

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2025.01.0004

引用格式: 董啸天, 林朱俊, 朱文谨, 等. 江苏中部海岸盐沼植被的消浪效果[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2025, 34(1): 24-30.

江苏中部海岸盐沼植被的消浪效果

董啸天^{1,2}, 林朱俊¹, 朱文谨¹, 张梅¹, 魏萌萌¹, 丁嘉¹, 陈涵博¹

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005;

2. 自然资源部 华东海岸带野外科学观测研究站, 江苏 南京 210007)

摘要: 目前潮滩盐沼湿地退化消失已经成为全球性的问题, 而盐沼植被起到了消浪、缓流、截沙、固沙等作用, 对潮滩动力地貌过程产生重要影响。因此, 深入研究滨海盐沼植被在不同植被参数下的消浪效果具有重要意义。为了模拟和分析不同植被参数对波浪的影响, 采用一维岸滩演变模型来模拟波浪在盐沼植被区的传播情况。通过对比模拟的波高变化, 直观地了解不同植被参数下波高沿程的变化特征, 进而准确揭示植被的消浪特性。研究表明: 盐沼植被的消浪作用会随着密度、高度、直径的增加而增强, 但消浪能力存在临界值。不同植被参数对波浪削弱强度各有差异, 其中直径对波浪的影响最为显著。

关键词: 滨海盐沼植被; 一维岸滩演变模型; 植被参数

中图分类号: TV139.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-8248 (2025) 01-0024-07

Wave absorbing effect of salt marsh vegetation in the central coast of Jiangsu Province

DONG Xiaotian^{1,2}, LIN Zhujun¹, ZHU Wenjin¹, ZHANG Mei¹, WEI Mengmeng¹, DING Jia¹, CHEN Hanbo¹

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

2. Observation and Research Station of East China Coastal Zone, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210007, China)

Abstract: At present, the degradation and disappearance of tidal flat salt marshes has become a global problem, and salt marsh vegetation has played a role in wave absorbing, current slowing, sand retention, and sand fixation, which has an important impact on the dynamic geomorphological process of tidal flat. Therefore, it is of great scientific significance to study the wave dissipation effect of coastal salt marsh vegetation in different vegetation parameters. In order to simulate and analyze the influence of different vegetation parameters on waves, a one-dimensional beach evolution model was used to simulate the propagation of waves in the salt marsh vegetation area. By comparing the simulated wave height changes, the variation characteristics of wave height along the path under different vegetation parameters are intuitively understood, and then the wave dissipation characteristics of vegetation can be accurately revealed. The results show that the wave dissipation effect of salt marsh vegetation will increase with the increase of density, height and diameter, but there is a critical value of wave dissipation capacity. Different vegetation

收稿日期: 2024-05-26; 修订日期: 2024-06-29

基金项目: 自然资源部华东海岸带野外科学观测研究站开放基金项目(ORSECCZ2022204); 江苏省自然资源开发专项基金(海洋科技创新)项目(JSZRHYKJ202008)

作者简介: 董啸天(1990—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为河口海岸动力学, (E-mail) dongxt@jou.edu.cn.

通信作者: 朱文谨(1981—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为海洋地质学, (E-mail) zhucius@jou.edu.cn.

parameters have different effects on wave weakening intensity, among which diameter has the most significant effect on wave.

Key words: coastal salt marsh vegetation; one-dimensional beach evolution model; vegetation parameters

0 引言

在全球气候异变和海平面上升等多种因素影响下, 潮滩盐沼湿地退化消失已成为全球热点问题。李华等^[1]、周曾等^[2]深入探讨了盐沼植被对水动力、泥沙输运以及地貌演变的影响, 研究结果表明, 盐沼植物起到了消浪、缓流、截沙及固沙作用, 并分析了盐沼植物对水体紊动、悬沙运动及对滩面沉积地貌的复杂影响。Möller 等^[3]研究盐沼植被对水动力特性的影响, 通过实测数据揭示了水深在波浪衰减过程中起着关键作用, 特别是在盐沼前缘的几米范围内, 大部分波能得到了有效衰减。Mudd 等^[4]则结合实测和实验数据, 发现盐沼植被对泥沙捕获量的影响主要取决于水流速度。侯明行等^[5]、王爱军等^[6]、高抒等^[7]均强调盐沼植被对潮滩盐沼地貌演变有重要影响, 指出其改变了潮流的动力特征, 起到消浪促淤的作用, 从而增强了盐沼滩面的稳定性。Zhang 等^[8]首次全面考虑了波流相互作用的动态效应, 并结合植物叶片及杆茎的结构与柔性特征, 深入分析了植物柔性变形及其叶片结构对受力分布的影响, 进一步揭示了植物群落对波流速度的调节作用。Suzuki 等^[9]建立的植被消浪模型纳入了惯性和孔隙效应的影响, 进一步细化了植被消浪的数学模型。王建婷等^[10]研究了防浪林起到的消浪效果, 研究结果表明, 防浪林的植被半径增大或者植被行株距减小均有助于增强消浪作用。王磊等^[11]在动量方程源项中引入拖曳阻力项, 构建了刚性植被区域波浪传播的计算模型, 用以研究植被对波浪衰减的影响。综上所述, 不同学者结合实测资料、物理实验和数值模拟等方法均认定盐沼植被在潮滩地貌演变过程中的重要性。

