

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.014

粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状

吕亭豫¹, 龚政², 张长宽¹, 耿亮¹, 张茜¹

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098)

摘要: 从潮沟分类、潮沟地貌形态特征及发育演变过程等方面回顾分析了潮沟系统的研究进展。认为 Strahler 在 Horton 分级方法基础上提出的潮沟分级模式相对更为合理; 潮沟总长与潮盆集水面积之间存在正相关关系, 潮差与潮沟密度间存在正相关关系, 植被对潮沟密度的影响尚无一致结论; 对于潮沟截面形态的研究主要集中于宽深比、不对称性以及沉积物和植被对其影响作用; 潮沟发育演变动力机制的研究在定性层面的成果较多, 定量研究成果相对较少。指出潮沟内复杂的水流结构、潮沟边壁稳定性, 以及通过物理模型试验、数值模拟、遥感分析等综合性手段建立影响因素与潮沟形态特征的定量关系等是今后的研究热点。

关键词: 潮沟; 粉砂淤泥质潮滩; 潮沟形态特征; 潮沟发育演变过程; 潮沟密度; 动力地貌; 综述
中图分类号: TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)02-0178-11

Reviews of morphological characteristics and evolution processes of silty mud tidal creeks

LYU Tingyu¹, GONG Zheng², ZHANG Changkuan¹, GENG Liang¹, ZHANG Qian¹

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Research progress on the tidal creek system is reviewed in terms of classification, morphological characteristics, and evolution processes of tidal creeks. It is suggested that the classification mode of tidal creeks proposed by Strahler based on the Horton's classification method is relatively reasonable. The total length of the tidal creek is positively correlated with the water catchment area, the tide range is positively correlated with the tidal creek density, and the influence of vegetation on the tidal creek density is inconclusive. Studies on the cross-sectional morphology of the tidal creek focus on the influence of the width-depth ratio, asymmetry, sediment, and vegetation on the cross-sectional morphology of the tidal creek. There are more qualitative results and fewer quantitative results regarding the dynamic mechanisms of tidal creek evolution. It is pointed out that, in future research, more attention should be paid to the complex flow structure in tidal creeks, the stability of side walls of tidal creeks, and the quantitative relationship between morphological characteristics of tidal creeks and their factors through physical model, numerical simulation, and remote sensing analysis techniques.

Key words: tidal creek; silty mud tidal flat; morphological characteristic of tidal creek; evolution process of tidal creek; tidal creek density; dynamic morphology; review

收稿日期: 2015-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(51379003, 51179067); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0841)

作者简介: 吕亭豫(1990—), 女, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 主要从事海岸潮滩系统演变动力机制研究。E-mail: lvtingyu2009@163.com

通信作者: 龚政, 教授。E-mail: gongzheng@hhu.edu.cn

潮沟,狭义上来说是一种发育在潮间带,尤其是粉砂淤泥质潮间带,由海洋动力,特别是潮汐作用形成的潮汐水道^[1]。广义上讲,还可以把由潮流维持,连接海洋与海湾或潟湖的潮汐水道,以及入海口处受潮汐作用改造的废弃河道列入其中^[2]。本文研究对象为狭义概念上的潮沟,其作为潮滩上海陆相互作用最活跃的微地貌单元,是潮水和泥沙输入与输出的通道^[3]。潮沟系统多发育在潮汐作用明显的粉砂淤泥质海岸^[4-6],尤其集中在潮间带内,即平均大潮高潮线至平均大潮低潮线之间的潮滩,有时由于潮沟的溯源侵蚀可至潮上带,个别较大的潮沟可能延伸至潮下带^[2],并呈现树枝状、矩形状、平形状或羽状等平面形态结构^[7]。

粉砂淤泥质潮滩作为潮沟发育的主要地带,在世界范围内广泛分布:英国西部及东南海岸、荷兰西北海岸、美国东海岸、法国西海岸、中国辽东湾、渤海湾、江苏沿海、长江口、杭州湾、珠江口等有泥沙汇入区,以及浙江、福建、广东、广西沿海港湾内^[8-9]。粉砂淤泥质潮滩是在沿海平原外缘发育的由淤泥质黏土和粉砂组成的平坦海岸,其动力特征与砂或砾石构成的海滩不同,一般具有宽广性、大尺度、坡度平缓等特征。潮滩-潮沟系统所在的潮间带滩地作为海陆交界地带,在围垦造地^[10]、生态环境^[11-14]、水产养殖^[15]和旅游度假等方面具有重要的环境意义和经济价值。

潮沟的形态,如:潮沟密度、截面宽深比、潮沟曲率等,取决于水沙动力为主导地位的潮沟-潮滩系统发育演变过程,与水动力条件、泥沙特性、动植物影响、人类活动等息息相关。早在20世纪40年代,国内外学者便开始关注潮滩-潮沟系统^[16-17],提出了潮沟分级方法、潮网密度、分叉率等重要概念。从20世纪80年代开始,随着沿海闸堤、围垦工程建设规模加大以及对滩涂生态、资源环境的日益重视,通过现场观测、遥感分析、物理模型和数值模拟等研究手段,对潮沟地貌形态特征和发育演变过程等进行了大量研究^[18-23]。目前,还有诸多科学问题值得深入探讨,如:潮汐特性、泥沙特性、潮滩植被等与潮沟密度、截面宽深比等潮沟形态的定量关系,潮沟曲流发育的动力学机制等。

笔者首先从潮沟地貌形态特征的角度,回顾了潮沟分类方法、潮沟密度、截面宽深比、曲率等方面的研究进展;然后从潮沟动力地貌过程的角度,回顾了潮沟发育演变动力机制、沉积过程等方面的研究进展;最后,给出了值得进一步研究的方向。

1 潮沟的分类

潮沟有多种分类方法,可以从潮沟的平面形态结构、成因类型和在滩面所处的位置等进行分类。

1.1 根据潮沟平面形态结构分类

根据潮沟平面形态结构,Pye等^[24]等把潮沟分为7类:单线型(linear single)、线型树枝状(linear dendritic)、树枝状(dendritic)、弯曲型树枝状^[25](meandering dendritic)、网状(reticulate)、复合型(complex)、重叠型(superimposed)。Hibma等^[26]和Luna等^[27]从宏观视角,将河口区域平面形态复杂的潮沟分为树枝状和辫状(弯曲型)2类。Eisma^[28]在考察了包括河口、潟湖、宽阔海岸、盐沼在内不同潮滩环境下潮间带潮沟系统后,把潮沟分为3类10种:(a)单一通道:顺直型、蜿蜒型、弯曲型(曲率 >1.5);(b)潮沟系统:平行潮沟、细长树枝型、树枝型、支流型、辫状、连通型;(c)稀少或没有潮沟。3种分类方式虽然因为研究尺度不同而存在部分差异,但都是以潮沟系统平面形态结构的复杂程度为依据,Pye等^[24]的分类方法较适用于树枝状潮沟系统发育的盐沼潮滩,Hibma等^[26]和Luna等^[27]的分类方法主要针对河口地区,而Eisma^[28]分类方式则相对较为细致全面。

