

# 江苏中部潮滩长期演变规律及其受米草生长影响<sup>1</sup>

龚政<sup>1,2</sup>, 石磊<sup>2</sup>, 靳闯<sup>2</sup>, 张茜<sup>2</sup>, 赵堃<sup>2</sup>

(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)

**【摘要】**在江苏盐城川东港南侧潮滩设置了一系列水准桩,使用滩面高程观测仪对滩面高程进行 7a (2012 年 10 月—2018 年 11 月)的逐月现场观测,结合遥感资料获取米草前缘位置变化,探究淤泥质潮滩中长期演变规律及米草生长在潮滩地貌演变中的作用。结果表明:高滩区域地下过程(土体膨胀、压缩等)对滩面变化起控制作用;盐沼区米草生长促进滩面沉积,随米草前缘向海生长,盐沼中部区域年增长率降低,靠近米草前缘区域滩面年淤积量增加,但米草向海推进对光滩区域演变影响小;潮滩剖面自陆向海依次可分为基本稳定带、快速淤积带、基本稳定带、快速冲刷带,潮间带中部坡度逐步增大;滩涂面积保有量在 2012—2018 年观测时段内逐年降低。

**【关键词】**淤泥质潮滩;盐沼;互花米草;地貌演变;滩涂资源

**【中国分类号】**TV122 **【文献标志码】**A

淤泥质潮滩是地球上最具价值的生态系统之一<sup>[1-2]</sup>,提供海岸防护<sup>[3]</sup>、碳储备<sup>[4]</sup>、水质调节<sup>[1]</sup>等重要的生态服务。然而受海平面上升和人类活动的影响,潮滩健康受到严重威胁,本世纪末全球潮滩将萎缩 20%以上<sup>[1-2]</sup>。因此,开展长期的潮滩演变研究,掌握潮滩演变规律,进行合理的健康评估,是全面保护潮滩生态的重要途径和方法。

淤泥质潮滩处于海陆交界地带,波浪、潮流、植被和泥沙供给等均影响潮滩形态特征及其演变规律<sup>[2-5]</sup>。当波浪主导滩面泥沙输运时,潮滩剖面呈蚀退型<sup>[3,6]</sup>;当潮流主导时,剖面呈进积型,且泥沙供给越充分,剖面越平缓,潮差越大,剖面越陡峭<sup>[6-7]</sup>;在潮流作用下,滩面各处垂向年淤积率不同,平均高潮位附近沉积最大<sup>[8-8]</sup>,而高滩处的滩面发育由地下过程(土体压缩和膨胀)

**收稿日期:** 2020-10-09;

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金资助项目(51925905);国家自然科学基金资助项目(51879095)

**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:石磊,E-mail:ml8305177163@163.com

主导<sup>[8-10]</sup>。Roberts 等<sup>[11]</sup>、Pritchard 等<sup>[12]</sup>和 Friedrichs<sup>[13]</sup> 构建一维剖面演变模型,较好地复现了波流作用下剖面演变规律。植被在潮滩演变中同样发挥着巨大作用。植被通过削弱水流流速<sup>[14-16]</sup>、降低冠层中水流紊动能<sup>[15]</sup>、增强泥沙黏聚力<sup>[14]</sup>等方式,促进滩面沉积,促淤效果一定程度上与植株生物量(密度、直径等)和水中悬沙浓度呈正相关<sup>[14-19]</sup>。基于植被沉积动力学研究, Morris 等<sup>[20]</sup>和 van Belzen 等<sup>[2]</sup>探究了滩面高程和植被生长关系,认为淹没频率影响植被生物量,存在植被生长的极限淹没频率; Fagherazzi 等<sup>[21]</sup>、Zhou 等<sup>[22]</sup>开发了植被一水动力一泥沙输运耦合模型,揭示了植被生长和滩面演变互馈机理,并预测了当海平面上升时,盐沼向陆迁移的趋势。针对江苏潮滩演变规律研究,国内学者也取得了一定进展。基于海岸剖面的实测数据,发现江苏潮滩呈现北冲南淤的状态,冲淤平衡点逐渐南移江苏中部潮滩泥沙供给丰富,受潮动力季相变化、沿岸流等因素影响,剖面呈双凸型<sup>[5,7,23]</sup>,生物量和滩面高程之间基本呈现抛物线关系<sup>[18-19]</sup>。国内外研究在潮滩短期实测、植被沉积动力及高程变化对植被影响方面成果丰硕,但植被生长对潮滩高程的反馈作用研究较少。

