

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.03.009

江苏海岸潮滩剖面形态与动力泥沙响应关系

张长宽,黄婷婷,陶建峰,倪立

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京 210098)

摘要:基于2007年江苏海岸潮滩剖面高程测量资料和潮流、波浪、泥沙模拟结果,对比分析不同岸段剖面形态特征及其与潮流动力、波浪动力及泥沙供给的响应关系。研究发现:江苏海岸潮流主导的潮滩剖面往往呈现上凸形,随着泥沙供应量的增加,潮滩剖面进一步发展为斜坡形与上凸形组合和双凸形;稳定泥沙供给条件下,潮差越大、剖面坡度越陡;若泥沙供应量越大,潮滩则越平缓。江苏海岸波浪主导且缺乏泥沙供给的潮滩剖面呈下凹形或斜坡形,滩面坡度随波高的增大而增大。

关键词:潮滩剖面形态;水动力;泥沙供给;江苏海岸

中图分类号:TV148+.5

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2020)03-0245-07

Response relationship of tidal flat profile and dynamic sediment along Jiangsu Coast

ZHANG Changkuan, HUANG Tingting, TAO Jianfeng, NI Li

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the elevation data of tidal flat profiles from field survey conducted in 2007 along the Jiangsu Coast, together with the numerical simulation results, the morphological characteristics of tidal flat profiles in different sections and their response to tides, waves and sediment supplies were compared and analyzed. Results show that the profile of tidal flats dominated by tidal current tends to be convex. With the increase in sediment supply, the profile can further develop into a sloping convex combination or double convex one. An increasing sediment supply attributes to a gentler and wider tidal flat profile. Besides, the tide-dominated tidal flat profile with a constant sediment supply tends to be steeper with a larger tidal range. Finally, the profile of wave-dominated tidal flats lacking sediment supply tends to be concave or linearly sloping, and a larger wave height results in a steeper tidal flat profile.

Key words: tidal flat profile; hydrodynamics; sediment supply; Jiangsu Coast

作为海陆相互作用的前沿地带,潮滩为港口航道建设、滩涂围垦工程等海岸开发工程提供了丰富的资源。潮滩的地貌形态及其演变规律的认知是潮滩资源开发利用与保护的科学依据^[1],其剖面形态特征的研究是探索潮滩地貌演变规律的重要而便捷的途径^[2]。近年来,国内外学者对潮滩剖面形态特征进行了较多研究,主要分两个方面:一方面,潮流是潮滩发育的主要因素,是淤积型潮滩的支配动力。Roberts等^[3]通过潮流泥沙数值模型,发现仅有向岸潮流作用下的潮滩平衡剖面呈上凸形,潮差增大、滩面坡度变陡,悬沙浓度越大、潮滩越宽、剖面坡度越平缓。另一方面,波浪对淤泥质潮滩的剖面形态影响主要表现在侵蚀冲刷效果和地形塑造上,是导致岸滩侵蚀的主控动力。Friedrichs等^[4]、Roberts等^[3]、Yan等^[5]通过数学模型发现仅受波浪作用时潮滩剖面呈现下凹形,波高增大会导致潮滩剖面坡度变陡。

粉砂淤泥质海岸是江苏海岸潮滩的主要类型,近几十年来,众多学者针对这一开敞式潮滩开展了大量研

基金项目:国家自然科学基金(51620105005);国家重点研发计划(2018YFC0407501);江苏省交通运输科技项目(2017ZX01)

作者简介:张长宽(1954—),男,教授,主要从事河口海岸动力学、海岸工程等研究。E-mail: ckzhang@hhu.edu.cn

引用本文:张长宽,黄婷婷,陶建峰,等.江苏海岸潮滩剖面形态与动力泥沙响应关系[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):245-251.

ZHANG Changkuan, HUANG Tingting, TAO Jianfeng, et al. Response relationship of tidal flat profile and dynamic sediment along Jiangsu Coast[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(3): 245-251.

