

风暴作用下淤泥质潮滩-潮沟系统地貌演变研究进展

龚政^{1,2}, 张岩松², 赵堃², 周曾^{1,2}, 张长宽¹

(1. 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 210098;
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 鉴于风暴作用对淤泥质潮滩-潮沟系统的地貌演变有重要的影响, 对海岸工程的安全以及海岸带资源的开发与保护有重要的实用价值, 从研究方法、演变特点和动力机制等方面回顾了风暴作用下淤泥质潮滩-潮沟系统地貌演变的研究进展。认为淤长型潮滩风暴剖面的形态特征一般呈“中间冲刷, 两端淤积”, 但其动力机制研究系统性还不够; 盐沼可以较好地削弱风暴, 起到固沙效果, 但其侧向演变值得进一步关注; 风暴作用下潮沟的活动性大大增强, 其中潮沟摆动及其岸壁侵蚀机理是亟待解决的科学问题。指出未来应进一步加强现场资料的获取, 并通过数值模拟、物理模型试验等手段, 加强对风暴作用下潮滩-潮沟系统地貌演变机理的研究。

关键词: 风暴; 淤泥质; 潮滩-潮沟系统; 地貌演变; 潮沟摆动; 盐沼

中图分类号: P737.12; TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2019)04-0075-10

Advances in coastal storm impacts on morphological evolution of mud tidal flat-creek system//GONG Zheng^{1,2}, ZHANG Yansong², ZHAO Kun², ZHOU Zeng^{1,2}, ZHANG Changkuan¹ (1. *Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Coastal storm has important impacts on morphological evolution of mud tidal flat-creek system, and related research is of great practical value to the safety of coastal engineering and to the development and protection of coastal zone resources. The research progress of coastal storm impacts on morphological evolution of mud tidal flat-creek system was reviewed in terms of research methods, evolution characteristics and dynamic mechanisms. The storm profile for the accretional mudflats is generally eroding in the middle and depositing at both ends, but the study on its dynamic mechanism is not systematic enough. Salt marshes can effectively weaken storm and stabilize sand, but their lateral evolution deserves more attention. Under the impact of storm, the activity of tidal creeks is greatly enhanced, among which the mechanism of tidal creek shift and the bank erosion is a scientific problem urgently to be solved. In the future, it is necessary to further strengthen the acquisition of field data and strengthen the study on the morphological evolution mechanism of the tidal flat-creek system under the impact of storm by means of numerical simulations and physical experiments.

Key words: storm; mud; tidal flat-creek system; morphological evolution; tidal creek shift; salt marsh

淤泥质潮滩在世界分布广泛, 在国外主要分布在荷兰、法国等大西洋沿岸以及一些海湾和河口等处。中国潮滩规模大, 在世界上具有特殊地位, 潮滩岸线总长约 4 000 km^[1]。潮沟是潮滩上最活跃的地貌单元, 是潮滩水、沙、营养物质等的交换通道^[2]。淤泥质潮滩-潮沟系统的地貌演变受潮汐、波浪、生物、地下水、风暴等多因子的作用^[3-4], 学者们对正常天气条件下潮滩-潮沟系统的动力地貌演变进行了大量基础性的研究, 对系统的长期发育演变有了一

定的认识, 而对短历时风暴作用的研究较为薄弱。
“海岸风暴 (coastal storms)”广义上是指由热带气旋或温带气旋等大气扰动引起的, 可显著影响水底地貌并使后滩 (潮上带) 也处于波浪、水流和增水等作用之下的沿海气象^[5]。风暴对潮滩-潮沟系统的地貌演变、泥沙层理和沉积结构等有重要的影响^[6-7]。随着气候变化的加剧, 极端风暴的频率有增大的趋势, 且主要集中在我国所处的西北太平洋地区^[8], 因此, 对风暴作用下潮滩-潮沟系统地貌演变

的认识和研究变得越来越重要。风暴期间,潮滩地貌发生短历时、大范围、大幅度的冲淤变化,并引起潮沟的剧烈摆动。潮沟摆动对于已匡围海堤安全构成严重威胁,造成严重经济损失。例如,2013 年江苏沿海条子泥一期匡围工程施工期间,某次风暴影响下西大港潮沟摆动引起的海堤损毁,直接损失高达 600 多万元^[9]。此外,风暴还会加速海岸蚀退,引起盐沼的损失退化等,对海岸湿地生态环境产生压力^[10-11]。因此,研究风暴作用下淤泥质潮滩-潮沟系统地貌演变,对于保障海岸工程安全以及海岸带资源的开发与保护具有重要的实用价值。

本文从风暴作用下潮滩演变和潮沟演变两个方面展开,从研究方法、演变特点和动力机制等方面回顾了国内外的研究进展,并重点综述了潮沟摆动及其岸壁侵蚀过程的相关研究,给出了值得进一步研究的方向和内容。

1 风暴作用下的潮滩演变

1.1 研究方法

针对风暴作用下潮滩-潮沟系统的地貌演变,目前主要研究方法还是现场观测以及遥感分析。潮滩冲淤变化观测主要是借助标志桩法和埋板法(标志层法)以及 RTK (real-time kinematic) 测量^[12-14],这些方法较适用于风暴前后的观测。但风暴期间,现场观测条件十分恶劣,容易损坏标志桩,标志板存在风暴后无法找回的风险^[15],风暴期间云层厚度和降水等因素也可能导致 RTK 无法使用。最近,有学者利用潮滩三脚架架设高精度、高分辨率的动力-泥沙-地貌自动观测仪器(如 SEB、OBS、ADV 等),成功进行了风暴期间的现场观测,但仍需要在观测架扰流问题以及稳定性等方面进一步研究^[16]。潮滩冲淤遥感分析一般通过构建 DEM (digital elevation model),对 DEM 进行叠加分析而实现。潮滩冲淤演变分析目前仍然是遥感应用的薄弱领域,在实际调查中,仍然以野外实地测量为主,遥感冲淤分析多提供辅助信息。航空、航片立体像对、激光雷达、合成孔径雷达干涉测量(InSAR)、卫星遥感等技术在数据精度、成本、回归周期等方面离实际应用还有一定距离^[17-18]。地面激光扫描系统(terrestrial laser scanner)可以快速获取高分辨率、大范围的地貌数字高程数据,分辨率在厘米级,比较适合定量研究潮滩-潮沟系统在风暴作用下的地貌演变过程,但也存在设备费用较高等问题^[19]。目前,数值模拟和物理模型试验方面的研究多关注正常天气下的发育演变过程,并着眼于长期地貌平衡态研究^[20-21],短历时风暴作用的研究较少。由于现场观测的难度高,开

展相应的数值模拟研究以及建立可控条件下的物理模型试验研究势在必行。但是,如何在实验室对风暴过程、泥沙和潮滩-潮沟系统进行概化是后续研究中有待突破的方向^[22]。