利用实测数据对潮滩湿地的健康状况评估和未来演变趋势的预测也是潮滩研究的重点问题。Lovelock 等<sup>[9]</sup>、Wang 等<sup>[10]</sup>利用实测的滩面高程、沉积厚度,从泥沙输入角度评估了筑坝等人为活动对湿地演变的影响, Gong 等<sup>[5]</sup>方基于实测剖面的年际变化,预测了江苏中部潮间下带剖面将进一步下切。但是,现有的江苏潮滩评估多从生态景观角度考虑,利用遥感技术、PSR 模型等进行评估<sup>[24-25]</sup>。利用实测数据,从自然演变角度探究潮滩土地资源变化,确定潮滩健康情况的研究还不够深入。

因此,针对江苏淤泥质潮滩长期现场观测研究缺乏、植被生长对滩面高程影响探讨较少、自然条件下潮滩健康评估不够的现状,本文结合已有的 7a (2012-2018 年)滩面高程逐月观测资料和遥感资料获取的米草生长情况,以及前期工作中所获取的潮滩动力资料<sup>[3,5,8,23]</sup>,深入探究盐沼植被生长对潮滩地貌产生的影响,分析潮滩面积保有量变化,以期加深对潮滩地貌中长期演变规律及现有潮滩资源的认识。

## 1 研究区域概况

研究区域位于江苏中部沿海川东港南侧潮滩(图 1,遥感图片拍摄于 2015 年 10 月 13 日)。江苏沿海中部的射阳河口至北凌河口段为典型的淤长型潮滩,宽度约为 2~6km,潮滩滩面平缓,坡度仅为 0.1%~0.3%<sup>[7]</sup>。该区域潮滩由海向陆可分为粉砂细沙滩、粉砂淤泥质潮滩和泥滩,潮滩上的沉积物分带性明显<sup>[3,7]</sup>。该海域潮汐为不规则的半日潮,潮差 3~4m,且高潮位呈现季节性变化,一般夏秋季高、冬春季低。西洋深槽涨潮流自西北向东南,为往复流;涨落潮流不对称,涨潮占优<sup>[6,7,23]</sup>。受到外海沙脊群掩护,波浪作用较弱<sup>[5,7]</sup>。易受寒潮和台风作用,对该区域短历时地貌形态有较大影响<sup>[3]</sup>。

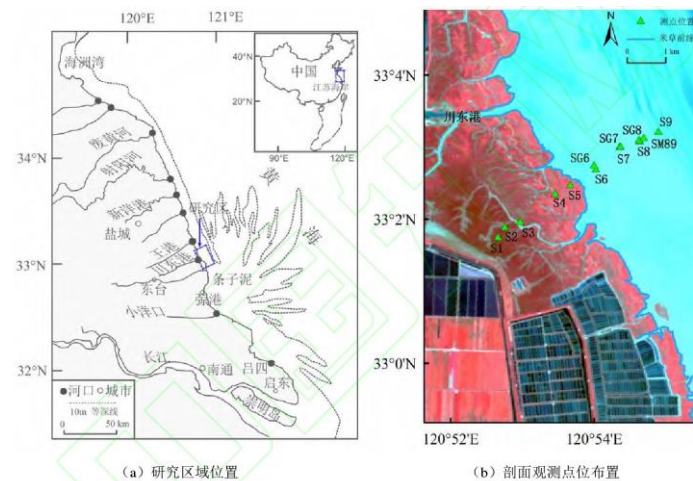


图 1 江苏海岸中部潮滩的研究区域及剖面观测点位置<sup>[3]</sup>

## 2 现场观测基本情况

## 2.1 滩面高程观测

2012年8月在江苏中部潮滩布设水准桩,设置了SI—S9观测站点(图1)。SI—S4站点位于盐沼区域,S5站点在观测初期位于盐沼与光滩交界处,S6—S9站点分布于光滩区域,各站点间平均距离约500m,S5站点位于平均高潮位附近。观测初期,剖面整体呈现双凸形特征,S4、S6、S7分别为上凸点、下凹点、下凸点(图2(a),初始剖面高程选用2012年10月测量数据)。由于部分桩基受到破坏,2014年10月又在S6、S7、S8附近分别补设了SG6、SG7、SG8,以及位于S8和S9之间的SM89站点,SM89位于平均低潮位附近(图1和图2(a))。

