

淤泥质光滩-盐沼过渡带波浪衰减的观测研究

以长江口崇明东滩为例

史本伟¹, 杨世伦^{1*}, 罗向欣¹, 徐晓君¹

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

关键词: 波浪; 盐沼; 光滩; 浪潮仪; 衰减速率

中图分类号: TV148+.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2010)02-0174-05

1 引言

波浪是海岸环境中最重要的动力条件之一。无论就泥沙起运、搬运和堆积的沉积动力学而言^[1], 还是从海岸防护的角度考虑^[2], 波浪都是不可缺少的动力因子。由沉积物组成的潮间带分布在世界海岸的许多岸段^[3]。由于黄河、长江等大河有大量细颗粒泥沙来源, 我国有广泛发育的淤泥质潮间带, 其中尤以连绵近千千米的江苏-上海潮间带著称于世。要深入认识潮间带(特别是开敞型潮间带)的冲淤过程, 必须考虑波、流的共同作用^[1]。要在确保海堤安全的前提下降低海堤的设计和建造成本, 也需要了解堤外波浪的衰减规律。因此, 潮间带波浪衰减的研究受到学术和工程界的高度重视。美国的研究表明, 波浪进入互花米草(*Spartina alterniflora*)盐沼 20~30 m 距离后波高降低 71%, 波能损失 92%~100%^[2,4]。以英国盐沼为对象的研究认为, 80 m 宽的盐沼植物能使波高降低 40% (物理模型试验)^[5]。对英格兰北诺福克地区的盐沼与相邻光滩的野外观测和数学模拟实验发现, 波浪经过 197 m 长的光滩, 有效波高减低 15.29%, 波能减少 28.52%; 波浪经过 180 m 长的盐沼, 波高降低 60.96%, 波能减少 82.05%^[2]。对长江口海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)沼泽前缘的初步观测表明: 在植物冠顶

被淹没之前, 波浪传入沼泽 10 m 后波高和波能分别损失 57% 和 81%; 当植物冠顶被淹没之后, 波浪的损失十分有限^[6]。总之, 尽管波浪在光滩和在盐沼上传播时都有能量损失, 但是波浪在盐沼中的衰减比在光滩上的衰减更加明显。

海岸波浪研究有现场观测、水槽试验和数值模拟三种途径。前者更接近复杂的自然状况, 因而更值得重视。对海岸浅水区域波浪的观测研究(尽管已经做了一些工作)还远远不够, 原因有两方面: (1) 不同地区的海岸自然条件(沉积物组成、地貌背景、植被状况、风况、潮况)往往差异显著, 一个地区的研究结果往往不能或不能完全代表其他地区的情况; (2) 观测仪器的局限性, 对于适用于浅水的、便携式的、高精度的波浪观测仪器(或由于其价格昂贵)难以购买, 并且对于波浪资料的后处理非常耗时、耗力。海岸浅水区波浪的自动观测研究十分少见^[1,7-9], 相比之下, 流速、流向的自动观测要丰富得多。利用先进的测波仪进行不同特点海岸波浪衰减观测研究是当前研究海岸动力的发展趋势之一。

本文以开敞型长江口崇明东滩潮间带为实验场所, 对下列三方面进行研究: (1) 波浪的向岸衰减特征; (2) 盐沼植被对波浪衰减的贡献; (3) 波高/波能密度与水深的关系。

收稿日期: 2009-12-31; 修订日期: 2010-03-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671017); 国家自然科学基金委员会创新群体项目(40721004); 上海市科学技术委员会重点基金项目(07DJ14003-01); 国家科学技术部中荷合作项目(2008DFB90240)。

