

# 盐沼前缘陡坎韵律性形态特征及其形成过程与机理

赵秧秧<sup>1</sup>, 高 抒<sup>1,2</sup>, 王丹丹<sup>1</sup>, 许 振<sup>1</sup>, 朱 冬<sup>1</sup>, 王晓枫<sup>1</sup>

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093;

2. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093)

**摘要:** 盐沼前缘陡坎是潮滩环境中盐沼与粉砂—淤泥质光滩交界处的独特地貌形态, 研究其形成过程与机理有助于理解盐沼湿地对潮滩发育及其稳定性的影响。根据江苏中部海岸盐城自然保护区核心岸段互花米草盐沼前缘陡坎形态参数(凹槽长度、凹槽宽度和陡坎高度)的分析, 发现不同的形态参数组合对应于不同的陡坎演化阶段。根据陡坎形态特征差异, 可将盐沼前缘陡坎韵律性形态发育过程分为三个阶段, 而这三阶段的交替旋回过程与近岸波向的季节性变化有关。陡坎处的地貌特征与前缘光滩的沉积物特征表明陡坎形态特征形成与波浪作用有关, 且显著的陡坎韵律性形态能够部分地应用边缘波理论来解释。

**关键词:** 盐沼前缘陡坎; 韵律性形态; 边缘波理论; 地貌演化阶段与均衡态; 江苏海岸

DOI: 10.11821/dlxb201403009

## 1 引言

盐沼前缘陡坎位于盐沼与粉砂—淤泥质光滩交界处, 在欧洲西部<sup>[1-8]</sup>和北美洲东部<sup>[9-15]</sup>的部分海岸以及中国长江口北岸<sup>[16-18]</sup>、江苏中部海岸<sup>[19-21]</sup>、废黄河三角洲<sup>[22]</sup>等区域均有分布。Allen<sup>[2, 23]</sup>提出, 盐沼前缘陡坎是垂向沉积速率、相对海平面变化速率以及沉积物压实速率等因素控制下盐沼淤进—蚀退旋回的产物, 水动力条件的改变引起海岸侵蚀, 使得盐沼边缘后退、盐沼前缘陡坎形成、潮间带下部滩面蚀低。然而Gao 和Collins<sup>[3]</sup>发现英国南部海岸盐沼前缘陡坎形成于加积环境, 盐沼滩面和光滩滩面的垂向沉积速率差异而导致交界处坡度增大, 受波浪冲击而形成陡坎, 因此陡坎本身仅代表一种局地冲刷地貌。此外, 盐沼边缘潮沟的形成与摆动也可能促使盐沼前缘陡坎的形成<sup>[21, 24]</sup>。

尽管盐沼前缘陡坎的成因及其形成环境目前尚未达成统一认识, 但盐沼前缘陡坎常被认为是盐沼边缘侵蚀后退的标志<sup>[3, 11, 15, 25]</sup>, 与相对海平面变化、盐沼向海扩张、近岸沉积物堆积、波浪作用与潮差以及盐沼边缘潮沟的形成与摆动等因素有关<sup>[2, 15, 26]</sup>。Allen<sup>[2]</sup>发现Severn 河口盐沼前缘陡坎在波浪和潮流的冲击作用下以崩塌和滑移的方式后退。Schwimmer<sup>[15]</sup>在美国 Delaware 的 Rehoboth 湾西部和 Priestas 和 Fagherazzi<sup>[27]</sup>在美国 Louisiana 西南部的观测均表明, 米草属盐沼前缘陡坎并不都是平直的, 而是在沿岸方向呈不规则或具有一定韵律性的地貌形态。那么, 盐沼前缘陡坎的这种韵律性形态特征是如何形成的? 研究者提出自组织过程和边缘波是盐沼前缘陡坎波切冲沟的可能激发机制<sup>[27]</sup>, 但对陡坎韵律性形态的形成机理没有进行深入探讨。2012年冬季我们在江苏海岸盐城国家级珍禽自然保护区核心区的互花米草盐沼前缘也观测到沿岸方向呈凹槽—冲刷脊相间排列的韵律性

收稿日期: 2013-09-22; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 江苏省自然科学基金重点研究专项 (BK2011012) [Foundation: Natural Science Foundation of Jiangsu, No. BK2011012]

作者简介: 赵秧秧 (1989-), 男, 浙江慈溪人, 硕士研究生, 海洋地质专业。E-mail: yyzhao2013@yeah.net

作者简介: 高抒 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 中国地理学会常务理事 (S110001451M), 主要从事海洋地质学、海岸地貌学、沉积学研究。E-mail: shugao@nju.edu.cn

陡坎形态,与砂砾质海滩的滩尖嘴地貌有形态上的相似之处。关于滩尖嘴的形成、发展与维持,比较有代表性的成因假说主要有边缘波<sup>[28-30]</sup>、地形一流相互反馈的自组织机制<sup>[31-32]</sup>、破波不稳定性<sup>[33]</sup>、沿岸流不稳定性<sup>[34]</sup>、流速凸角的存在<sup>[35]</sup>及波链干涉作用<sup>[36]</sup>等,但目前被研究者较为认可的只有前两种假说<sup>[37-42]</sup>。

边缘波假说认为,入射波因折射而被地形捕获形成边缘驻波,入射波与边缘驻波相叠加,导致波浪上冲流在沿岸方向上有规律地变化,从而引起海滩沿岸泥沙侵蚀有规律地变化<sup>[29, 43]</sup>。而自组织理论<sup>[32]</sup>认为,滩尖嘴地貌是海滩泥沙、地形与波、流的正负反馈作用下形成的:(1)海滩地形与冲流之间的正反馈作用机制使得地形更加不规则;(2)堆积与侵蚀之间的负反馈机制使得滩面发育成滩角。对于江苏海岸盐沼前缘陡坎而言,由于与陡坎相关的凹槽和冲刷脊地形是盐沼海侧边缘不断后退的蚀余产物,地形与冲流之间的负反馈作用不明显,因此自组织机制不适用于解释此类陡坎韵律性形态的形成。

江苏盐城国家级珍禽自然保护区作为中国最大的海岸湿地保护区和面积最广的互花米草分布区域<sup>[44]</sup>,其核心区受人为活动影响最小,发育了典型平原型淤泥质潮滩。此外,尽管盐沼前缘陡坎在长江口北岸、废黄河三角洲等区域已被发现,但江苏盐城自然保护区核心区具有显著韵律性形态的盐沼前缘陡坎尚未受到关注。因此,本文拟以此为研究对象,通过定量刻画其形态特征和分析地貌、沉积特征,结合边缘波假说,探讨陡坎韵律性地形的形成过程与机理。

2 研究区概况

盐城国家级珍禽自然保护区核心岸段位于江苏海岸中部、南黄海辐射沙脊群的北翼,北起新洋港南岸,南至斗龙港北岸,西以西潮河、里道河为界,东至0 m等深线,面积约219 km<sup>2</sup>。受岸外东沙等潮流沙脊的掩蔽作用,发育半封闭的平原型粉砂淤泥质海岸。潮滩宽度较大,仅盐沼湿地就宽达6~9 km,具有明显的盐沼植被分带性(图1),自陆向海依次为芦苇(*Phragmites australis*)、盐蒿(*Suaeda salsa*)、互花米草(*Spartina alterniflora*),盐沼外缘即为光滩。互花米草盐沼与光滩交界处发育陡坎,高0.30~1.20 m,沿岸方向呈凹槽—冲刷脊相间排列的韵律性形态。凹槽底部上覆砂层,深入盐沼的顶部多堆积贝壳碎屑。临近陡坎的互花米草植株多被折断,滩面被蚀低,并出露大量米草根茎;陡坎向岸方向形成宽达30~50 m的贝壳滩。