究,取得了一些认知。高抒等^[6]基于江苏淤泥质海岸剖面的若干特征探讨了江苏沿海堆积岸剖面与侵蚀岸剖面的发育条件。陈才俊^[7]对江苏淤长型潮滩断面进行了连续观测,提出了影响潮滩剖面发育的主要因素有泥沙供应、风浪、潮流以及围垦等。虞志英等^[8]研究发现,缺少泥沙供应的江苏北部淤泥质海岸在近岸破波的冲刷下不断侵蚀。哈长伟等^[9]基于现场调查和资料收集,探讨了吕四海岸地貌、水动力、泥沙运动以及沉积与动力之间的响应。刘秀娟等^[10]以江苏中部海岸为研究对象建立了大小潮周期性作用下的潮滩剖面演变模型,模拟了潮滩均衡态剖面形态与初始坡度、潮差、沉积物供应量之间的关系。陈君等^[11]通过江苏沿海潮滩剖面高程实测资料分析了江苏沿海潮滩剖面的形态特征、冲淤类型及冲淤趋势;龚政等^[12-13]对江苏盐城川东港南侧潮滩剖面演变过程开展了持续观测,发现该潮滩剖面双凸形特性明显,并以江苏中部淤长型泥质潮滩为例,建立了基于过程的潮滩动力地貌演变数学模型,研究了在沿岸潮流作用、供沙充分情况下双凸形潮滩横剖面形成机制。

如前所述,前人对江苏海岸淤泥质潮滩的研究多集中于潮滩的形态特征、影响潮滩发育的因素以及某一岸段剖面形态的形成机制。本文基于现场观测资料分析和数值计算结果,旨在建立江苏海岸各不同岸段潮滩剖面形态特征与动力因子及泥沙之间的响应关系,成果对江苏沿海海岸防护和湿地生态保护等提供技术支撑。

1 研究区域概况

江苏海岸线北起绣针河口、南抵长江北口,根据江苏近海海洋综合调查与评价总报告,岸线总长达 888.945 km^[14](图 1)。潮滩以粉砂淤泥质潮滩为主^[15],其中 50% 以上的泥沙来源于海底,特别是中南部辐射沙脊群区,35% 的潮滩总堆积量来自废黄河三角洲和吕四附近的海蚀物质^[16]。江苏沿海为正规半日潮,高潮差地区主要集中在连云港外的海州湾地区和以弶港为中心的辐射沙脊群地区^[17],其中辐射沙脊群海域潮差最大,涨潮、落潮流之间存在明显的不对称性^[18]。沿海有两个大浪区,中心位置分别位于废黄河口及吕四岸外^[19],外海波浪进入中部沙脊群浅水区后,多次破碎,从而在辐射沙脊群中心区波高较小^[18]。在大潮差弱波浪以及丰富的泥沙来源等多因子共同作用下,江苏海岸形成了宽阔平坦的潮滩,但剖面形态差异明显。

2 结果与讨论

2.1 研究资料

2007 年 7—8 月,“江苏近海海洋综合调查与评价”专项在江苏沿海共布设 60 条剖面进行滩面高程测量^[14],测量范围自岸线至理论低潮面附近。本文研究选取灌河口—连兴港闸岸段共 40 个潮滩剖面为研究对象(图 1)。

江苏沿海潮位测站较少,本次研究的潮位资料采用已建立的江苏近海潮汐潮流数值模型,模拟得到 40 个潮滩剖面 2007-07-01—2007-08-30 每隔 10 min 一次的模拟结果。该模型已经采用江苏沿岸 6 个潮位站的主要分潮调和常数进行了验证,具体见文献[20]。江苏沿海波高资料基于 FVCOM-SWAVE 波流耦合模型,该模型模拟西北太平洋 35 a 的波浪进行平均得到 40 个潮滩剖面处的平均波高^[21]。平均潮差和平均波

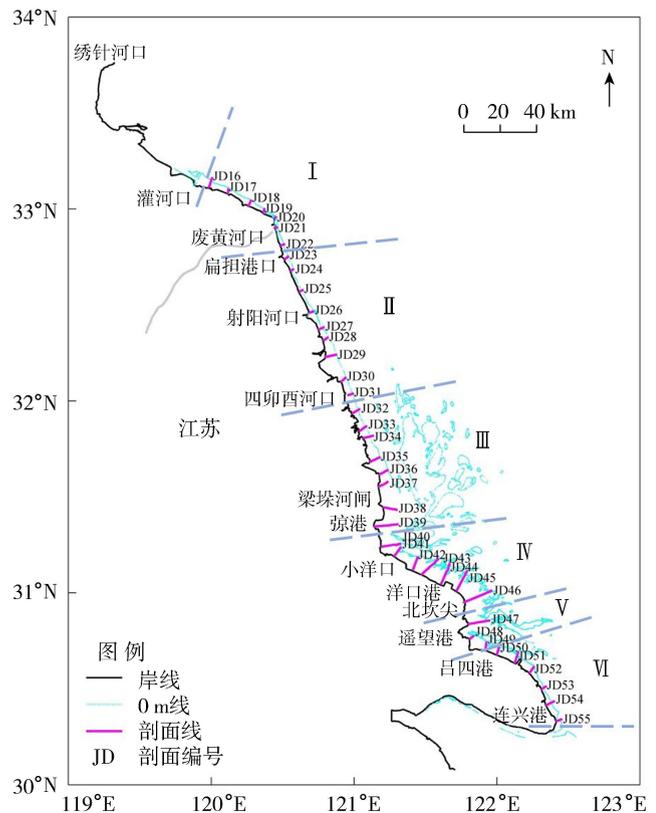


图 1 江苏海岸潮滩剖面位置布置及岸线分段示意图

Fig. 1 Profile location of tidal flat and shoreline segmentation along Jiangsu Coast

