

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.02.008

开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制

——Ⅱ. 潮汐作用

龚政^{1,2}, 耿亮¹, 吕亭豫^{1,3}, 周曾^{2,4}, 严佳伟¹, 张长宽¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

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 210098; 3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

4. School of Environment, University of Auckland, Auckland 92019, New Zealand)

摘要: 为研究潮汐作用下潮沟网络形成、演变规律, 结合江苏沿海粉砂淤泥质潮滩实际情况, 建立实验室物理模型, 模拟具有一定坡度的潮滩在潮汐作用下的地形演变, 分析了潮沟发育演变中的水沙运动规律, 研究了潮差对于潮沟发育的影响。研究表明, 潮沟发育过程受到床面坡度变化的影响, 坡度均一的潮滩上, 潮沟系统通过相邻小潮沟相互连接而形成, 没有明显的潮沟头部溯源侵蚀现象; 在潮汐作用下, 涨潮初期和落潮后期水流流速较快, 泥沙运动主要出现在这一阶段, 在潮滩中部泥沙运动最为剧烈; 潮差对于潮沟系统形态和结构的影响较小, 潮滩排水路径长度与子流域面积呈幂函数分布, 潮差越大则潮沟系统越早达到动态平衡, 且具有更大的拓宽潮沟的作用。

关键词: 潮滩; 潮沟; 物理模型; 潮汐作用; 泥沙运动; 水动力条件; 江苏海岸

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)02-0231-09

潮滩作为海陆交互带的重要组成部分, 是海洋与陆地之间物质交换的中间地带, 受到水动力条件、泥沙性质、生态环境的共同影响^[1-2]。潮滩上多发育有潮沟系统, 其功能是落潮时宣泄滩面水、涨潮时向上游输送沉积物^[3]。潮沟系统具有类似河流网络的分支结构, 但潮沟系统和河网在构造上有着显著差异, 潮沟形态特性会受到潮沟尺度的影响^[4]。目前关于潮沟演变机理主要有两种理论: 冲刷理论^[5-6]和淤积理论^[7]。冲刷理论认为, 潮沟起源于潮滩表面的地形扰动^[8], 且地形扰动较强时, 所产生的潮沟系统也会有较大的密度和复杂性^[8], 在演变初期, 尤其在退潮阶段归槽水流向潮沟汇聚时, 潮沟系统依靠潮沟头部的溯源侵蚀而增长^[5, 9]。淤积理论认为, 潮沟由潮滩上不同流路的泥沙不断淤积束窄而形成^[7]。也有学者认为, 冲刷过程促使潮沟的最初形成, 而泥沙淤积过程则大多促使潮沟的后续发展及细化^[10]。淤积作用和冲刷作用对潮沟发展演变的影响, 仍没有得到统一的结论。

目前, 水动力数学模型还难以反映潮滩涨潮初期和落潮末期的极浅水情况, 物理模型在真实反映潮滩极浅水环境和潮沟内三维水流结构方面具有优势。现有的潮滩-潮沟系统演变物理模型主要针对于潟湖沙坝地区^[5, 11-13]。文献[8-9]采用物理模型试验研究开敞式潮滩-潮沟系统演变, 主要研究了潮沟的形态特征, 未对流速参数等进行测量, 没有深入探讨动力机制。本系列研究旨在通过物理模型试验模拟不同动力作用下潮滩-潮沟系统演变规律, 本文通过漂浮物粒子示踪法测量水流表面流速, 分析潮沟演变中的水沙运动规律, 重点剖析潮差的影响。

收稿日期: 2016-06-02; **网络出版时间:** 2017-02-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20170221.1127.012.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015B25614)

作者简介: 龚政(1975—), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士, 主要从事海岸潮滩系统演变动力机制、河口海岸水动力及泥沙运动数值模拟等研究。E-mail: gongzheng@hhu.edu.cn

通信作者: 耿亮, E-mail: gengliang@hhu.edu.cn

1 研究区域概况

为研究江苏中部粉砂淤泥质潮滩-潮沟的演变过程,结合江苏潮滩剖面现场观测资料^[14-15],在川东港南侧选取典型潮滩进行模拟(图1),潮滩宽度为7~10 km,滩面坡度为0.1%~1%,潮汐为不规则半日潮,平均潮差为3.68 m。研究区域潮汐特性、波浪特性和泥沙特性等见文献[16]。