作者简介: 史本伟(1979—), 男, 河南省商丘市人, 博士生, 从事河口海岸动力沉积方面的研究。E-mail: shibenwei2005@126.com

* 通信作者: 杨世伦, 教授, 博士生导师, E-mail: slyang@sklec.ecnu.edu.cn

2 研究区域概况

崇明东滩位于长江口崇明岛东部,面向东海(图1a)。长江口为不正规半日潮,在口门区平均潮差为2.5~2.7 m,最大潮差为4.62 m;年平均风速为3.5~4.5 m/s,最大风速达36 m/s^[10]。崇明东滩是国家级湿地鸟类保护区,也是世界重要湿地名录之一。该潮间带宽数千米,上部是盐沼植被带,下部是光滩带,沉积物以淤泥质为主^[11]。研究断面位于崇明东滩正东

偏北位置(图1b)。本文三个观测点分别定位在盐沼-光滩边界向海610 m的光滩上(A点:31°32′6.612″N, 121°58′46.70″E;高程1.72 m)、盐沼-光滩交界处(B点:31°31′58.623″N, 121°58′25.59″E;高程2.28 m)和盐沼-光滩边界向陆9 m(C点:31°31′58.591″N, 121°58′25.26″E;高程2.61 m)(高程均为吴淞基面)。该处盐沼植物是引种的美国互花米草(*Spartina alterniflora*),一般高1.5~2.0 m,盖度为90%~95%,生物量干重为3~5 kg/m²^[12]。

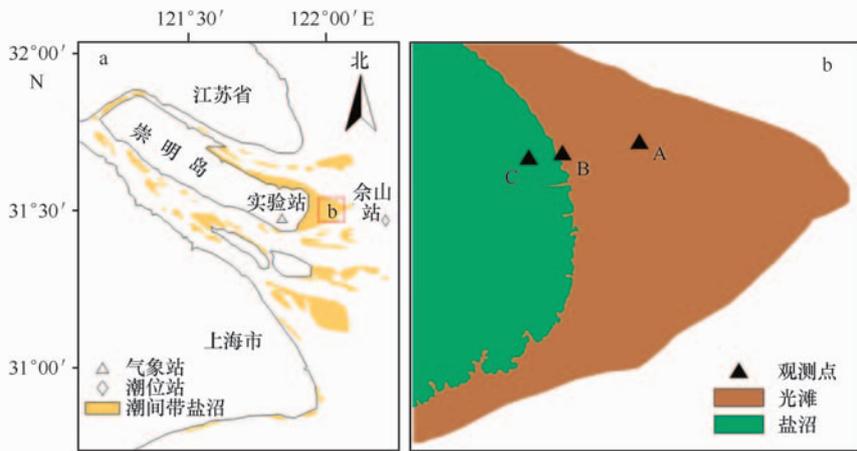


图1 研究区域示意图

3 现场观测和数据处理

2007年11月22—29日(本文用2007年11月23日的一个潮周期来举例说明),在长江口崇明东滩的潮间带中部光滩-盐沼过渡带利用三个SBE 26plus浪潮仪(wave and tide recorder)(美国SEA-BIRD公司生产)进行观测。该浪潮仪观测适合的最大水深是20 m(分辨率为0.2 mm,精度为0.01%)。设置采样时间间隔为10 min,即每隔10 min发一个脉冲,采样频率为4 Hz。在观测断面南侧约50 m的船上观察波浪的前进方向,使在同一直线上的三个观测点沿波浪的传播方向,并且同时垂直于等深线,确保波浪衰减率是在波浪前进方向上的衰减率。先把浪潮仪固定好后,再把它平放到滩面上,压力探头距滩面15 cm。浪潮仪记录数据的处理采用仪器公司配售的Seasoft for waves专用软件,得出的参数包含平均波高、有效波高、最大波高、平均波能密度和平均水深(即10 min内压力探头到水面垂直距离各个记录数据

的平均值),实际水深是水面至底床的垂直距离,即仪器压力探头记录的水深加上探头距床面的距离(15 cm)。对于观测点的经纬度和高程使用美国Ashtech生产的RTK-GPS测量,其水平测量精度达厘米级 $[(1.6+2\times 10^{-6})\text{cm}]$,高程测量精度达厘米级 $[(2.0+1\times 10^{-6})\text{cm}]$ 。