高分布见图2。

潮滩剖面形态可分为上凸形和下凹形两种基本形态,上凸、下凹点位如图3所示^[2]。本文的潮滩剖面坡度比定义为平均高潮位和平均低潮位之间潮滩区域的高程变化量与相对应潮滩宽度的比值。

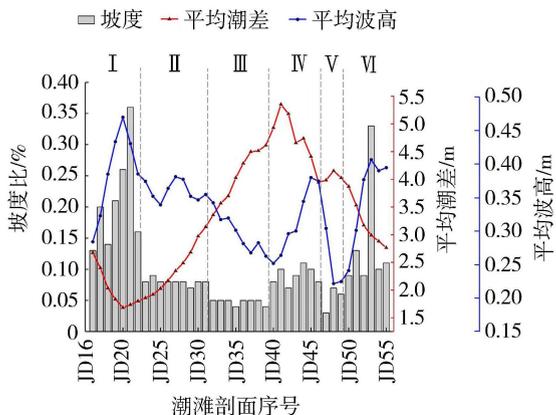


图2 江苏海岸潮滩剖面坡度、平均潮差及平均波高示意

Fig.2 Sketch of slope, mean tidal range and mean wave height of tidal flat profiles along Jiangsu Coast

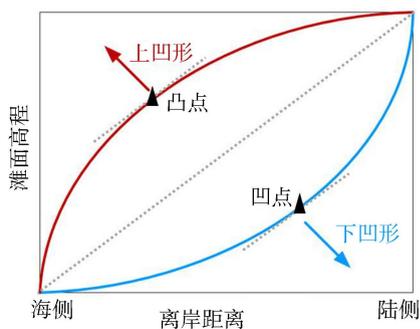


图3 潮滩剖面基本形态示意图

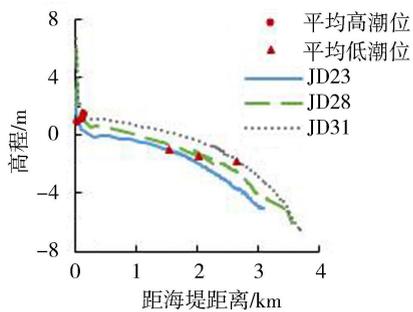
Fig.3 Sketch of basic morphologic characteristics of tidal flat profile

2.2 潮滩剖面形态与动力、泥沙供给的响应

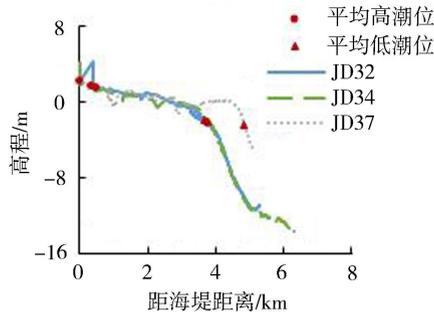
2.2.1 潮滩上凸形态与潮流动力、泥沙供给的关系

JD23 ~ JD49 潮滩剖面分布于扁担港口—东灶港岸段,本岸段为淤积型潮滩^[11],控制潮滩向淤涨型发展的主导因素是潮流动力以及丰富的泥沙供给,悬浮泥沙在涨潮、落潮不对称潮流作用下不断在岸滩落淤。因此,以该岸段为例分析潮滩剖面形态与潮流动力及泥沙供应量的响应关系。

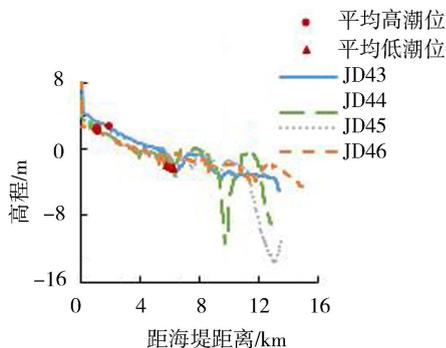
图4绘制了各岸段代表剖面并标注出了平均高、低潮位。由图4(a)可见,扁担港口—四卯酉河口岸段的JD23 ~ JD31 潮滩剖面整体呈典型的上凸形,凸点以上坡度平缓,凸点以下坡度逐渐变陡。由图4(b)可见,四卯酉河口—梁垛河闸岸段的JD32 ~ JD37 潮滩剖面亦呈上凸形。小洋口—遥望港岸段的JD43 ~ JD46