1.2 风暴剖面的形态特征

前人对风暴作用下沙质岸滩的演变进行了大量的研究,其风暴剖面的主要特点包括滩肩的侵蚀和 水下沙坝的出现^[22]。与之相比,淤泥质海岸对风暴响应的研究较少。黏性淤泥质滩面和非黏性沙砾质滩面的抗蚀能力有明显差异,加之相对较强的潮汐作用、宽缓的滩坡以及生物对沉积作用的影响,淤泥质海岸对风暴的响应与沙质海岸相比有很大差异^[23]。另外,沙质岸滩剖面的变化主要考虑横向输沙,而淤泥质潮滩剖面的演变和外来泥沙有直接的关系,需要在纵向和横向比较大的空间尺度来考察。对淤泥质潮滩和沙质岸滩的类比研究需要谨慎,但是这种类比研究却有助于我们理解潮滩地貌的演变特点^[24]。

潮滩的平衡剖面形态特征是判断其冲淤状态及趋势的重要指征^[25-26]。针对潮滩的平衡剖面,前人做过较多研究^[27]。在侵蚀淤积平衡剖面的基础上,Kirby^[25]提出了一个与沙质海岸 Bruun 法则类似的概念模型:Mehby 法则。这一法则可以用来检验由泥沙供给控制的潮滩长期演变和风暴控制的短期演变趋势^[28]。正常天气条件下,由于潮汐不对称和泥沙滞后效应的存在,再加上泥沙的充足供应,潮滩总体上会呈淤积状态。风暴天气带来的强烈动力条件,会使滩面出现“大冲大淤”^[16, 29],这种冲淤一般在厘米到分米级范围^[30-33]。诸多学者对淤长型潮滩风暴剖面形态进行了现场观测,得出了基本一致的结论:潮滩上部淤积,下部冲刷,如若考虑潮下带的淤积,则是“中间冲刷,两端淤积”的剖面形态,风暴过后,潮滩会继续正常天气条件下的淤积状态,恢复到平衡剖面^[6, 19, 24, 31-32, 34-35]。而对于侵蚀型潮滩风暴剖面,风暴会极大地加快潮滩原来上凹型剖面上冲下淤的趋势^[6]。由于各次风暴发生前的原始地貌状态不同、各次风暴发生时的潮况不同、风暴的路径不同、风暴期间潮滩及相邻潮下带水域风速风向的差异,风暴期间潮滩经历的冲淤变化的细节是复杂的。潮滩剖面在风暴中的变化应该是“可冲可淤”的,既可以是净冲刷,也可以是净淤积^[16]。

20 世纪 70 年代后期,风暴沉积开始受到国内外沉积学家的关注。多位学者^[27, 36-38]相继较系统地回顾了国内外风暴沉积的研究成果。风暴沉积一般有以下几方面特征:在沉积结构方面,风暴沉积较正常沉积平均颗粒粒径变粗,分选性增强,泥质含量减

少,在垂向上有自下而上沉积物粒度减小的趋势,正常天气与风暴天气交替形成潮滩的泥控层 (mud-dominated layers) 和沙控层 (sand-dominated layers)^[28,39] 组成韵律性层理;在沉积构造方面,风暴沉积以发育丘状交错层理为典型特征,同时底部具有冲刷侵蚀面、平行层理、爬升层理等,而常态沉积下以发育水平纹层、交错层理为主;在沉积序列上,风暴沉积底部一般具有明显的冲刷面,与下伏常态沉积为不整合接触。层序下部为平行层理,中部为缓起伏的丘状交错层理,上部为波状交错层理或爬升层理,再向上被常态沉积层覆盖,两者呈渐变关系,这种沉积序列的变化,反映了风暴能量弱—突强—渐弱的变化规律。不同的淤泥质潮滩风暴沉积的详细情况不甚相同,需要通过现场观测,进一步完善沉积模式,并探讨分析其动力机制。

1.3 风暴剖面的形成机制

风暴作用带来的风暴潮和台风浪会极大地改变正常天气条件下的动力条件,这种动力条件下的泥沙运动和输移直接影响潮滩的地貌演变。针对风暴作用下的泥沙运动,蒋昌波等^[22]、殷锴^[40]做过相关的综述,他们指出前人的研究多为风暴前后现场观测的成果,且国内研究多为风暴作用下的骤淤、输沙率等方面的规律分析,由于缺乏风暴期间的高强度非平衡输沙过程的观测以及研究区域的局限性,对风暴作用下的泥沙运动机理的研究尚存在一定的缺陷。淤泥质潮滩的基本动力泥沙过程可归结为两种:在破波带内,波浪掀沙造成泥沙悬浮;在破波带外,破波带内悬浮的泥沙在潮流作用下扩散运移,即“波浪掀沙、潮流输沙”过程^[41-43]。对于淤泥质潮滩,其底质通常为细砂、粉砂、黏土以及有机物组成的混合物,这些细颗粒多组分泥沙粒径跨度范围较大,常涵盖非黏性沙到黏性沙,且呈现出水平向的分带性和垂向分层性,泥沙运动情况比较复杂。多组分泥沙分选是泥沙运动产生的一个重要现象,很大程度上决定了潮滩剖面形态演变的趋势。Zhou等^[44]建立一维数学模型模拟了波流共同作用下潮滩滩面泥沙分选“岸向细化”的特点,反映了“波浪掀沙、潮流输沙”规律,在模型中进一步加入风暴的作用后发现,风暴引起的极强床面剪切力可以起运较粗的泥沙,并由涨潮流向岸侧输送,改变了正常天气情况下泥沙“岸向细化”的模式^[45],从定性层面基本反映了泥沙分选过程。赵秧秧等^[34]以江苏如东海岸为例,建立了沉积动力学垂向二维概念模型,初步探究了形成风暴沉积层序及其空间分布的动力学机理。著名的“沉降和起运滞后”效应是淤泥质潮滩上重要的泥沙运动过程,在正常天气情况下,会引

起细颗粒泥沙的岸向沉积。基于现场泥沙沉积观测,有学者发现著名的“沉降和起运滞后”效应仅适用于较弱波浪条件下潮滩黏性泥沙沉积,而风暴作用期间不符合这一规律,且潮沟中也不适用^[24,46]。但同时也有学者指出,风暴作用下的许多动力特征与泥沙运动滞后效应有着密切的联系,如波浪运动的非对称性、波浪轨道速度的水平梯度、水流的垂向速度和床面底部的余流等^[22]。这种滞后效应引发的非均匀沙非恒定输移致使泥沙输移率发生改变,因此,研究风暴作用下的泥沙运动滞后机理具有重要的意义。