1.2 根据潮沟成因分类

根据潮沟成因,可分成4种类型^[20]:(a)滩面水流冲刷型^[29],指在潮坪上落潮后期流或落潮后表面溢流产生局部的冲刷而逐渐发育演化成的潮沟,其发育机理类似于坡地冲沟。(b)潮流辐聚侵蚀型^[30-31],指潮流在区域上的辐聚和辐散而产生的潮沟系统。这类潮沟,一般规模较大,走向总体上平行于涨、落潮流方向,往往与海岸走向斜交,有时甚至平行。其上游可因溯源侵蚀而伸延至高潮坪以及更高的地方,其下游沟床可以一直延伸至潮下带很深的部位。通常,这类潮沟的侧向迁移特别明显。(c)陆源水流侵蚀继承型^[10],指陆上小型水流注入潮坪区,刻蚀出小型沟渠,然后,涨、落潮流不断对它冲刷,改造成显著的、以潮汐水流塑造为主的潮沟。(d)潟湖、广海间潮流侵蚀型^[32],指连接潟湖和广海的潮汐水道,这类潮沟主流通常规模巨大,深可达几十米,宽可达几千米。

1.3 根据潮沟所处的位置分类

按照潮沟在滩面上所处的位置,可以分为盐沼潮沟和泥滩潮沟^[33],盐沼潮沟主要发育在潮间带上部,即滩面高程在大潮高潮位和平均高潮位之间,滩面上生长有盐沼植物;泥滩潮沟主要发育在潮间带中下部,即滩面高程在平均高潮位和大潮低潮位之间,滩面上少有盐沼植物或为光滩。本文研究的潮沟,是指发育在潮间带,滩面水流冲刷型的潮沟系统,一般呈弯曲型树枝状,涵盖盐沼潮沟和泥滩潮沟。

2 潮沟的地貌形态特征

在世界各地的潮滩区域,潮沟的地貌形态存在很大差异。本节重点综述潮沟分级方法、潮沟密度、宽深比等地貌形态特征方面的研究进展。

2.1 潮沟分级方法

为描述潮沟发育演变过程和地貌形态特征,需要对潮沟级别进行定义。最早的潮沟分级源自河网分级方法,Gravelius^[34]定义在任何一个河网内,最大的主流为第一级水道,汇入主流的最大支流为第二级水道,汇入大支流的小支流为第三级水道,以此类推,直至把全部大小支流命名完毕为止。这种分级方法在潮沟系统的研究中仍沿用,但是这种划分方法存在2个困难:(a)很难在分级的起始阶段确定哪一条潮沟为一级主流,通常要先了解整个潮沟系统,才能确定潮沟系统中主流与支流之间的关系;(b)在大小不同的潮沟网内,这一潮沟网内一级潮沟与另一潮沟网内一级潮沟可能相差很大。Horton^[16]提出了与Gravelius完全相反的分级顺序。他定义一级潮沟为最小、末端的支流;多个一级潮沟汇聚形成二级潮沟;多个二级潮沟或一级与二级潮沟连接形成三级潮沟,同理递推。这种分级方法存在的不足之处在于:对于没有分枝的大型潮沟,从定义上属于Horton分级方法中最基础的潮沟,但从其尺度上看,又具有Horton分级方法中高级潮沟的特征,从而对各级潮沟特性的研究造成偏差。

Strahler^[17]对Horton的定义方法进行了修正,他认为较高级的潮沟,不可能伸展到潮沟的末梢部分,而那些顶端不再分枝的部分,只能划归为一级潮沟。许宝荣等^[35]通过河网结构水道级别确定方法试验,证明了Strahler的分级模式更为合理。为便于潮沟的统计和特性研究,Vlaswinke等^[36]和Toshiki等^[37]在物理模型和数值模拟中也沿用了Strahler分级方法,定义末端分支为一级潮沟,以保证无分支的潮沟为同一级。

2.2 潮沟密度特征

潮沟密度(潮沟总长($\sum l$)与其集水面积(A)之比)是反映潮沟在滩面上发育程度的重要指标,但考虑到在潮滩上准确识别集水区域边界较为困难,研究过程中以单位面积潮滩上的潮沟长度来表示潮沟密度,与河网中的水系密度相似,但要考虑潮滩上不同潮盆对于潮沟密度的影响。已有研究表明,潮沟总长与其集水面积之间存在定量相关关系,Marani等^[38]通过对意大利威尼斯潟湖136条潮沟的研究,建立了 $\sum l = \alpha A$ 的线性关系式,式中 α 为潮沟密度系数,因各潮盆特性不同而在0.02附近浮动,但基本保持为常数;Novakowski等^[39]整理分析美国南卡罗来纳州725个潮盆-潮沟数据,建立了 $\sum l = \alpha A^{0.88}$ 的指数关系式,并确定该地区潮沟密度变化范围为0.0008~0.069 m/m²。

国内外学者还对潮沟密度的影响因素进行了深入研究,主要包括:潮差(纳潮量)和植被。潮差是反映潮汐特性和潮汐动力作用强度的重要指标,与潮沟密度关系密切。Allen^[40]研究发现潮盆内潮沟总长度与该潮盆的纳潮量存在正相关关系;张忍顺等^[21]参照1980年和1982年江苏省淤泥质海岸的航片,得到潮沟密度与平均潮差之间存在显著的线性关系。

植被对潮沟密度存在影响。沈永明等^[41]观测发现,互花米草通过增大下垫面糙度,增高了落潮时的归槽水位,这可能引起刚落潮时就发生归槽,进而有更多的滩面潮水需要通过潮沟排出,潮沟密度相应增大。陈勇等^[42]、郑宗生等^[43]则认为植被抑制潮沟的发育,潮盆植被覆盖度与潮沟密度负相关。吴德力等^[44]通过对比江苏中部海岸互花米草扩展初期(1992年)与扩展期间(1992—2002年)高、中、低潮带的潮沟密度,得到互花米草扩展抑制了该区中潮带潮沟的(密度)发育,而对低潮带潮沟发育有一定促进作用。

