequence stratigraphic correlation and mapping of theloyd and sego sandstones, Uinta and piceance basins of Utah and Colorado, USA[J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(7): 763-785.
- [42] ARCHER A W. Modeling of cyclic tidal rhythmites based on a range of diurnal to semidiurnal tidal-station data[J]. Marine Geology, 1995, 123(1/2): 1-10.
- [43] CHOI K. Tidal rhythmites in a mixed-energy, macrotidal estuarine channel, Gomso Bay, west coast of Korea[J]. Marine Geology, 2011, 280(1/2/3/4): 105-115.
- [44] 任美镠, 张忍顺, 杨巨海. 江苏王港地区淤泥质潮滩的沉积作用[J]. 海洋通报, 1984, 3(1): 40-54. (REN M E, ZHANG R S, YANG J H. Sedimentation on tidal mud flat in Wanggang area, Jiangsu Province, China[J]. Marine Science Bulletin, 1984, 3(1): 40-54. (in Chinese))

- [45] 李炎, 张立人, 谢钦春. 浙江象山大目涂淤泥质潮滩发育的周期性[J]. 海洋学报, 1987, 9(6): 725-734. (LI Y, ZHANG L R, XIE Q C. Periodicity of development of muddy tidal flat with large mesh coating in Xiangshan, Zhejiang Province [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1987, 9(6): 725-734. (in Chinese))
- [46] 杨世伦, 徐海根. 长江口长兴、横沙岛潮滩沉积特征及其影响机制[J]. 地理学报, 1994, 49(5): 449-456. (YANG S L, XU H G. Tidal flat sediments and sedimentation on the Changxin and Hengsa islands at the mouth of Changjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 1994, 49(5): 449-456. (in Chinese))
- [47] PLINK-BJÖRKLUND P. Shallow-water deltaic clinofolds and process regime[J]. Basin Research, 2020, 32(2): 251-262.
- [48] SCHINDLER R J, PARSONS D R, YE L P, et al. Sticky stuff: redefining bedform prediction in modern and ancient environments[J]. Geology, 2015, 43(5): 399-402.
- [49] PRIOR D B, YANG Z S, BORNHOLD B D, et al. The subaqueous delta of the modern Huanghe (Yellow River)[J]. Geo-Marine Letters, 1986, 6(2): 67-75.
- [50] 李文静, 王英民, 何敏, 等. 珠江口盆地中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 W J, WANG Y M, HE M, 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. (in Chinese))
- [51] 申冠卿, 张原锋, 张敏. 黄河下游漫滩高含沙洪水滩槽界定及泥沙时空沉积特性[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 641-651. (SHEN G Q, ZHANG Y F, ZHANG M. Definition of channel and floodplain and spatio-temporal sedimentation characteristics for overbank hyperconcentrated flood in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 641-651. (in Chinese))
- [52] ZĂINESCU F, VESPREMEANU-STROE A, ANTHONY E, et al. Flood deposition and storm removal of sediments in front of a deltaic wave-influenced river mouth[J]. Marine Geology, 2019, 417: 106015.
- [53] PONCIANO L C M O, DELLA FÁVERA J C. Flood-dominated fluvio-deltaic system: a new depositional model for the Devonian Cabeças Formation, Parnaíba Basin, Piauí, Brazil[J]. Anais Da Academia Brasileira De Ciências, 2009, 81(4): 769-780.
- [54] JANSSEN-STELDER B. The effect of different hydrodynamic conditions on the morphodynamics of a tidal mudflat in the Dutch Wadden Sea[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(12/13): 1461-1478.
- [55] ALLEN J R L, DUFFY M J. Medium-term sedimentation on high intertidal mudflats and salt marshes in the Severn Estuary, SW Britain: the role of wind and tide[J]. Marine Geology, 1998, 150(1/2/3/4): 1-27.
- [56] LEE H J, JO H R, CHU Y S, et al. Sediment transport on macrotidal flats in Garolim Bay, west coast of Korea: significance of wind waves and asymmetry of tidal currents[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(7/8): 821-832.
- [57] BHATTACHARYA J P, GIOSAN L. Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction[J]. Sedimentology, 2003, 50(1): 187-210.
- [58] HARLEY M D, MASSELINK G, RUIZ de ALEGRÍA-ARZABURU A, et al. Single extreme storm sequence can offset decades of shoreline retreat projected to result from sea-level rise[J]. Communications Earth & Environment, 2022, 3: 112.
- [59] ZHOU Z, WU Y M, FAN D D, et al. Sediment sorting and bedding dynamics of tidal flat wetlands: modeling the signature of storms[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127913.
- [60] FAN D D, GUO Y X, WANG P, et al. Cross-shore variations in morphodynamic processes of an open-coast mudflat in the Changjiang Delta, China: with an emphasis on storm impacts[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(4): 517-538.
- [61] BUDILLON F, SENATORE M R, INSINGA D D, et al. Late Holocene sedimentary changes in shallow water settings: the case of the Sele River offshore in the Salerno Gulf (south-eastern Tyrrhenian Sea, Italy)[J]. Rendiconti Lincei, 2012, 23(1): 25-43.
- [62] 龚政, 黄诗涵, 徐贝贝, 等. 江苏中部沿海潮滩对台风暴潮的响应[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 243-254. (GONG Z, HUANG S H, XU B B, et al. Evolution of tidal flat in response to storm surges: a case study from the Central Jiangsu Coast [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 243-254. (in Chinese))
- [63] ZUCHUAT V, GUGLIOTTA M, POYATOS-MORÉ M, et al. Mixed depositional processes in coastal to shelf environments: towards acknowledging their complexity[J]. The Depositional Record, 2023, 9(2): 206-212.
- [64] HOITINK A J F, WANG Z B, VERMEULEN B, et al. Tidal controls on river delta morphology[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(9): 637-645.