核心岸段沿海处于盐城北部沿海不规则半日潮和南部沿海规则半日潮的过渡海域,平均潮差约为2 m,潮流具有较为明显的日不等现象<sup>[45]</sup>。潮流强,平均大潮流速大于1.5 m/s,主流向基本与岸线平行<sup>[46]</sup>。根据2009.10-2013.09期间江苏省海洋环境预报监测中心实时预报数据<sup>①</sup>分析,盐城近岸海区全年多以风浪为主的偏南向和偏北向混合浪,偏南浪频率为45%,偏北浪频率为32%,主浪向为SSE和SW,其频率分别为11%和10%,强浪向为NW和S,具有明显的季节性变化特征(图2)。春季盛行偏南向和偏北向浪,主浪向为

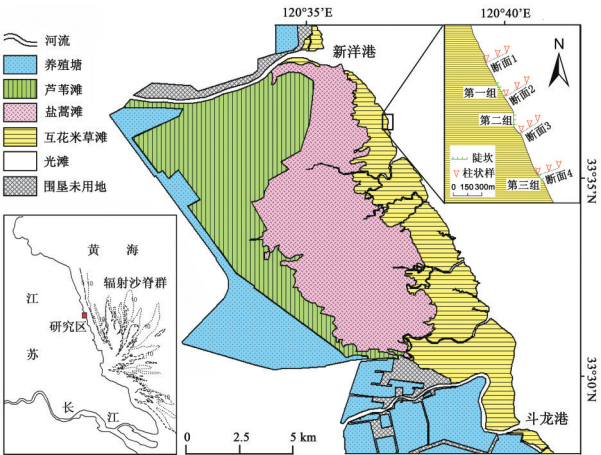


图1 江苏盐城自然保护区海岸研究区位置图  
Fig 1 Study site on the coast adjacent to the Yancheng Nature Reserve, Jiangsu, China

① 江苏省海洋环境监测预报中心网站. <http://www.jsocn.cn/> list. html? ac=gcyb&do=gcyb\_cgby.



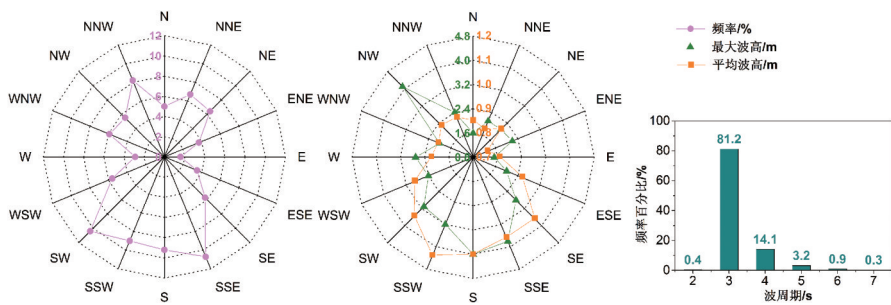


图2 2009-2013年盐城近岸海区波浪要素统计

Fig. 2 Wave climate on the Yancheng coast, based on the statistics of 2009 to 2013

SSE 和 NNE、NNW；夏季盛行偏北向浪，主浪向为 NNE 和 NNW；秋季以偏西南向为主，主浪向为 SW；冬季以偏南向浪为主，主浪向为 SSE。年平均波高 1.0 m，最大波高可达 4.1 m，平均波周期 3.2 s，年际变化不显著。

3 研究方法

3.1 陡坎形态参数的定义

江苏盐城自然保护区核心岸段互花米草盐沼前缘陡坎沿岸线平行展布，呈凹槽—冲刷脊相间排列的韵律性地貌形态 (图 3A/B)。陡坎向海侧是高程相对较低的光滩，其上分布离散的冲刷脊残留体 (图 3C/D)；陡坎向岸侧是高程相对较高的互花米草滩，出露被冲断残留的米草根系和分布宽达 30~50 m 的贝壳滩 (图 3E/F)。我们于 2012 年 12 月 10-13 日测量了三段岸线的陡坎形态参数，包括陡坎前光滩滩面与互花米草滩面的高程差、向岸凹入深槽的长度与宽度、凹槽主轴线和相邻冲刷脊顶端连线的方向。测量的三段岸线的地理位置如图 1 所示，自北向南依次为第一、二、三组陡坎。根据统计学要求，每一段岸线测量沿岸连续分布的 30~50 个向岸凹入的深槽，自北向南三段岸线长度依次为 171 m、122 m 和 79 m。陡坎形态参数的定义如下 (图 4)：陡坎向海凸出的部分称为冲刷脊，各冲刷脊向海侧的顶端连线称为包络线，相邻冲刷脊的包络线长度为凹槽的包络宽度 ( $W_b$ )，相邻冲刷脊的包络线中点到冲刷脊间凹槽向岸侧顶端连线的长度为凹槽的长度 ( $L$ )，包络线中点的滩面高程与凹槽向岸侧顶端滩面高程的差为陡坎高度 ( $H$ )，包络线与凹槽轴线的垂直方向的夹角为包络线偏角 ( $\alpha$ )，则深槽宽度  $W =$

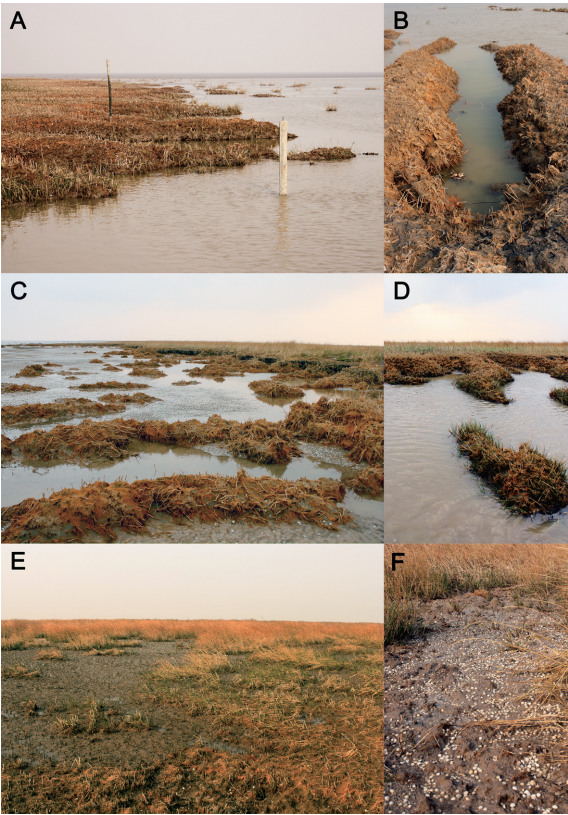


图3 盐沼前缘陡坎处地貌形态

- (A/B) 凹槽—冲刷脊相间排列的韵律性地形；
- (C/D) 陡坎向海侧的光滩及离散冲刷脊残留体；
- (E/F) 陡坎向岸侧的互花米草滩及贝壳堆积

Fig. 3 Morphology of the marsh-edge cliffs (A/B) Rhythmic topography of alternative tough and scouring-ridge; (C/D) Seaward mixed sand-mud flats with isolated scouring-ridge remains; (E/F) Landward salt marshes occupied by *Spartina alterniflora* covered with shell debris.