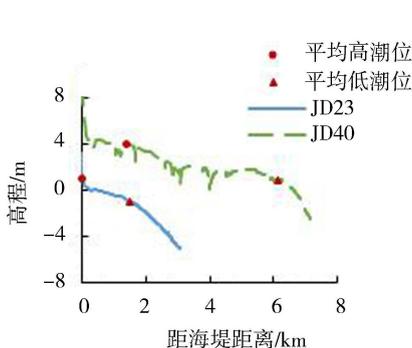
(a) 扁担港口—四卯酉河口



(b) 四卯酉河口—梁垛河闸



(c) 小洋口—遥望港



(d) 双凸形代表断面JD40

图4 江苏海岸淤积段潮滩剖面形态

Fig.4 Tidal flat profiles in deposition sections along Jiangsu Coast

潮滩剖面在距离海堤约6 km以内为高平滩带,呈斜坡形,在距离海堤约 6 km 以外呈上凸形,潮滩坡度变缓,9 km 以外的剖面高程变化幅度较大。与其他断面形态不同的是,JD40 潮滩剖面为具有两个凸点的双凸形,且潮滩宽度远大于扁担港口南侧的 JD23 剖面。

JD23 ~ JD37 位于扁担港口—梁垛河闸岸段(图 1),岸线平直,走向西北,潮差自北向南逐渐增大,在 1.8 ~ 4.5 m 之间,属于潮流主导的中强潮开敞海岸。图 5 给出了该岸段涨潮、落潮比较,由图 5 可见,此岸段涨潮流速大于落潮流速,那么最大涨潮流到最大落潮流出现的时间间隔比从最大落潮流到下次最大涨潮流出现的时间间隔就要长些,使得细粒泥沙在高潮前后沉降的时间延长,最终在潮滩上部富集,形成具有坡度变化的潮滩剖面形态,沉积速率最高的地方就是潮滩凸点所在之处。

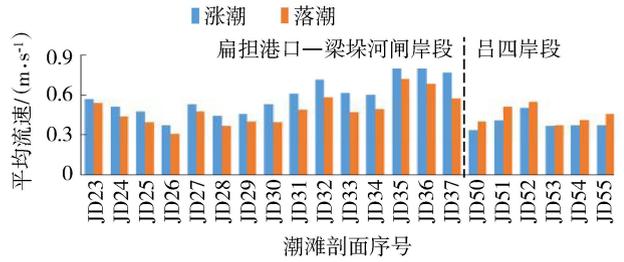


图 5 江苏海岸涨潮、落潮流速大小对比
Fig. 5 Comparison of rising current velocity and ebb current velocity along Jiangsu Coast

JD43 ~ JD46 位于小洋口—遥望港岸段(图 1),本岸段以北坎尖为拐点,岸线近似直角转弯^[11]。此岸段不仅受南黄海旋转潮波的影响,东海前进潮波的作用也十分明显,整体潮差在 m 左右。在平均高潮位至平均低潮位之间的潮滩呈斜坡形,而平均低潮位以外的 3 km 潮滩呈上凸形。9 km 以外由于近岸潮汐水道的存在使得剖面呈现高程急剧变化的形态。

JD40 位于梁垛河闸—小洋口岸段,此岸段另四个剖面 JD38、JD39、JD41、JD42 由于近岸围垦等人类工程引起了较大的潮滩动力泥沙分布差异已不是原始的滩面形态。JD40 位于江苏岸外最大沙洲——条子泥沙洲南部岸滩与腰沙北部岸滩交汇处(图 1),南黄海和东海两大潮波系统在弶港岸段辐合,潮流作用极强^[22],潮差均在 4 m 以上,属强潮半开敞海岸。根据杨耀中^[18]模拟的含沙量场和 Zhang 等^[23]模拟的悬沙通量结果(图 6),JD40 所在的弶港区域是平均含沙量峰值所在处,且悬浮泥沙在涨潮流的辐聚作用下各从西北、东北、东南方向向岸运动,使得弶港岸段泥沙供给远大于沿海其他岸段,潮流的促淤作用使得平均高、低潮位附近各形成一个凸点,最终呈现双凸形的潮滩剖面形态。