在评估盐沼植被的消浪效果中, 阻尼因数与消浪系数是能直观体现植物消浪作用特性的重要指标, 且波浪传播方向上植物面积占横截面比例是一个关键因素^[12]。不同的盐沼植被起到的消浪效果不同, 且刚性植被相较于柔性植被起到的消浪效果更优越^[10]。不同植被的不同部位泥沙捕获效率亦存在

差异, 会随着植被生物密度的增加而逐渐增加^[13]。植被对波高的衰减能力也随着波陡系数、植被相对高度系数、植被区域长度和植被系数 4 个主要参量增大而随之增强^[14]。基于此, 本文建立了一个一维岸滩演变模型, 来深入探讨滨海盐沼植被不同植被参数(植被密度、植被高度、植被直径)产生差异化的消浪效果。通过对不同植被参数下波高沿程变化特征的对比分析, 来准确直观地反映植被的消浪特性。

1 一维岸滩演变模型

1.1 控制方程

1.1.1 短波作用平衡方程

波浪运动平衡方程为

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma} \quad (1)$$

式(1)中, x 轴垂直指向海岸方向, y 轴平行于海岸方向, θ 为波浪入射角(与 x 轴的夹角), σ 为波固有频率, c_x 为波浪在 x 方向的传播速度, c_y 为波浪在 y 方向的传播速度。等式右边代表波能耗散, D_w 为整体耗散量, 是波能分量的一部分, 由均方根波高 H_{rms} 和最大波高 H_{max} 之间的关系决定。方程中 A 是波浪作用量, 表示为

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad (2)$$

式(2)中, S_w 代表单位方向上的波能流密度。波浪在 x 和 y 方向上的传播速度为

$$c_x(x, y, t, \theta) = c_g \cos \theta + u^L, \quad (3)$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c_g \sin \theta + v^L. \quad (4)$$

式(3)和式(4)中, u^L 和 v^L 分别是离岸和沿岸的水深平均速度, c_g 为波群速度。波浪在 θ 域传播的速度为

$$c_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) + \cos \theta \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \sin \theta \left(\sin \theta \frac{\partial v}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (5)$$

式(5)中, h 为水深, u 和 v 分别为波流共同作

用下流场的水平速度和垂直速度, k 为波数。

1.1.2 波面滚动能量方程

波面滚动能量平衡方程为

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial c_x E_r}{\partial x} + \frac{\partial c_y E_r}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta E_r}{\partial \theta} = D_w - D_r, \quad (6)$$

$$D_r = \frac{S_r(x, y, t, \theta)}{E_r(x, y, t)} \bar{D}_r(x, y, t), \quad (7)$$

$$\bar{D}_r = \frac{2g\beta_r E_r}{c}.$$

式(6)和式(7)中, 每个方向单位上的滚动能量为 $E_r(x, y, t, \theta)$, D_r 为水滚能耗散沿着 θ 方向上的分布函数, \bar{D}_r 为滚动能量的耗散总量, c 为波浪传播速度, $S_r(x, y, t, \theta)$ 为水滚能不同方向上的应力分布函数。

滚动能量对波能辐射应力作用表达式为

$$S_{xx, r}(x, y, t) = \int \cos^2 \theta E_r d\theta, \quad (8)$$

$$S_{xy, r}(x, y, t) = S_{yx, r}(x, y, t) = \int \sin \theta \cos \theta E_r d\theta, \quad (9)$$

$$S_{yy, r}(x, y, t) = \int \sin^2 \theta E_r d\theta, \quad (10)$$

式(8)、式(9)和式(10)中, $S_{xx, r}$, $S_{xy, r}$, $S_{yy, r}$, $S_{yx, r}$ 分别代表波浪向 x 轴和 y 轴传播分解到垂直于 x 轴和 y 轴的切应力。