以往研究表明,潮沟密度定义为潮沟总长与潮盆集水面积之比,潮沟密度可以在某种程度上反映其所在潮盆的特性,潮沟总长与潮盆集水面积之间存在正相关关系;潮差与潮沟密度间存在正相关关系;在植被对潮沟密度的影响方面,目前尚无一致的结论。在以后的研究中,可以进一步论证潮汐不对称性、植被等对潮

沟密度的影响。

2.3 潮沟截面宽深比特征

宽深比(W/D)是潮沟宽度与深度的比值,它很大程度上取决于潮沟临界抗冲刷能力。影响潮沟临界抗冲刷能力的因素包括水动力、植被、底质特性等。

在潮流下切形成潮沟过程中,由于泥沙固结及流速梯度的作用,潮沟底部的泥沙比潮沟边壁的泥沙更稳定,而潮沟侧面的流速又大于底部流速,所以潮沟边壁的泥沙比底部泥沙更容易被冲刷,使潮沟更易沿横向拓宽而不是沿深度下切,因此潮沟截面多呈宽浅型,宽深比大于1。光滩上潮沟截面宽深比最大,碱蓬滩其次,最小的是米草滩^[5]。米草对潮沟边壁起到保护作用,使潮沟不易横向拓宽,但同时潮沟又要满足宣泄更多滩面水的要求,因而不断向底部侵蚀,形成宽深比较小的截面形态^[41]。Zeff^[45]、Marani等^[46]、D'Alpaos^[47]先后现场观测得到天然潮沟宽深比的范围为2~50,其中盐沼潮沟宽深比变化范围为5~8;泥滩潮沟宽深比变化范围为8~50。

Vlaswinkel等^[36]、Toshiki^[37]、Stefanon等^[48]通过物理模型试验模拟了潮沟发育演变过程,达到基本平衡状态后,模拟得到的潮沟宽深比变化范围与现场观测值^[45-47]相似。但是,试验中沿用Strahler的分级方法,模拟得到的一级潮沟宽深比最大,变化范围为21~27,四级潮沟宽深比最小,基本稳定在6左右。上述物理模型试验的结论与现场观测结果之间存在趋势性的矛盾。笔者认为:由于在天然条件下,碱蓬滩和米草滩上的植被存在固滩作用,限制了低级潮沟宽度的发育;而物理模型试验没有考虑植被的作用,潮沟端部自由发育,所以其一级潮沟的宽深比相对更大。

目前,对于潮沟截面形态的研究主要集中于宽深比、不对称性以及沉积物和植被对其影响作用。如何在物理模型试验中真实反映植被对潮沟截面形态的影响,如何客观反映泥沙和水动力特性对截面冲淤、甚至潮沟壁塌落等过程的影响,是值得研究的技术难题。

3 潮沟发育演变过程

3.1 研究手段

1997年,Allen^[40]就认识到对潮沟系统三维地貌形态结构研究的重要性,此后,学者相继提出很多概念数学模型^[49-52]。同时,很多学者通过现场观测^[53-54]、机载激光扫描高度计^[55]、遥感影像及地理信息系统^[56-57]等研究方法,对潮沟系统的沉积特性^[58-59]、地貌冲淤^[60-63]、水沙动力特性^[21, 51, 54, 64-65]以及植被生态^[5, 14, 41]等进行研究。近10年,为解决自然环境中潮沟随时间的长期变化难以被跟踪观测和校验的问题,物理模型试验^[23, 36-37, 48, 66-72]和数值模拟^[47, 71, 73-75]作为新的研究手段,被运用到潮沟系统研究中。物理模型试验通过在试验水槽中模拟潮汐动力下潮沟发育演变地貌过程,运用高精度地形测量仪器,收集潮沟系统发育演变各阶段空间和时间的四维数据,为更好地了解潮沟系统发育演变过程特性提供了全新的视角,也为潮沟演变的数值模拟提供良好的基础。目前,数值模拟以控制方程为基础,对物理过程进行不同程度的简化,模拟水动力、泥沙运输、地貌演变间的相互作用,总体上可以反映分枝状潮沟的演变特性^[71-72, 76-79],但在真实模拟潮沟长期演变过程方面还有难度。

遥感分析是对潮沟的宏观形态进行反演分析,但不便于定量反映潮沟的细微尺度,对于发育演变过程的记录也不具备连续性;物理模型非常直观地模拟潮沟演变的完整过程,有助于探知未知动力过程,但因为物理模型是对现场潮滩-潮沟系统的概化,尤其由于比尺效应,增加了问题研究的复杂性;数值模拟中,存在诸多影响因子,其对潮沟形态和发育过程影响的敏感性分析仍未探明;且部分机理还不够清晰,譬如:极浅水动力环境、岸壁稳定性等,这些问题都限制了数值模拟的发展,需更多现场观测和试验研究的支持。

3.2 潮沟发育过程

潮沟发育演变过程主要包括:潮沟下切延伸、曲流发育、蜿蜒摆动以及消亡。影响潮沟系统形态和发育演变的因素包括:滩面归槽水、潮汐不对称性、潮差等水动力,潮滩-潮沟泥沙,堤闸围垦等。其中归槽水^[21]和潮汐不对称^[80-81]是潮沟发育演变的主要动力因素,对潮沟的初始形成^[21, 82]及曲流发育^[83]起到关键作用。

潮沟的发育主要有下切和沉积2种形式。初始光滩存在很多潜在的微小扰动(如泥沙沉积引起滩面高度不同),使落潮流在该处达到侵蚀的临界值,进而下切形成潮沟。潮沟内底质在落潮期的活动程度明显大于涨潮期,潮沟发育主要受落潮动力和底质条件所控制;落潮过程中潮沟尖端头部要汇集滩面和两侧的归槽

水,端部也具有更大的切应力,潮沟源头部位通过溯源侵蚀不断延长,这一现场观测结论与物理模型试验中的结论^[36]具有一致性。

滩面沉积物的种类与含量对潮沟的塑造有重要影响。滩面沉积物中含泥量大于20%或含沙量大于40%,潮沟的发育便受到限制^[21]。潮沟边界若含有过多黏土,就会由于黏结力太大阻碍潮沟的溯源侵蚀和横向摆动。滩面归槽水的出现使潮沟落潮输水量大于涨潮输水量,滩面则正好相反,因此滩面归槽水是导致潮沟、滩面涨落潮输水、输沙量不对称、流速不对称的决定性因素。若含沙级沉积物较多,滩面水就会通过渗漏而非归槽排出,潮沟及滩面的涨、落潮输水量应该相等,不利于潮沟形成。