针对淤长型潮滩“中间冲刷,两端淤积”的风暴剖面的动力机制,前人的研究和分析主要有以下几个方面:①“波浪掀沙、潮流输沙”仍是淤泥质潮滩的基本动力泥沙过程。风暴期间,波流联合底床剪切应力明显增大,远远超过潮滩沉积物的临界剪切应力,水体挟沙能力明显增强,导致大量滩面泥沙再悬浮,水体悬沙浓度明显增大^[16]。悬浮泥沙随潮流被输送到相邻低能区域,包括盐沼区和潮下带^[31]。Fan等^[32]建立了图解概念模型,根据地形和动力条件将滩面分为7个部分来分析冲淤特点,并指出波浪过程及其对潮滩的作用强度受潮汐的影响,这种影响使潮滩细部冲淤模式不尽相同。具体表现在:涨潮和落潮过程中,破波带相应的上下摆动;破碎波高受水深限制,大潮期间的弱风暴会比小潮期间的强风暴对潮滩的侵蚀区域更大,这也是因为由波浪破碎再悬浮起来的泥沙的再分配受控于潮流的作用。②正常天气条件下的潮汐不对称性会在风暴期间加强。这是因为风暴会加强潮流特别是涨潮流的作用,从而加剧了潮滩上潮汐的不对称性^[6];另外,风暴引起的强潮动力和波浪振荡剪切力作用下,淤泥质底床发生软化乃至液化而形成高浓度浮泥层^[47-48]。Wells等^[47]发现,当水底有浮泥时,浮泥层在波浪的作用下也会产生相应的波动,从而造成波浪波高的较快衰减,此时波浪以类孤立波的形式向高潮水边线传播。由于类孤立波的波峰下水质点的向岸速度比波谷下的离岸速度大,同样加强了涨落潮流速的不对称性,有利于细颗粒沉积物继续向岸运移,在潮滩上部富集。③余流对泥沙输移起着重要作用。风暴期间,潮滩浅水区水体大量向岸净输移是向岸风成流及波流的表现^[49]。作为一种水体平衡,在水深较大的潮滩下部形成底层水体的向海净输移。因此,底层余流存在着一个转向点。转向点的形成使潮滩及潮下带分成内、外堆积带和侵蚀带^[35]。总的来说,风暴剖面的形成机制研究大多是现场观测成果,研究体系还不够强。风暴期间,动力

作用增强,波浪与潮流间相互作用增大了水动力的复杂性,而这正是泥沙运动与潮滩演变的驱动力。目前,对于正常天气下潮滩的长期发育已有一定的研究,而对于潮滩剖面风暴作用的短期过程及其形成机制有待进一步研究。

1.4 盐沼对于风暴的响应

近年来,在面对全球气候变化、海岸城市防洪以及海岸带侵蚀的压力下,越来越多的研究者关注盐沼在削弱风暴灾害方面的作用,社会也对这种基于生态系统或者基于自然的风暴防护项目越来越感兴趣^[50]。对于淤泥质潮滩,盐沼多分布于潮间上带和潮上带,盐沼的淤积是淤泥质潮滩风暴剖面的重要特征。很多学者通过现场观测、数值模拟和物理模型试验等手段研究了盐沼对于风暴的响应,成果较为丰富。当盐沼具有一定高度且连续分布时,盐沼植被可以有效地缓冲水流,削弱风暴增水,耗散波浪能量,起到固沙效果,并增强盐沼的稳定性^[51]。现场观测和数值模拟都发现盐沼对风暴增水有削弱作用,这种削弱作用可以分为盐沼植被的摩擦作用和潮沟的输水或储水作用^[52-56],根据盐沼和风暴的不同,削弱率大概在 1.7 ~ 25 cm/km 范围内。不同的盐沼植被消波效应也不同,柔韧性好的植被容易被风暴击倒,耗散能量较少,但它们不容易出现结构损伤,并且倒下之后能够保护盐沼表层免于侵蚀;而柔韧性差的植被耗散能量多,但更易折断,且会导致湍流和冲刷的加剧。现场观测表明,盐沼的消浪效果与相对波高成正比,与植株的淹没度成反比^[51]。我国于 20 世纪 70 ~ 80 年代引入互花米草并大量种植于沿海滩涂,现在分布较广的地区有江苏沿海,张忍顺等^[57]指出我国沿岸互花米草草带宽度在 200 m 以上时,它的消浪作用非常明显,消能率超过 90%,若宽度超过 500 m,则消能率可达 99%。近年来,学者们对于这种“生物动力地貌学”(Biomorphodynamics)的研究进展迅速、成果丰硕。未来可进一步探究其规律,并通过适当概化用于更好地模拟潮滩风暴剖面的演变过程。

风暴期间,盐沼前缘普遍存在着冲刷现象,主要是高潮憩流期风暴浪的侵蚀作用所造成^[6],这种侵蚀常常会在盐沼前缘产生陡坎^[58],而陡坎的形成增加了盐沼前缘光滩的水深,会加剧波浪的作用,从而对盐沼前缘产生较长时期的影响^[59]。在淤长型潮滩,风暴过后,侵蚀区会很快转变为淤积区,淤积速率最大的地方也常出现在盐沼前缘^[19,32]。但是,盐沼前缘的侧向侵蚀导致的盐沼损失退化在很多地区也都有观测到,Leonardi 等^[11]指出从长期的角度看,盐沼退化主要是受高频(每月 1 次)的中等风暴

的影响所致,而极端风暴因为其频率低、作用时间短,造成的影响不足 1%。目前,风暴影响下盐沼的侧向变化相比垂向变化研究较少,且需要更多关注风暴对盐沼长期生长演变的影响,并考虑盐沼季节性和周期性的变化^[60],为海岸带可持续开发、生态环境保护等提供科学依据。

2 风暴作用下的潮沟演变

2.1 演变特点及动力机制

国内外通过现场观测、遥感分析、数值模拟和物理模型试验等研究手段,对潮沟地貌形态特征和发育演变过程等进行了大量基础研究。目前,还有诸多科学问题值得深入探讨,如潮沟曲流发育的动力学机制等^[61]。风暴作用下动力增强,潮沟活动性也相应增强,潮沟形态会发生特别显著且形式多样的变化,相关的研究多数来自于现场观测和遥感分析的成果,还十分薄弱。