采用滩面高程变化观测仪RSET-MH(Rod Surface Elevation Table-Marker Horizon)对每个站点高程进行观测。通过读取测针在悬臂上方的长度,结合桩顶高程换算得到滩面绝对高程;通过埋置在滩面之下,作为标记层的水平瓷砖,测量滩面沉积物厚度,换算得到地下土层压缩和膨胀量(以下简称“地下过程”)<sup>[5,8,23]</sup>在2012年10月到2018年11月的大潮期,进行了滩面高程的逐月观测。

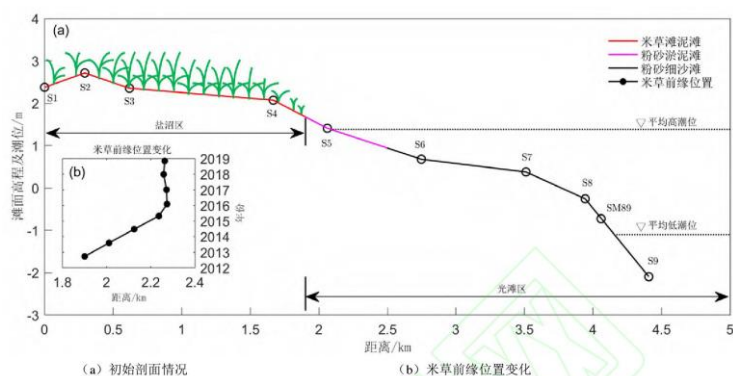


图2 研究区域初始剖面及米草前缘位置

## 2.2 米草前缘获取

选取2012—2019年8—10月的Landsat8遥感影像,对影像进行辐射定标、大气校正等,结合野外观测进行常规目视解译<sup>[26]</sup>,并沿站点方向获取米草前缘位置(图1(b)),遥感影像空间分辨率为30m。米草前缘在2012年10月距离S5站点靠陆侧约150m,2014年夏季米草前缘向海推进至S5站点,2016年10月推进至S5站点向海侧约250m,平均每年向海推进速度约80~100m,2017—2019年米草前缘基本稳定(图2(b))。

## 3 结果及讨论

### 3.1 盐沼区各站点滩面高程变化特征

盐沼区是潮滩生态活跃地带,植物生长影响着滩面高程变化<sup>[14-19]</sup>。S1站靠近海堤,受降雨及海堤坡面汇流影响,形成洼地HR。S2站位于剖面最高点(图2(a)),全年潮水淹没频率小,集中于夏秋季(5-11月);该站点滩面高程基本稳定,年变化幅度小于3cm(图3)。S2站点淹没频率与高程变化相关性不显著(图3阴影部分),因此潮流引起的泥沙沉积贡献小,滩面过程主要受地下过程(指地下水位变化、植被根系腐败产生的有机物沉积等导致土壤膨胀、压缩)影响<sup>[5,8,23]</sup>。

S3、S4位于盐沼内部,S5起初位于光滩区,而后处于盐沼内部(图2(a))。S3、S4滩面高程不断淤高,季相变化明显,即:夏秋季淤高,冬季稳定,夏季淹没频率高,潮流控制滩面高程,冬季淹没频率低,高程受地下过程控制<sup>[5,8,23]</sup>。但S3、S4年间滩面淤高幅度不同,2012-2018年滩面高程增量逐年减缓,高程逐步稳定。S5站点在2014年之后改变原本冲淤平衡趋

势，滩面高程逐年增加。7a 来，S3—S5 滩面高程分别增长了近 30cm、50cm 和 55cm，总淤积量随着距米草前缘的向岸侧距离增加而逐步减小（图 4 和图 5）。