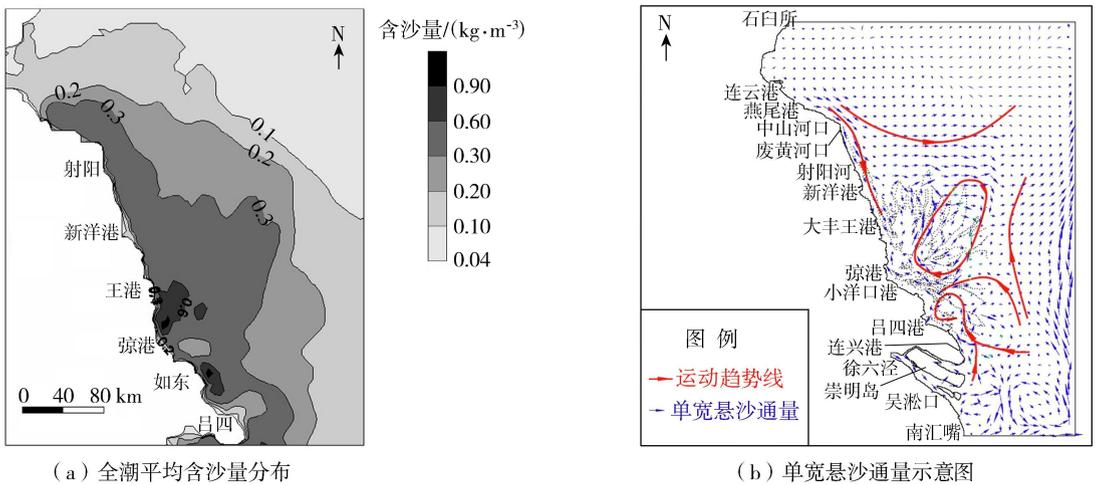


图 6 江苏海岸夏季大潮全潮平均含沙量分布及单宽悬沙通量示意图^[23]

Fig. 6 Distribution of mean sediment concentration and unit width suspended sediment flux in summer spring along Jiangsu Coast

通过以上分析可以发现,在泥沙供应充足的前提下,潮流动力主导的淤涨型潮滩剖面往往呈上凸形,随着泥沙供应量的增加,剖面将进一步向斜坡形及上凸形组合或双凸形发展。

2.2.2 潮滩坡度与潮差、泥沙供应量的关系

江苏海岸潮滩剖面 JD16 ~ JD55 潮滩坡度、潮差及各断面的坡度与平均潮差见图 2,对潮流主导的淤积岸段 JD23 ~ JD49 进行分析。由于岸段潮滩剖面坡度相近,因此将 JD23 ~ JD44 按平均潮差与坡度的差异分为 3 个岸段进行对比分析。对比 II 岸段与 IV 岸段可以发现,IV 岸段潮差更大,潮滩剖面坡度也更陡。III 岸段

处于南黄海辐射沙脊群中心处,泥沙来源丰富,虽然潮差大于Ⅱ岸段,但滩面坡度却更平缓。

Ⅲ岸段与Ⅳ岸段位于江苏中部,皆处在岸外存在辐射沙脊群的岸段,泥沙供应充足。受两个潮波系统辐合的影响,Ⅳ岸段是江苏沿海潮流作用最强的岸段,特大潮差使细颗粒泥沙在大潮涨潮高潮位时向岸方向运移很长距离,又在憩流时刻落淤,致使潮滩上部淤高。同时,强潮流作用侵蚀潮间下带,最终潮滩上部淤高下部侵蚀必然使得潮滩剖面坡度变陡。位于废黄河口南侧的Ⅱ岸段,主要受南黄海旋转潮波影响,潮流作用较弱,潮差较小。自1855年黄河入海口北归以后,原本的黄河口三角洲失去了泥沙来源,沿岸海洋动力对岸滩物质冲刷作用增强造成潮滩侵蚀,冲刷下来的物质在沿岸流的作用下大量南移,为此岸段提供了泥沙来源^[19],但悬沙通量除部分向南输送外,大量泥沙在射阳河口外向海输运。由图6可见,Ⅲ岸段泥沙供给充足,全潮平均含沙量远大于Ⅱ岸段,且悬沙皆向岸段内部运移并停留在此岸段,因此,Ⅲ岸段在泥沙供应量充足条件下,虽然潮差更大,但坡度却更平缓,滩面也更宽阔。Ⅳ岸段的JD45与JD46位于岸线的拐角处北坎尖段,迎着东北向强风,风浪作用较强,虽然潮差小于Ⅳ岸段的JD40~JD44,但坡度较之略陡。Ⅴ岸段的JD47南连腰沙,泥沙供应充足,坡度相对较缓。Ⅴ岸段的JD48与JD49处于堆积岸段与侵蚀岸段的过渡位置,潮差小于Ⅳ岸段,相应坡度也比Ⅳ岸段平缓。