潮滩和潮沟作为一个系统,潮沟的稳定性是潮滩稳定性的标志^[62-63]。风暴期间,潮沟通过不断地侧向迁移、摆动来改造或破坏潮滩沉积,同时影响潮滩的稳定性^[2]。龚政等^[64]通过断面观测得出潮间带中部区域滩面高程受制于风暴潮流对于潮沟平面摆动和潮沟形态的影响,当潮沟较多时,潮间带中部冲刷显著。潮沟是潮滩水、沙的交换通道,风暴期间潮沟本身的输水输沙作用比风暴前提高,因此越向沟梢,淤积量越大,潮间上带的潮沟沟梢多被淤死。风暴带来的高速涨潮流会导致滩面涨潮水灌入潮沟的现象,迅速的涨潮流对潮间下带粉细沙有一种夷平作用,使滩面受侵蚀,而其上的潮沟则接受淤积^[6]。风暴期间,潮沟的发育要通过拓宽或开辟新潮沟来适应动力条件的突变。杨世伦等^[23]曾观测到风暴期间形成的贯穿裸滩和盐沼下部的潮沟,但在风暴过后数月完全消亡。Xie 等^[19]也同样观测到风暴期间潮沟口门段的侵蚀,但在风暴过后和潮滩一同发生淤积,可见潮沟在风暴作用下的变化有着与潮滩剖面类似的突变和恢复过程。任美镠等^[6]曾就某典型风暴作用下江苏淤泥质海岸潮沟演变特点和动力机制做了分析研究,主要包括:①如果风暴造成的壅水方向与潮沟的延伸方向相同,潮沟的涨潮水量大增,涨潮时间提前,潮流动力作用大为增强,会造成潮沟连通关系的改变。②一些过去废弃而淤浅了的潮沟往往成为潮沟拓宽或开辟新潮沟的可能路线,从而重新活跃起来。③风暴会增大潮沟平面摆动的速度,加速裁弯取直的过程,如风暴前潮沟已比较顺直,风暴将拓宽潮沟,甚至发育弯道的冲刷陡坎;潮沟已有的岸壁陡坎在风暴作用下会加速

崩塌后退,后退距离达数十米。

2.2 潮沟摆动及其岸壁侵蚀过程

风暴期间,潮沟的快速摆动对海堤安全构成严重威胁,是亟须解决的科学问题。这里通过总结前人的相关研究,为进一步探讨潮沟摆动机制提供思路。潮沟由于发育曲流而产生横向摆动^[62]。潮沟曲流的发育机制还需要进一步研究验证,但人们普遍认为涨、落潮最大流速路径的不一致,是潮沟曲流发育的重要动力因素^[62,65-67]。潮沟摆动需要充足的泥沙供应和水动力条件,摆动的速度与趋势受多方面因素影响,包括潮沟规模、泥沙特性、闸下陆源水、围垦工程等^[61]。潮滩中下带潮沟发育,平面摆动剧烈^[13,68]。大型潮沟弯曲度较小,且相比中小潮沟更加稳定,风暴作用之下也是如此^[9]。发育在非黏性或未固结泥沙之中的曲流摆动较大^[69],且有可能在漫滩流、岸壁侵蚀或波浪的作用之下洗刷掉,而发育在盐沼或黏性泥沙之中的曲流则相对更加稳定^[70]。在风暴引起的强潮动力和波浪振荡剪切力作用下,淤泥质底床发生软化乃至液化而形成高浓度浮泥层^[47-48]。这层浮泥层含水量高,颗粒黏结作用弱,临界剪切应力和强度很小,潮滩-潮沟系统很容易被反复改造^[9]。暴雨对潮沟摆动也有重要的作用,尤其在低潮位。暴雨的溅击作用会使表面黏土更易侵蚀^[71-73],还会加强落潮流,从而引起岸壁侵蚀和泥沙的向下输移^[74]。随着曲流的发育,沉积物不断在曲流凸岸边滩水流较缓处淤积,加大了水流向凹岸的汇集,凹岸侵蚀不断加剧,当曲流发育到一定程度,潮沟就易裁弯取直^[61,75]。

潮沟摆动是曲流边滩沉积和岸壁侵蚀两者共同作用的结果。诸多学者从沉积学的角度对曲流边滩进行了研究^[70,76-80]。风暴期间,潮沟裁弯拓宽、横向迁移或改道,并增强水流侧向沉积作用。这种多次风暴形成的灾害性变化,使携带的大量沉积物快速堆积埋藏,易保存在地质记录中。侧向迁移作用使槽谷明显呈弯曲状,凹岸强烈受蚀不断后退,凸岸缓平,有利于边滩沉积。但横向迁移不稳,经常变换方向,左右摆动,使已形成的边滩沉积重遭破坏,再建新的边滩或心滩沉积^[81]。岸壁侵蚀是造成潮沟摆动的重要过程,潮沟的岸壁侵蚀可以分为逐渐侵蚀和瞬时崩塌两类,岸壁逐渐侵蚀是一个缓慢而连续的过程,主要与水流强度和泥沙抗冲性能有关。岸壁瞬时崩塌是一个快速、不连续的过程,受多种因素的影响,如涨落潮过程(静水压力的变化)、土体性质(饱和土-非饱和土的转化)、植被(根部的黏结作用)、土体含水量(地下渗流与地表蒸腾)等。

岸壁侵蚀的研究开始于河流系统^[82]。因其显

著影响河道水质,对河道的蜿蜒、裁弯取直、漫滩过程等起到了至关重要的作用^[83-84],一直是河流研究的热点与难点。目前,基于极限平衡法的岸壁稳定模型已经发展成熟,并推出了一系列的商业软件,如美国泥沙研究所的 BSTEM 模型^[85]。为了进一步研究岸壁崩塌过程,有学者采用应力-应变法来研究岸壁土体内部任一点的稳定状态^[86-88]。但河流与潮滩-潮沟系统既有许多相似点也有许多差异,需要在借鉴研究方法的同时,考虑两个系统在水流驱动力和模式、时空尺度等方面的不同。对于潮沟岸壁侵蚀的研究还处于起步阶段,且研究对象多是盐沼潮沟^[66,89]。Chen 等^[90]发现了植被根系和土体固结对潮沟岸壁的稳定起着积极作用,前者增强了岸壁上部的稳定性,而后者增强了岸壁下部的稳定性。盐沼潮沟低频的摆动和高频的岸壁侵蚀,是存在于盐沼潮沟的悖论。为了解释这一现象,Gabet^[91]通过现场观测分析,认为是崩塌土体保护了岸壁,阻止了进一步的岸壁侵蚀。还有学者将崩塌过程与岸壁坡度和土壤扩散系数建立了线性关系,描述了滩、沟之间的泥沙大量交换^[92]。