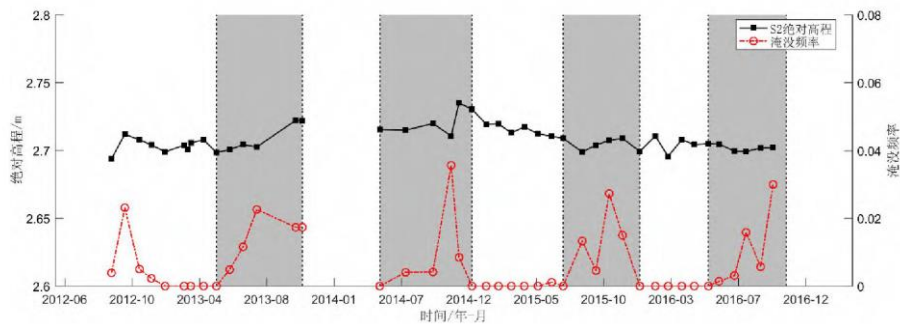


图 3 2012—2016 年 S2 滩面高程及淹没频率变化

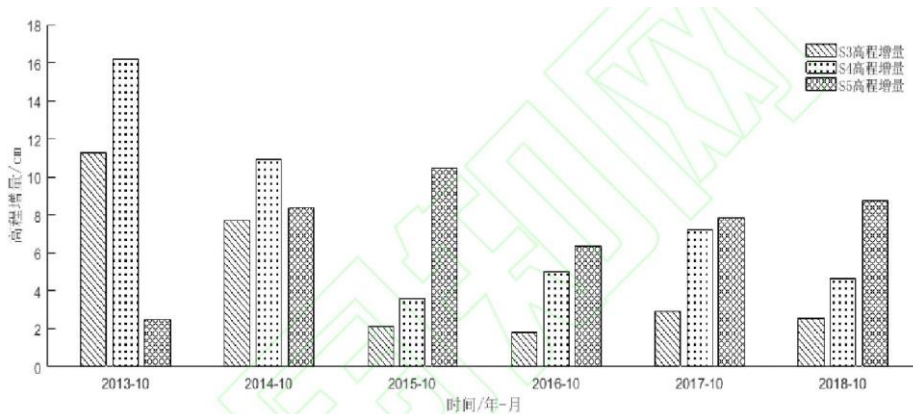


图 4 S3—S5 滩面高程变化（阴影区域表示夏秋季 5—11 月）

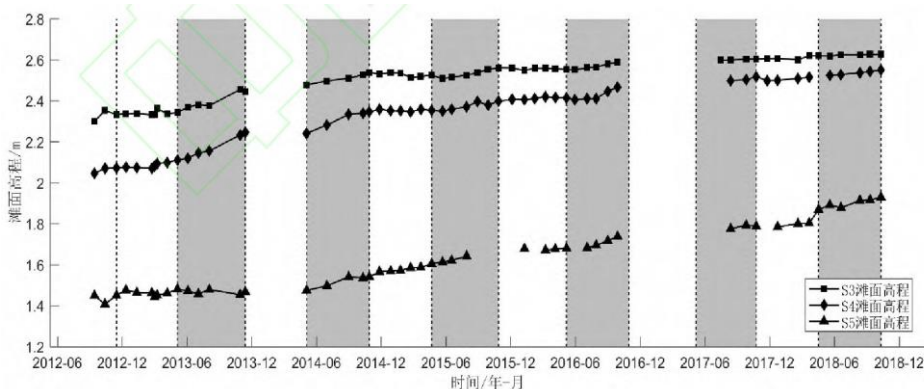


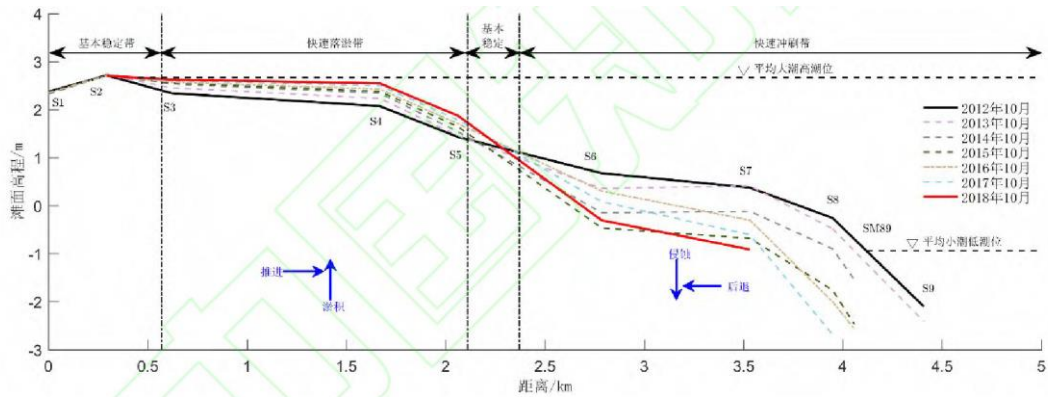
图 5 S3—S5 滩面高程逐年增量

米草向海生长影响着 S3-S5 的滩面高程变化。米草等盐沼植被通过茎叶捕获泥沙<sup>[14-15]</sup>、根系提高滩面抗剪强度<sup>[14]</sup>、弱冠层减弱水流紊动<sup>[14-17]</sup>、有机物的沉积<sup>[14-15]</sup>等方式，使得泥沙在滩面落淤，滩面沉积量在一定程度上与米草生物量（密度、直径等）呈正相关，也受到潮流中悬沙浓度的影响<sup>[14-19]</sup>。观测初期，米草前缘介于 S4、S5 之间，以每年 80~100m 速度向海推进，S3、S4 逐年远离盐沼边缘（图 2（b））。虽然 S3、S4 附近互花米草植株密度和高度（约 2m）较大，且向海方向逐渐降低<sup>[18]</sup>，但受 S3、S4 站点前方植被生物量的增加影响，在泥沙来源相近情况下，前方植被截留泥沙增加，使得到达后方的潮流中泥沙含量减少，因此盐沼滩内的 S3、S4 站点高程虽然保持增长，但随着 2 个站点与盐沼边缘距离增大，沉积量逐年降低。S5 站点滩面高程变化