$W_b \times \cos \alpha_0$

3.2 短柱样采集与分析

2012年12月7-13日在江苏盐城自然保护区核心区的互花米草盐沼前缘陡坎前的光滩上采集4个断面共12根短柱样(图1),断面走向基本垂直于岸线方向,相邻断面间距约400 m,每个断面的3根短柱样在距离陡坎5~205 m的范围内近似等间距分布。以1 cm为间距分样,并进行粒度测试。测试仪器为英国Malvern公司生产的Mastersize 2000型激光粒度仪(测量范围为0.01~2000 μm,粒径间距为0.25 Φ, 粒径分辨率为0.1 Φ, 重复测量的相对误差小于3%)。以0.25 Φ间距输出样品各粒级的百分含量,采用McManus矩法公式计算沉积物粒度参数<sup>[47]</sup>。

3.3 依据边缘波理论的形态参数估算

边缘波理论被用于砂砾质海岸滩尖嘴地貌成因的解释。入射波经岸线地形折射,被地形捕获形成离岸方向呈指数减小、沿岸方向呈正弦变化的边缘驻波<sup>[48-50]</sup>。入射波叠加在边缘驻波之上,使得波浪上冲流沿岸方向上有规律地变化,进而导致沿岸泥沙冲淤有规律地变化:边缘波波腹处侵蚀量大,形成向岸凹入的负地形;边缘波波节处侵蚀量小,形成向海凸出的正地形<sup>[29, 43]</sup>。

在平均坡度角为β的海滩上,边缘波的频散关系<sup>[48]</sup>可表示为:

$$L_e = gT_e^2(2n + 1)\tan\beta/2\pi \tag{1}$$

式中:  $L_e$ 和  $T_e$ 分别是边缘波沿岸波长(m)和波周期(s),  $g$ 为重力加速度( $m/s^2$ ),  $n$ 是节点数。根据边缘波理论,边缘波波长与滩尖间距(凹槽宽度)具有关联性。对于同步边缘波(波周期等于入射波周期),滩尖间距等于边缘波沿岸波长;而对于分谐边缘波(波周期等于入射波的2倍),滩尖间距等于边缘波沿岸波长的1/2。滩尖间距λ与入射波、滩面地形的关系<sup>[29-30]</sup>可表示为:

$$\lambda = m g T_i^2 \tan\beta/\pi \tag{2}$$

式中:  $T_i$ 为入射波的波周期(s),  $m = 1.0$ 或 $0.5$ 分别对应分谐边缘波和同步边缘波。

波浪自外海向岸传播的过程中,水深逐渐减小而受到底床摩擦作用,波高也随之增大。当波峰速度大于波形速度,波浪就会发生破碎。波浪在其破碎之前,波周期几乎保持不变<sup>[51]</sup>。对于坡度很小的粉砂淤泥质潮滩,底床摩擦效应消耗波浪能量,使波高增幅难以达到波浪破碎的程度;但盐沼前缘陡坎处坡度的骤然增大,波浪易在陡坎处破碎。因此,可认为陡坎前的入射波周期等于近岸带海域的波周期。根据江苏省2009.10-2013.09期间的海洋环境预报数据,盐城近岸海域波周期频率分布如图2所示。因此,盐沼前缘的入射波周期取值为3 s。滩面坡度的定义在砂砾质海滩的滩尖嘴与粉砂淤泥质潮滩的陡坎处有所不同。砂砾质海滩的沉积物颗粒较粗,沉积物搬运以推移方式为主,滩面坡度在尖角和凹入处有一定差异;潮滩沉积物的颗粒较细,以悬浮输运为主,滩面坡度在陡坎和凹槽处差异较大。本文将滩面坡度定义为陡坎高度与凹槽长度的比值,即 $\tan\beta = H/L$ 。将滩面坡度和近岸入射波的波周期代入式(2),得到盐沼陡坎韵律性地形的凹槽宽度估算值。

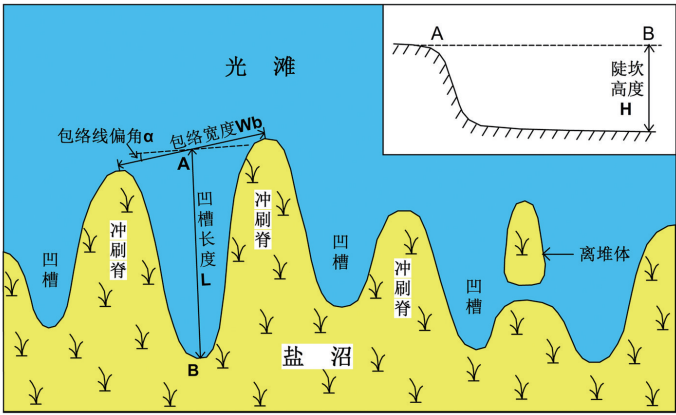


图4 陡坎形态测量参数示意图  
Fig. 4 Definition of the morphological parameters of marsh-edge cliffs

4 研究结果

4.1 盐沼前缘陡坎形态特征

从互花米草盐沼前缘三段岸线的陡坎形态参数(图 5)和各参数的统计值(表 1)可以发现,第一组和第二组陡坎的形态参数特征较为相似,平均凹槽长度分别为 9.08 m 和 7.57 m,平均凹槽宽度分别为 3.10 m 和 3.47 m,平均陡坎高度分别为 0.85 m 和 1.07 m;第一、二组的凹槽长度和陡坎高度明显大于第三组,而三组陡坎的凹槽宽度差异相对较小。这表明第三组陡坎的韵律性形态与第一、二组陡坎存在较大差异,是陡坎韵律性形态的另一种

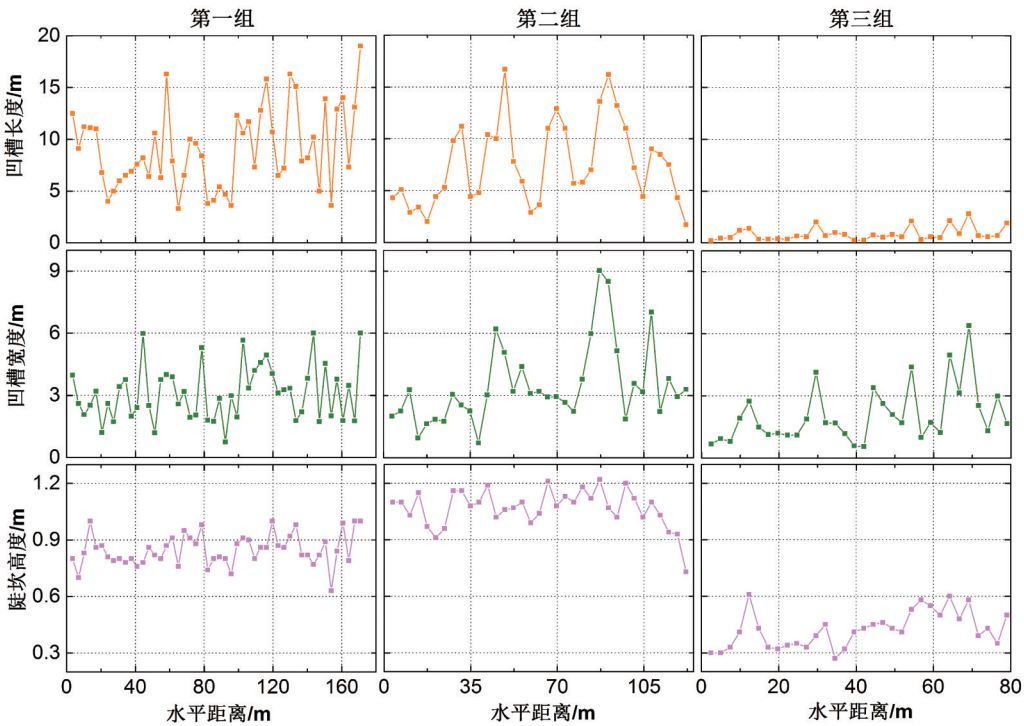


图5 盐沼前缘陡坎形态参数(水平距离指距测量的第一个凹槽的距离)

Fig. 5 Morphological parameters of marsh-edge cliffs. Horizontal axis indicates the distance away from the first measured point

表 1 盐沼前缘陡坎形态参数统计值

Tab. 1 Statistical morphological parameters of the marsh-edge cliffs

形态参数	陡坎组号	统计个数	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m	相对离散度*%
凹槽长度	一	50	19.0	3.30	9.08	3.88	43
	二	35	16.7	1.70	7.57	4.01	53
	三	32	2.80	0.20	0.86	0.65	76
	总计	117	19.0	0.20	6.38	4.81	—
凹槽宽度	一	50	6.01	0.75	3.10	1.32	43
	二	35	9.03	0.70	3.47	1.93	55
	三	32	6.39	0.55	2.06	1.38	67
	总计	117	9.03	0.55	2.93	1.63	—
陡坎高度	一	50	1.00	0.63	0.85	0.08	10
	二	35	1.22	0.73	1.07	0.10	9
	三	32	0.61	0.27	0.42	0.10	23
	总计	117	1.22	0.27	0.80	0.26	—