由于岸壁侵蚀是多因子共同作用的结果,岸壁侵蚀的时间尺度和泥沙在垂向上侵蚀和沉积过程的时间尺度不同。另外,岸壁侵蚀过程无法在较粗的水动力模型网格中模拟。因此,目前的海岸地貌模型中还没有特别精确有效的途径去刻画岸壁侵蚀过程^[93-94]。Delft3D 模型中将岸壁侵蚀过程刻画为将发生在湿网格的侵蚀由相连干网格的侵蚀代替,这意味着泥沙从干网格输移到与之相连的湿网格,因此湿网格的床面不变,直到干网格变为湿网格,岸壁侵蚀也就由此发生。van der Wegen 等^[93]将这一过程应用到河口滩槽地貌演变中,比较了考虑和不考虑岸壁侵蚀的演变差异。Chu 等^[94]应用这一过程,并将资料同化方法应用到地貌模型中,不断结合观测数据更新潮沟的摆动形态,使模型最终结果更加真实合理。但这一过程只是对岸壁侵蚀的粗略刻画,并没有考虑水流对岸壁的切应力以及泥沙的特性等。Gong 等^[95]采用应力-应变法探究岸壁崩塌过程,进而建立了潮沟边壁后退数学模型。结果表明,潮沟岸壁崩塌过程可以分为坡脚剪切破坏、坡顶拉破坏、坡顶到坡脚的贯穿面形成 3 个阶段,模拟发现岸壁崩塌对潮沟岸壁侵蚀后退的贡献高达 85%,表明该过程对潮沟的形态和规模起到控制作用。这一模型从机理上对潮沟岸壁侵蚀过程进行了刻画。目前,精确有效地刻画模拟岸壁侵蚀过程是学者研究的前沿和热点^[93],而如何预测风暴作用下的潮沟摆动趋势更是研究的难点。

3 研究展望

针对淤泥质潮滩-潮沟系统在风暴作用下的地貌演变特点和机制, 前人的研究成果主要通过现场观测和遥感分析得到。笔者认为潮滩的风暴剖面与沙质海岸相比有较大不同, 其形成机制有待进一步系统研究; 盐沼植被能有效地削弱风暴作用, 起到固沙效果, 但其侧向变化也应该引起学者的重视; 风暴作用下潮沟的活动性大大增强, 潮沟摆动及其岸壁侵蚀过程的研究还十分薄弱。综合分析目前的相关研究, 风暴作用下淤泥质潮滩-潮沟系统地貌演变中有待进一步研究的内容包括:

a. 风暴作用下潮滩-潮沟系统的水动力特点和泥沙运动规律分析。应设计和改进现场观测技术和方法, 并结合遥感技术, 获取风暴作用前、中、后的现场资料, 包括潮滩不同分带、不同水深和典型潮沟控制断面的水沙过程, 研究多组分泥沙在复杂动力环境下的分选过程和运动规律, 并应关注风暴作用下的泥沙运动滞后机理、浮泥形成和运动规律等, 为进一步研究分析淤泥质潮滩-潮沟系统的演变特点提供基础资料。

b. 风暴作用下潮滩地貌演变机制系统性研究。潮滩演变受多种因子的影响, 风暴对其短期和长期演变都有重要影响, 需在动力和泥沙运动规律研究的基础上, 综合分析风暴作用对潮滩不同分带的地貌演变影响机制, 并考虑风暴与生物作用、地下过程、海平面上升等驱动因子的耦合, 为精确模拟潮滩演变提供支撑; 在考虑盐沼削弱风暴作用的同时, 关注风暴对盐沼长期生长演变的影响, 并考虑盐沼季节性 and 周期性的变化。

c. 潮沟摆动动力学机制研究。借鉴河流岸壁侵蚀研究方法, 研究涨落潮流、渗流力、孔隙水压力等多因子影响下潮沟岸壁侵蚀机理; 可通过物理模型试验, 根据现场潮沟边壁情况, 探究不同水位高度、不同岸壁高度、不同泥沙组分下的岸壁稳定性, 并进一步概化风暴动力环境, 研究其岸壁侵蚀机理; 耦合潮沟岸壁侵蚀及泥沙输运过程, 建立风暴作用下淤泥质潮滩-潮沟系统“动力-泥沙-地貌”数学模型, 动态模拟潮沟摆动过程, 探究其动力学机制。

参考文献:

[1] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. 第四纪研究, 1990, 10 (4): 291-300. (WANG Ying, ZHU Dakui. Tidal flats of China[J]. Quaternary Sciences, 1990, 10 (4): 291-300. (in Chinese))

[2] 邵虚生. 潮沟成因类型及其影响因素的探讨[J]. 地理学报, 1988, 43 (1): 35-43. (SHAO Xusheng. Genetic

classification of tidal creek and factors affecting its development [J]. Acta Geographica Sinica, 1988, 43 (1): 35-43. (in Chinese))

[3] 王宁舫, 龚政, 张长宽, 等. 淤泥质潮滩地貌演变中的水动力及生物过程研究进展[J]. 海洋工程, 2016, 34 (1): 104-116. (WANG Ningge, GONG Zheng, ZHANG Changkuan, et al. Hydrodynamic and biological processes that control the morphodynamic evolution of mudflats: an overview[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34 (1): 104-116. (in Chinese))

[4] 罗锋, 蒋冰, 董冰洁, 等. 潮滩剖面形态特征及演变[J]. 科技导报, 2018, 36 (14): 35-41. (LUO Feng, JIANG Bing, DONG Bingjie, et al. Characteristics and evolution of tidal flat profile[J]. Science & Technology Review, 2018, 36 (14): 35-41. (in Chinese))

[5] HARLEY M. Coastal storm definition[M]//CIAVOLA P, COCO G. Coastal storms: processes and impacts. New Jersey: John Wiley & Sons, 2017: 1-21.

[6] 任美镔, 张忍顺, 杨巨海, 等. 风暴潮对淤泥质海岸的影响: 以江苏省淤泥质海岸为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3 (4): 1-24. (REN Meie, ZHANG Renshun, YANG Juhai, et al. The influence of storm tide on mud plain coast: with special reference to Jiangsu Province [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1983, 3 (4): 1-24. (in Chinese))

[7] LI Congxian, WANG Ping, FAN Daidu, et al. Open-coast intertidal deposits and the preservation potential of individual laminae: a case study from east-central China [J]. Sedimentology, 2000, 47 (5): 1039-1051.

[8] BACMEISTER J T, REED K A, HANNAY C, et al. Projected changes in tropical cyclone activity under future warming scenarios using a high-resolution climate model [J]. Climatic Change, 2018, 146 (3): 547-560.

[9] 陈才俊, 徐向红. 条子泥一期工程对条子泥发育影响及工程防护措施[J]. 海洋工程, 2015, 33 (5): 105-112. (CHEN Caijun, XU Xianghong. Influence of Tiaozini First-phase Project on Tiaozini development and project protection measures[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33 (5): 105-112. (in Chinese))

[10] 张晓龙, 李培英, 刘月良. 黄河三角洲风暴潮灾害及其对滨海湿地的影响[J]. 自然灾害学报, 2006, 15 (2): 10-13. (ZHANG Xiaolong, LI Peiying, LIU Yueliang. Storm surge disaster and its impact on coastal wetlands in Yellow River Delta [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15 (2): 10-13. (in Chinese))

[11] LEONARDI N, GANJU N K, FAGHERAZZI S. A linear relationship between wave power and erosion determines salt-marsh resilience to violent storms and hurricanes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113 (1): 64-68.