与米草前缘生长相关,观测初期,S5 站点位于盐沼边缘,互花米草以簇团形式存在<sup>[18,27]</sup>,2 刀,密度小、植株高度矮小、茎叶细,促淤能力弱<sup>[14-15,27]</sup>,该区域处于冲淤稳定状态。随着盐沼植被的向海生长,于 2014 年覆盖 S5 站点后(图 2(b)),植被的高度和密度均增加,促淤能力增强,滩面高程不断淤高。前人研究认为盐沼区域滩面淤积量从海向陆呈现线性变化,盐沼边缘至内部淤积不断减小<sup>[4,9,27]</sup>,本研究与前人结论基本一致。

### 3.2 潮间带剖面年际变化

2012 年至 2018 年潮间带 10 月高程变化如图 6 所示,2014、2015 年 10 月的剖面在风暴后测量,风暴潮对潮滩短期剖面演变影响大,因此,这两次剖面未在年际变化分析中采用。总体上,盐沼区不断淤高并向海推进,光滩区蚀低且向岸后退。盐沼区和光滩区年冲淤量存在明显区别,盐沼区年淤积量受米草前缘向海生长影响:随着米草前缘向海推进,盐沼区年淤积量逐年减缓;当米草前缘稳定之后,盐沼区年淤积量基本稳定(表 1)。光滩区冲刷变化趋势与米草向海扩张关系不大,光滩区域主要以沿岸向潮流塑造为主光滩剖面呈现冲刷状态(表 1),且随着剖面蚀低,淹没频率增加,进一步加大了潮流的剖面塑造作用。川东港南侧潮滩总体的冲淤演变,受到光滩区大幅度冲淤变化影响,改变了之前潮滩基本冲淤平衡状态 BQ<sup>[9]</sup>。由于盐沼区的向海推进和光滩区的蚀退,潮间带坡度逐步增大,在盐沼滩与光滩的交接区域总存在冲淤平衡位置,受盐沼区域向海推进影响,该冲淤平衡点 7a 向海移动约 120m,移动幅度较小(图 6)。