- [65] 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.
- [66] OLARIU C. Autogenic process change in modern deltas: lessons for the ancient[M]//MARTINIUS 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.
- [67] 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.
- [68] 蔡树群, 郑舒, 韦惺. 珠江口水动力特征与缺氧现象的研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(5): 1-8. (CAI S Q, ZHENG S, WEI X. Progress on the hydrodynamic characteristics and the hypoxia phenomenon in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(5): 1-8. (in Chinese))
- [69] 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.
- [70] NARDIN W, FAGHERAZZI S. The effect of wind waves on the development of river mouth bars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12).
- [71] GILLIS L G, SNAVELY E, LOVELOCK C, et al. Effects of crab burrows on sediment characteristics in a *Cerriops australis*-dominated mangrove forest[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 218: 334-339.
- [72] DECHO A W. Microbial biofilms in intertidal systems: an overview[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10/11): 1257-1273.
- [73] 伍志元, 蒋昌波, 陈杰, 等. 高强度扰动下海岸动力地貌特征研究进展[J]. *水科学进展*, 2023, 34(2): 310-320. (WU Z Y, JIANG C B, CHEN J, et al. Coastal dynamic geomorphology under high intensity disturbance: research progress and perspectives[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(2): 310-320. (in Chinese))
- [74] 张长宽, 陈欣迪. 大规模滩涂围垦影响下近海环境变化及其对策[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(5): 424-430. (ZHANG C K, CHEN X D. Offshore environmental changes and countermeasures in response to large-scale tidal flat reclamation[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(5): 424-430. (in Chinese))
- [75] WANG Y P, GAO S, JIA J J, et al. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. *Marine Geology*, 2012, 291/292/293/294: 147-161.
- [76] 周曾, 陈雷, 林伟波, 等. 盐沼滩生物动力地貌演变研究进展[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 470-484. (ZHOU Z, CHEN L, LIN W B, et al. Advances in biogeomorphology of tidal flat-saltmarsh systems[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 470-484. (in Chinese))
- [77] 徐孟飘, 东培华, 马骏, 等. 大小潮作用对潮滩沉积物层理影响的数值模拟研究[J]. *海洋学报*, 2021, 43(10): 70-80. (XU M P, DONG P H, MA J, et al. The effects of spring-neap tide on sediment bedding on tidal flats: a numerical study [J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(10): 70-80. (in Chinese))
- [78] ZHOU Z, COCO G, van der WEGEN M, et al. Modeling sorting dynamics of cohesive and non-cohesive sediments on intertidal flats under the effect of tides and wind waves[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 104: 76-91.
- [79] ZHOU Z, YE Q H, COCO G. A one-dimensional biomorphodynamic model of tidal flats: sediment sorting, marsh distribution, and carbon accumulation under sea level rise[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 93: 288-302.
- [80] PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1965, 91(1): 105-139.
- [81] SOULSBY R. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications[M]. London: Telford, 1997.
- [82] VIPARELLI E, BLOM A, FERRER-BOIX C, et al. Comparison between experimental and numerical stratigraphy emplaced by a prograding delta[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2014, 2(1): 323-338.
- [83] LEONARDI N, SUN T, FAGHERAZZI S. Modeling tidal bedding in distributary-mouth bars[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(6): 499-512.
- [84] GAO S, COLLINS M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 268-294.
- [85] 高抒. 沉积记录研究的现代过程视角[J]. *沉积学报*, 2017, 35(5): 918-925. (GAO S. Discover more information from sedimentary records: views based on contemporary earth surface dynamic processes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 918-925. (in Chinese))