[12] STUMPF R P. The process of sedimentation of a salt marsh[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1983,

- 17(5): 495-508.
- [13] 龚政, 靳闯, 张长宽, 等. 江苏淤泥质潮滩剖面演变现场观测[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 880-887. (GONG Zheng, JIN Chuang, ZHANG Changkuan, et al. Surface elevation variation of the Jiangsu mudflats: field observation[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 880-887. (in Chinese))
- [14] 张文祥, 杨世伦, 陈沈良. 一种新的潮滩高程观测方法[J]. 海岸工程, 2009, 28(4): 30-34. (ZHANG Wenxiang, YANG Shilun, CHEN Shenliang. A new method for observing tidal-flat elevation[J]. Coastal Engineering, 2009, 28(4): 30-34. (in Chinese))
- [15] 史本伟. 长江口崇明东滩盐沼-光滩过渡带沉积动力过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [16] 杨天. 风暴天气下淤泥质潮滩冲淤过程及其动力机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [17] 陈勇. 海岸带滩涂资源遥感应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 296-304. (CHEN Yong. Advance of remote sensing application to tidal flat resource monitoring in costal zone[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 296-304. (in Chinese))
- [18] 康彦彦, 丁贤荣, 葛小平. 遥感与水动力模型相结合的宽大潮滩历史地形反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 531-536. (KANG Yanyan, DING Xianrong, GE Xiaoping. Historical topographic reconstruction of large-scale tidal flats based on remote sensing and hydrodynamic model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(6): 531-536. (in Chinese))
- [19] XIE Weiming, HE Qing, ZHANG Keqi, et al. Application of terrestrial laser scanner on tidal flat morphology at a typhoon event timescale [J]. Geomorphology, 2017, 292: 47-58.
- [20] ZHOU Zeng, COCO G, TOWNEND I, et al. Is “morphodynamic equilibrium” an oxymoron? [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 165: 257-267.
- [21] ZHOU Zeng, OLABARRIETA M, STEFANON L, et al. A comparative study of physical and numerical modeling of tidal network ontogeny [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2014, 119(4): 892-912.
- [22] 蒋昌波, 伍志元, 陈杰, 等. 风暴潮作用下泥沙运动和岸滩演变研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(1): 1-9. (JIANG Changbo, WU Zhiyuan, CHEN Jie, et al. Review of sediment transport and beach profile changes under storm surge[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2014, 11(1): 1-9. (in Chinese))
- [23] 杨世伦, 丁平兴, 赵庆英. 开敞大河口滩槽冲淤对台风的响应及其动力泥沙机制探讨: 以长江口南汇边滩-南槽-九段沙系统为例[J]. 海洋工程, 2002, 20(3): 69-75. (YANG Shilun, DING Pingxing, Zhao Qingying. Morphodynamic response of a large river mouth to typhoons[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(3): 69-75. (in Chinese))
- [24] SHI Z, CHEN J Y. Morphodynamics and sediment dynamics on intertidal mudflats in China (1961—1994) [J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(15): 1909-1926.
- [25] KIRBY R. Practical implications of tidal flat shape[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(10): 1061-1077.
- [26] 陈君, 王义刚, 蔡辉. 江苏沿海潮滩剖面特征研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(4): 90-96. (CHEN Jun, WANG Yigang, CAI Hui. Profile characteristics study of the Jiangsu coast[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(4): 90-96. (in Chinese))
- [27] 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 Changkuan, XU Mengpiao, ZHOU Zeng, 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))
- [28] WANG Ping, Cheng Jun. Storm impacts on the morphology and sedimentology of open-coast tidal flats [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2017.
- [29] 张东生, 张君伦, 张长宽, 等. 潮流塑造-风暴破坏-潮流恢复: 试释黄海海底辐射沙脊群形成演变的动力机制[J]. 中国科学: D 辑, 1998, 28(5): 394-402. (ZHANG Dongsheng, ZHAGN Junlun, ZHANG Changkuan, et al. Shaped by tide-destroy by storm-recovery by tide-the dynamic mechanism of the formations of the radial sand ridges in the Yellow Sea[J]. Science in China: Series D, 1998, 28(5): 394-402. (in Chinese))
- [30] 茅志昌. 长江口的台风浪及其对崇明东滩的冲淤作用[J]. 海洋学研究, 1993, 11(4): 8-16. (MAO Zhichang. Wave caused by typhoon and its impacts on the erosion-accumulation of the eastern Chongming flat[J]. Journal of Marine Sciences, 1993, 11(4): 8-16. (in Chinese))
- [31] YANG Shilun, FRIEDRICHS C T, SHI Zhong, et al. Morphological response of tidal marshes, flats and channels of the Outer Yangtze River Mouth to a major storm[J]. Estuaries, 2003, 26(6): 1416-1425.
- [32] FAN Daidu, GUO Yanxia, WANG Ping, 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.
- [33] SIADATMOUSAVI S M, JOSE F. Winter storm-induced hydrodynamics and morphological response of a shallow transgressive shoal complex: Northern Gulf of Mexico[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 154: 58-68.
- [34] 赵秧秧, 高抒. 台风风暴潮影响下潮滩沉积动力模拟初探: 以江苏如东海岸为例[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 79-90. (ZHAO Yangyang, GAO Shu. Simulation of