注:距离指各点与 S1 站点的相对距离

图 6 川东港南侧潮滩剖面冲淤分带及年际变化

以往的淤长型潮滩剖面中长期演变的数值模型<sup>[11-13,19-22]</sup>,能较好地反映潮滩总体的冲淤变化趋势,但潮滩冲淤过程(即剖面年际变化)模拟结果与现场观测结果仍存在一定的差异。对于存在盐沼植被覆盖的潮滩模拟结果主要有两类:一是潮滩剖面的淤积量随时间不断减小,剖面淤积逐年减缓<sup>[11-13]</sup>;二是潮滩剖面达到均衡态后以相同的淤积量逐年向海扩张,剖面持续向海推进<sup>[12,19]</sup>。现场实测结果表明,盐沼区域年淤积量随时间先减缓后稳定,模型结果与此存在趋势性差异,对潮滩剖面冲淤平衡点位的模拟与实际情况也有区别。模型中,盐沼植被对潮滩演变影响的概化较为简单。本文的现场实测结果可以为潮滩演变模型提供参考,加深对盐沼植被在潮滩演变中影响的认识。如:前人得出江苏中部盐沼每年向海推进 50m<sup>[27]</sup>(由盐沼淤积量折算),而本研究发现盐沼向海推进先减缓后稳定。

表 1 2013—2018 年米草前缘变化与滩面冲淤对比

年份	米草前缘与 S1 距离/km	盐沼单宽冲淤量/m <sup>2</sup>	光滩单宽冲淤量/m <sup>2</sup>	潮滩总单宽冲淤量/m <sup>2</sup>
2013 年	2.01	199.26	-280.45	-81.19
2014 年	2.13	148.30	-754.28	-605.98
2015 年	2.24	61.30	-827.35	-766.05
2016 年	2.27	61.28	690.44	751.72

2017 年	2.27	87.19	-512.60	-425.41
2018 年	2.26	68.11	-450.95	382.84

注：“-”表示潮滩受到冲刷

### 3.3 潮间带冲淤区界定及滩涂资源变化

潮滩各处受到潮流、植被等因子作用，盐沼区和光滩区剖面演变呈现不同趋势，为了进一步概化潮滩剖面演变趋势，加深对各区域冲淤变化了解，本文结合 7a 剖面变化规律，提出以盐沼或光滩年均冲淤量的 5% 作为界限，划定淤积或冲刷与稳定的界限。当潮滩某区域冲刷量或淤积量小于临界值时，表明该区域潮滩总体稳定；当冲淤量超过临界值时，表明该区域的冲刷或者淤积加剧。由此，将潮滩剖面由陆向海依次分为基本稳定带、快速淤积带、基本稳定带、快速冲刷带四个部分（图 6），与短期观测发现的剖面“稳定—淤积—稳定—冲刷”的韵律式变化<sup>[5, 23]</sup>具有一致性。潮间带冲淤分带的划分，为淤长型潮滩的数模概化及模型验证提供帮助，有利于直观地了解潮滩演变趋势。

7a 来，盐沼区新增的滩涂土地资源小于光滩区冲刷损失量，整个剖面呈现冲刷态势（图 6 和表 1），长期以来形成的本区域潮间带持续淤涨的理念受到挑战。广袤的潮间带土地不仅是滩涂养殖、动植物生长发育的场所，更是潮滩湿地调节气候、涵养水源等重要的生态服务功能的基础。A% 维持健康滩涂的土地面积保有率，是生态保护中重要的一环<sup>[24, 28]</sup>。为了探究中长期来江苏中部潮滩受到植被生长等因子影响下潮滩土地资源冲淤动态变化，选用滩涂面积保有率（ $T_j$ ）作为计算参数，滩涂面积指平均大潮高潮位线到小潮低潮位线之间的单宽面积（图 6），计算公式如下<sup>[24, 28]</sup>：

$$T_j = \frac{S_j}{S_{2012}} \quad (1)$$

式中： $T_j$  为第  $j$  年滩涂面积保有率； $S_j$  为第  $j$  年滩涂面积； $S_{2012}$  为 2012 年滩涂面积。当  $T_j \geq 0.8$  时，滩涂资源基本稳定；当  $T_j < 0.8$  时，滩涂资源萎缩。经计算，2013—2018 年滩涂面积保有率分别为 0.97、0.93、0.86、0.87、0.84 和 0.81。