潮沟系统发育过程中的速率受多方面因素影响: Hughes^[6]在观测南卡罗来纳州淤泥质盐沼滩时,发现新生成的潮沟每年延伸长度为2 m; Symonds等^[84]在观测英国沃什湾潮沟时,发现在自然状态下,潮沟每年延伸15 m,而在海堤建成后,因为要增加潮滩排水量,发育速率增加到每年延伸400 m; Knighton等^[85]在研究澳大利亚北部继承废弃河道的潮沟时,测得其发育速率为每年500 m; Eisma^[28]比较发现无黏泥沙和无植被环境下的潮沟更容易发育; Vlaswinkel等^[36]通过物理模型试验模拟潮沟系统的发育过程,通过不同时段对潮沟三维形态的统计,得到了潮沟长度与集水面积在发育中的规律: 在潮沟发育前25%的时间内,潮沟长度已经达到了稳定时的55%,而集水面积完成了75%。可见,潮沟发育是确定集水面积后,先纵向延伸、后拓宽细化。集水面积与潮沟长度的发育速率都以指数函数形式增长,先迅速增长、后逐渐放缓。

3.3 潮沟曲流演变过程

对潮沟曲流的形成存在2种理论解释: (a)从力学角度: 当沿潮沟方向的水流不规则,就会形成横向次生流。次生流对主流的扰动,会加强潮沟内某一侧的水流,在潮沟横截面内形成水力梯度,生成环流,凹岸侵蚀、凸岸淤积,最终形成曲流^[47, 86-87]。潮沟内涨、落潮最大流速路径不一致,对潮沟曲流发育和沙洲形成起重要作用^[88-89]。潮沟形成初期,曲流并不发育,潮沟都较为顺直,弯曲度很小^[19]。在发育初期,由于沟槽内潮流的双向作用逐渐发生曲流,并开始摆动迁移。潮沟内曲流形成的动力因素,普遍认为是潮流的双向作用。沟槽中潮水涨落潮最大流速路径不一致,造成其对潮沟的侵蚀部位不同,进而逐渐形成曲流^[73]。在沟槽中由于水流不均匀作用的逐渐明显,形成了凹岸侵蚀、凸岸淤积的效果,尤其在潮滩中上部侵蚀淤积同时作用下,沉积物不断在潮沟凸岸水流较缓处淤积,使凸岸边滩升高变宽,进而加大落潮水流向凹岸汇集,凹岸侵蚀强度增强,坡度变陡,不断坍塌后退,于是潮沟曲流得到进一步发育^[90]。但曲流不能无限发育,当潮沟弯曲度达到一定程度后,遇到风暴潮、暴雨等情况,潮沟内流量急剧增加,潮沟就会发生裁弯取直^[83]。(b)随机性: 当顺直潮沟某处水流存在扰动,地形对水流的扰动做出正反馈,促进曲流的形成,最终达成稳态^[28]。初始地形对潮沟的发育有较大的影响,在物理模型实验中尤为明显,初始地形的不平整,可能决定了潮沟主轴线的整体走向; 边界条件的不均匀性、潮滩泥沙的不均匀性,也是潮沟蜿蜒具有随机性的影响因素。

潮沟曲率是反映潮沟弯曲程度的物理量,潮沟的曲流发育与河流有相似之处,潮沟弯曲长度与其宽度之间存在相关关系^[68, 76, 91-93]。1982年, Bejan^[18]证明河流的平衡形态呈正弦曲线,曲流的波长与河道宽度成比例,新生的河流曲流长度与河道宽度之比为2~3,发育非常成熟后该比值为6.5~11,这一理论在潮沟系统中同样成立。 Bagnold^[94]指出河流为降低水力梯度发生蜿蜒,曲率半径可以达到宽度的2~3倍; Marani等^[46]通过现场观测发现陆向潮沟较为狭窄,且曲率大于海侧潮沟。

3.4 潮沟侧向迁移过程

潮沟的迁移和侧向摆动需要充足的泥沙供应和水流动力条件,与此同时,潮沟的周期性横向摆动对潮滩沉积过程也起到显著作用。潮沟的摆动速度与趋势受多方面因素影响,包括潮沟规模、泥沙特性、陆源水、围垦工程等。

潮沟的规模越大,潮沟越趋于稳定; 土体黏性越强,潮沟越不易于摆动。潮间的沉积分带和潮沟分级存在一致性,含泥量较多的潮上带和潮间带上部的盐沼潮滩上,潮沟成树枝状分叉,土体黏结力强,加之植物的固滩作用,潮沟的横向摆动速度较小,每年摆动数厘米或几乎稳定不动^[95]。

闸下陆源水是导致潮沟迁移的另一要素,其对潮沟的影响具有季节性特征: 汛期上游排水多,径流起支配作用,低潮时涵闸排水,增加了潮水沟退水流速,对沟床冲刷作用明显; 涨潮时,潮水沟中充满了因潮水顶托而留在上游的含沙量极低的淡水,使含有大量泥沙的潮水不能到达上游; 冬季涵闸基本不排水,上游淤积快,与一般潮沟相似^[96]。

围垦工程会改变潮滩的整体水沙环境。王艳红等^[97]、李加林等^[98]、张正龙^[99]通过遥感与现场观测相结合的方法,对江苏及辐射沙洲区域围垦后潮滩-潮沟系统响应情况进行研究。部分研究成果表明,围垦后,新海堤切断潮沟系统上段,末端潮沟被截断,潮沟的总长度减小,潮沟数量减少;同时,归槽水滩面面积明显减少,潮沟系统尺度变小;新建海堤前潮间上带潮沟及滩面逐步淤高,海堤前预留下的盐沼不断扩展和新海堤工程对潮流的阻挡等因素,都不利于潮沟向岸的侧向摆动,潮沟向海堤侧向迁移的幅度减缓^[99]。陈才俊^[96]研究发现,江苏中部海堤大规模外迁前后潮沟两侧原有的平衡被打破,激活了部分潮沟的发育,特别是当海堤建设在潮沟凸岸一侧,则会加快潮沟向围堤一侧弯曲,对工程安全危害极大。可以看出,目前围垦工程对潮沟迁移、摆动的影响十分明显,但围垦对潮滩-潮沟系统的长期作用仍需要进一步探讨。

总体而言,目前对于潮沟发育演变动力机制的研究在定性层面的成果较多,定量研究成果相对较少。对极浅水动力环境和岸壁稳定、塌落过程等的机理还不够清晰,对潮沟曲流过程的机理还缺乏明确的观点,围垦工程等对潮沟演变的影响尚无定论。因此,需要发挥遥感分析、物理模型试验和数值模拟等多种技术手段的优势,从宏观、中观和细观等不同层面深入探究潮沟演变机理。