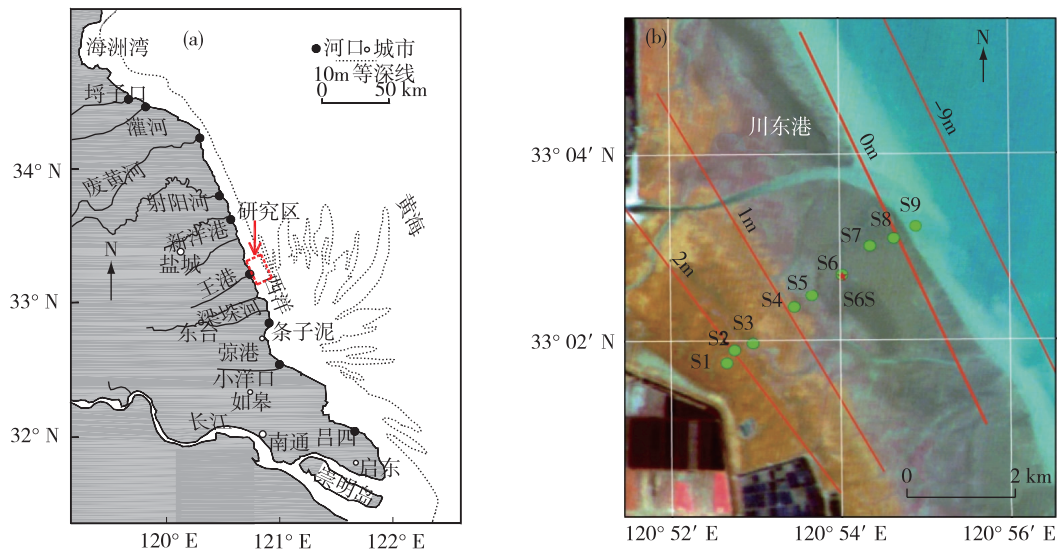


图1 研究区域位置示意^[14]

Fig. 1 Location of study area^[14]

2 物理模型概况

试验模型采用变态模型,水平比尺750,垂向比尺100,模型变率7.5,流速比尺10^[16]。目前针对潮滩系统演变的物理模型试验多采用无黏性的模型沙^[5, 8-9],保证泥沙的起动流速相似,本试验中选用中值粒径1 mm的木屑作为模型沙。模型试验区长(沿岸线方向)4.2 m、宽(垂直于岸线方向)5.5 m,在其中均匀铺设模型沙,初始状态试验区海侧泥沙厚度10 cm,陆侧滩面泥沙厚度15 cm,滩面坡度约1%,并设置宽约20 cm的过渡段,使水流平缓进入潮滩区域。试验地形通过三维微地貌激光地形仪进行扫描,高程测量精度为0.5 mm。本研究详细物理模型设计及装置请参见文献[16]。

设置3组对照试验,模型分别选用周期为10 min,潮差为3 cm、4 cm、5 cm的余弦形式潮位过程。试验组次设计见表1。

表1 各组次试验参数

Table 1 Summary of the experiments carried out in the tidal basin

组次	潮差/cm	潮周期/min	运行潮周期数	平均水位/cm	地形扫描范围/(cm·cm)
1	3	10	98	11.5	300×400
2	4	10	98	11.5	370×400
3	5	10	84	11.5	480×400

3 潮沟发育及其水沙运动

以试验组次3为例(潮差为5 cm),本次试验共进行了6个阶段,共84个潮周期,每个阶段(包含14个潮周期)结束后进行地形扫描。由于试验过程中观察到潮滩在演变初期变化最为剧烈,故在最初的7个潮周期结束后对潮滩表面形态额外进行一次扫描。

3.1 初始滩面对潮沟发育的影响

文献[16]描述了模型从初始状态运行至动态平衡全过程的潮滩-潮沟形态变化,其中动态平衡是指潮沟系统整体达到稳定,但局部仍存在小范围变化。潮沟系统发育演变总体表现为,运行7个潮周期后首先产生相互平行且独立的小潮沟,随后相邻潮沟相互连接形成潮沟系统,该现象与Iwasaki等^[8]的试验结果相似:初始地形的局部扰动在潮流作用下发育成潮沟,并与其他潮沟相连形成潮沟系统。但与Stefanon等^[5]、Vlaswinkel和Cantelli^[9]所提出的潮沟发育规律有明显区别。本试验中并没有观察到明显的潮沟通过头部溯源侵蚀而延伸的现象。对比前人^[5,8,9]物理模型的试验条件,发现潮沟系统发育过程受到床面坡度变化的影响。当床面存在较大坡度改变时,如Stefanon等^[5]、Vlaswinkel和Cantelli^[9]的模型初始床面坡度分别为0%(即水平)和0.25%,潮滩与外海交界处的坡度陡降,一旦在较为水平的潮滩上形成潮沟,在潮沟头部与滩面交界处的地形坡度变化较大,落潮水流流经该处时被加速,较大的切应力使得该处泥沙冲刷更加强烈,从而潮沟不断因头部的溯源侵蚀而延伸。相反,本试验中床面坡度为1%,与Iwasaki等^[8]研究中0.67%~2.50%的坡度接近,水位变动区范围内滩面坡度均一,滩面归槽水没有明显的加速现象,不会产生明显的潮沟头部溯源侵蚀现象。因此,不仅在落潮时期有泥沙运动,涨潮时期的泥沙运动也对潮沟发展产生贡献^[8]。