因此,在有稳定泥沙供给时,潮流起主导作用的淤泥质潮滩,潮差越大,滩面坡度越陡;而泥沙供应量的增大会致使潮滩更平缓、宽阔。

2.2.3 潮滩剖面形态与波浪动力的关系

位于江苏北部废黄河口的Ⅰ岸段及南部吕四的Ⅵ岸段,属于侵蚀型潮滩^[11],波浪动力是侵蚀型潮滩的主导动力,高频的波浪运动通过掀沙作用造成岸滩长期侵蚀。因此,以Ⅰ岸段、Ⅵ岸段为研究对象,考虑波浪对潮滩剖面的塑造作用,探究潮滩剖面形态与波浪动力的响应关系。图7绘制了两处岸段的代表剖面并标注出了平均高、低潮位。位于废黄河口岸段的JD16~JD19呈略下凹的斜坡形,JD21~JD22呈下凹形,凹点以上较窄较陡,凹点以下滩坡较缓较宽;JD20潮滩剖面呈坡度较陡的斜坡形。位于吕四岸段的JD50~JD52平均波高为0.2~0.3 m,2 km以外的潮滩剖面受工程影响较大,因此以2 km以内作为研究对象,潮滩剖面呈斜坡形;JD53~JD55波浪作用略强于前者,为0.3~0.4 m,潮滩剖面呈下凹形。

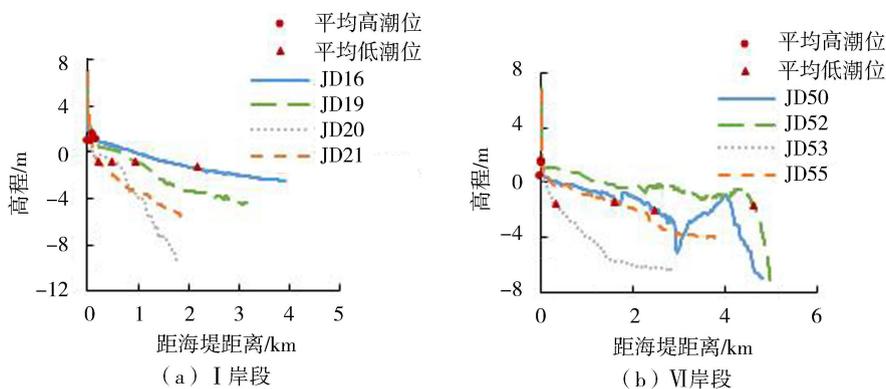


图7 江苏海岸侵蚀段潮滩剖面形态

Fig. 7 Tidal flat profiles in erosion sections along Jiangsu Coast

Ⅰ岸段海岸线向海突出呈弓形,掩护条件较差,波浪作用强,是波浪主导的侵蚀型海岸。自黄河改道后缺少泥沙供给,持续的波浪冲刷使此岸段潮滩上部不断变窄变陡,水下岸坡不断变缓,最终潮滩剖面呈典型的下凹形。JD20剖面位于向海凸出的弓形顶点处,受E、S、N 3个方向风浪作用,处于波浪能量辐聚中心,辐聚区内波浪增大,波能流引起泥沙剧烈运动,对海岸的侵蚀强度极大,最终形成坡度陡、宽度窄的斜坡形剖面。Ⅵ岸段海域较开敞,总体掩蔽条件不佳,是江苏沿岸的大浪区之一^[24]。长江口南移使得吕四海岸失去了大量的泥沙来源^[19],而且该岸段呈现出落潮流占优的流态(图5),致使该岸段滩面冲刷蚀低,加上波浪作用,进一步加剧了滩脚侵蚀,使得滩脚后退、潮滩变窄,滩面呈现典型的下凹形。近年来,沿岸工程建设和围垦工程的影响使得JD50~JD52出现局部淤高的现象,波浪作用相对较弱。JD53~JD55潮间下带及潮下带受波浪侵蚀严重,呈下凹状态,由于长江口尚有少量的泥沙在一定条件下向该区运移,且潮滩下部被波浪侵蚀下来的泥沙在涨潮流时也向上搬运,使得该段潮滩潮上带和潮间上带略有淤高。可见,在缺少泥沙供给的