- tidal flat sedimentation in response to typhoon-induced storm surges: a case study from Rudong Coast, Jiangsu, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 79-90. (in Chinese))
- [35] 陈卫跃. 潮滩泥沙输移及沉积动力环境: 以杭州湾北岸、长江口南岸部分潮滩为例[J]. *海洋学报*, 1992, 13(6): 813-821. (CHEN Weiye. Sediments transportation and depositional dynamic environment in tidal flat: a case study of north Hangzhou Bay and part of south Yangtze Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 13(6): 813-821. (in Chinese))
- [36] 时钟, 陈吉余, 虞志英. 中国淤泥质潮滩沉积研究的进展[J]. *地球科学进展*, 1996, 11(6): 37-44. (SHI Zhong, CHEN Jiyu, YU Zhiying. Sedimentation on the intertidal mudflat in China: an overview[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1996, 11(6): 37-44. (in Chinese))
- [37] 胡明毅, 贺萍. 潮坪风暴沉积特征及其研究意义[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 391-395. (HU Mingyi, HE Ping. The study of tidal storm deposits and its research significance[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(3): 391-395. (in Chinese))
- [38] 龚小辉, 柏春广, 王建. 淤泥质潮滩沉积周期性研究综述[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2012, 35(1): 117-121. (GONG Xiaohui, BAI Chunguang, WANG Jian. Review of research on sedimentary periodicity of tidal mud flat[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 35(1): 117-121. (in Chinese))
- [39] FAN Daidu, LI Congxian, ARCHER A W, et al. Temporal distribution of diastems in deposits of an open-coast tidal flat with high suspended sediment concentrations [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3): 173-181.
- [40] 殷锴. 风暴潮作用下横门东出海航道泥沙冲淤研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [41] 陈德昌, 金镠, 唐寅德, 等. 连云港地区淤泥质海岸近岸带水体含沙量的横向分布[J]. *海洋与湖沼*, 1989, 20(6): 544-553. (CHEN Dechang, JIN Liu, TANG Yinde, et al. Lateral distribution of suspended sediments in nearshore waters of muddy coast of Lianyungang Harbour[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, 20(6): 544-553. (in Chinese))
- [42] 张勇, 金镠. 淤泥质海滩悬沙回归模型的建立及其应用[J]. *泥沙研究*, 1987(1): 19-26. (ZHANG Yong, JIN Liu. Establishment and application of suspended sediment[J]. *Journal of Sediment Research*, 1987(1): 19-26. (in Chinese))
- [43] 曹祖德, 王桂芬. 波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1993, 15(1): 107-118. (CAO Zude, WANG Guifen. Numerical simulation of sand transport by wave and tide[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(1): 107-118. (in Chinese))
- [44] ZHOU Zeng, 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.
- [45] ZHOU Zeng, XU M, ZHANG C K, et al. Modeling the role of storms on tidal flat sorting dynamics [C]// LANZONI S, REDOLFI M, ZOLEZZI G. The 10th symposium on river, coastal and estuarine morphodynamics. Trento-Padova, Italy: [s. n.], 2017.
- [46] 张忍顺. 江苏省淤泥质潮滩的潮流特征及悬移质沉积过程[J]. *海洋与湖沼*, 1986, 17(3): 235-245. (ZHANG Renshun. Characteristics of tidal current and sedimentation of suspended load on tidal mud flat in Jiangsu Province[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1986, 17(3): 235-245. (in Chinese))
- [47] WELLS J T. Dynamics of coastal fluid muds in low-, moderate-, and high-tide-range environments [J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 1983, 40(Sup1): 130-142.
- [48] KESSEL T, KRANENBURG C, BATTJES J A. Transport of fluid mud generated by waves on inclined beds [C]// 25th International Conference on Coastal Engineering. Orlando: [s. n.], 1996.
- [49] 茅志昌. 波浪对南汇东滩冲淤作用的初步分析[J]. *海洋湖沼通报*, 1987(4): 21-29. (MAO Zhichang. The role of wave action in scouring and siltation processes of East Nanhui Tidal Flat [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1987(4): 21-29. (in Chinese))
- [50] SUTTON-GRIER A E, WOVK K, BAMFORD H. Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 51: 137-148.
- [51] LEONARDI N, CARNACINA I, DONATELLI C, et al. Dynamic interactions between coastal storms and salt marshes: a review[J]. *Geomorphology*, 2018, 301: 92-107.
- [52] STARK J, VAN OYEN T, MEIRE P, et al. Observations of tidal and storm surge attenuation in a large tidal marsh [J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(4): 1371-1381.
- [53] STARK J, PLANCKE Y, IDES S, et al. Coastal flood protection by a combined nature-based and engineering approach: modeling the effects of marsh geometry and surrounding dikes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 175: 34-45.
- [54] WAMSLEY T V, CIALONE M A, SMITH J M, et al. The potential of wetlands in reducing storm surge [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(1): 59-68.
- [55] SHENG Y P, LAPETINA A, MA G. The reduction of storm surge by vegetation canopies: three-dimensional simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012,

- 39, L20601.
- [56] SMOLDERS S, PLANCKE Y, IDES S, et al. Role of intertidal wetlands for tidal and storm tide attenuation along a confined estuary: a model study [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2015, 3(5): 3181-3224.
- [57] 张忍顺, 沈永明, 陆丽云, 等. 江苏沿海互花米草 (*Spartina alterniflora*) 盐沼的形成过程 [J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(4): 358-366. (ZHANG Renshun, SHEN Yongming, LU Liyun, et al. Formation of spartina alterniflora salt marsh on Jiangsu Coast, China [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(4): 358-366. (in Chinese))
- [58] 赵秧秧, 高抒, 王丹丹, 等. 盐沼前缘陡坎韵律性形态特征及其形成过程与机理 [J]. 地理学报, 2014, 69(3): 378-390. (ZHAO Yangyang, GAO Shu, WANG Dandan, et al. Characteristics and formation mechanisms of the rhythmic morphology of salt-marsh edge cliffs [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 378-390. (in Chinese))
- [59] FAGHERAZZI S, CARNIELLO L, D'ALPAOS L, et al. Critical bifurcation of shallow microtidal landforms in tidal flats and salt marshes. [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(22): 8337-8341.
- [60] 张长宽, 龚政, 陈永平, 等. 潮滩演变研究进展及前沿问题 [C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会. 舟山: 中国海洋学会海洋工程分会, 2017: 759-766.
- [61] 吕亭豫, 龚政, 张长宽, 等. 粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 178-188. (LU Tingyu, GONG Zheng, ZHANG Changkuan, et al. Reviews of morphological characteristics and evolution processes of silty mud tidal creeks [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(2): 178-188. (in Chinese))
- [62] 张忍顺, 王雪瑜. 江苏省淤泥质海岸潮沟系统 [J]. 地理学报, 1991, 46(2): 195-206. (ZHANG Renshun, WANG Xueyu. Tidal creek system on tidal mud flat of Jiangsu Province [J]. Acta Geographica Sinica, 1991, 46(2): 195-206. (in Chinese))
- [63] 陈君, 赵磊, 卫晓庆. 江苏淤泥质潮滩及近岸沙洲的稳定性判别 [J]. 水利经济, 2012, 30(3): 15-19. (CHEN Jun, ZHAO Lei, WEI Xiaoqing. Stability evaluation of muddy tidal flats and offshore sand bars in coastal areas of Jiangsu Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012, 30(3): 15-19. (in Chinese))
- [64] 龚政, 黄诗涵, 徐贝贝, 等. 江苏中部沿海潮滩对台风暴雨的响应 [J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 243-254. (GONG Zheng, HUANG Shihan, XU Beibei, 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))
- [65] LI Chunyan, CHEN Changsheng, GUADAGNOLI D, et al. Geometry-induced residual eddies in estuaries with curved channels: observations and modeling studies [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: C1005.
- [66] FAGHERAZZI S, GABET E J, FURBISH D J. The effect of bidirectional flow on tidal channel planforms [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(3): 295-309.
- [67] HIBMA A, STIVE M J F, WANG Z B. Estuarine morphodynamics [J]. Coastal Engineering, 2004, 51(8): 765-778.
- [68] 燕守广. 江苏淤长型淤泥质潮滩上潮沟的发育与演变 [D]. 南京: 南京师范大学, 2002.
- [69] HOOD W G. Tidal channel meander formation by depositional rather than erosional processes: examples from the prograding Skagit River Delta (Washington, USA) [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(3): 319-330.
- [70] HUGHES Z J. Tidal channels on tidal flats and marshes [M]//DAVIS R A Jr, DALRYMPLE R W. Principles of tidal sedimentology. Berlin: Springer, 2012: 269-300.
- [71] MWAMBA M J, TORRES R. Rainfall effects on marsh sediment redistribution, North Inlet, South Carolina, USA [J]. Marine Geology, 2002, 189(3): 267-287.
- [72] PILDITCH C A, WIDDOWS J, KUHN N J, et al. Effects of low tide rainfall on the erodibility of intertidal cohesive sediments [J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(14): 1854-1865.
- [73] TOLHURST T J, WATTS C W, VARDY S, et al. The effects of simulated rain on the erosion threshold and biogeochemical properties of intertidal sediments [J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(10): 1217-1230.
- [74] CHOI K, JO J H. Morphodynamics of tidal channels in the open coast macrotidal flat, Southern Ganghwa Island in Gyeonggi Bay, West Coast of Korea [J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(6): 582-595.
- [75] 张忍顺, 陈家记. 琼港辐射沙洲内缘区海岸发育及近期演变 [J]. 海洋通报, 1988, 7(1): 42-49. (ZHANG Renshun, CHEN Jiaji. Coastal development and evolution in the near future of the inner edge of radial sandbanks at Jianggang [J]. Marine Science Bulletin, 1988, 7(1): 42-49. (in Chinese))
- [76] MOWBRAY T D. The genesis of lateral accretion deposits in recent intertidal mudflat channels, Solway Firth, Scotland [J]. Sedimentology, 2010, 30(3): 425-435.
- [77] CHOI K, DALRYMPLE R W, CHUN S S, et al. Sedimentology of modern, inclined heterolithic stratification (IHS) in the Macrotidal Han River Delta, Korea [J]. Journal of Sedimentary Research, 2004, 74(5): 677-689.
- [78] CHOI K. External controls on the architecture of inclined heterolithic stratification (IHS) of Macrotidal Sukmo