3.2 潮沟演变动态平衡状态

通过三维微地貌激光地形仪对试验区滩面进行逐点扫描,得到三维地形数据,通过Arcgis对原始的地形数据DEM进行处理并分析潮沟网络,基于D8算法^[17]计算水流方向。采用Strahler分级模式^[18]对潮沟分级,没有支流汇入的末端潮沟为1级潮沟,低级潮沟汇聚形成高级潮沟,本试验中最高生成了5级潮沟。

对整个滩面试验区的每一点计算不同时期高程值的标准差,反映每个点滩面高程的变动幅度,体现在水动力作用下泥沙运动的强度。图2为潮滩演变至动态平衡状态后(42个潮周期)滩面高程变化标准差分布($x=280$ cm附近明显的带状异变是三维微地貌激光地形仪故障导致的)。可以看出,整体上潮滩中部的泥沙运动最为剧烈,潮沟发育最为明显,其次是潮间上带,潮间下带最弱。泥沙运动强度分布情况与水动力条件有关,当潮位处于波峰和波谷时,潮位变化梯度近乎为0,水动力条件较弱,因此,在潮间带上部和下部的泥沙运动较弱。

在整个潮滩试验区内均匀选取了103个断面,在每个断面上选取了潮沟内外两个特征点,计算每个特征点在各试验阶段内高程变化标准差,反映各阶段潮沟内外泥沙的运动程度,如图3所示。在前42个潮周期中,潮沟内外的高程变化程度均逐渐减小;42个周期之后,高程变化始终保持在较低水平。说明在42个潮周期之前,潮滩及潮沟演变先快后慢,潮滩泥沙运动强度持续减小;42个周期之后,泥沙运动强度很小。定义各断面潮滩表面高程变化标准差与潮沟内部高程变化标准差的比值(简称“标准差比”),潮沟外部(即潮滩表面)高程变化可以反应潮沟增宽的程度,潮沟内部高程变化可以反应潮沟增深的程度,故标准差比可以反应潮沟增宽和增深的强弱关系。除42~56个周期外,潮沟断面标准差比始终小于1,潮沟在绝大多数时间内以加深为主导过程。但随着试验的进行,标准差比呈现增大趋势,说明潮沟边壁的泥沙运动相对于潮沟底部在不断增强,潮沟断面增宽的程度逐渐增大,最终与增深程度相当,再加上较小的泥沙运动强度,潮沟及其断面形态基本保持稳定,可认为潮滩在42个潮周期之后达到动态平衡状态。

3.3 水动力与泥沙运动

为探究泥沙运动与水动力过程的关系,以5 cm潮差试验为例,在试验过程中通过示踪粒子获取潮沟演变过程中3个潮周期潮间带中下部的水流表面流速,建立表面流速与测量区域平均水深的定量关系,定性分

析表面流速与泥沙运动的关系，并且比较了潮沟内外水流表面流速的差异。

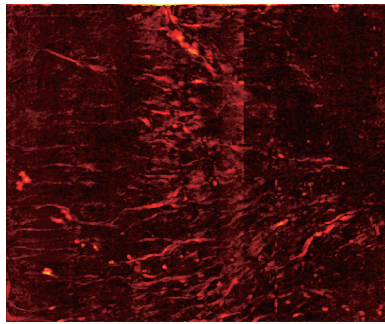


图2 滩面高程变化标准差(42个潮周期后)

Fig. 2 Distribution of elevation standard deviation on the tidal flat (After 42 tidal cycles)

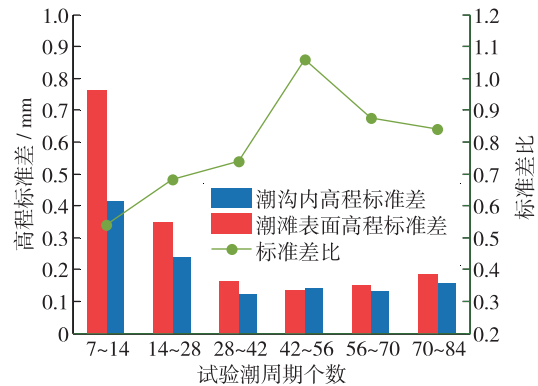


图3 高程标准差变化趋势

Fig. 3 Variation of elevation standard deviation

图4(a)表示潮沟内外水流表面流速随水位的变化过程，图4(b)表示表面流速与水位变化率随试验时间为变化过程。涨潮阶段，潮沟中先于潮滩表面涨水，在涨潮初期潮沟中流速就迅速达到最大值，伴随着强烈的泥沙运动；随水深继续增加，潮沟内流速呈现减小趋势，潮沟外部滩面被水淹没后流速开始增大，之后随着潮沟内流速一起减小。在落潮初期，潮滩流速呈现增大趋势，潮沟内外流速大致相等；当水位下降至大约11.9 cm时，潮沟内外流速变化开始产生差异，靠近潮沟的水流方向开始改变，即出现明显的水流归槽现象，潮沟外(即潮滩表面)流速逐渐减小为0，潮沟内部流速继续增大；当水位下降至约11.5 cm时，大部分滩面已经露滩，仅在潮沟中有滩面滞留水，随后潮沟中的流速达到最大，泥沙运动也主要在此阶段出现。随着水位的进一步降低，潮沟中的水流仍会维持较长一段时间，当表面流速减小到约11 cm/s时，泥沙停止运动。