1.1.3 浅水方程

在广义拉格朗日平均方程 (GLM) 的基础上, 动量方程和连续方程中拉格朗日速度、斯托克斯速度与欧拉速度关系式为

$$u^L = u^E + u^S, \quad (11)$$

$$v^L = v^E + v^S. \quad (12)$$

式(11)和式(12)中, u^E 和 v^E 为欧拉速度, u^S 和 v^S 分别表示在 x 和 y 方向上的斯托克斯输移速度。

$$u^S = \frac{E_w \cos \theta}{\rho h c}, \quad (13)$$

$$v^S = \frac{E_w \sin \theta}{\rho h c}. \quad (14)$$

式(13)和式(14)中, E_w 为短波能量, ρ 为水的密度。

拉格朗日动量方程为

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v, x}}{\rho h}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v, y}}{\rho h}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y}. \quad (17)$$

式(15)、式(16)和式(17)中, τ_{sx} 和 τ_{sy} 为风应力, τ_{bx}^E 和 τ_{by}^E 为底切应力, η 为水位, $F_{v, x}$ 和 $F_{v, y}$ 为植物作用力, F_x 和 F_y 为波浪力, f 为科氏力系数, v_h 为水平黏度。

1.1.4 植被阻尼方程

植被引起的总阻力 F_v 为每层植被引起的阻力 $F_{v, i}$ 之和, 即

$$F_v(t) = \sum_{i=1}^{n_v} F_{v, i}(t), \quad (18)$$

$$F_{v, i}(t) = \frac{1}{2} \rho C_{D, i} b_{v, i} N_{v, i} h_{v, i} u^L(t) |u^L(t)|. \quad (19)$$

式(18)和式(19)中, n_v 为植被层数, $C_{D, i}$ 为阻力系数, $b_{v, i}$ 为植物根茎的直径, $h_{v, i}$ 为植被高度, $N_{v, i}$ 为植物的密度。

植被引起的短波耗散可根据波高和若干植被参数的函数来求解。总的耗散项则可用每层植被层耗散之和来计算, 即

$$D_v = \sum_{i=1}^{n_v} D_{v, i}. \quad (20)$$

式(20)中, $D_{v, i}$ 为植被在植被层第 i 层中的耗散。植被耗散计算式为

$$D_{v, i} = \frac{(\sin h^3 k a_i h - \sin h^3 k a_{i-1} h) + 3(\sin h k a_i h - \sin h k a_{i-1} h)}{3k c \cos h^3 k h} \frac{\rho C_{D, i} b_{v, i} N_{v, i}}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{kg}{2\sigma} \right)^3 H_{rms}^3. \quad (21)$$

式(21)中, g 为重力加速度, H_{rms} 为均方根波高, a_i 为第 i 层的植被相对高度 ($a_i = h_{v, i}/h$)。

1.2 模型建立

本文以江苏中部盐城国家级珍禽自然保护区核心区为研究区域, 根据其近岸实测剖面地形资料将剖面模型建立至离岸 3 km 处, 建立了一维岸滩演变模型来反映盐沼植被对波浪和水流运动的影响。图 1 为研究区盐沼前缘陡坡地形与剖面演变模型详图, 离岸 50 m 为植被区域。进行计算的地形长度为 3 000 m, 设置空间步长 1 m, 网格间距均匀, 共 3 000 个网格点。边界条件设为一维边界条件, 在边界处设置随时间变化的水位。植被作用下波流相互作用为 1, 模型选择定点输出。因岸滩上情况较为复杂, 所以点位布置相对较密, 设置离岸 5, 10, 13, 15, 17, 20, 21, 23, 25, 50, 100, 200, 500, 1 000, 2 000 m 共 15 个位置点位。

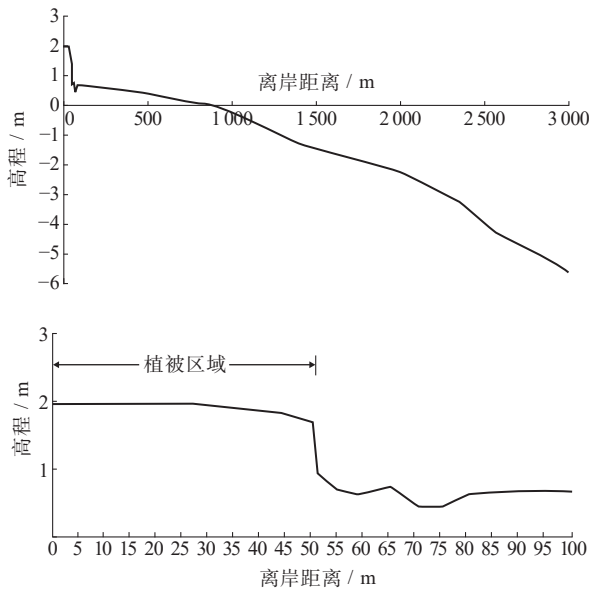


图 1 盐沼前缘地形与剖面演变模型建立

Fig. 1 Establishment of topography and profile evolution model of salt marsh front

