

潮滩剖面形态特征及演变

罗锋^{1,2}, 蒋冰³, 董冰洁¹, 章志¹, 张一乙¹

1. 江苏省海涂研究中心, 南京 210036

2. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210024

3. 国家海洋信息中心, 天津 300171

摘要 总结了国内外对潮滩剖面形态和演变研究上取得的进展, 以全球最典型、潮滩资源最丰富的江苏为研究对象, 分析了潮滩观测量测方法、潮滩剖面形态及沉积过程, 潮滩演变特征及其物质和动力响应等, 并讨论了潮滩发育与演变的主要影响因素。

关键词 潮滩剖面; 形态特征; 冲淤变化; 演变因素

中国沿海滩涂可划分为泥滩、沙滩、岩滩和生物滩 4 种基本类型。泥滩又称潮滩、海涂, 为淤泥质海岸潮间带浅滩, 占中国滩涂总面积的 80% 以上^[1]。潮滩 (tidal flats) 是高潮位与低潮位之间的泥滩, 范围应限于理论深度基面以上部分, 该基准面以下, 属于海岸带的水下岸坡范围。潮滩沉积体作为粉砂淤泥质海涂的重要特征, 为沿海地区未来的发展提供了广阔空间。潮滩形态演变规律与趋势是潮滩资源保护开发的科学依据, 近年来关于潮滩研究的文献持续增长, 潮滩研究得到国内外专家学者的持续关注^[1-7]。掌握沿海潮滩的演变规律对区域生态保护、滩涂资源保护以及合理开发有极为重要的科学意义。

关于砂质海滩剖面的研究已经取得较多成熟而广泛的成果, 而对于潮滩的研究, 由于观测和调查的困难, 对其剖面塑造的研究远少于砂质海岸。国外在这方面研究开始较早, 20 世纪 30 至 60 年代, 关于潮滩的地貌类型、沉积物分布、沉积构造和沉积动力等方面获得了卓越的研究成果。有关潮滩剖面的研究成果也较

多, 如 Pritchard 等研究了潮滩平衡剖面的特征及不同潮差、不同性质的颗粒与沉积物供应状况对于平衡剖面的影响^[8-9]; Roberts 等采用数学模型方法研究了垂向潮流及波浪对淤泥质潮滩剖面的塑造, 并探讨了不同潮差、沉积物供应状况下的潮滩平衡剖面情况^[10]。

中国的潮滩研究起步相对较晚, 自 20 世纪 80 年代中期, 关于潮滩沉积过程、地貌演变的野外观测研究方面有了较大进展, 以江苏潮滩最为典型。张忍顺^[11]、任美镠^[12]、陈才俊^[13]和高抒^[14]等最先开始对潮滩的沉积特征和剖面形态进行了研究。王颖等^[15]对渤海湾和江苏淤泥质潮滩的沉积地貌分带性进行了分析; 高抒^[14]等从潮流、波浪以及泥沙供应方面将潮滩剖面概括为堆积岸剖面和侵蚀岸剖面两种基本类型, 并论述了其形成机理与剖面形态特征。贺松林^[16]等通过分析潮滩水动力特征以及潮流的冲淤效应, 分析了潮滩“S”型剖面的形成机理, 并对潮滩地貌进行分带论述; 刘秀娟等^[17-18]通过建立数学模型, 对江苏中部淤长型潮滩剖面形态演变模拟, 论述了沉积物源量控制潮滩冲淤均衡态的

收稿日期: 2018-06-11; 修回日期: 2018-07-02

基金项目: 江苏省海洋科技创新专项 (HY2017-2); 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金项目 (2017CZEPK05)