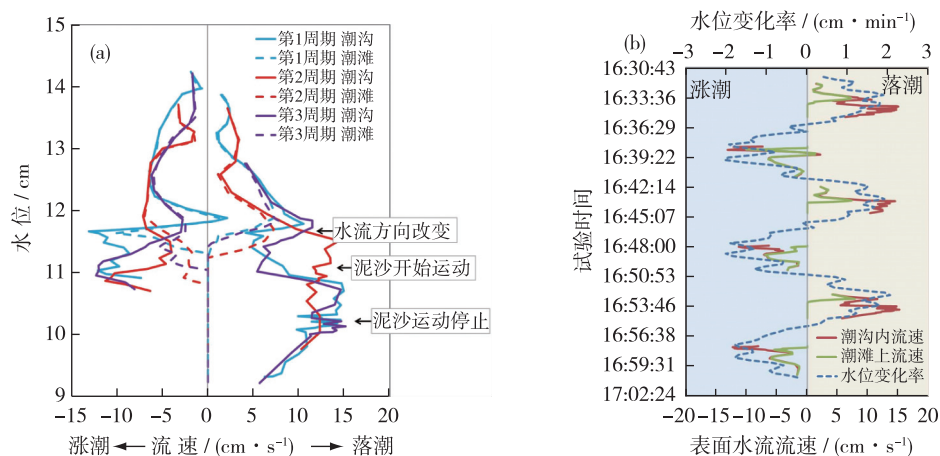


图4 表面流速随水位变化过程和水流表面流速与水位变化率随时间变化过程

Fig. 4 Variation of surface velocity inside and outside tidal creeks with water level and surface velocity variation compared with water level gradient

滩面水流流速主要受到水位变动速率和地形坡度的影响^[19-20]。根据现场对潮沟水流流速的测量结果，在涨潮初期潮沟水流会出现流速最大值^[21-23]。Wang等^[23]通过现场观测发现，涨潮初期的潮沟流速激增是由于此时水位变动速率较大而产生的。在本试验中，涨潮后期与落潮初期水流流速过程与水位变化速率过程一致(图4(b)，图中水位变化率的波动是由于试验尾门控制精度不足造成)，但涨潮初期和落潮后期水深较浅

时潮沟内流速有明显增大, 且流速的变动程度大于水位变化速率的变动程度, 说明水深较大时水流流速主要受到水位变动速率的控制, 随着水深减小, 底床通过底摩阻对水流的影响逐渐增强, 落潮后期滩面归槽水开始向潮沟汇集, 使得潮滩表面流速减小, 而潮沟内水流得到加速。另外, 试验中选用的模型沙渗透率较大, 相当于放大了地下水渗流对潮沟水流的影响, 由于泥沙内部孔隙水渗出, 潮沟内水位下降速度明显慢于落潮水位变动速度^[24-25], 在一定程度上加强了落潮后期的潮沟水流。由于受到水流流速的控制, 泥沙运动也主要出现在水深较小时, 此时水流表面流速最大, 潮沟底部水流切应力较大。因此, 水流表面流速和当地水深共同决定了泥沙运动, 或者说, 泥沙运动取决于近底层的垂向流速梯度: 当水深较浅且表面流速较大时, 近底层流速及流速梯度较大, 从而输沙率增加^[26]。前面提到的泥沙运动强度的分布情况(图2)可以得到解释: 由于模型水位为余弦形式变动, 潮滩下游靠海一侧绝大部分时间内水深较大, 仅在潮波波谷处水深达到较小值, 而此时水动力条件较弱; 在潮滩上部, 大部分时间为露滩状态, 淹没现象仅出现在波峰时期(应注意到, 试验中由于泥沙的冲刷和固结, 滩面高程下降, 使得在试验中后期潮滩上部最高点低于最高水位约5 mm); 相反, 在潮滩中部, 水位变动速率最大, 水深也较小, 垂向流速梯度较大, 更有利于泥沙的输移。

4 潮差影响分析

为分析不同潮差情况对于潮滩-潮沟系统的影响, 根据表1中的参数设置进行了3组对照试验, 试验潮差分别为3 cm、4 cm和5 cm, 并分别统计了每组试验中潮沟长度、断面形态以及排水密度的变化规律。