\*相对离散度 = 标准差/平均值



类型。此外，每组陡坎的凹槽长度和宽度波动大，即相对离散度大，达43%以上，最高76%；而陡坎高度波动相对较小，相对离散度仅为9%~23%。这表明凹槽长度和宽度的空间分异较大，而陡坎高度的空间分异较小。

4.2 陡坎形态参数之间的相关性

盐沼前缘陡坎形态参数 (陡坎高度、凹槽长度与宽度) 之间的相关性 (图6) 显示，三组陡坎的凹槽长度与陡坎高度的线性相关系数分别为0.62、0.45和0.51，在置信度0.01水平 (双侧，下同) 均显著相关；凹槽长度与宽度的线性相关系数分别为0.36、0.57和0.85，除第一组仅在置信度0.05水平上显著相关外，其余两组在置信度0.01水平上显著相关；凹槽宽度与陡坎高度的线性相关系数分别为0.15、0.12和0.53，第一、二组的相关性不显著，只有第三组在置信度0.01水平上显著相关。这表明在陡坎韵律性形态形成过程中凹槽长度变化与陡坎高度、凹槽宽度变化是相关的，但凹槽宽度的变化相对于陡坎高度的变化在不同位置上具有明显差异，就北部岸段的第一、二组陡坎而言，凹槽宽度的变化相对于陡坎陡坎高度的变化是相对独立的，而对于南部岸段的第三组陡坎两者的变化又是相互联系的。这进一步说明第三组陡坎的韵律性形态与第一、二组陡坎处于不同的发育演化阶段。

4.3 陡坎前滩面地貌与沉积物特征

盐沼前缘陡坎前滩面地貌特征与陡坎韵律性形态特征具有密切联系。在第一、二组陡坎所处的岸段，岸线较为平直，凹槽向盐沼滩切入的深度较大，凹槽顶端的陡坎底部堆积

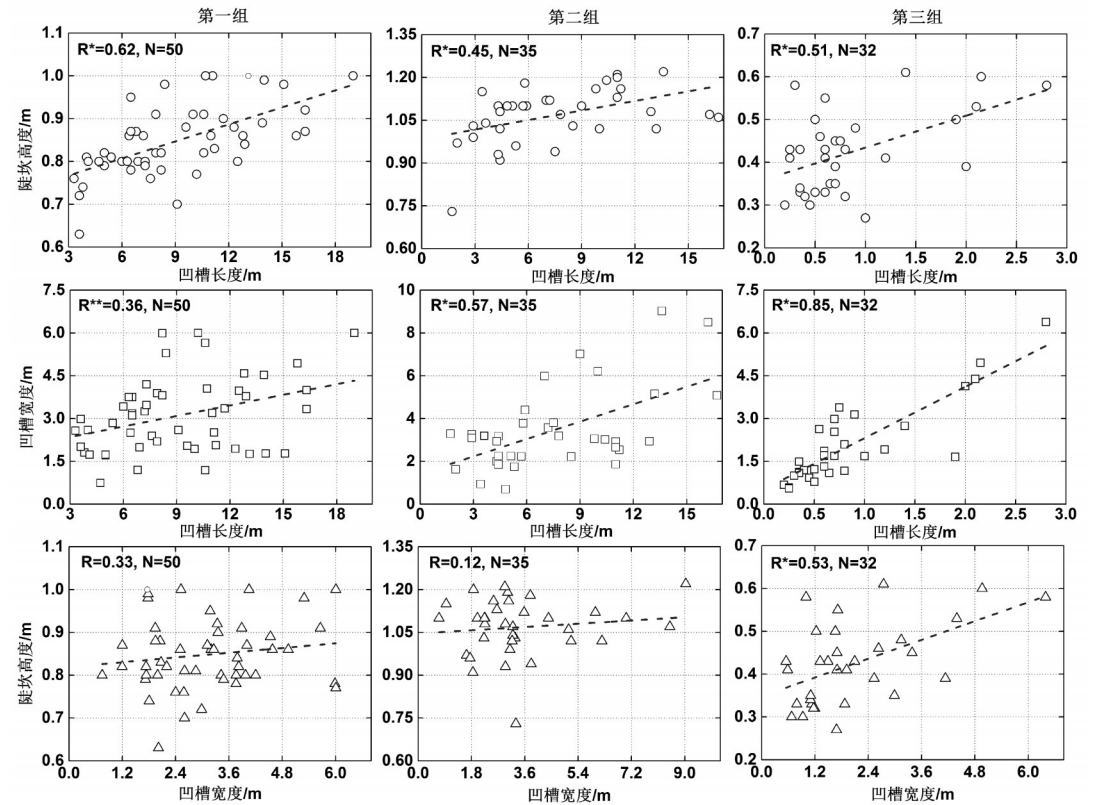


图6 盐沼前缘陡坎形态参数之间的相关性

(上标\*表示在置信度0.01水平上显著相关；上标\*\*表示在置信度0.05水平上显著相关)

Fig 6 Correlation between morphological parameters of marsh-edge cliffs. Superscript \* indicates significant correlation at the confidence level of 0.01. Superscript \*\* indicates significant correlation at the confidence level of 0.05.

贝壳碎屑,形成陡坎立面与凹槽底面之间的坡形堆积体,凹槽底面以砂质沉积物为主,但凹槽内陡坎立面的崩塌使得凹槽底面局部堆积泥质沉积物;陡坎冲刷脊自陆向海蚀低幅度增大,偶尔出现冲刷脊中部被深切的现象;距离陡坎3~5 m范围内在落潮期间仍积水,平均深度为10~20 cm;陡坎前滩面发育不对称波痕。在第三组陡坎所处的岸段,岸线呈不规则弧形,凹槽向盐沼滩切入的深度较小,除在凹槽顶部堆积贝壳碎屑外,在陡坎前滩面也分布有贝壳碎屑;陡坎前不形成积水负地形,滩面沉积物以砂质为主,也发育不对称波痕。

陡坎前光滩4个断面的垂向剖面沉积物特征显示(图7),沉积物粒径在3.37~7.26  $\Phi$ 之间,以细砂或极细砂为主,含砂量为1.21%~89.8%。与自下而上粒径逐渐减小的正常潮滩层序<sup>[52]</sup>不同,陡坎前光滩沉积物粒径总体上自下而上呈增大或保持不变的趋势。垂向剖面上部都是均一分布的砂层,无明显层理,厚度5~40 cm不等;下部偶尔出现0.5~1.0 cm的厚泥层或夹有泥质纹层的泥砂互层层理,在垂向剖面上表现为粒径减小。

4.4 边缘波理论与陡坎形态

根据边缘波理论,分谐边缘波作用下的凹槽宽度是同步边缘波作用下的2倍。根据式(2)计算得到三组陡坎在分谐边缘波作用下的凹槽宽度分别为3.10 m、5.27 m和20.49 m,且各组陡坎的凹槽宽度理论值与实测值在置信度0.01水平(双侧)上都显著相关。第一、二组陡坎的凹槽宽度计算值与实测平均值(分别为3.10 m和3.47 m)较为接近,而第三组陡坎的凹槽宽度计算值比实测值(2.06 m)大一个数量级。对凹槽宽度实测值 $W$ 与计算值 $W_t$ 的比值 $W/W_t$ 及其对数值 $\log_2(W/W_t)$ 作图(图8)。第一、二组陡坎的理论凹槽宽度和实测凹槽宽度的比值在0.5~2区间内分别占57%和53%,在0.25~4区间内分别占87%和81%,而第三组陡坎的理论宽度与实测宽度比在0.5~2区间仅占16%,在0.25~4区间仅占30%。因此,第一、二组陡坎的凹槽宽度的计算值与实测值是基本一致的,而第三组陡坎凹槽宽度计算值与实测值差异较大。