条件下,波浪主导的侵蚀型岸段通过高频的波浪运动掀动促使潮滩向凹形侵蚀剖面发展演变。

图2同时给出了两处岸段各断面的坡度与平均波高,由图2可见,无论是废黄河口岸段还是吕四岸段,潮滩坡度与平均波高两者的变化趋势是一致的,即平均波高越大,滩面坡度越陡。废黄河口岸段海岸潮流作用较弱,对滩地沉积物的冲蚀作用甚微,侵蚀的主要动力是近岸破碎波浪。被冲刷的泥沙以悬移的方式随沿岸潮流运移扩散输出此岸段,范围甚广,很少原地沉降。在波浪持续的冲刷下,潮滩宽度变窄,坡度变陡。波高越大,波浪作用越强,对底床的侵蚀强度越大,滩面越陡。而吕四岸段岸滩冲刷主要是在长江口南移后缺乏泥沙来源的情况下,浅滩在波浪作用下掀起的泥沙被较强的落潮流带向外海,整个岸段总体依旧是波高越大坡度越陡的剖面形态。JD52剖面的发育可能与其西北侧沿岸工程有关。总的来说,江苏海岸波浪主导的侵蚀型淤泥质潮滩,波高越大,波能流对潮滩潮间下带及潮下带的侵蚀越剧烈,潮滩剖面坡度越陡。

3 结 语

潮流和波浪作为江苏沿海主要的水动力,其与泥沙输运共同塑造了特有的潮滩地貌特征,江苏海岸潮滩剖面形态与动力及泥沙的响应关系如下。

潮流主导的岸段:扁担港口—梁垛河闸岸段潮滩在潮流主导下剖面形态呈现上凸形,小洋口—遥望港岸段及琼港南侧的新洋港由于泥沙供应量充足,潮滩剖面形态向斜坡与上凸形组合、双凸形发展;对比四卯西港口—方塘河闸岸段与方塘河闸—洋口港岸段发现,在有稳定泥沙供给时,潮差越大,剖面坡度越陡;对比四卯西港口—方塘河闸岸段与扁担港口—四卯西港口岸段可得到,泥沙供应量越大,潮滩越平缓。波浪主导的岸段:缺乏泥沙供给的废黄河口岸段与吕四岸段在波浪主导下呈下凹形或斜坡形;不论是废黄河口岸段还是吕四岸段,滩面坡度都随波高的增大而增大。

当然,岸滩形态不仅与潮流动力、波浪动力及泥沙供应有关,还与季风、台风、海平面上升、河道迁移、潮滩围垦、河流三角洲开发工程等有关,因此对于江苏海岸潮滩剖面形态与其影响因素的响应分析还有待更深入研究。

参考文献:

- [1] 张长宽,陈欣迪. 海岸带滩涂资源的开发利用与保护研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):25-33. (ZHANG Changkuan, CHEN Xindi. Research progress on exploitation, utilization and protection of tidal flat resources in the coastal zone[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(1):25-33. (in Chinese))
- [2] 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 the study of tidal flat profile morphology and sediment sorting[J]. Advances in Water Science,2018,29(2):269-282. (in Chinese))
- [3] 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):1079-1097.
- [4] FRIEDRICHS C T, AUBREY D G. Uniform bottom shear stress and equilibrium hypsometry of intertidal flats[M]. Washington, D C: American Geophysical Union, 2013: 405-429.
- [5] YAN Li, WU Menwu, CHEN Ying, et al. Flume experimental study on evolution of a mouth bar under interaction of floods and waves[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12 (2): 162-168.
- [6] 高抒,朱大奎. 江苏淤泥质海岸剖面的初步研究[J]. 南京大学学报(自然科学版),1988,34(1):75-84. (GAO Shu, ZHU Dakui. Preliminary study of mud tidal flat profile along the Jiangsu Coast[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1988,34(1):75-84. (in Chinese))
- [7] 陈才俊. 江苏淤长型淤泥质潮滩的剖面发育[J]. 海洋与湖沼,1991,22(4):360-368. (CHEN Caijun. Development of silty tidal flat profile in Jiangsu[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,1991,22(4):360-368. (in Chinese))
- [8] 虞志英,张勇. 江苏北部开敞淤泥质海岸的侵蚀过程及防护[J]. 地理学报,1994,49(2):149-157. (YU Zhiying, ZHANG Yong. Protection and erosion process of open silty coast in northern Jiangsu[J]. Acta Geographica Sinica,1994,49(2):149-157. (in Chinese))
- [9] 哈长伟,陈沈良,张文祥,等. 江苏吕四海岸沉积动力特征及侵蚀过程[J]. 海洋通报,2009,28(3):53-61. (HA Changwei, CHEN Shenliang, ZHANG Wenxiang, et al. Dynamic sedimentary characteristics and erosion process of the Lvsu Coast, Jiangsu [J]. Marine Bulletin,2009,28(3):53-61. (in Chinese))