4.1 对于潮沟系统发育速度的影响

统计比较了不同潮差情况下潮沟总长度的变化过程, 并计算各阶段的潮沟总长度占最终长度的百分比, 以表示潮沟总长的发育程度^[16], 见图5。不同潮差情况的潮沟长度增长都经历了先快后慢的过程, 但在演变初期, 潮沟长度的增长速率, 即潮沟总长度发育程度, 随着潮差的增大而显著提高, 大潮差的情况下潮沟长度能够更快地达到动态平衡状态。3 cm、4 cm和5 cm潮差情况达到动态平衡状态的时间分别为70个、56个、42个潮周期。这反映出不同潮汐动力对于潮滩-潮沟系统塑造过程的不同: 对于单位面积的纳潮流域而言, 大潮差情况具有较大的纳潮量, 水动力条件较强, 能够更迅速改变潮滩形态, 并使其达到动态平衡; 相反, 小潮差情况则是较为缓慢地塑造潮滩-潮沟地形。

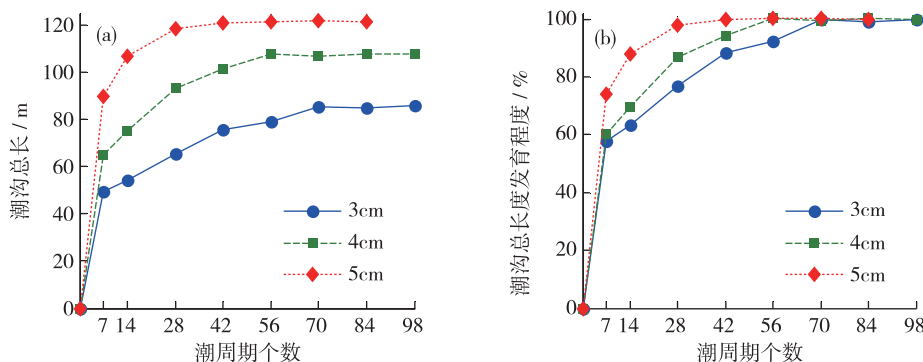


图5 潮沟总长变化和总长度发育程度变化

Fig. 5 Variation of total creek length and fraction of the final total creek length

4.2 对于排水密度的影响

目前针对排水密度的表示方式主要有两种: Horton 排水密度^[27]和归槽水流路径长度^[28]。Horton 排水密度是指单位面积纳潮流域上的潮沟总长度, 仅能够反映潮沟分割潮滩的能力, 但不能反映潮沟形态和结构对于潮滩排水的影响^[28]。归槽水流路径长度是指潮滩上某点的水流流入最近潮沟的距离, 代表着潮沟参与水交换的能力, 归槽水流长度越短, 说明滩面水流越容易汇聚到潮沟中, 潮沟系统的排水能力越强。计算归槽

水流长度时需要通过瞬时水面形态确定水流方向^[4]。由于本次试验中的水深很小、瞬时水面形态难以捕捉,原始计算归槽水流方向的方法不能适用。因此,为反映潮滩整体向外海的排水能力,利用 Arcgis 软件计算并

统计了不同潮差情况下以海侧边界为排水终点的子流域平均排水长度以及子流域面积,见图 6。现实情况中,不同的潮沟系统形态、结构以及复杂程度会影响流域排水方向和长度,使得流域平均排水长度随流域面积表现出不同的变化趋势。

在本试验结果中,不同潮差情况下的子流域面积和平均排水路径长度数据点在双对数坐标系中呈现良好的线性相关关系,表现出良好的幂函数形式分布规律。说明不同潮差情况下产生的潮沟系统形态结构(如潮沟弯曲和分叉)特点相同,潮差对潮沟系统平面形态分布和排水密度的影响较小,潮滩排水长度主要受子流域大小的控制。这与 Marani 等^[28]通过对同一地区的两次现场观测所得结论一致:潮沟总长度对于流域面积的响应不会受到潮差的影响。

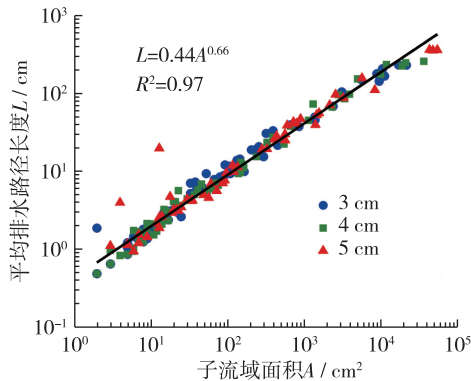


图 6 子流域平均排水路径长度和子流域面积关系

Fig. 6 Relationship of mean drainage path length and sub-basin area

4.3 对于潮沟断面的影响

试验中潮沟系统达到动态平衡状态后,在各组试验中均匀选取潮沟断面进行断面参数统计,其中 3 cm 潮差试验选取断面 1 769 个,4 cm 潮差试验选取断面 2 614 个,5 cm 潮差试验选取断面 3 114 个。按照潮沟等级分别统计潮沟断面的宽度、深度、面积以及宽深比,见图 7。