4 结论与展望

对发育在潮间带、滩面水流冲刷型的潮沟系统,潮沟长度、宽度、深度、潮沟密度、宽深比等是反映潮沟形态的重要参数,其发育演变过程为逐渐下切、延伸、形成曲流、凹冲凸淤、蜿蜒摆动,直至部分消亡。影响潮沟系统形态和发育演变的因素包括:滩面归槽水、潮汐不对称性、潮差等水动力特性,以及泥沙特性、堤间围垦等。综合国内外研究进展,得出以下主要结论和研究展望:

a. Strahler^[17]在 Horton 分级方法基础上提出的潮沟分级模式相对更为合理。潮沟密度可以在某种程度上反映其所在潮盆的特性,潮沟总长与潮盆集水面积之间存在正相关关系;潮差与潮沟密度间存在正相关关系;在植被对潮沟密度的影响方面,目前尚无一致的结论,今后可深入研究潮汐不对称性、植被等对潮沟密度的影响。

b. 潮沟宽深比很大程度上取决于潮沟临界抗冲刷能力,其影响因素包括水动力、植被、底质特性等。现场观测表明,光滩上潮沟截面宽深比最大,碱蓬滩其次,最小的是米草滩。然而,已有的潮沟演变物理模型试验的结论与现场观测结果之间存在趋势性的矛盾,这可能由于物理模型试验没有考虑植被的作用,潮沟端部自由发育,导致其一级潮沟的宽深比相对更大。如何在物理模型试验中真实反映植被对潮沟截面形态的影响,如何客观反映泥沙和水动力特性对截面冲淤、甚至潮沟壁塌落等过程的影响,是值得研究的技术难题。

c. 潮沟的发育过程已经在现场观测和物理模型试验中得到了证实。潮沟曲流的机理还未有一致性认识;潮沟迁移和侧向摆动的影响因素已经基本明确,但围垦工程对其影响尚无一致的观点。总体上对于潮沟发育演变动力机制的研究在定性层面的成果较多,定量研究成果相对较少。

d. 潮沟内的水流结构复杂,尤其是潮沟剖面水流结构和弯段环流结构,是潮沟下切和曲流演变的主要动力,而潮沟边壁的稳定也是曲流演变的重要影响因素。因此,需要开展潮沟内中细微尺度水流结构的研究,探究潮沟壁冲刷、失稳、塌落物理过程,揭示潮沟下切和曲流的形成机制。

e. 发挥遥感分析、物理模型试验和数值模拟等多种技术手段的优势,分别从宏观、中观和细观等不同层面深入探究潮沟演变机理,是今后本领域的研究趋势。但物理模型试验存在的比尺效应、数值模拟中尚未探明的极浅水动力环境、岸壁塌落过程物理机制等问题,尚需更多现场观测数据的支持。

参考文献:

- [1] PERILLO G M E. Tidal courses: classification, origin and functionality[M]. Amsterdam: Elsevier B V, 2009.
- [2] 尹延鸿. 潮沟研究现状及进展[J]. 海洋地质动态, 1997(7): 1-4. (YIN Yanhong. Actuality and advances in tidal creeks [J]. Marine Geology Letters, 1997(7): 1-4. (in Chinese))
- [3] VANDENBRUWAENE W, MEIRE P, TEMMERMAN S. Formation and evolution of a tidal channel network within a constructed tidal marsh[J]. Geomorphology, 2012, 151/152: 114-125.
- [4] 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.
- [5] 侯明行, 刘红玉, 张华兵. 盐城淤泥质潮滩湿地潮沟发育及其对米草扩张的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 400-409. (HOU Mingxing, LIU Hongyu, ZHANG Huabing. Effect of tidal creek system on the expansion of the invasive *Spartina* in the

- coastal wetland of Yancheng[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 400-409. (in Chinese))
- [6] HUGHES Z J. Tidal channels on tidal flats and marshes [M]. New York: Principles of Tidal Sedimentology, Springer Netherlands, 2012: 269-300.
- [7] ICHOKU C, CHOROWICZ J. A numerical approach to the analysis and classification of channel network patterns[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(2): 161-174.
- [8] ZHANG Renshun. Suspended sediment transport processes on tidal mud flat in Jiangsu Province, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1992, 35(3): 225-233.
- [9] 时钟, 陈吉余. 中国淤泥质潮滩沉积研究的进展[J]. *地球科学进展*, 1996, 11(6): 555-562. (SHI Zhong, CHEN Jiyu. Sedimentation on the intertidal mudflat in China: an overview[J]. *Advances In Earth Science*, 1996, 11(6): 555-562. (in Chinese))
- [10] 龚政, 窦希萍, 张长宽, 等. 江苏沿海滩涂围垦对闸下河道淤积的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2010(1): 73-78. (GONG Zheng, DOU Xiping, ZHANG Changkuan, et al. Influence of tidal flat reclamation on channel sedimentation downstream of tidal sluice in Jiangsu coastal zone[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(1): 73-78. (in Chinese))
- [11] 秦海明, 汤臣栋, 马强, 等. 春、秋季崇明东滩盐沼潮沟大型浮游动物群落分布[J]. *水生生物学报*, 2014, 38(2): 1-7. (QIN Haiming, TANG Chendong, MA Qiang, et al. Distribution of macrozooplankton community Chongming Dongtan salt marsh creeks during summer and autumn[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(2): 1-7. (in Chinese))
- [12] 李强, 安传光, 马强, 等. 崇明东滩潮间带潮沟浮游动物的种类组成及多样性[J]. *生物多样性*, 2010, 18(1): 67-75. (LI Qiang, AN Chuanguang, MA Qiang, et al. Species composition and diversity of zooplankton in tidal creeks of the Chongming Dongtan intertidal flat[J]. *Biodiversity Science*, 2010, 18(1): 67-75. (in Chinese))
- [13] 高伟, 陆健健. 长江口潮滩湿地鸟类适栖地营造实验及短期效应[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2080-2089. (GAO Wei, LU Jianjian. A restoration trial of bird habitat on the intertidal flats in the Yangtze Estuary and its short-term effects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2080-2089. (in Chinese))
- [14] 田波, 周云轩, 张利权, 等. 遥感与 GIS 支持下的崇明东滩迁徙鸟类生境适宜性分析[J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3049-3059. (TIAN Bo, ZHOU Yunxuan, ZHANG Liquan, et al. AGIS and remote sensing-based analysis of migratory bird habitat suitability for Chongming Dongtan Nature Reserve, Shanghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3049-3059. (in Chinese))
- [15] GARDNER L R, THOMBS L, EDWARDS D, et al. Time series analyses of suspended sediment concentrations at north Inlet, south Carolina[J]. *Estuaries*, 1989, 12(4): 211-221.
- [16] 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.
- [17] STRAHLER A N. Dynamic basis of geomorphology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, 63(9): 923-938.
- [18] BEJAN A. Theoretical explanation for the incipient formation of meanders in straight rivers[J]. *Geophysical Research Letters*, 1982, 9(8): 831-834.
- [19] 张国栋, 朱静昌, 王益友, 等. 苏北弶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 creeks in Jiang harbor area in northern Jiangsu province[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984, 6(2): 223-234. (in Chinese))
- [20] 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]. *Journal of Green Science and Technology*, 1988, 43(1): 35-43. (in Chinese))
- [21] 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]. *Journal of Green Science and Technology*, 1991, 46(2): 195-206. (in Chinese))
- [22] 吴德力. 江苏中部海岸潮沟的形态特征与演变过程研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [23] STEFANON L, CARNIELLO L, D'ALPAOS A, et al. Experimental analysis of tidal network growth and development[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(8): 950-962.
- [24] PYE K, FRENCH P. Erosion and accretion processes on British Salt Marshes [M]. Cambridge: Cambridge Environmental Research Consultants, 1993.
- [25] DALRYMPLE R W, ZAITLIN B A, BOYD R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1992, 62: 1130-1146.