- [86] COLLINS D S, AVDIS A, WELLS M R, et al. Prediction of shoreline-shelf depositional process regime guided by palaeotidal modelling[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 223: 103827.
- [87] BOUDET L, SABATIER F, RADA KOVITCH O. Modelling of sediment transport pattern in the mouth of the Rhone Delta: role of storm and flood events[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 198: 568-582.
- [88] CHEN L, ZHOU Z, XU M P, et al. Exploring the influence of land reclamation on sediment grain size distribution on tidal flats: a numerical study[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2018(36): 85.
- [89] VONA I, GRAY M, NARDIN W. The impact of submerged breakwaters on sediment distribution along marsh boundaries[J]. *Water*, 2020, 12(4): 1016.
- [90] 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.
- [91] ROBERTS W, LE HIR P, WHITEHOUSE R J S. Investigation using simple mathematical models of the effect of tidal currents and waves on the profile shape of intertidal mudflats[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10/11): 1079-1097.
- [92] ZHOU Z, LIU Q, FAN D D, et al. Simulating the role of tides and sediment characteristics on tidal flat sorting and bedding dynamics[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46(11): 2163-2176.
- [93] GUERIN T, BERTIN X, CHAUMILLON E. Wave control on the rhythmic development of a wide estuary mouth sandbank: a process-based modelling study[J]. *Marine Geology*, 2016, 380: 79-89.

Sedimentary Stratigraphic Characteristics and Formation Mechanisms of Estuarine Coasts*

ZHOU Zeng^{1,2}, LIU Yao², WU Yiming², XU Fan³, FAN Daidu⁴, ZHANG Changkuan²

- (1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China*; 2. *Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210024, China*; 3. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China*;
4. *State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: Estuarine and coastal areas, located at the interface between the sea and land, are heavily impacted by human activities such as coastal engineering projects. Strategies for managing impacts are diverse, and depend on the geomorphology, evolution history and dominant processes shaping the system. Techniques such as observing the sedimentary stratigraphic characteristics and coastal numerical modelling have been used to better understand these formative processes. Here we review research findings linking hydrodynamic factors (e.g., river, tide, and wave) in estuarine and coastal regions to the sedimentary stratigraphic characteristics that are associated with different hydrodynamic processes. The mechanisms through which these forces shape the sedimentary stratigraphy are analyzed, along with episodic dynamic factors such as floods and storms, along with other influencing factors like biological disturbance, sea-level changes, and reclamation projects; all of these affect the formation and preservation of sedimentary stratigraphy. Additionally, the application and mechanistic understanding of numerical methods of interpreting the formation and destruction mechanisms of sedimentary layering are discussed. Finally, some future research directions are proposed, including e.g., the need of research at the spatiotemporal scales of estuarine and coastal sedimentary layering, and the development of multifactor coupled numerical models.

Key words: sedimentary stratigraphy; estuarine coast; dynamic geomorphology; formation mechanisms; numerical simulation

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3106201) and the National Natural Science Foundation of China (No. 42376161).