作者简介: 罗锋, 高级工程师, 研究方向为海洋滩涂环境及物质输运, 电子邮箱: jsmarine@163.com

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.14.006

特征及其与潮滩初始地貌、潮差、物源供给的关系;龚政等^[19-22]基于淤泥质潮滩滩面高程变化观测仪,对潮滩剖面分区季节进行了逐月滩面高程观测,探究其演变规律;另外还从物理模型设计和潮沟形态、潮汐作用、海平面上升影响方面系统地研究了潮滩潮沟系统发育演变动力机制。Zhou等^[23]通过数值模拟指出潮流、风浪、砂泥的动力特性,能够影响潮滩剖面形态及泥质沉积物的分布及动力分选特性;李明亮等^[24]探讨淤涨型潮滩剖面对围垦工程的响应特征及剖面演化模式。张长宽等^[25]对潮滩演变研究进展及前沿问题进行了综述。

1 潮滩观测量测研究方法

对潮滩剖面形态变化,观测量测研究方法主要总结为3大类:人工跑滩、数值模拟和遥感无人机^[26-27]。近几年,用遥感和地理信息系统(geographic information system, GIS)技术进行潮滩演变研究越来越广泛^[28]。利用多时相遥感影像支持下的潮滩高程构建方法,对沿海潮滩高程进行构建,结合海图、测量资料研究和验证潮滩的冲淤演变,在此基础上揭示潮滩冲淤时空演变规律。遥感具有在长时间序列内可对大空间尺度范围进行连续观测的能力,低空无人机遥感具有高灵活性、高时效性、高分辨率、低成本的优势,可以代替人工测量和卫星遥感、航空遥感,以满足滩涂海岸带监测研究中不断提高的现势性和分辨率的要求。但是,无人机遥感也存在不足,荷载性能和抗风性弱,限制了影像获取和处理效率^[22]。

以江苏淤泥质潮滩为典型,剖面演变采用分区季节进行现场观测是常用的经典方法,龚政等^[19]、李明亮等^[24]和陈君等^[27]采用现场人工高程测量,结合地区布设的平面和高程控制网,使用淤泥质潮滩高程变化观

测仪对水准观测站进行测量,多期高精度实测高程及沉积物粒度数据进行分析,在观测站设置水准桩后,使用动态高程测量技术(real time kinematic, RTK)沿设置的剖面线跑滩,并同时采集剖面沉积物样本,获取潮滩剖面高程数据和沉积物数据,分析潮滩剖面及沉积物输运特征。跑滩方法具有测量精度高、成本低、可重复多次测量等优点,尤其在米草滩区域,可尽量减少盐沼植物对测量的干扰。数值模拟方面,龚政等^[19-22]和刘秀娟等^[17]利用动力学模型对江苏中部潮滩剖面演化控制因素进行研究,采用了潮流模型、推移质输运及悬移质沉降、再悬浮模型以及床面变形模型等数学模拟方法对潮滩进行研究。

2 潮滩剖面形态及沉积过程

江苏潮滩的沉积物来源于长江泥沙、废黄河三角洲侵蚀产物以及岸外海底(辐射沙脊群区)的侵蚀物质^[15]。就潮上带及潮间带而言,侵蚀岸段由于海岸防护工程的建设,海岸侵蚀得到了控制,转而表现为不同程度的“假淤积”现象,但是未来随着冲刷逐渐向剖面上部扩展,最后会过渡到全剖面侵蚀;淤积岸段则依旧以一定的速率保持向海淤长。在潮差不变的前提下,当潮滩失去沉积物供应时,潮滩上部堆积,下部侵蚀,宽度变窄,坡度变陡,并将进入持续的侵蚀状态(图1^[16])。

2.1 潮滩的剖面类型

不同剖面形态揭示了不同沿海潮滩的冲淤过程和状态。相关研究也总结了江苏沿海潮滩剖面形态主要有斜坡形、斜坡形+上凸形组合、下凹形、上凸形这4种类型^[16, 19, 27]。具有斜坡形剖面的海岸为相对稳定岸段,随着泥沙供应而表现为不同坡度,当泥沙供应较多时,表现为较长斜坡形,坡度较缓;当泥沙供应较少时,表