4 结果

4.1 波高的变化

三观测点的平均波高和有效波高都随水深的增大而增大(见图2)。平均波高和有效波高之间呈极好的正相关关系:

$$H_{sA} = 1.5332 H_{aA}^{1.0052}, n = 34, \\ r = 0.999, P < 0.001, \quad (1)$$

$$H_{sB} = 1.8397 H_{aB}^{1.0736}, n = 27, \\ r = 0.999, P < 0.001, \quad (2)$$

$$H_{sC} = 0.6028 H_{aC}^{0.9564}, n = 24, \\ r = 0.999, P < 0.001, \quad (3)$$

式中, H_{sA} 、 H_{sB} 和 H_{sC} 分别代表A点(光滩)、B点

(光滩-盐沼交界)和 C 点(盐沼)的有效波高; H_{aA} , H_{aB} 和 H_{aC} 分别代表 A 点(光滩)、B 点(光滩-盐沼交界)和 C 点(盐沼)的平均波高; n 为样本数; r 为相关系数; P 为显著性水平。

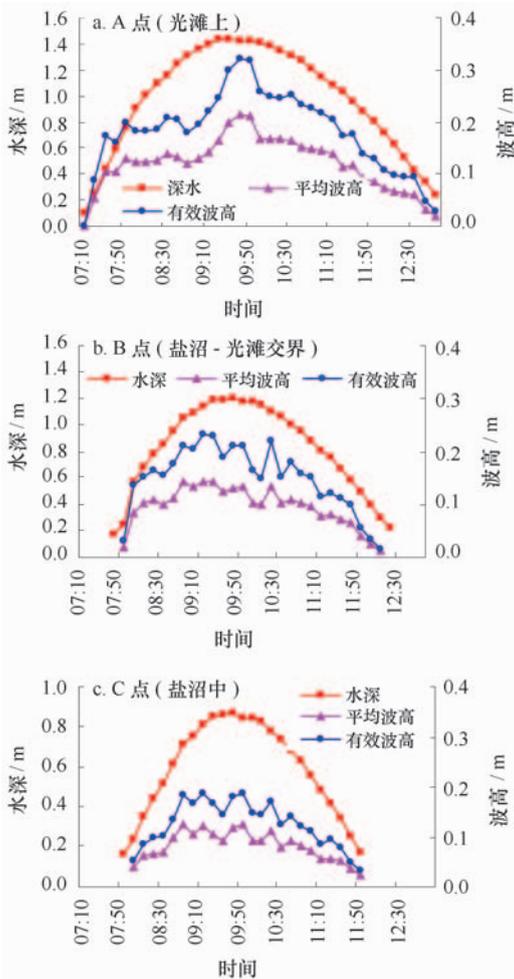


图2 三个观测点波高和水深过程线

无论是平均波高还是有效波高, A 点(光滩)的几乎所有观测值都大于 B 点(光滩-盐沼交界)的同步观测值, 而 B 点的观测值大于 C 点(盐沼)的同步观测值(见图 2)。平均波高的最大值从 A 点(光滩)的 0.36 m 下降为 B 点(光滩-盐沼交界)的 0.143 m 和 C 点(盐沼)的 0.124 m(表 1), 下降率分别为 0.098%/m(光滩段)和 1.476%/m(盐沼段), 后者是前者的 14.9 倍。平均波高的平均值从 A 点(光滩)的 0.25 m 下降为 B 点(光滩-盐沼交界)的 0.105 m 和 C 点(盐沼)的 0.082 m(表 1), 下降率分别为 0.095%/m(光滩段)和 2.43%/m(盐沼段), 后者是前者的 25.6 倍。有效波高的最大值从 A 点(光滩)的 0.54 m 下降为 B 点(光滩-盐沼交界)的