- [10] 刘秀娟,高抒,汪亚平. 淤长型潮滩剖面形态演变模拟:以江苏中部海岸为例[J]. 地球科学, 2010,35(4):542-550. (LIU Xiujuan, GAO Shu, WANG Yaping. Modeling of morphological evolution of silt-long tidal flat profiles: a case study of the central coast of Jiangsu[J]. Journal of Earth Science,2010,35(4):542-550. (in Chinese))
- [11] 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. Study on the characteristics of tidal flat profiles along the Jiangsu Coast[J]. Marine Engineering, 2010,28(4):90-96. (in Chinese))
- [12] 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. Field observation of the evolution of muddy tidal flat profiles in Jiangsu[J]. Advances in Water Science,2014,25(6):880-887. (in Chinese))
- [13] 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 Zheng, ZHANG Changkuan, TAO Jianfeng, et al. Formation mechanism of double convex profile of silt muddy tidal flat[J]. Advances in Water Science,2013,24(2):212-219. (in Chinese))
- [14] 江苏省908专项办公室. 江苏近海海洋综合调查与评价总报告[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [15] 龚政,吕亨豫,耿亮,等. 开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制: I. 物理模型设计及潮沟形态[J]. 水科学进展,2017,28(1):86-95. (GONG Zheng, LYU Tingyu, GENG Liang, et al. Dynamic mechanism of development and evolution of open tidal flat and gully system. I. Physical model design and gully morphology [J]. Advances in Water Science,2017,28(1):86-95. (in Chinese))
- [16] 朱大奎,柯贤坤,高抒. 江苏海岸潮滩沉积的研究[J]. 海洋科学进展,1986,4(3):23-31. (ZHU Dakui, KE Xiankun, GAO Shu. Study on tidal flat sedimentary of Jiangsu Coast[J]. Advances in Marine Science,1986,4(3):23-31. (in Chinese))
- [17] 杨阳,陈永平. 江苏沿海潮差能和潮流能区域分布研究[J]. 可再生能源,2013,31(1):76-80. (YANG Yang, CHEN Yongping. Regional distribution of tidal range energy and tidal current energy along the Jiangsu Coast[J]. Renewable Energy Resources,2013,31(1):76-80. (in Chinese))
- [18] 杨耀中. 南黄海辐射沙脊群悬沙通量数值研究[D]. 南京:河海大学,2010.
- [19] 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 Meiyi, ZHANG Renshun, YANG Juhai. Sedimentation on tidal mud flat in Wanggang area, Jiangsu Province, China[J]. Marine Science Bulletin,1984,3(1):40-54. (in Chinese))
- [20] 陶建峰,张长宽,姚静. 江苏沿海大规模围垦对近海潮汐潮流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(2):225-230. (TAO Jianfeng, ZHANG Changkuan, YAO Jing. The impact of large-scale reclamation on tidal currents along the Jiangsu Coast[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2011,39(2):225-230. (in Chinese))
- [21] LI Jiangxia, PAN Shunqi, CHEN Yongping, et al. Numerical estimation of extreme waves and surges over the northwest Pacific Ocean[J]. Ocean Engineering,2018,153:225-241.
- [22] 郇凯,章卫胜,王金华. 江苏沿海潮流数值模拟与潮流能估算[J]. 水利水运工程学报,2017(1):111-117. (YUN Kai, ZHANG Weisheng, WANG Jinhua. Numerical simulation of tidal current and estimation of tidal energy along the Jiangsu Coast [J]. Hydro-Science and Engineering,2017(1):111-117. (in Chinese))
- [23] ZHANG Changkuan, YANG Yaozhong, TAO Jianfeng, et al. Suspended sediment fluxes in the radial sand ridge field of South Yellow Sea[J]. Journal of Coastal Research,2005,65:624-629.
- [24] 陈宏友. 苏北南通海涂近期冲淤动态及其开发[J]. 海洋科学,1990,14(2):28-35. (CHEN Hongyou. The recent trends of deposition and erosion of beach area in Nantong, Jiangsu and its exploitation[J]. Marine Science, 1990,14(2):28-35. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-11 编辑:张志琴)