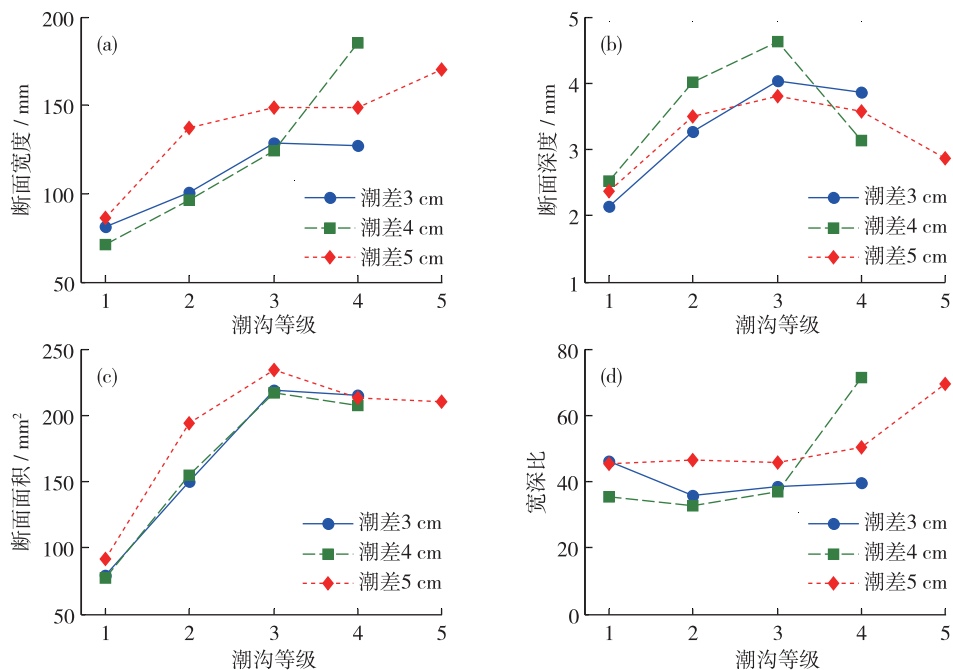


图 7 潮沟断面宽度、深度、面积和宽深比随潮沟等级变化规律

Fig. 7 Mean creek width, depth, cross-section area and width/depth rate versus creek order

对于 1 级至 3 级潮沟,5 cm 潮差情况会产生较大的潮沟宽度,但对于潮沟加深的影响程度不明显,使得 5 cm 潮差所产生的潮沟具有较大的断面面积和断面宽深比。说明当水动力条件增强时,潮沟系统需要增大断面面积以适应大潮差时的排水强度,并且大潮差情况对于潮沟宽度的影响强于对深度的影响,与加深相

比,潮沟更容易变宽。其原因可能是大潮差所产生的较强水动力条件会使潮沟内外的泥沙都产生运动,而水动力条件较小的情况主要影响潮沟中的泥沙运动,使得潮沟显著加深。3 cm 和 4 cm 潮差情况产生了几乎相同的潮沟断面面积,但 3 cm 潮差情况的潮沟宽度大于 4 cm 潮差情况,而深度小于 4 cm 潮差情况,也造成了较大的宽深比。另外,随着潮沟等级的增大,断面深度和面积呈现先增大后减小的趋势,最大值出现在 3 级潮沟处,而试验中的 3 级潮沟主要位于潮滩中部,进一步证实了潮滩中部泥沙运动较强,潮沟发育更完善的结论。4 级、5 级潮沟出现在潮滩下部,且潮沟数量显著减少,在 4 cm 潮差情况下出现了宽度陡增和深度陡降的情况,导致宽深比也陡增,这可能与潮沟数量少、抽样误差大、代表性不够有关;也可能随着潮差增大,潮沟形态呈现非单调变化有关,这有待于今后进一步研究。

5 结 论

(1) 通过对比本试验与国外学者物理模型试验条件的不同,认为滩面坡度改变会显著影响潮沟的发育过程;其原因是坡度改变较大的区域会产生较大的水头差,使水流对泥沙的冲刷加剧,潮沟通过头部延伸而伸长;当滩面各处坡度均一时,演变初期潮滩各处均有潮沟产生,相邻潮沟相互连接最终形成潮沟系统。

(2) 以 5 cm 潮差试验组次为例,通过不同试验阶段高程标准差的变化,解释了潮沟断面形态形成过程;42 个潮周期之后,潮沟及其断面形态基本保持稳定,可认为潮滩已达到动态平衡状态。