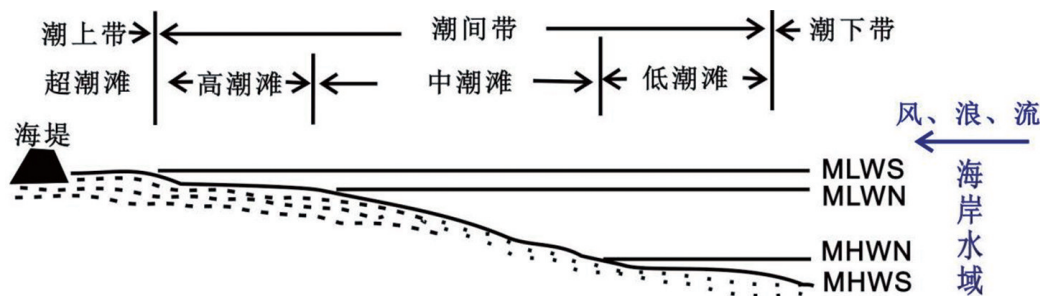


图1 潮滩滩段划分示意

Fig. 1 Map of tidal flat profile division

现为较短的斜坡形,坡度较陡。具有下凹形剖面的海岸通常为侵蚀性岸段,岸段发育过程通常是由斜坡形转变而来,海洋动力以波浪作用为主,凹点位置决定侵蚀进程,凹点向岸方向的滩坡变陡,潮间带滩地变窄,向海方向滩坡变缓,大部分岸段的水下岸坡均遭受一定程度的侵蚀^[27];具有上凸形剖面的海岸通常为淤积性岸段,上下凸点分别为平均高潮位和低潮位附近,海洋动力以潮汐作用为主,坡度越缓,供沙量越大、沉积速度越快的潮滩,双凸形潮滩剖面形态越明显^[13, 27]。

2.2 潮滩的沉积动力过程

潮滩的沉积是在潮汐周期不断作用下,水中泥沙在潮滩不断落淤的结果,潮汐动力是淤长潮滩沉积的支配动力。在动力作用和沉积效应影响下,潮滩的侵蚀和淤积逐渐达到稳态平衡,此时的潮滩剖面被称为均衡剖面^[29]。

潮流运动与泥沙输运共同塑造堆积潮滩特有的地貌特征,大小潮周期变化也是驱动潮滩地貌演变直接因素,并在一定程度上控制着地貌演化规律。地貌特征的演变模式受潮流沉积动力过程控制,大小潮变化过程既是潮位的高低变化,也是潮流动力的强弱更替^[30]。大潮期沉积下来的泥沙,尤其是高位滩地,由于小潮期潮位的降低与潮流动力的减弱,性质易于密实而难以起动,使得滩面偏于淤长,直到大潮再次来临,滩面逐步恢复。当潮滩初始坡度较小时,在潮滩调整至均衡态的过程中,其上部沉积速率较大,中下部沉积速率较小。当初始坡度较大时,则潮滩上部的沉积速率较小,而其中下部尤其是下部的沉积速率较大。物源供应越丰富潮滩宽度越大,坡度越小,同时向岸水动力作用减弱,滩面颗粒物质也变细,悬浮物质也因潮流流速减缓而发生分选沉降。

2.3 潮滩的沉积速率

沉积速率是潮滩沉积环境的重要参数,能综合体现沉积环境的特征,是确定沉积环境的定量指标,同位素测年和断面高程重复测量方法是用来计算潮滩沉积速率最常用的方法^[31]。潮滩的沉积速率与滩面水动力状况、沉积物供应等有关,随着滩面高程的增加,滩面淹没水深减小,潮水带来的沉积物量有所减少,沉积速率逐渐降低。但如果滩面出现盐沼植被,减小了水流速度,沉积速率迅速增加。