0.234 m 和 C 点(盐沼)的 0.187 m(表 1), 下降率分别为 0.093%/m(光滩段)和 2.23%/m(盐沼段), 后者是前者的 24.0 倍。有效波高的平均值从 A 点(光滩)的 0.37 m 下降为 B 点(光滩-盐沼交界)的 0.165 m 和 C 点(盐沼)的 0.125 m(表 1), 下降率分别为 0.091%/m(光滩段)和 2.69%/m(盐沼段), 后者是前者的 29.7 倍。

表 1 三观测点波高和波能密度在一个潮周期中的参数统计

波浪参数	A 点 (光滩)	B 点 (光滩-盐沼交界)	C 点(盐沼)
有效波高/m			
平均值	0.37	0.165	0.125
标准方差	0.080	0.045 0	0.046 0
最小值	0.22	0.056 0	0.030 0
最大值	0.54	0.234	0.187
平均波高/m			
平均值	0.25	0.105	0.082 0
标准方差	0.060	0.027 0	0.029 0
最小值	0.15	0.039 0	0.021 0
最大值	0.36	0.143	0.124
平均波能密度/ $J \cdot m^{-2}$			
平均值	46.16	27.15	17.57
标准方差	16.63	9.78	10.31
最小值	17.79	10.46	1.95
最大值	76.16	44.80	31.88

4.2 波能密度的变化

观测点的平均波能密度随着水深增大而呈增大趋势(见图 3)。与三个测点波高的变化一样, A 点(光滩)的几乎所有的平均波能密度观测值都大于 B 点(光滩-盐沼交界)同步观测值, 而 B 点的观测值大于 C 点(盐沼)的同步观测值(见图 3)。平均波能密度的最大值从 A 点(光滩)的 76.2 J/m^2 下降为 B 点(光滩-盐沼交界)的 44.8 J/m^2 和 C 点(盐沼)的 31.9 J/m^2 (表 1), 下降率分别为 0.068%/m(光滩段)和 3.2%/m(盐沼段), 后者是前者的 47 倍。平均波能密度的平均值从 A 点(光滩)的 46.2 J/m^2 下降为 B 点(光滩-盐沼交界)的 27.2 J/m^2 和 C 点(盐沼)的 17.6 J/m^2 (表 1), 下降率分别为 0.068%/m(光滩段)和 3.9%/m(盐沼段), 后者是前者的 58 倍。