- [26] HIBMA A, STIVE M J F, WANG Zhengbing. Estuarine morphodynamics [J]. Coastal Engineering Coastal Morphodynamic Modeling, 2004, 51(8/9): 765-778.
- [27] LUNA B L, WOLMAN M G, JOHN P M. Fluvial processes in geomorphology [M]. New York: Dover Publication, 1995.
- [28] EISMA D. Intertidal deposits: river mouths tidal flats and coastal lagoons [M]. New York: CRC Press, 1998.
- [29] FAGHERAZZI S, MARIOTTI G. Mudflat runnels: evidence and importance of very shallow flows in intertidal morphodynamics [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(14): 132-151.
- [30] 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, ZHANG 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))
- [31] WANG Yang, ZHANG Yongzhan, ZOU Xinqing, et al. The sand ridge field of the South Yellow Sea: origin by river—sea interaction [J]. Marine Geology, 2012, 291/292/293/294: 132-146.
- [32] DISSANAYAKE D M P K, ROELVINK J A, van der WEGEN M. Modelled channel patterns in a schematized tidal inlet [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(11/12): 1069-1083.
- [33] HEALEY R G, PYE K, STODDART D R, et al. Velocity variations in salt marsh creeks, Norfolk, England [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1981, 13(5): 535-545.
- [34] GRAVELIUS H. Grundriß der gesamten Gewässerkunde, Band I: Fluß kunde (Compendium of Hydrology, Vol I Rivers, in German) [M]. Berlin: Göschen, 1914.
- [35] 许宝荣, 杨太保, 邹松兵. 基于 DEM 的干旱区河网系统模拟: 以柴达木盆地流域为例 [J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(5): 315-319. (XU Baorong, YANG Taibao, ZOU Songbing. Auto-construction study on drainage system in Qaidam Basin [J]. Remote Sensing Technology And Application, 2004, 19(5): 315-319. (in Chinese))
- [36] 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.
- [37] TOSHIKII, YASUYUKI S, ICHIRO K. Modelling of the initiation and development of tidal creek networks [J]. Proceedings of the ICE-Maritime Engineering, 2013, 166(2): 76-88.
- [38] MARANIM, BELLUCO E, D'ALPAOS A, et al. On the drainage density of tidal networks [J]. Water Resources Research, 2003, 39(2): 1-11.
- [39] NOVAKOWSKI K I, TORRES R, GARDNER L R, et al. Geomorphic analysis of tidal creek networks [J]. Water Resources Research, 2004, 40(5): 1-13.
- [40] ALLEN J. Simulation models of salt-marsh morphodynamics: some implications for high-intertidal sediment couplets related to sea-level change [J]. Sedimentary Geology, 1997, 113(3): 211-223.
- [41] 沈永明, 张忍顺, 王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征 [J]. 地理研究, 2003, 22(4): 520-527. (SHEN Yongming, ZHANG Renshun, WANG Yanhong. The tidal creek character in salt marsh of *Spartina alterniflora* Loisel on strong tide coast [J]. Geographical Research, 2003, 22(4): 520-527. (in Chinese))
- [42] 陈勇, 何中发, 黎兵, 等. 崇明东滩潮沟发育特征及其影响因素定量分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013(1): 212-219. (CHEN Yong, HE Zhongfa, LI Bing, et al. Spatial distribution of tidal creeks and quantitative analysis of its driving factors in Chongming Dongtan, Shanghai [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013(1): 212-219. (in Chinese))
- [43] 郑宗生, 周云轩, 田波, 等. 植被对潮沟发育影响的遥感研究: 以崇明东滩为例 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 117-124. (ZHENG Zongsheng, ZHOU Yunxuan, TIAN Bo, et al. Effects of vegetation on the dynamic of tidal creeks based on quantitative satellite remote sensing: a case study of Dongtan in Chongming [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(3): 117-124. (in Chinese))
- [44] 吴德力, 沈永明, 方仁建. 江苏中部海岸潮沟的形态变化特征 [J]. 地理学报, 2013, 68(7): 955-965. (WU Deli, SHEN Yongming, FANG Renjian. A morphological analysis of tidal creek network patterns on the central Jiangsu coast [J]. Journal of Green Science and Technology, 2013, 68(7): 955-965. (in Chinese))
- [45] ZEPP M L. Salt marsh tidal channel morphometry: applications for wetland creation and restoration [J]. Restoration Ecology, 1999, 7(2): 205-211.
- [46] MARANI M, LANZONI S, ZANDOLIN D, et al. Tidal meanders [J]. Water Resources Research, 2002, 38(11): 1-7.
- [47] D'ALPAOS A. Tidal network ontogeny: channel initiation and early development [J]. Journal of Geophysical Research, 2005,