以江苏潮滩为例,涨潮流速明显大于落潮流速,最大涨潮流速与最大含沙量同时出现^[15]。沉积速率的季

节特征明显,秋冬季显著大于冬春季,离围垦等人类活动越远,沉积速率对潮滩围垦的响应越不显著,潮滩沉积物的粒度参数变化也表现出类似的规律^[24]。进一步研究表明,多年平均潮位线以上滩面将淤积加高,自岸向海垂向沉积速率降低,平均高潮位处沉积速率最大^[32],而多年平均潮位线以下区域趋于蚀低^[33]。在对剖面形态的研究中,高抒等^[14]认为上凸点沉积速率较大,泥沙供给充分时,上凸型点更为显著。数值模拟结果也显示,虽然目前江苏中部潮滩呈淤长状态,围垦堤坝等人类活动改变了潮滩的沉积环境,加快了互花米草滩的沉积物沉降和堆积^[31]。但未来将面临因物源匮乏而转为侵蚀的风险,这对于海岸防护和生态系统保护是一个新的挑战^[34]。

3 潮滩演变特征及其响应

侵淤主要指沉积物侵蚀淤积的空间特征。潮滩侵淤变化是在各种动力条件下较长时期内输入泥沙量与输出泥沙量动态变化的反映,当输入泥沙量大于输出泥沙量时潮滩表现为淤积,当输入泥沙量小于输出泥沙量时表现为侵退,当两者相当时潮滩处于侵淤平衡态。

3.1 典型潮滩剖面演变特征

江苏海岸就潮上带及潮间上带而言,绣针河口—临洪口为基本稳定岸段,临洪口—西墅、灌河口—中山河口、塘芦港—连兴港为稳定微淤岸段,烧香河口—灌河口、中山河口—扁担港口、东灶港—塘芦港为侵蚀岸段,扁担港口—东灶港为淤积岸段^[23]。侵蚀岸段由于海岸防护工程的建设,海岸侵蚀得到了控制,转而表现为高滩不同程度的淤积,但是未来随着冲刷逐渐向剖面上部扩展,最后会过渡到全剖面侵蚀;淤积岸段则依旧以一定的速率保持向海淤长。就潮下带及水下岸坡而言,除四卯西河口—小洋口典型淤长型淤泥质岸段外,江苏沿海大部分水下岸坡均曾经历或正在经历一定程度的侵蚀后退,随着侵蚀带的扩大,波浪作用逐渐加强,且作用范围逐渐扩大。

3.2 物源供应与海平面上升对潮滩剖面演变的影响

外源供应充足时,潮滩从初始坡度调整至均衡态仍可长期保持淤长状态,并在淤长过程中保持均衡态时的剖面形态,即潮滩剖面处于动态的均衡态中。当潮滩失去外源供应时,在半月大小潮的作用下,潮滩上

部发生堆积,潮滩中下部则开始侵蚀。在演变初期,堆积和侵蚀速率都较快,而后变慢直至达到均衡态,此时潮滩宽度变窄,坡度变陡。此外,海平面上升将加速海岸侵蚀,增加潮汐、波浪和风暴潮的强度,减少滩涂和沿海湿地,由于其区域的损失而降低消浪能力。因此,侵蚀海岸的长度将增加,淤积海岸的沉降速率将减小甚至转变成侵蚀,潮滩宽度减小,海岸坡度增大^[35]。堆积型岸滩地貌特征的形成根本上是潮流驱动下泥沙沉积分布过程的结果,因此典型堆积剖面上凸点的形成可能与滩上沉积速率的差异有关。

3.3 物源粒度变化对潮滩剖面演变的影响

外源供应量的变化是主要控制因素,外源粒度粗细对潮滩演化也有一定程度的影响。各底质沉积物粒度组分沿向海方向呈现出规律性变化,从岸堤向海延伸,砂含量逐渐增加,粉砂含量减少,黏土含量也减少,沉积物粒度参数和粒度组分含量表现出的沿程变化趋势与沉积动力条件有着密切的关系^[29]。物源的粒度逐渐变粗,均衡态时的潮滩宽度变小,坡度变大,前积变快,但变化幅度较小。滩面微地貌广泛发育,只有粗颗粒物能在滩面维持稳定,细颗粒被再悬浮并向海岸方向输送,水动力变弱,细颗粒沉降。