(3) 通过漂浮物示踪粒子获取潮间带中下部的水流表面流速,建立表面流速与测量区域平均水深的定量关系,定性分析表面流速与泥沙运动的关系,并且比较了潮沟内外水流表面流速的差异。水深较大时,水流流速主要受水位变化率的控制。涨潮流和落潮流对于潮沟的塑造作用不同:涨潮流对于潮沟的塑造作用表现在涨潮初期流速出现最大值阶段,强烈的水流推动潮沟内外的泥沙同时向上游运动,使潮沟向末端方向延伸;落潮流对于潮沟的塑造表现在落潮后期,由于地形对水流的集中,上游汇聚的归槽水持续对潮沟底部和边壁进行冲刷,使潮沟不断加深并横向摆动,而潮沟外部的泥沙运动较弱。

(4) 在滩面坡度均一的潮滩上,大潮差情况下的潮沟初期发育更快,能够更早地达到动态平衡状态。但潮差对于潮沟系统形态、结构的影响较小,潮滩子流域排水长度主要受到子流域面积控制,两者呈现幂函数形式分布。

(5) 对于 1~3 级潮沟,潮差较大情况对于潮沟拓宽的作用强于蚀深效果,使潮沟产生较大的断面面积和宽深比。由于 4 级、5 级潮沟数量少、抽样误差大、代表性不强,随潮沟等级变化宽度和深度出现了陡变的情况,具体原因有待于今后进一步研究。

(6) 实际潮滩受到潮汐、波浪等多种水动力作用,本试验主要考虑了规则的潮汐作用,试验模拟得到的潮沟形态、发育特征和水沙运动规律与实际总体相符。为了增强模型试验与原型的可比性,今后一方面要在模型中尽可能考虑实际动力作用(如潮汐不对称、大小潮等),另外,需要进一步注重潮沟现场资料的收集,加强物理模型试验成果与天然情况的比对,深化潮滩系统演变动力机制的理解。

参考文献:

- [1] D'ALPAOS A, TOFFOLON M, CAMPOREALE C. Ecogeomorphological feedbacks of water fluxes, sediment transport and vegetation dynamics in rivers and estuaries[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 93: 151-155.
- [2] RONER M, D'ALPAOS A, GHINASSI M, et al. Spatial variation of salt-marsh organic and inorganic deposition and organic carbon accumulation: inferences from the Venice lagoon, Italy[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 93(B): 276-287.
- [3] 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 R S, WANG X Y. Tidal creek system on tidal mud flat of Jiangsu province[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 1991, 46(2): 195-206. (in Chinese))
- [4] RINALDO A, FAGHERAZZI S, LANZONI S. Tidal networks; 2: watershed delineation and comparative network morphology[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(12): 3905-3917.
- [5] STEFANON L, CARNIELLO L, D'ALPAOS A, et al. Experimental analysis of tidal network growth and development[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(12): 1455-1468.