- 110(F2): 351-394.
- [48] 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): 1-6.
- [49] 黄海军, 李凡. 黄河三角洲海岸带陆海相互作用概念模式[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(5): 808-816. (HUANG Haijun, LI Fan. Conception model of land ocean interaction in the coast zone of the yellow river delta[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(5): 808-816. (in Chinese))
- [50] 谢东风, 高抒. 淤泥质潮流深槽最大冲刷深度的一个概念模型[J]. *海洋学研究*, 2006, 24(3): 11-20. (XIE Dongfeng, GAO Shu. Modeling maximum scour depths of tidal channels with mud substrate in shallow marine environments[J]. *Journal of Marine Science*, 2006, 24(3): 11-20. (in Chinese))
- [51] 谢东风, 高抒, 汪亚平. 砂质底质潮汐水道均衡态模拟初探[J]. *海洋学报*, 2006, 28(6): 86-93. (XIE Dongfeng, GAO Shu, WANG Yaping. A preliminary modeling study on morphodynamic equilibrium of tidal channels floored with sandy sediments[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(6): 86-93. (in Chinese))
- [52] FRENCH J, STODDART D. Hydrodynamics of saltmarsh creek systems: implications for marsh morphological development and material exchange[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(3): 235-252.
- [53] 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))
- [54] 李鹏, 杨世伦, 秦渭华. 基于潮沟定点观测的潮间带水、沙、盐交换研究: 以长江口九段沙—潮沟为例[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(1): 126-133. (LI Peng, YANG Shilun, QIN Weihua. Interchange of water-sediment-salinity over an intertidal flat in Jiuduansha in the Changjiang River estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(1): 126-133. (in Chinese))
- [55] MASON D C, SCOTT T R, WANG H. Extraction of tidal channel networks from airborne scanning laser altimetry[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61(2): 67-83.
- [56] 刘燕春, 张鹰. 遥感中轴线法在江苏辐射沙洲潮沟演变监测中的应用[J]. *海洋科学*, 2011, 35(2): 72-76. (LIU Yanchun, ZHANG Ying. Application of remote sensing medial axis method in investigation of dynamic changes of tidal creeks in radial sandbanks offshore Jiangsu Province[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(2): 72-76. (in Chinese))
- [57] 陈翔. 基于多源遥感数据的九段沙潮沟信息提取及研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [58] YANG S L. Sedimentation on a growing intertidal island in the Yangtze River Mouth[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 49(3): 401-410.
- [59] 谢小平, 王兆印, 沈焕庭. 长江口九段沙现代潮滩沉积特征[J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 566-573. (XIE Xiaoping, WANG Zhaoyin, SHEN Huaning. Sedimentary characteristics of the modern tidal flat of Jiuduansha Shoal in Changjiang Estuary[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005(4): 566-573. (in Chinese))
- [60] 杨世伦, 杜景龙, 郜昂, 等. 近半个世纪长江口九段沙湿地的冲淤演变[J]. *地理科学*, 2006, 26(3): 335-339. (YANG Shilun, DU Jinglong, GAO Ang, et al. Evolution of Jiuduansha Wetland in the Changjiang River Estuary during the last 50 Years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(3): 335-339. (in Chinese))
- [61] 冯永玖, 刘丹, 韩震. 遥感和GIS支持下的九段沙岸线提取及变迁研究[J]. *国土资源遥感*, 2012, 24(1): 65-69. (FENG Yongjiu, LIU Dan, HAN Zhen. Shoreline extraction and change analysis of the Jiuduansha Islands with the support of remote sensing and GIS technologies[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2012, 24(1): 65-69. (in Chinese))
- [62] GAO Ang, YANG Shilun. Long-term morphological evolution of a tidal island as affected by natural factors and human activities, the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(1): 123-131.
- [63] 陈炜, 李九发, 蒋陈娟, 等. 长江河口九段沙近期冲淤演变过程研究[J]. *泥沙研究*, 2011, (1): 15-21. (CHEN Wei, LI Jiufa, JIANG Chenjuan, et al. Characteristics of recent morphological evolution of Jiuduansha Shoal in Yangtze Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2011 (1): 15-21. (in Chinese))
- [64] 李占海, 高抒, 柯贤坤, 等. 江苏大丰海岸碱蓬滩潮沟及滩面的沉积动力特征[J]. *海洋学报*, 2005, 27(6): 77-84. (LI Zhanhai, GAO Shu, KE Xiankun, et al. Sediment dynamic processes of salt marsh creek and adjacent tidal-flats on the Dafeng coast, Jiangsu Province, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005(6): 77-84. (in Chinese))
- [65] 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 Yaping, ZHANG Renshun, GAO Shu. Geomorphic and hydrodynamic responses in salt marsh-tidal creek systems[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(21): 2315-2320. (in Chinese))
- [66] TAMBRONI N, BOLLA PITTALUGA M, SEMINARA G. Laboratory observations of the morphodynamic evolution of tidal

- channels and tidal inlets[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2005, 110(F4): 1-19.
- [67] HOYAL D C J D, SHEETS B A. Morphodynamic evolution of experimental cohesive deltas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(F2): 1-18.
- [68] 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*, 2012, 91(3): 311-323.
- [69] COCO G, ZHOU Zeng, VAN MAANEN B, et al. Morphodynamics of tidal networks: advances and challenges[J]. *Marine Geology*, 2013, 346(6): 1-16.
- [70] KLEINHANS M, VAN SCHELTINGA R T, VAN DER VEGT M, et al. Turning the tide: growth and dynamics of a tidal basin and inlet in experiments[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 120(1): 1-25.
- [71] 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.
- [72] ZHOU Zeng, 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.
- [73] 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.
- [74] RAFFAELE MARCIANO Z B W A. Modeling of channel patterns in short tidal basins[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(F1): 1-13.
- [75] D'ALPAOS A, LANZONI S, MARANI M, et al. Spontaneous tidal network formation within a constructed salt marsh: observations and morphodynamic modelling[J]. *Geomorphology*, 2007, 91(3-4): 186-197.
- [76] VAN MAANEN B, COCO G, BRYAN K R. Modelling the effects of tidal range and initial bathymetry on the morphological evolution of tidal embayments[J]. *Geomorphology*, 2013, 191(6): 23-34.
- [77] 吴晓东. 潮水沟体系水动力条件数值模拟的实例研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [78] JIMÉNEZ M, CASTANEDO S, ZHOU Zeng, et al. On the sensitivity of tidal network characterization to power law estimation[J]. *Advances in Geosciences*, 2014, 39(39): 69-73.
- [79] JIMÉNEZ M, CASTANEDO S, ZHOU Zeng, et al. Scaling properties of tidal networks[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 4585-4602.
- [80] WANG Zhengbing, JEUKEN C, de VRIEND H J. Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries [R]. Delft: Delft Hydraulics, 1999.
- [81] 高抒. 潮汐河道形态动力过程研究综述[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(12): 1237-1248. (GAO Shu. Morphodynamic processes of tidal inlets: a review[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2008, 23(12): 1237-1248. (in Chinese))
- [82] 张忍顺. 淤泥质潮滩均衡态: 以江苏辐射沙洲内缘区为例[J]. *科学通报*, 1995, 40(4): 347-350. (ZHANG Renshun. The equilibrium state of tidal mud flat: inner part of Jiangsu Radiate Sand Ridges as a case study[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(4): 347-350. (in Chinese))
- [83] HIBMA A, STIVE M J F, WANG Zhengbin. Estuarine morphodynamics[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51(8-9): 765-778.
- [84] SYMONDS A M, COLLINS M B. The establishment and degeneration of a temporary creek system in response to managed coastal realignment: The Wash, UK[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(12): 1783-1796.
- [85] KNIGHTON A D, WOODROFFE C D, MILLS K. The evolution of tidal creek networks, Mary river, northern Australia[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(2): 167-190.
- [86] LUNA B LEOPOLD W B LANGBEIN. River Meanders[M]. New York: American Geographical Society, 1967: 60-70.
- [87] SEMINARA G. Meanders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006(554): 271-297.
- [88] LI C, CHEN C, GUADAGNOLI D, et al. Geometry induced residual eddies in estuaries with curved channels-observations and modeling studies[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C1): 1-14.
- [89] ECF B. Coasts[M]. Oxford: Blackwell, 1984.
- [90] 徐元, 王宝灿. 淤泥质潮滩表层沉积物稳定性时空变化的探讨[J]. *海洋学报*, 1996, 18(6): 50-60. (XU Yuan, WANG Baocan. A discussion of spatial and temporal variation of muddy tidal flat surface sediment stability[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, 18(6): 50-60. (in Chinese))
- [91] CHANG S W, CHING K F C. Channel aspect ratio effect on thermal performance of airwater slug flow through U-bend channels[J]. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014(76): 11-29.
- [92] LIU Xiaoxie, BAI Yunchuan. Turbulent structure and bursting process in multi-bend meander channel[J]. *Journal of*