4 对影响潮滩剖面发育因素的讨论

潮滩作为陆海衔接的前沿地带,是海岸带的重要组成部分,拥有丰富资源和极大社会、经济效益,在增加后备土地资源、提高海洋生态保护能力等方面有重要作用^[36]。潮滩剖面形态特征、演变机理的研究是学科前沿和国际研究热点。

本文已对潮滩剖面形态及沉积过程、潮滩演变特征及其物质、动力响应等方面开展了系统分析研究,潮滩发育和演变的主控影响因素非常复杂,人类活动、潮流、波浪、降雨、滩面沉积物、底栖动物以及盐沼植被的生长都影响着潮滩演变过程^[15]。以下将从泥沙来源、海洋动力条件、人类活动等3大类主要控制因素进行讨论。

4.1 泥沙来源对潮滩剖面发育的影响

江苏淤长型淤泥质潮滩剖面形态为双凸形,上、下凸点分别位于平均高潮位和平均低潮位(偏上)附近。供沙丰度决定着潮滩淤长快慢,决定了潮滩剖面的基本形式。含沙量越高的地段,潮滩沉积量越大,淤长速

度越快,供沙量越大;沉积速度越快的潮滩,双凸形潮滩剖面形态越明显。当潮滩侵蚀作用明显增强时,剖面形态便由上凸转为下凹,吕四和废黄河口海岸泥沙为负向输出,平均低潮位以上潮滩为下凹形剖面;稳定型潮滩剖面近似于直线形。我们常用潮滩剖面形态来判断江苏潮滩的淤长情况。

4.2 海洋动力条件对潮滩剖面发育的影响

受季风气候的影响,江苏沿海风浪和季节性供沙变化显著,秋冬季风浪频率和强度大大高于春夏季节。潮滩剖面形态周期性的变化是以海岸动力周期性变化为基础的,并与潮汐和季风气候条件的变化相对应。潮滩的沉积是在潮汐周期不断作用下,水中泥沙在潮滩不断落淤的结果,因此,潮汐动力是淤长潮滩沉积的支配动力。当风浪相对较弱时,泥沙倾向于沉积在上潮间带平原上,而沙子主要分布在中潮滩和下潮滩上。当风浪较强时,沙土和泥土都会更容易重新悬浮和侵蚀,从而在高水位附近形成明显的凹面轮廓。

4.3 人类活动对潮滩剖面发育的影响

受到引种植被、围垦建堤和港口工程等人类活动^[37-38]的影响,潮间带纳潮量减小,水动力发生改变,涨落潮过程中,潮流所携带的大量沉积物进入围垦区后,由于冲刷延迟效应,落潮水流未能将沉积物全部带回潮下带,会有更多悬浮泥沙开始堆积在滩面上,加剧了围垦区内沉积物的淤积,使潮滩剖面的上凸趋势减缓,剖面曲率减小。海堤工程破坏了原潮波形态、水动力同泥沙间的平衡关系,使潮滩的沉积发生变化,并使潮滩剖面形态也发生变化。围垦改变了堤前潮滩的沉积过程,堤外潮滩剖面坡度也经历缓-陡-缓的变化过程。围垦初期,潮间上带淤积快于潮间下带,潮间上带剖面线抬高,潮滩坡度由缓变陡;经过一段时间的淤积,潮上带淤积减慢,沉积峰区随之下移至潮间下带,潮间下带剖面线抬高,潮滩坡度又由陡转缓,并逐渐恢复围前的潮滩沉积特征和剖面形态^[13]。在物源充足的淤涨型潮滩围垦,可导致沉积物在围堤附近海域快速堆积、沉积物粒径变细;离海堤越远,沉积速率及沉积物粒度参数的变化越不显著^[24]。