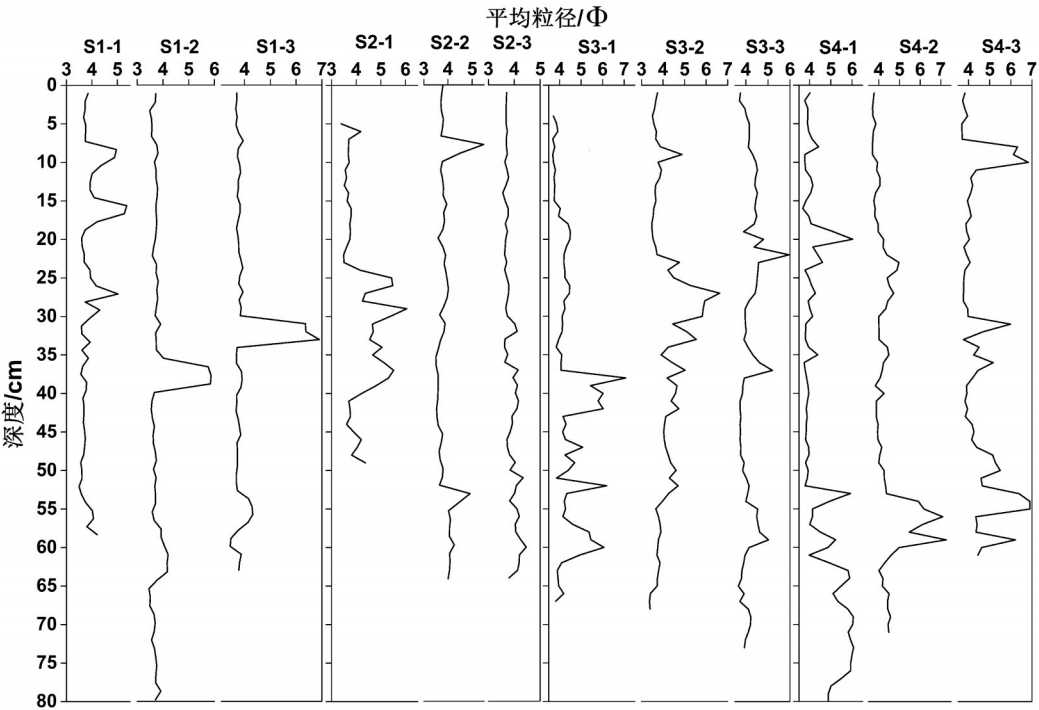


图7 陡坎前的垂向剖面沉积物特征

Fig. 7 Sediment characteristics in tidal flat profiles before marsh-edge cliffs

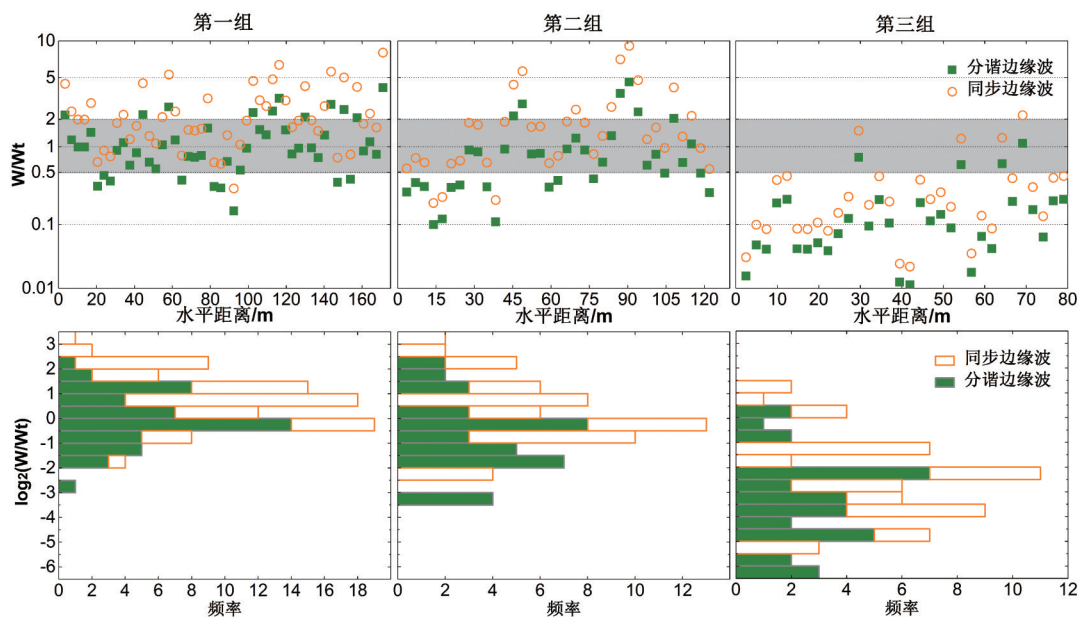


图 8 凹槽宽度实测值与理论值的对比  
Fig. 8 Comparisons of measured trough widths and calculated trough widths under edge wave theory

5 讨论

5.1 波浪作用对陡坎形成的影响

潮滩是在细颗粒沉积物供应充足、以潮流作用为主要水动力的条件下形成的海岸地貌类型<sup>[52-53]</sup>。由于潮滩具有宽广的潮间带和缓和的坡度，在江苏中部海岸潮间带宽度最大超过 10 km，平均坡度仅 0.2%<sup>[54-55]</sup>，因此，波浪从外海向潮间带上部传播的过程中受底床摩擦力的作用逐渐消耗能量，而不至于发生破碎。然而互花米草等植被在潮间带的引种定植，使得盐沼湿地的生态位向海延伸<sup>[56-57]</sup>；同时互花米草对水流的阻挡、波浪能量的衰减以及悬浮泥沙的捕获使得互花米草盐沼滩面的沉积速率远大于粉砂—淤泥质光滩<sup>[58-65]</sup>，因此，在盐沼与光滩的边界在向海移动的过程中，盐沼和光滩滩面的沉积作用和高程产生不连续，从而使两者交界处的滩面坡度增大而易受高能波浪的冲击形成陡坎<sup>[3, 5, 8, 60, 66-67]</sup>；波浪作用是盐沼前缘陡坎侵蚀和崩塌以致盐沼边缘后退的主要控制因素<sup>[4-6, 25, 68-70]</sup>。Tonelli 等人<sup>[71]</sup>通过耦合 Boussinesq 非线性浅水方程数值模拟波浪作用对盐沼边缘的影响，结果显示波浪对盐沼边缘的作用力取决于潮位，波浪对盐沼陡坎的作用强度随潮位上升而增大，直到盐沼边缘滩面恰好被淹没时，波浪在陡坎处破碎而能量耗散最大。此外，当陡坎接近直立时能够捕获大量波能而使陡坎受到的波浪作用力最大<sup>[67, 71]</sup>。Francalanci 等人<sup>[72]</sup>通过水槽实验模拟了潮周期内风浪作用下盐沼边缘陡坎的不稳定性和后退，认为陡坎的不稳定与植物根系的生长、岸滩顶部张裂的形成以及波浪冲击力有关。Priestas 和 Fagherazzi<sup>[27]</sup>通过分析波切冲沟内的声学多普勒流速仪测得的波浪数据，发现周期 4~6 s 的波浪产生的强冲流侵蚀冲沟顶部而促使冲沟发生溯源侵蚀。

江苏盐城自然保护区互花米草盐沼边缘滩面、陡坎形成的凹槽顶部以及第三组陡坎所在位置的陡坎前光滩上富集了大量的贝壳碎屑，而贝壳只有在一定强度的激浪作用下从潮滩中挖掘出来并发生破碎，易于被潮流携带向潮滩上部输运<sup>[73]</sup>，因此陡坎附近的贝壳碎屑堆积(体)是波浪在此处破碎而耗散大量波能，从而使水体中携带的贝壳碎屑快速堆积而