- tal Shelf Research, 2010, 30(8): 950-962.
- [6] 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 X S. Genetic classification of tidal creek and factors affecting its development[J]. Journal of Green Science and Technology, 1988, 43(1): 35-43. (in Chinese))
- [7] HOOD W G. A conceptual model of depositional, rather than erosional, tidal channel development in the rapidly prograding Skagit River Delta (Washington, USA)[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31(14): 1824-1838.
- [8] IWASAKI T, SHIMIZU Y, KIMURA I. Modelling of the initiation and development of tidal creek networks[J]. Proceedings of the ICE-Maritime Engineering, 2013, 166(2): 76-88.
- [9] VLASWINKEL B M, CANTELLI A. Geometric characteristics and evolution of a tidal channel network in experimental setting[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(6): 739-752.
- [10] BELLARD J P, TOFFOLON M, CARNIELLO L, et al. An ecogeomorphic model of tidal channel initiation and elaboration in progressive marsh accretional contexts[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2015, 120(6): 1040-1064.
- [11] KLEINHANS M G, van der VEGT M, van SCHELTINGA R T, et al. Turning the tide: experimental creation of tidal channel networks and ebb deltas[J]. Netherlands Journal of Geosciences-Geologie En Mijnbouw, 2012, 91(3): 311-323.
- [12] STEFANON L, CARNIELLO L, D'ALPAOS A, et al. Signatures of sea level changes on tidal geomorphology: experiments on network incision and retreat[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(12): 85-91.
- [13] ZHOU Z, STEFANON L, OLABARRIETA M, et al. Analysis of the drainage density of experimental and modelled tidal networks [J]. Earth Surface Dynamics, 2014, 2(1): 105-116.
- [14] 龚政, 张长宽, 陶建峰, 等. 淤长型泥质潮滩双凸形剖面形成机制[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 212-219. (GONG Z, ZHANG C K, TAO J F, et al. Mechanisms for the evolution of double-convex cross-shore profile over accretional mudflats[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 212-219. (in Chinese))
- [15] 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 Z, JIN C, ZHANG C K, et al. Surface elevation variation of the Jiangsu mudflats: field observation [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 880-887. (in Chinese))
- [16] 龚政, 吕亭豫, 耿亮, 等. 开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制: 1: 物理模型设计及潮沟形态[J]. 水科学进展, 2017, 28(1):86-95. (GONG Z, LYU T Y, GENG L, et al. Mechanisms underlying the dynamic evolution of an open-coast tidal flat-creek system: I: physical model design and tidal creek morphology[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1):86-95. (in Chinese))
- [17] 贺丹, 曹佳云, 付晓婷, 等. 基于 ArcGIS 图解建模的水系自动提取研究[J]. 地下水, 2011, 33(3): 128-130. (HE D, CAO J Y, FU X T, et al. Study on automatic extraction of water system based on ArcGIS graphic model[J]. Ground Water, 2011, 33(3): 128-130. (in Chinese))
- [18] 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. (LYU T Y, GONG Z, ZHANG C K, et al. Reviews on morphological characteristics and evolution processes of silty mud tidal creeks [J], Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(2): 178-188. (in Chinese))
- [19] BRIDGES P H, LEEDER M R. Sedimentary model for intertidal mudflat channels, with examples from the Solway Firth, Scotland [J]. Sedimentology, 1976, 23(4): 533-552.
- [20] 张忍顺. 潮滩沉积动力学研究概况[J]. 黄渤海海洋, 1987, 5(2): 71-79. (ZHANG R S. Progress of studies on sedimentary dynamics of tidal mud flat[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1987, 5(2): 71-79. (in Chinese))
- [21] BAYLISS-SMITH T P, HEALEY R, LAILEY R, et al. Tidal flows in salt marsh creeks[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1979, 9(3): 235-255.
- [22] 汪亚平, 张忍顺, 高抒. 论盐沼-潮沟系统的地貌动力响应[J]. 科学通报, 1998, 43(21): 2315-2320. (WANG Y P, ZHANG R S, GAO S. Geomorphic and hydrodynamic responses in salt marsh-tidal creek systems[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(21): 2315-2320. (in Chinese))
- [23] WANG Y P, ZHANG R S, GAO S. Velocity variations in salt marsh creeks, Jiangsu, China[J]. Journal of Coastal Research, 1999, 15(2): 471-477.
- [24] 辛沛, 金光球, 李凌, 等. 崇明东滩盐沼潮沟水动力过程观测与分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 74-79. (XIN P, JIN G Q, LI L, et al. Observation and analysis of hydrodynamics in a tidal creek at the Chongming Dongtan salt marsh[J]. Advances in

- Water Science, 2009, 20(1): 74-79. (in Chinese))
- [25] 辛沛, 金光球, 李凌. 潮汐作用下盐沼孔隙水流动及溶质运移模拟[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 379-384. (XIN P, JIN G Q, LI L, et al. Modelling of tide induced pore water flow and solute transport in a salt marsh [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 379-384. (in Chinese))
- [26] 黄才安, 奚斌. 推移质输沙率公式的统一形式[J]. 水利水运科学研究, 2000(2): 72-78. (HUANG C A, XI B. Unified form of bed load transport equation[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000(2): 72-78. (in Chinese))
- [27] HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1945, 56(3): 275-370.
- [28] MARANI M, BELLUCO E, D'ALPAOS A, et al. On the drainage density of tidal networks[J]. Water Resources Research, 2003, 39(2): 5029-5035.

Mechanisms underlying the dynamic evolution of an open-coast tidal flat-creek system: II : influence of tidal range*

GONG Zheng^{1,2}, GENG Liang¹, LYU Tingyu^{1,3}, ZHOU Zeng^{2,4}, YAN Jiawei¹, ZHANG Changkuan¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 3. CCCC Water Transportation Consultants Co, Ltd, Beijing 100007, China;

4. School of Environment, University of Auckland, Auckland 92019, New Zealand)

Abstract: To explore the initiation and development of tidal creek network driven by tidal currents, an experimental physical model was established based on the prototype of a silt-muddy tidal flat-creek system on the Jiangsu coast. The evolutionary process was simulated with an initially gentle bed slope of about 1%. The movement of flow and sediment, as well as the influence of tidal range on tidal creek development, was analyzed. The results indicated that tidal creek development was influenced by the bed slope variation. For the cases of uniform bed slope, the connection of neighboring tidal creeks, rather than headward erosion as shown by previous studies, resulted in the development of tidal networks. A strong flow and sediment movement occurred at the early flood and the late ebb stages, and sediment movement was most active in the mid-intertidal flat. Tidal range had little influence on the overall pattern formation and the structure of tidal networks. The relationship between the mean drainage path length and the sub-basin area generally followed a power-law function. Tidal networks approached a dynamic equilibrium state earlier under larger tidal ranges which contributed more to the development of the tidal creek widths.

Key words: tidal flat; tidal creek; physical model; tidal range; sediment movement; hydrodynamics; Jiangsu coast

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51379003) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2015B25614).