4.4 潮滩剖面发育研究的前沿科学问题

4.4.1 生物作用对潮滩剖面发育的影响

淤泥质海岸作为部分生物群的栖息场所,生物作用对潮滩演变的影响持续增强,生物与潮滩演变的耦合作用逐渐受到关注。生物作用根据不同生物类别,

可分为底栖动物影响和植物影响两类。底栖动物对潮滩演变影响的研究还处于初级阶段。王宁舸等^[30]从沉积学和动力学2方面研究生物作用对淤泥质潮滩演变,根据塑造滩面形式的不同,其影响可分为生物扰动(bioturbation)、生物侵蚀(bioerosion)和生物沉积(biodeposition)3种。生物扰动和生物侵蚀作用通过不同机制改变了泥沙的运动特性,使滩面偏于冲刷。相比于底栖动物影响,盐沼植物具有明显的减流促淤作用,其固滩作用不仅仅是植被到地貌的单向过程,两者间双向动力反馈机制更是地貌演化的重要环节。

4.4.2 地下过程对潮滩剖面发育的影响

研究发现,地下土层可影响并控制滩面高程变化。实际潮滩环境中,潮滩上频繁的潮水涨落驱动着地下水位高低变化过程,地下水与植物根系等构成了潮滩基本地下环境,地下土层中的这种作用统称为潮滩地下过程。测量滩面高程变化、表面冲淤变幅和地下水位变动来分析地下过程对高程的影响。此外,植被生长变化也可通过地下过程的形式对滩面高程产生一定影响。波、流和生物作用的研究相比,目前针对地下过程的认识和探索较少,尤其在地下过程作用形式和机制方面更鲜有涉足,但地下土层变化的存在及其对滩面走向的重要影响已是事实,特别在海平面上升背景下,地下过程可能导致的潮滩损失将成为滩涂发育研究必须考虑的关键因素之一^[19],也是今后关注的前沿问题^[25]。

5 结论

通过分析潮滩剖面形态及沉积过程、江苏海岸带及滩涂形成和演变的主要影响因素,得到了以下结论。

1) 潮滩研究关系到社会、科学、经济和生态效益,潮滩剖面形态及演变特征是当今研究的热点。

2) 在潮滩剖面的塑造过程中,供沙是维持海岸潮滩淤蚀变化的充要条件,它决定着海岸是否淤长,因而决定着潮滩剖面的基本形态;潮流和波浪是塑造剖面形态的主要动力因素,海平面上升将加速海岸侵蚀过程,复杂的水动力环境、海平面上升及海岸工程建设、护堤围垦等人为控制因素影响剖面形态发育演变;地下水过程及生物作用都是未来潮滩研究的若干前沿科学问题。

3) 由于特殊且复杂的动力环境和人类活动影响,

潮滩形态特征及演变研究也是难点,未来将面临因物源匮乏而转为侵蚀的风险,这对于海岸防护和生态系统保护是一个新的挑战。

参考文献(References)

- [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. Advances in development, utilization, and protection of coastal tidal flats[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(1): 25-33.
- [2] 张长宽, 陈君, 林康, 等. 江苏沿海滩涂围垦空间布局研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 206-212.
Zhang Changkuan, Chen Jun, Lin kang, et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(2): 206-212.
- [3] Amos C L. Chapter 10 Siliciclastic tidal flats[M]. G M E P, Elsevier: Developments in Sedimentology, 1995, 273-306.
- [4] Wells J T. Dynamics of coastal fluid muds in low-, moderate-, and high-tide-range environments[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2011(40): 130-142.
- [5] Straaten L M J U V. Sedimentation in tidal flat areas[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1961, 9(7): 203-226.
- [6] Kirwan M L, Megonigal J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise[J]. Nature, 2013, 504(7478): 53-60.
- [7] Temmerman S, Kirwan M L. Building land with a rising sea[J]. Science, 2015, 349(6248): 588-589.
- [8] Pritchard D, Hogg A J, Roberts W. Morphological modelling of intertidal mudflats: The role of cross-shore tidal currents[J]. Continental Shelf Research, 2002, 22(11-13): 1887-1895.
- [9] Pritchard D, Hogg A J. Cross-shore sediment transport and the equilibrium morphology of mudflats under tidal currents[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(10): 1-15.
- [10] Roberts W, Hir P L, 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.
- [11] 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.
- [12] 任美镔. 人类活动对中国北部海岸带地貌和沉积作用的影响[J]. 地理科学, 1989(1): 1-7.
Ren Meie. Human impact on the coastal morphology and sedimentation of north China[J]. Scientia Geographica Sinica, 1989