形成。此外,陡坎前光滩上层覆盖的粗颗粒砂质沉积物也是波浪作用的产物。在粉砂—淤泥质潮滩,“波浪掀沙、潮流输沙”的基本动力过程<sup>[74]</sup>和“冲刷延迟”、“沉降延迟”的泥沙输运模式<sup>[75-76]</sup>,使得泥沙在输运过程中产生横向分选,从而形成沉积物的带状分布格局,即自海向陆依次为粉沙滩、泥砂混合滩、盐蒿泥滩<sup>[54,77]</sup>。因此,在潮滩正常的沉积层序中沉积物粒径是自下而上逐渐减小的<sup>[52]</sup>。然而,陡坎前光滩上表层覆盖的无层理均匀砂层以及沉积物粒径总体自下而上粗化的趋势(图8)并不是潮滩正常沉积作用的产物,而是由波浪作用增强所引起的,与Prietas和Fageherazzi<sup>[27]</sup>观测到的陡坎处波浪作用以及Tonelli等<sup>[71]</sup>数值模拟的陡坎处波浪作用最强的结果是相一致的。因此,盐沼前缘陡坎处存在强烈的波浪冲击与破碎,且波浪作用对陡坎的形成演化及其形态发育是至关重要的。

边缘波理论最初是用来解释砂砾质海岸滩尖嘴地貌的形成机理。当波浪以激破波在极低能的海滩上破碎时,滩角的形成与边缘驻波有关<sup>[28]</sup>,且这种关系已被实验所证实<sup>[29,78]</sup>。将边缘波理论用于解释陡坎韵律性形态的形成,对于第一、二组陡坎是基本适用的。第一、二组陡坎的凹槽宽度绝对值较大、相对离散度较小(表1),且凹槽宽度与凹槽长度、陡坎高度的相关性不十分显著(图6),这与边缘波对陡坎韵律性地形的作用是一致的。当边缘波作用于陡坎时,与入射波叠加在波腹处侵蚀陡坎形成向岸凹入的深槽,因此仅凹槽宽度受边缘波沿岸波长控制,而凹槽长度和陡坎高度受波浪作用时间和强度、陡坎处米草根系对沉积物的保护作用等因素影响<sup>[2,15,27]</sup>。边缘波理论下第一、二组陡坎凹槽宽度与实测值显著相关,且同处一个数量级,似乎说明边缘波理论所涉及的机理能够解释陡坎韵律性形态的形成。然而第三组陡坎的凹槽长度与宽度、陡坎高度绝对值较小,韵律性形态发育不显著,且边缘波理论下的凹槽宽度比实测值大一个数量级,因此第三组陡坎的形态特征形成不能直接用边缘波理论解释。

第三组陡坎的韵律性形态与边缘波理论预测值的差异可能与该地点陡坎韵律性形态所处的发育阶段有关。研究区的岸线后退和波浪作用强度是自北而南减小的<sup>[22,77]</sup>,第三组陡坎处于形成的较早阶段,陡坎前滩面还较宽,波浪作用与冲刷凹槽形态之间尚未达到均衡状态,而边缘波理论是针对砂砾质海滩均衡态的。第一、二组陡坎所在地点开敞程度高,波浪作用较强,因此陡坎形态动态变化快,易于达到均衡态。此外,应用边缘波理论解释盐沼前缘陡坎韵律性陡坎形成机理只是一个尝试,毕竟互花米草盐沼与砂砾质海滩有很大的差异,其地貌对波浪作用的响应也会有不同,如陡坎侵蚀后退受到米草根系的固结作用发生边缘崩塌等后退形式。因此,今后需要进一步从陡坎边缘波浪场、沉积动力学等角度进行深入探讨。

## 5.2 韵律性陡坎形态演化的周期性

受相对海平面上升速率、盐沼和光滩滩面的垂向沉积速率、波浪与潮流作用等因素的影响,盐沼前缘陡坎以崩塌、滑移或底切悬垂等形式发生侵蚀后退<sup>[2,15,25-26,60]</sup>。在盐沼前缘陡坎侵蚀后退的过程中,其韵律性形态也在不断发生变化。根据2012年12月和2013年4月、9月在江苏盐城自然保护区核心岸段的实地观测,结合图5和表1的陡坎形态参数特征,可将盐沼前缘韵律性陡坎形态的发育过程分为三个阶段:(1)第一阶段是陡坎韵律性形态形成的初期。盐沼前缘植被受波浪作用而发生倒伏、折断,盐沼边缘滩面蚀低,在盐沼前缘受边缘驻波作用形成韵律性排列的小型凹槽,进而此时单个凹槽的长度、宽度和陡坎高度较小,如第三组陡坎所示。(2)第二阶段是陡坎韵律性形态发育显著的成熟期。在波浪和潮流的冲刷作用下,凹槽内陡坎下部沉积物由于植被根系少而率先被侵蚀,上部沉积物受根系固结保护而以块体倒塌的形式脱离陡坎,在凹槽顶部快速后退的同时凹槽宽度也因侧向侵蚀而有所增大<sup>[27]</sup>,使冲刷脊的宽度逐渐减小。这个阶段的陡坎韵律性形态如第一、二组陡坎所示,凹槽长度和宽度较大,陡坎高度相对稳定。(3)第三阶段陡坎韵律性形态进一步发育。冲刷脊受波浪长时间冲刷作用发生侵蚀后退,同时凹槽内堆积粗颗粒沉

积物,局部冲刷脊被截断,使相邻凹槽发生合并,陡坎前形成“离堆”的孤立蚀余形态。

根据野外观测,从2012年12月到2013年4月,陡坎韵律性形态变化不大,第一、二组陡坎基本维持在图5和表1所示的形态特征;而2013年3月到9月期间,第一、二组陡坎所在岸段发生明显的侵蚀后退,最大后退距离达40 m左右,陡坎形态与图5和表1所示的第三组陡坎相似。因此,陡坎韵律性形态演化具有明显的季节性,这与波向的季节性变化有关。研究区秋季波向以西南向为主,平均波浪作用较强,适合形成显著的陡坎韵律性形态;夏季的偏北向浪以及风暴潮作用对陡坎韵律性形态具有破坏作用,且易造成陡坎的快速后退。陡坎韵律性形态在一年四季间的发育演化可对应于上述三阶段的旋回过程。

## 6 结论

(1) 江苏盐城自然保护区核心岸段互花米草盐沼前缘陡坎的韵律性形态存在两种类型,分别对应盐沼前缘陡坎韵律性发育的不同演化阶段。

(2) 根据陡坎形态特征差异,可将盐沼前缘陡坎韵律性形态发育过程分为三个阶段。第一阶段形成韵律性形态雏形,第二阶段凹槽宽度和长度增大使陡坎呈现显著的韵律性形态,与优势波浪之间达到均衡态,第三阶段冲刷脊蚀退,伴随着凹槽内粗颗粒沉积物充填和孤立蚀余形态的形成。这三个阶段可以周期性地再现,与近岸波浪的季节性变化有关。

(3) 陡坎韵律性形态能够部分地应用边缘波理论来解释。进一步的研究可基于对陡坎形态的长期观测,结合陡坎边缘波浪场和沉积动力学特征,通过数值模拟方法分析陡坎韵律性形态的形成机理及陡坎后退与岸线稳定性的关系。