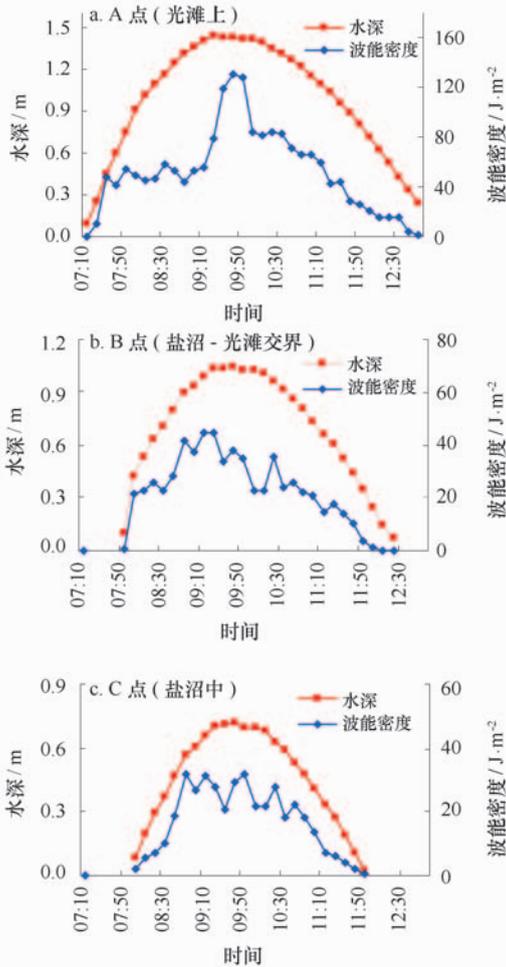


图3 三个观测点波能密度和水深过程线

4.3 波高与水深的关系

在各个潮周期中波高有随水深增大而增大的趋势,即在观测点被淹没的初期和末期(浅水阶段)波高较小,而在高潮位阶段波高较大(见图2)。各观测点的波高与水深之间在统计上具有显著的正相关。图4是有效波高与水深关系的一个例子,相关系数分别为0.966(盐沼中)、0.927(光滩-盐沼交界处)和0.871(光滩),显著性水平均小于0.001。

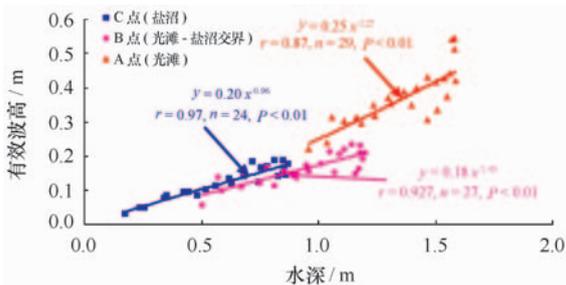


图4 三个观测点在共同淹没阶段的有效波高与水深的关系

y 代表有效波高, x 代表水深, r 代表相关系数,

n 代表样本数, P 代表显著性水平

5 讨论

波能密度与波高的时空变化趋势一致是因为众所周知两者之间有内在联系,即前者与后者的二次方成正比^[13]。在同一观测点波高与水深的显著正相关反映水深是波浪发育的限制性因子。当水深减小到小于二分之一波长时称为“浅水波”,这时波浪触及床底,导致能量损耗,波高随之降低。波高/波能密度的向岸减弱反映波浪在传播过程中因摩擦而导致能量损耗,波浪的折射和破碎等也都是摩擦造成的。在光滩上波浪受到的摩擦与滩面的糙度和高程变化率(坡度)有关,而在盐沼中除了这些影响因素外,还与植被导致水体和植物茎叶之间的摩擦有关。本文单位距离上波高的损失率在盐沼中比在光滩上高14~29倍,单位距离上波能密度的损失率在盐沼中比在光滩上高40~55倍,这可能主要是因为茂密的互花米草(*Spartina alterniflora*)的摩擦消能作用。盐沼植物的消浪作用无疑与植物的特征有关。植物越高、越密、生物量越大,消浪效果越好。如前所述,在英格兰北诺福克的潮间带上:波浪经过197 m的砂质光滩,有效波高减低15.29%^[2],单位距离上的降低率为0.078%/m,这与本文光滩上的降低率0.091%/m相近,但在北诺福克,波浪经过180 m的盐沼,有效波高降低60.96%,降低率为0.39%/m,明显低于本文的2.69%/m。其原因可能是北诺福克盐沼植物是大米草(*Spartina anglica*)和盐地碱蓬(*Suaeda maritima*)等,高度通常小于20~30 cm^[2]。在美国波浪进入互花米草(*Spartina alterniflora*)盐沼20~30 m距离后,波高降低71%,波能损失92%~100%^[4]。以平均25 m距离计算,波高和波能密度的降低率分别是2.84%/m和3.84%/m,与本文的结果基本相符,可见不同的盐沼植物种类,其消浪效果差异显著。

潮汐对观测点波浪的特征及其衰减具有重要影响。低潮位时观测点露出,仪器无波浪记录。当潮位上涨至中潮位附近时,仪器被淹没,有波浪记录。随着潮位的继续上涨,水深逐渐增大,波高和波能也随之增大,一般在高潮位时波高和波能达到最大值。在落潮过程中,随着潮位的下降水深减小,波高和波能也随之减小(见图2和3)。因此,在风况一定的条件下,大潮期间的波浪比小潮期间的大。波浪一般由海向陆传播,故涨潮阶段流向与波向大致相同,落潮阶段则相反。因此,涨潮阶段波浪的衰减可能比落潮阶段的小,从而造成涨潮阶段波浪总体上强