- (1): 1-7.
- [13] 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 depositional tidal flat in Jiangsu province[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1991, 22(4): 360-368.
- [14] 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(1): 75-84.
Gao Shu, Zhu Dakui. The profile of Jiangsu's mud coast[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 1988(1): 75-84.
- [15] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. 第四纪研究, 1990(4): 291-300.
Wang Ying, Zhu Dakui. Tidal flats of China[J]. *Quaternary Sciences*, 1990(4): 291-300.
- [16] 贺松林. 淤泥质潮滩剖面塑造的探讨[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1988(2): 61-68.
He Songlin. Approach to development of profile of Tidal flat [J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 1988(2): 61-68.
- [17] 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 the Shore-Normal profile shape evolution for an accretional tidal flat on the central Jiangsu coast[J]. *Earth Science*, 2010, 35(4): 542-550.
- [18] 刘秀娟, 高抒. 江苏中部潮滩剖面的模拟[C]. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会, 南京, 2007.
Liu Xiujuan, Gao Shu. Simulation of tidal flat section in central Jiangsu[C]. *Proceedings of the 13th China Marine (Offshore) Engineering Symposium*. Ocean Engineering Branch of China Ocean Society, Nanjing, 2007.
- [19] 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 Chnagkuan, et al. Surface elevation variation of the Jiangsu mudflats: Field observation[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 880-887.
- [20] 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 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, Lü Tingyu, Geng Liang, 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.
- [21] 龚政, 耿亮, 吕亭豫, 等. 开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制——II. 潮汐作用[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 231-239.
Gong Zheng, Geng Liang, Lü Tingyu, et al. Mechanisms underlying the dynamic evolution of an open-coast tidal flat-creek system: II: Influence of tidal range[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 231-239.
- [22] 龚政, 严佳伟, 耿亮, 等. 开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制——III. 海平面上升影响[J]. 水科学进展, 2018(1), 109-117.
Gong Zheng, Yan Jiawei, Geng Liang, et al. Mechanisms underlying the dynamic evolution of an open-coast tidal flat-creek system III: Impact of sea level rise[J]. *Advances in Water Science*, 2018(1), 109-117.
- [23] Zhou Z, Coco G, Wegen M V D, 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.
- [24] 李明亮, 杨磊, 龚绪龙, 等. 围垦工程影响下的淤涨型潮滩演化: 以江苏琼港潮滩为例[J]. 海洋通报, 2016, 35(6): 683-693.
Li Mingliang, Yang Lei, Gong Xulong, et al. The geomorphologic response of accreting intertidal flat to reclamation: A case from Jianggang, Jiangsu[J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(6): 683-693.
- [25] 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.
Zhang Changkuan, Gong Zheng, Chen Yongping, et al. Research progress and frontier issues of tidal flat evolution[C]// *The 18th Academic China marine (offshore) Engineering Symposium*. Zhoushan: Chinese society for oceanography, 2017: 759-766.
- [26] 邓才龙, 刘焱雄, 田梓文, 等. 无人机遥感在海岛海岸带监测中的应用研究[J]. 海岸工程, 2014, 33(4): 41-48.
Deng Cailong, Liu Yanxiong, Tian Ziwen, et al. Research on application of UAV remote sensing in coastal monitoring of island[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 33(4): 41-48.
- [27] 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, Caihui. Study on the characteristics of tidal flat profile in jiangsu coastal area[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 28(4): 90-96.
- [28] 王永星. 近40年来江苏中部沿海潮滩演变的多源遥感影像分析[D]. 南京: 南京大学, 2013.
Wang Yongxing. Study on evolution of tidal flat in jiangsu central coast using multi-source remote sensing images in recent 40 years[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [29] 朱庆光, 冯振兴, 徐夏楠, 等. 围垦工程影响下的江苏琼港潮滩剖面的演化机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 21-29.
Zhu Qingguang, Feng Zhengxing, Xu Xianan, et al. Evolution-