**致谢:**李润祥参与野外数据采集工作,于谦、周亮、杨阳、韩卓尘在问题讨论与写作过程中给予宝贵建议,谨以致谢。

## 参考文献 (References)

- [1] van Eerd M M. Salt marsh cliff stability in the Oosterschelde. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1985, 10(2): 95-106.
- [2] Allen J R L. Evolution of salt-marsh cliffs in muddy and sandy systems: A qualitative comparison of British West-Coast estuaries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14(1): 85-92.
- [3] Gao Shu, Collins M. Formation of salt-marsh cliffs in an accretional environment, Christchurch Harbour, Southern England//Wang P X, Berggren W A. *Proceedings of the 30th International Geological Congress*, Beijing, China, 1997, 13: 95-110.
- [4] van der Wal D, Pye K. Patterns, rates and possible causes of saltmarsh erosion in the Greater Thames area (UK). *Geomorphology*, 2004, 61(3): 373-391.
- [5] van de Koppel J, van der Wal D, Bakker J P et al. Self-organization and vegetation collapse in salt marsh ecosystems. *The American Naturalist*, 2005, 165(1): E1-E12.
- [6] Pedersen J B T, Bartholdy J. Exposed salt marsh morphodynamics: An example from the Danish Wadden Sea. *Geomorphology*, 2007, 90(1): 115-125.
- [7] Quaresma V S, Bastos A C, Amos C L. Sedimentary processes over an intertidal flat: A field investigation at Hythe flats, Southampton Water (UK). *Marine geology*, 2007, 241(1): 117-136.
- [8] Callaghan D P, Bouma T J, Klaassen P et al. Hydrodynamic forcing on salt-marsh development: Distinguishing the relative importance of waves and tidal flows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 89(1): 73-88.
- [9] Redfield A C. Development of a New England salt marsh. *Ecological Monographs*, 1972, 42: 201-237.
- [10] Coulombe B D. Shore erosion and coastal processes along the eastern shore of Chesapeake Bay, Maryland [D]. Newark: University of Delaware, 1986: 132p.
- [11] Phillips J D. Coastal submergence and marsh fringe erosion. *Journal of Coastal Research*, 1986, 2: 427-436.
- [12] Finkelstein K, Hardaway C S. Late Holocene sedimentation and erosion of estuarine fringing marshes, York River, Virginia. *Journal of Coastal Research*, 1988, 4(3): 447-456.

- [13] Downs L L, Nicholls R J, Leatherman S P et al. Historic evolution of a marsh island: Bloodsworth Island, Maryland. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10: 1031-1044.
- [14] Wray R D, Leatherman S P, Nicholls R J. Historic and future land loss for upland and marsh islands in the Chesapeake Bay, Maryland, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11: 1195-1203.
- [15] Schwimmer R A. Rates and processes of marsh shoreline erosion in Rehoboth Bay, Delaware, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 2001, 17(3): 672-683.
- [16] Yang Shilun, Ding Pingxing, Zhu Jun et al. Tidal flat morphodynamic processes of the Yangtze Estuary and their engineering implications. *China Ocean Engineering*, 2000, 14(3): 307-320.
- [17] Zhang Zhenke, Xie Li, Cong Ning et al. Recent morphological changes of tidal flat at Yuantuojiang Point, estuary of the north branch of the Yangtze River. *Geographical Research*, 2010, 29(5): 909-916. [张振克, 谢丽, 丛宁 等. 近期长江北支口门圆陀角附近滩涂地貌动态变化. *地理研究*, 2010, 29(5): 909-916.]
- [18] Xie Li, Zhang Zhenke, Zhang Yunfeng et al. Sedimentation and morphological changes at Yuantuojiang Point, estuary of the North Branch, Changjiang River. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(2): 24-34.
- [19] Shen Yongming, Zhang Renshun, Wang Yanhong. The tidal creek character in salt marsh of *Spartina alterniflora* Loisel on strong tidal coast. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 520-527. [沈永明, 张忍顺, 王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征. *地理研究*, 2003, 22(4): 520-527.]
- [20] Zhang Zhenglong. Response of the development of tidal creeks to human activities in inner radial sandbank [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2004: 25-30. [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: 25-30.]
- [21] Zhang Renshun, Shen Yongming, Lu Liyun et al. Formation of *Spartina alterniflora* salt marsh on Jiangsu coast, China. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(4): 358-366. [张忍顺, 沈永明, 陆丽云 等. 江苏沿海互花米草 (*Spartina alterniflora*) 盐沼的形成过程. *海洋与湖沼*, 2005, 36(4): 358-366.]
- [22] Gao Shu. Erosion of old Yellow River Delta in northern Jiangsu and coast protection. *Coastal Engineering*, 1989, 8(1): 37-42. [高抒. 废黄河口海岸侵蚀与对策. *海岸工程*, 1989, 8(1): 37-42.]
- [23] Allen J R L. Salt-marsh growth and stratification: A numerical model with special reference to the Severn Estuary, southwest Britain. *Marine Geology*, 1990, 95(2): 77-96.
- [24] Pringle A W. Erosion of a cyclic saltmarsh in Morecambe Bay, north-west England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1995, 20(5): 387-405.
- [25] Mariotti G, Fagherazzi S. A numerical model for the coupled long-term evolution of salt marshes and tidal flats. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: F01004, doi: 10.1029/2009JF001326.
- [26] Schwimmer R A, Pizzuto J E. A model for the evolution of marsh shoreline. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(5): 1026-1035.
- [27] Priestas A M, Fagherazzi S. Morphology and hydrodynamics of wave-cut gullies. *Geomorphology*, 2011, 131: 1-13.
- [28] Komar P D. Observations of beach cusps at Mono Lake, California. *Geological Society of America Bulletin*, 1973, 84 (11): 3593-3600.
- [29] Guza R T, Inman D L. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(21): 2997-3012.
- [30] Inman D L, Guza R T. The origin of swash cusps on beaches. *Marine Geology*, 1982, 49(1): 133-148.
- [31] Russell R J, McIntire W G. Beach cusps. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76(3): 307-320.
- [32] Werner B T, Fink T M. Beach cusps as self-organized patterns. *Science*, 1993, 260(5110): 968-971.
- [33] Cloud P E. Beach cusps: Response to Plateau's rule? *Science*, 1996, 154(3751): 890-891.
- [34] Schwartz M L. Theoretical approach to the origin of beach cusps. *Geological Society of America Bulletin*, 1972, 83 (4): 1115-1116.
- [35] Gorycki M A. Sheetflood structure: mechanism of beach cusp formation and related phenomena. *Journal of Geology*, 1973, 81: 109-117.
- [36] Darlymple R A, Lanan G A. Beach cusps formed by intersecting waves. *Geological Society of America Bulletin*, 1976, 87(1): 57-60.
- [37] Allen J R L, Psuty N P, Bauer B O et al. A field data assessment of contemporary models of beach cusp formation. *Journal of Coastal Research*, 1996, 12(3): 622-629.
- [38] Holland K T, Holman R A. Field observations of beach cusps and swash motions. *Marine Geology*, 1996, 134: 77-93.
- [39] Masselink G, Pattiaratchi C B. Morphological evolution of beach cusp morphology and associated swash circulation patterns. *Marine Geology*, 1998, 146: 93-113.
- [40] Coco G, O'Hare T J, Huntley D A. Beach cusps: A comparison of data and theories for their formation. *Journal of Coastal Research*, 1999, 15(3): 741-749.
- [41] Coco G, Huntley D A. Regularity and randomness in the formation of beach cusp. *Marine Geology*, 2001, (178): 1-9.