结果表明，江苏中部潮滩的滩涂土地资源处于基本稳定的状态，但滩涂土地面积保有率近年来不断降低，至 2018 年滩涂土地面积保有率仅为 0.81，接近滩涂土地资源稳定的临界值。由于光滩区域的大量冲刷，潮滩土地资源正在逐步减少（表 1）。Gong 等<sup>[5]</sup>、张长宽等<sup>[7]</sup>通过已有的短期实测资料，推测未来一段时间江苏中部潮滩潮间带上部仍会保持一定速率的淤积，潮间下带将进一步冲刷，剖面坡度加大，这与本文中长期实测结果是吻合的。结合前期研究的剖面短期演变特征及本次研究结果，推测盐沼的淤积速率将继续维持稳定，而光滩区剖面不断下切，潮滩的滩涂面积保有率将进一步下降，低于 0.8 阈值，滩涂面积资源从稳定变化为萎缩。

## 4. 结论

基于江苏川东港附近潮滩连续 7a（2012 年 10 月—2018 年 11 月）实地观测资料，对比潮滩剖面短历时演变过程，并结合期间盐沼区米草前缘生长变化，得出主要结论如下：

(1) 高滩区域地下过程（土体膨胀、压缩等）对滩面变化起控制作用；米草前缘向海扩张影响 S3-S5 滩面高程变化：S3-S4 滩面高程增长速率随米草向海扩张而减缓，S5 滩面高程受米草生长影响，改变原有的冲淤平衡趋势，不断淤高。

(2) 盐沼淤积量随米草前缘向海生长而逐年减缓，随米草前缘稳定而稳定，米草向海推进对光滩区域演变影响小，潮滩剖面年际冲淤变化受光滩区冲淤量控制。

---

(3) 潮滩剖面自陆向海依次可分为基本稳定带、快速淤积带、基本稳定带、快速冲刷带，整体潮滩剖面呈现冲刷趋势，潮间带中部坡度逐步增大。

(4) 滩涂面积保有量 2012-2018 年逐年降低，接近稳定与萎缩的临界值，应采取积极措施，维护滩涂资源稳定。

#### 参考文献:

- [1] KIRWAN M L, PATRICK MEGONIGAL J. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise [J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 53-60.
- [2] van BELZEN J, van de KOPPEL J, KIRWAN M L, et al. Vegetation recovery in tidal marshes reveals critical slowing down under increased inundation [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15811.
- [3] 龚政, 黄诗涵, 徐贝贝, 等. 江苏中部沿海潮滩对台风风暴潮的响应[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 243-254. (GONG Z, HUANG S H, XU B B, 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))
- [4] SWALES A, REEVE G, CAHOON D R, et al. Landscape evolution of a fluvial sediment-rich *avicennia marina* mangrove forest: insights from seasonal and inter-annual surface-elevation dynamics [J]. *Ecosystems*, 2019, 22(6): 1232-1255.
- [5] GONG Z, JIN C, ZHANG C K, et al. Temporal and spatial morphological variations along a cross-shore intertidal profile, Jiangsu, China [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 144: 1-9.
- [6] ZHU Q, van PROOIJEN B C, WANG Z B, et al. Bed-level changes on intertidal wetland in response to waves and tides: a case study from the Yangtze River Delta [J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 160-172.
- [7] 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 C K, HUANG T T, TAO J F, 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. (in Chinese))
- [8] JIN C, GONG Z, GENG L, et al. Observations of surface and subsurface processes on a saltmarsh in the central Jiangsu Coast (China) [J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85: 296-300.
- [9] LOVELOCK C E, BENNION V, GRINHAM A, et al. The role of surface and subsurface processes in keeping pace with sea level rise in intertidal wetlands of Moreton bay, Queensland, Australia [J]. *Ecosystems*, 2011, 14(5): 745-757.
- [10] WANG G D, WANG M, LU X G, et al. Surface elevation change and susceptibility of coastal wetlands to sea level rise in Liaohe Delta, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 180: 204-211.
- [11] 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(10/11): 1079-1097.

---

[12]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(11/12/13): 1887-1895.

[13]FRIEDRICHS C T. Tidal flat morphodynamics[M]//*Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 137-170.

[14]MUDD S M, D'ALPAOS A, MORRIS J T. How does vegetation affect sedimentation on tidal marshes? Investigating particle capture and hydrodynamic controls on biologically mediated sedimentation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(F3): F03029.