- of tidal flat profiles under the influence of land reclamation in jiangsu province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 21–29.
- [30] 王宁舸, 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 Ningke, Gong Zheng, Zhang Changkuan, et al. Hydrodynamic and biological processes that control the morphodynamic evolution of mudflats: An overview[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 34(1): 104–116.
- [31] 朱冬. 江苏中部海岸潮滩沉积速率大面积测算方法[D]. 南京: 南京大学, 2015. Zhu Dong. The mapping method of tidal flat deposition rate in the central Jiangsu coast, eastern China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [32] 朱骏, 杨世伦, 谢文辉, 等. 潮间带短期冲淤过程的横向差异及其定量表达——以长江口南汇滨海岸段的观测分析为例[J]. *地理研究*, 2001, 20(4): 423–430. Zhu Jun, Yang Shilun, Xie Wenhui, et al. Cross-shore difference in short-term evolution of muddy intertidal flat using a quantification method—Taking the eastern shore of Nanhui as an example[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(4): 423–430.
- [33] 杨桂山, 施雅风, 季子修. 江苏淤泥质潮滩对海平面变化的形态响应[J]. *地理学报*, 2002, 57(1): 76–84. Yang Guishan, Shi Yafeng, Ji Zixiu. The morphological response of typical mud flat to sea level change in Jiangsu coastal plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 76–84.
- [34] 王文昊, 高抒, 徐杨佩云, 等. 江苏中部海岸潮滩沉积速率特征值的数值实验分析[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2014(5): 656–665. Wang Wenhao, Gao Shu, Xu Yangpeiyun, et al. Numerical experiments for the characteristic deposition rates over the tidal flat, central Jiangsu coast[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2014(5): 656–665.
- [35] Ji Zixiu, Jiang Zixun. Impacts of sea level rise on coastal erosion in the Changjiang river delta and North Jiangsu coastal plain[J]. *Chinese Geographical Science*, 1994(4), 310–321.
- [36] 杨宏忠. 江苏海岸滩涂资源可持续开发的战略选择[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. Yang Hongzhong. A research on sustainable development strategic option of Jiangsu coast beaches resources[D]. Beijing: China university of geosciences(Beijing), 2012.
- [37] 吴小根, 王爱军. 人类活动对苏北潮滩发育的影响[J]. *地理科学*, 2005, 25(5): 614–620. Wu Xiaogen, Wang Aijun. Impacts of human beings' activities on north jiangsu tidal flat[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(5): 614–620.
- [38] 杨世伦, 时钟. 长江口潮沼植物对动力沉积过程的影响[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 75–80. Yang Shilun, Shi Zhong. Influence of tidal marsh vegetations on hydrodynamics and sedimentation in the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 75–80.

Characteristics and evolution of tidal flat profile

LUO Feng^{1,2}, JIANG Bing³, DONG Bingjie¹, ZHANG Zhi¹, ZHANG Yiyi¹

1. Tidal Flat Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China

2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210024, China

3. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China

Abstract This paper reviews the progress made in the study of the tidal flat profile and the evolution in recent years both at home and abroad, with the most typical tidal flat in Jiangsu Province as an example, including the observation methods, the morphological characteristics, the physical mechanism of the tidal flat profile, the profile characteristics, sedimentary process, the characteristics of the escalation and deposition of the tidal flat along the coast, and the main factors affecting the erosion and the deposition of the coastal tidal flats.

Keywords tidal flat profile; morphological characteristics; erosion and deposition changes; evolution factors ●



(责任编辑 傅雪)