于落潮(见图 3b,c)。此外,在通常情况下浅水阶段波浪的衰减较之深水阶段(例如高潮位)明显,原因是浅水阶段波浪与底床的摩擦力大。

由于波浪在淤泥质潮间带(尤其是开敞型海岸)沉积动力过程中的重要作用^[1],盐沼植物的消浪效果必然会对潮间带的冲淤以及沉积物特性^[11]产生深刻影响。此外,波浪在潮间带(特别在盐沼中)的衰减对海堤的防护具有重要启示,可作为是否围垦或围垦强度多大(海堤高程位置)的依据之一。

6 结语

长江口崇明东滩的现场观测研究表明,波高/波

能密度在淤泥质潮间带光滩上和盐沼中都有显著的向岸衰减趋势,但在盐沼上的衰减率比在光滩上高一个数量级。波浪的这种向岸衰减除了与摩擦引起的能量损耗有关外,还与因高程增大引起的水深减小有关。不同的盐沼植物种类因高度、密度等的不同,其消能效果也显著不同。波浪在潮间带的衰减规律应在沉积动力过程研究和海岸防护决策中予以充分考虑。

野外观测得到崇明东滩国家湿地鸟类保护区的批准和研究生闫龙浩的协助,在此谨致谢忱!

参考文献:

- [1] WANG Y,GAO S, JIA J. High-resolution data collection for analysis of sediment dynamic processes associated with combined current-wave action over intertidal flats [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(7): 866—877.
- [2] MÖLLER I, SPENCER T, FRENCH J R, et al. Wave transformation over salt marshes: a field and numerical modeling study from North Norfolk, England [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49:411—426.
- [3] EISMA D. Intertidal Deposits: River Mouth, Tidal Flats, and Coastal Lagoons [M]. Boca Raton: CRC Press, 1998: 459.
- [4] KNUSTON P L, BROCHUR A, SEELIG W N, et al. Wave damping in *Spartina alterniflora* marshes [J]. Wetlands, 1982, 2: 87—104.
- [5] BRAMPTON A H. Engineering significance of British saltmarshes [C]// ALLEN J R L, PYE K. Saltmarshes, Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [6] YABG S L. The role of *Scirpus* marsh in attenuation of hydro-dynamics and retention of fine-grained sediment in the Yangtze Estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 47: 227—233.
- [7] BLACK K S, PATERSON D M, CRAMP A. Sedimentary Processes in the Intertidal Zone [M]. London: the Geological Society, 1998: 255—272.
- [8] MÖLLER I. Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: results from a UK east coast saltmarsh [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 69: 337—351.
- [9] 李志强, 陈子燊. 海滩冲流带高频振动及碎波带波浪作用的模态分析[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 161—168.
- [10] 上海市海岛资源综合调查报告编写组. 上海市海岛资源综合调查报告[R]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.
- [11] YANG S L, LI H, YSEBAERT T, et al. Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta: on the role of physical and biotic controls [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 77(4): 657—671.
- [12] LI H, YANG S L. Trapping effect of tidal marsh vegetation on suspended sediment, Yangtze Delta [J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(4): 915—924.
- [13] KOMAR P D. Beach Processes and Sedimentation[M]. Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice Hall, 1976: 429.

A wave attenuation over the transitional zone of mudflat and salt marsh

A case study in the eastern Chongming on the Changjiang Delta

SHI Ben-wei¹, YANG Shi-lun¹, LUO Xiang-xin¹, XU Xiao-jun¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Key words: waves; saltmarsh; mudflat; wave and tide recorder; attenuation rate