- Channel: wave versus rainfall [J]. *Marine Geology*, 2011, 285(1): 17-28.
- [79] BARWIS J H. Sedimentology of some South Carolina tidal-creek point bars, and a comparison with their fluvial counterparts[M]. Calgary: Canadian Society Petroleum Geologists, 1977.
- [80] D'ALPAOS A, GHINASSI M, FINOTELLO A, et al. Tidal meander migration and dynamics: a case study from the Venice Lagoon[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 87: 80-90.
- [81] 张国栋,朱静昌,王益友,等. 苏北淤港现代潮沟沉积研究[J]. *海洋学报*, 1984, 6(2): 223-234. (ZHANG Guodong, ZHU Jingchang, WANG Yiyu, et al. Study of modern deposition of tidal creek in Jiang harbor area in northern Jiangsu Province[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984, 6(2): 223-234. (in Chinese))
- [82] DUNCANSON H B. Observations on the shifting of the channel of the Missouri River Since 1883 [J]. *Science*, 1909, 29(23): 869-871.
- [83] SIMON A, CURINI A, DARBY S E, et al. Bank and near-bank processes in an incised channel [J]. *Geomorphology*, 2000, 35(3): 193-217.
- [84] LAI Y G, THOMAS R E, OZEREN Y, et al. Modeling of multilayer cohesive bank erosion with a coupled bank stability and mobile-bed model [J]. *Geomorphology*, 2015, 243: 116-129.
- [85] DARBY S E, RINALDI M, DAPPORTO S. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(3), F3022.
- [86] SAMADI A, AMIRI-TOKALDANY E, DAVOUDI M H, et al. Experimental and numerical investigation of the stability of overhanging riverbanks [J]. *Geomorphology*, 2013, 184: 1-19.
- [87] 假冬冬,黑鹏飞,邵学军,等. 分层岸滩侧蚀坍塌过程
- 及其水动力响应模拟[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 83-89. (JIA Dongdong, HEI Pengfei, SHAO Xuejun, et al. Numerical simulation of bank erosion processes with composite materials and variations in flow structure [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 83-89. (in Chinese))
- [88] SIMON A, THOMAS R E, CURINI A, et al. Case study: channel stability of the Missouri River, Eastern Montana[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128(10): 880-890.
- [89] EERDT M M V. Salt marsh cliff stability in the oosterschelde[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 10(2): 95-106.
- [90] CHEN Y, THOMPSON C E L, COLLINS M B. Saltmarsh creek bank stability: biostabilisation and consolidation with depth[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 35: 64-74.
- [91] GABET E J. Lateral migration and bank erosion in a saltmarsh tidal channel in San Francisco Bay, California [J]. *Estuaries*, 1998, 21(4): 745-753.
- [92] MARIOTTI G, KEARNEY W, FAGHERAZZI S. Soil creep in salt marshes[J]. *Geology*, 2016, 44(6): 459-462.
- [93] van der WEGEN M, WANG Z B, SAVENIJE H H G, et al. Long-term morphodynamic evolution and energy dissipation in a coastal plain, tidal embayment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(3), F3001.
- [94] CHU K, WINTER C, HEBBELN D, et al. Improvement of morphodynamic modeling of tidal channel migration by nudging[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 77(8): 1-13.
- [95] GONG Zheng, ZHAO Kun, ZHANG Changkuan, et al. The role of bank collapse on tidal creek ontogeny: a novel process-based model for bank retreat[J]. *Geomorphology*, 2018, 311: 13-26.

(收稿日期:2018-10-07 编辑:骆超)

(上接第 48 页)

- [25] 徐纬芳,刘成忠,顾延涛. 基于 PCA 和支持向量机的径流预测应用研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(6): 72-75. (XU Weifang, LIU Chengzhong, GU Yantao. Application research on runoff forecasting based on PCA and support vector machine[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2010, 21(6): 72-75. (in Chinese))
- [26] 李佳,王黎,马光文,等. LS-SVM 在径流预测中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2008(5): 8-11. (LI Jia, WANG Li, MA Guangwen, et al. Application of LS-SVM in runoff forecasting [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(5): 8-11. (in Chinese))
- [27] 周佩玲,陶小丽,傅忠谦,等. 基于遗传算法的 RBF 网络及应用 [J]. *信号处理*, 2001, 17(3): 269-273. (ZHOU Peiling, TAO Xiaoli, FU Zhongqian, et al. RBF network based on genetic algorithm and its application[J]. *Journal of Signal Processing*, 2001, 17(3): 269-273. (in Chinese))
- [28] 杨易华, 罗伟伟. 基于 KPCA-PSO-SVM 的径流预测研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(3): 44-47. (YANG Yihua, LUO Weiwei. Research on runoff forecast based on KPCA-PSO-SVM[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(3): 44-47. (in Chinese))

(收稿日期:2018-05-02 编辑:雷燕)