- Hydrodynamics, 2014, 2(26): 207-215.
- [93] 黄海军, 樊辉. 黄河三角洲潮滩潮沟近期变化遥感监测[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 723-730. (HUANG Haijun, FAN Hui. Change detection of tidal flats and tidal creeks in the Yellow River delta using landsat TM/ETM+Images[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(5): 723-730. (in Chinese))
- [94] BAGNOLD R A. Some aspects of the shape of river meanders[J]. US Geological Survey Professional Paper, 1960, E(282): 135-144.
- [95] GABET E. Lateral migration and bank erosion in a salt marsh tidal channel in San Francisco Bay, California[J]. Estuaries, 1998, 21(4B): 745-753.
- [96] 陈才俊. 江苏中部海堤大规模外迁后的潮水沟发育[J]. 海洋通报, 2001, 20(6): 71-79. (CHEN Caijun. Change in tide creek after mudflat being enclosed in the middle coast in Jiangsu Province[J]. Marine Science Bulletin, 2001(6): 71-79. (in Chinese))
- [97] 王艳红, 温永宁, 王建, 等. 海岸滩涂围垦的适宜速度研究: 以江苏淤泥质海岸为例[J]. 海洋通报, 2006, 25(2): 15-20. (WANG Yanhong, WEN Yongning, WANG Jian, et al. Feasible rate of tidal flat reclamation: Jiangsu mud coast as a case study [J]. Marine Science Bulletin, 2006, 25(2): 15-20. (in Chinese))
- [98] 李加林, 王艳红, 张忍顺, 等. 潮滩演变规律在围堤选线中的应用: 以江苏辐射沙洲内缘区为例[J]. 海洋工程, 2006, 24(2): 100-106. (LI Jialin, WANG Yanhong, ZHANG Renshun. Application of tidal flat evolution characters to seawall line choosing of inling project: Inner part of Jiangsu Radiate Sand Ridges as a case study[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(2): 100-106. (in Chinese))
- [99] 张正龙. 辐射沙洲内缘区潮沟发育对人类活动的响应[D]. 南京: 南京师范大学, 2004.

· 简讯 ·

河海大学 2015 年科技工作成果丰硕

河海大学紧密围绕以提高科技整体创新能力和取得高水平科技成果为目标, 完善科研管理机制, 加强科研经费管理, 深化科技评价改革, 推进重大项目组织策划, 各项科技工作稳步推进, 在部分重点工作中有新突破。

国家基金工作取得新突破。2015 年河海大学共获国家自然科学基金资助项目 132 项, 经费资助总额 5855.3 万元, 其中获批国家自然科学基金重大国际合作研究计划项目 1 项(首次)、重点项目 2 项, 青年项目资助率继续创下新高, 资助率从去年的 34.78% 上升至 35.42%。2015 年河海大学共获国家社会科学基金获得资助项目 14 项, 其中重点项目 1 项, 年度项目 11 项, 教育学专项 2 项; 年度项目资助率达 16.66%, 高于全国资助率平均水平(13.5%)。

高水平论文取得长足进步。发表 SCI 论文 819 篇, 同比增长 10.2%; SSCI 论文 21 篇。CSSCI 论文 286 篇, 同比增长 8.3%。

高水平科技奖励成果丰富。2015 年度获省部级以上奖励 78 项, 其中获国家科技进步奖一等奖 1 项, 二等奖 1 项; 高等学校科学研究优秀成果奖(科学技术)6 项; 大禹水利科学技术奖 4 项, 其中一等奖 1 项; 第十七届中国专利优秀奖 3 项; 第七届高等学校科学研究优秀成果奖(人文社会科学)三等奖 1 项。

发明专利授权量继续进入全国高校 30 强。发明专利申请量 1167 件, 同比增长 9%; 发明专利授权量 508 件, 同比增长 57%; PCT 国际申请 15 件, 同比增长 2 倍。第十七届中国专利优秀奖 3 项, 省内排名第一。

2 个教育部重点实验室参加教育部评估工作: 1 个初评优秀、1 个初评良好; 获批江苏省中国特色社会主义理论体系研究基地等 4 个省部级人文社科基地。技术转移中心获批成为“国家技术转移示范机构”, 连续 2 年入选江苏省科技服务业“百强”机构。

入选 2014 年度“创新人才推进计划中青年科技创新领军人才”1 名; 获批教育部“创新团队发展计划”滚动支持创新团队 1 项、江苏高等学校优秀科技创新团队 1 项、江苏高校哲学社会科学优秀创新团队 1 项。

承办了中国水利学会 2015 学术年会, 河海大学哲学社会科学联合会成立召开了第 1 次代表大会, 组织了百年校庆系列学术报告 200 余场。

(本刊编辑部供稿)