[15]BOUMA T J, TEMMERMAN S, van DUREN L A, et al. Organism traits determine the strength of scale-dependent bio-geomorphic feedbacks: a flume study on three intertidal plant species [J]. *Geomorphology*, 2013, 180/181: 57-65.

[16]张英豪, 赖锡军, 张琳, 等. 风浪作用下水生植物对水流结构的影响: 以太湖中两种典型沉水植物为例[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 441-449. (ZHANG Y H, LAI X J, ZHANG L, et al. Influence of aquatic vegetation on flow structure under wind-driven waves: a case study in Lake Taihu (China) with two typical submerged vegetations [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3):441-449. (in Chinese))

[17]陈杰, 管骷, 蒋昌波. 海啸波作用下泥沙运动:V:红树林影响下的岸滩变化[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2):206-213. (CHEN J, GUAN Z, JIANG C B. Study of sediment transport by tsunami waves: V: influence of mangrove[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(2): 206-213. (in Chinese))

[18]LI R X, YU Q, WANG Y W, et al. The relationship between inundation duration and *Spartina alterniflora* growth along the Jiangsu Coast, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 213: 305-313.

[19]龚政, 白雪冰, 靳闯, 等. 基于植被和潮动力作用的潮滩剖面演变数值模拟[J]. *水科学进展*, 2018, 29(6): 877-886. (GONG Z, BAI X B, JIN C, et al. A numerical model for the cross-shore profile evolution of tidal Flats based on vegetation growth and tidal processes[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(6): 877-886. (in Chinese))

[20]MORRIS J T, SUNDARESHWAR P V, NIETCH C T, et al. Responses of coastal wetlands to rising sea level[J]. *Ecology*, 2002, 83(10): 2869-2877.

[21]FAGHERAZZI S, KIRWAN M L, MUDD S M, et al. Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors [J], *Reviews of Geophysics*, 2012, 50: RG1002.

[22]ZHOU Z, YE Q H, COCO G. A one-dimensional biomorphodynamic model of tidal Flats: sediment sorting, marsh distribution, and carbon accumulation under sea level rise [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 93: 288-302.

[23]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))

[24]苏岫, 索安宁, 宋德瑞, 等. 基于遥感的长江经济带邻近海域滩涂生态承载力评估[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(4):

---

528-536. (SU X, SUO A N, SONG D R, et al. Ecological carrying capacity assessment of tidal flat in the Yangtze River Economic Belt by remote sensing [J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(4): 528-536. (in Chinese))

[25] 宁立新, 马兰, 周云凯, 等. 基于 PSR 模型的江苏海岸带生态系统健康时空变化研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 534-543. (NING L X, MA L, ZHOU Y K, et al. Spatiotemporal variations of ecosystem health of the coastal zone in Jiangsu Province based on the PSR model[J]. China Environmental Science, 2016, 36(2): 534-543. (in Chinese))

[26] 仇传银, 李行, 刘淑安, 等. 长江三角洲滩涂信息的遥感提取及时空变化[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(2): 269-278. (QIU C Y LI X, LIU S A, et al. Monitoring tidal Flats in the Yangtze River Delta using landsat images[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(2): 269-278. (in Chinese))

[27] 高抒, 杜永芬, 谢文静, 等. 苏沪浙闽海岸互花米草盐沼的环境-生态动力过程研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(11): 2339-2357. (GAO S, DU Y F, XIE W J, et al. Environment-ecosystem dynamic processes of *Spartina alterniflora* salt-marshes along the Eastern China coastlines [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2014, 44(11): 2339-2357. (in Chinese))

[28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 资源环境承载能力监测预警技术方法(试行) [EB/OL]. (2016-09-28) [2020-08-20]. [http://ghs.ndrc.gov.cn/gzdt/201609/t20160928\\_820449.html](http://ghs.ndrc.gov.cn/gzdt/201609/t20160928_820449.html). (the National Development and Reform Commission of the people's Republic of China. Monitoring and early warning technology of resources and environment carrying capacity (Trial) [EB/OL]. (2016-09-28) [2020-08-20]. [http://ghs.ndrc.gov.cn/gzdt/201609/t20160928\\_820449.html](http://ghs.ndrc.gov.cn/gzdt/201609/t20160928_820449.html). (in Chinese))