- [42] Coco G, Burnet T K, Werner B T. Test of self-organization in beach cusp formation. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C3): 3101, doi: 10.1029/2002JC001496.
- [43] Guza R T, Bowen A J. On the amplitude of beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(C5): 4125-4132.
- [44] Shen Yongming. The study of the function of the wetlands of *Spartina alterniflora* manpower salt marsh in Jiangsu. *Ecological Economy*, 2001, (9): 72-74. [沈永明. 江苏沿海互花米草盐沼湿地的经济、生态功能. *生态经济*, 2001, (9): 72-74.]
- [45] Guan Daoming. *Coastal Wetlands in China*. Beijing: China Ocean Press, 2012. [关道明. *中国滨海湿地*. 北京: 海洋出版社, 2012.]
- [46] Zhang Renshun. Characteristics of tidal current and sedimentation of suspended load on tidal mud flat in Jiangsu Province. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1986, 17(3): 235-245. [张忍顺. 江苏省淤泥质潮滩的潮流特征及悬移质沉积过程. *海洋与湖沼*, 1986, 17(3): 235-245.]
- [47] Jia Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuan. Grain-size parameters derived from graphic and moment methods: A comparative study. *Oceanologica et Limnologia Sinica*, 2002, 33(6): 577-582. [贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比. *海洋与湖沼*, 2002, 33(6): 577-582.]
- [48] Eckart C. Surface waves on water of variable depth. *Wave Rep.* 100, Scripps Institute of Oceanography, Ref. 51-12, University of California, La Jolla, 1951.
- [49] Ursell F. Edge waves on a sloping beach. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1952, 214: 79-97.
- [50] Bowen A J, Inman D L. Edge waves and crescentic bars. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(36): 8662-8671.
- [51] Holthuijsen L H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [52] Gao Shu. Geomorphology and sedimentology of tidal flats//Perillo G M E, Wolanski E, Cahoon D et al. *Coastal Wetlands: An Ecosystem Integrated Approach*. Amsterdam: Elsevier, 2009: 295-316.
- [53] Klein G deV. *Intertidal flats and intertidal sand bodies*//Davis R A. *Coastal Sedimentary Environments*. 2nd ed. New York: Springer, 1985.
- [54] Ren Mei'e. *Comprehensive Investigation of the Coastal Zone and Tidal Flat Resources of Jiangsu Province*. Beijing: China Ocean Press, 1986: 110-119. [任美铎. 江苏省海岸带与海涂资源综合调查(报告). 北京: 海洋出版社, 1986: 110-119.]
- [55] Zhu Dakui, Ke Xiankun, Gao Shu. Tidal flat sedimentation of Jiangsu coast. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1986, 4(3): 19-27. [朱大奎, 柯贤坤, 高抒. 江苏海岸潮滩沉积的研究. *黄渤海海洋*, 1986, 4(3): 19-27.]
- [56] Zhong Chongxin, Zhuo Rongzong. *Spartina anglica* was imported into China for twenty years. *Journal of Nanjing University (Research Advances in Spartina: Achievements of Past 22 Years)*, 1985, 40(2): 31-35. [仲崇信, 卓荣宗. 大米草在我国的二十二年. *南京大学学报(米草研究进展: 22年来的研究成果论文集)*, 1985, 40(2): 31-35.]
- [57] Xu Guowan, Zhuo Rongzong. Preliminary studies of introduced *Spartina alterniflora* Loisel in China (I). *Journal of Nanjing University (Research Advances in Spartina: Achievements of Past 22 Years)*, 1985, 40(2): 212-225. [徐国万, 卓荣宗. 我国引种互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)的初步研究(I). *南京大学学报(米草研究进展: 22年来的研究成果论文集)*, 1985, 40(2): 212-225.]
- [58] Esselink P, Dijkema K S, Reents S et al. Vertical accretion and profile changes in abandoned man-made tidal marshes in the Dollard estuary, the Netherlands. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14: 570-582.
- [59] Yang Shilun. The role of *Scirpus* marsh in attenuation of hydrodynamics and retention of fine sediment in the Yangtze estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 47: 227-233.
- [60] Allen J R L. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(12): 1155- 1231.
- [61] Yang Shilun, Shi Zhong, Zhao Qingying. Influence of tidal marsh vegetations on hydrodynamics and sedimentation in the Changjiang Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 75-80. [杨世伦, 时钟, 赵庆英. 长江口潮沼植物对沉积动力过程的影响. *海洋学报*, 2001, 23(4): 75-80.]
- [62] Sanchez J M, SanLeon D G, Izco J. Primary colonization of mudflat estuaries by *Spartina maritima* (Curtis) Fernald in northwest Spain: vegetation structure and sediment accretion. *Aquatic Botany*, 2001, 59: 15-25.
- [63] Wang Aijun, Gao Shu, Jia Jianjun. Impacts of *Spartina alterniflora* on sedimentary and morphological evolution of tidal salt marshes of Jiangsu, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(1): 92-99. [王爱军, 高抒, 贾建军. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响. *海洋学报*, 2006, 28(1): 92-99.]
- [64] Le Hir P, Monbet Y, Orvain F. Sediment erodability in sediment transport modelling: Can we account for biota effects? *Continental Shelf Research*, 2007, 27: 111-1142.
- [65] Gedan K B, Kirwan M L, Wolanski E et al. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: Answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 2011, 106(1): 7-29.
- [66] Pethick J S. Long-term accretion rates on tidal salt marshes. *Journal of Sedimentary Research*, 1981, 51: 571-577.

- [67] Fagherazzi S, Kirwan M L, Mudd S M et al. Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50: RG1002, doi: 10.1029/2011RG000359.
- [68] Möller I, Spencer T, French J R et al. Wave transformation over salt marshes: A field and numerical modelling study from North Norfolk England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 49: 411-426.
- [69] Möller I. Quantifying saltmarsh vegetation and its effects on wave dissipation: Results from a UK east coast saltmarsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 69: 337-351.
- [70] Feagin R, Lozada-Bernard S M, Ravens T M et al. Does vegetation prevent wave erosion of salt marsh edges? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106: 10109-10113.
- [71] Tonelli M, Fagherazzi S, Petti M. Modeling wave impact on salt marsh boundaries. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C09028), doi: 10.1029/2009JC006026.
- [72] Francalanci S, Bondoni M, Rinaldi M et al. Ecomorphodynamic evolution of salt marshes: Experimental observations of bank retreat processes. *Geomorphology*, 2013, 195: 53-65.
- [73] Wang Ying, Zhu Dakui. *Marine Geomorphology*. Beijing: Higher Education Press, 1984. [王颖, 朱大奎. 海岸地貌学. 北京: 高等教育出版社, 1984.]
- [74] Cao Zhude, Wang Guifen. Numerical simulation of sand transport by wave and tide. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(1): 107-118. [曹祖德, 王桂芬. 波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟. 海洋学报, 1993, 15(1): 107-118.]
- [75] Postma H. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1961, 1(1): 148-190.
- [76] McCave I N. Deposition of fine-grained suspended sediment from tidal currents. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(21): 4151-4159.
- [77] Zhu Dakui, Xu Tingguan. The coast development and exploit of middle Jiangsu. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition*, 1982, 18(3): 799-814. [朱大奎, 许廷官. 江苏中部海岸发育和开发利用问题. 南京大学学报: 自然科学版, 1982, 18(3): 799-814.]
- [78] Kaneko A. Formation of beach cusp in a wave tank. *Coastal Engineering*, 1985, 9(1): 81-98.

## Characteristics and formation mechanisms of the rhythmic morphology of salt-marsh edge cliffs

ZHAO Yangyang<sup>1</sup>, GAO Shu<sup>1,2</sup>, WANG Dandan<sup>1</sup>,  
XU Zhen<sup>1</sup>, ZHU Dong<sup>1</sup>, WANG Xiaofeng<sup>1</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Marsh-edge cliffs represent a unique geomorphological unit at the border of marsh vegetation and the intertidal mud flat. Research on the processes and mechanisms for the formation of salt-marsh marginal cliffs will improve our understanding of the influence of salt marshes on tidal flat growth and stability. Based on the results obtained from the measurements and analyses of morphological parameters of salt-marsh cliffs in the Yancheng Nature Reserve, central Jiangsu coasts, during December 2013, the development of the rhythmic morphology associated with the marsh cliff may be divided into three stages. These stages of long-term evolution present cyclical patterns and are related to seasonal changes in wave conditions. Furthermore, the formation of significantly rhythmic features of salt-marsh marginal cliffs may be explained partly by the theory of standing edge waves. In the future, numerical modeling can be applied to investigate the formation mechanisms of marsh-edge cliffs associated with such rhythmic features, in combination with *in situ* measurements for wave climates and sediment dynamics.

**Key words:** marsh-edge cliffs; rhythmic morphology; edge wave theory; geomorphological evolution stages and equilibrium; Jiangsu coast