1.3 模型验证

如图 2 和图 3 所示, 分别收集了 2013 年 9 月滩面水文波浪实测资料 (A#) [15], 以及研究海域 2013 年 9 月实测水文泥沙数据 (1# 和 2#)。

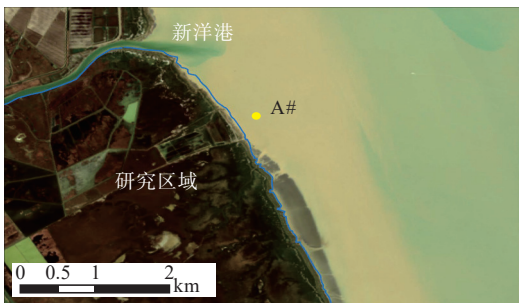


图 2 滩面水文波浪测点位置示意图

Fig. 2 Position diagram of hydrological wave measuring point on beach surface

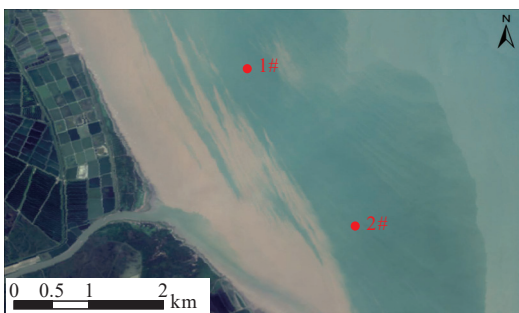


图 3 水文泥沙测点位置示意图

Fig. 3 Position diagram of hydrological sediment measuring point

通过分析可知, 1# 和 2# 测点的实测最大涨潮流速为 2.2 m/s, 落潮最大流速为 1.8 m/s, 涨落潮平均流速约 0.9 m/s。中值粒径约 0.08 mm, 粒径小于 0.005 mm 黏粒含量小于 10%, 粒径大于 0.075 mm 的粗颗粒含量大于 60%。含沙量在涨落潮过程中均在 2~3 kg/m³ 之间。

潮位验证如图 4 所示。A# 潮汐相位基本吻合, 水位模拟值与计算值平均误差为 0.036 m, 平均相对误差为 6.89%。由于观测仪器架设在距滩面 0.414 m 高度处, 故干出滩时段无法记录到水位过程。可见, 模型的模拟结果合理。

波况验证如图 5 所示, 显示了 A# 波高模拟值与实测值的对比。由图 5 可知, 观测时段内, 波高相位基本吻合, 平均误差为 0.028 m。由于测波仪器架设在距滩面 0.414 m 高度处, 故在滩面涨潮淹没、落潮干出时, 实测与模拟的规律存在一定的误差。由此可见, 模型的模拟结果合理。

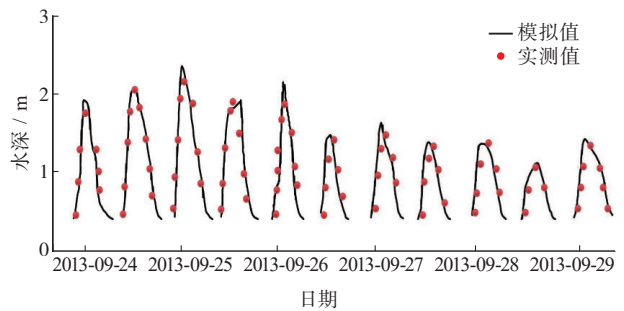


图 4 潮位验证

Fig. 4 Tide level verification

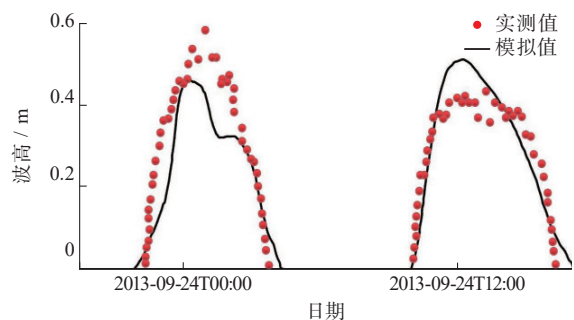


图 5 波况验证

Fig. 5 Wave condition verification

综上, 模型模拟的水文动力与实测数据变化趋势基本吻合, 据此建立的一维岸滩演变模型可用于研究盐沼前缘植被对波浪和水流运动的影响。

2 盐沼植被不同植被参数对波高的影响分析

基于一维岸滩演变模型,率定得阻力系数 C_D 为 2, D_{50} 为 0.08 mm, D_{90} 为 0.1 mm, 均方根波高 H_{rms} 为 0.5 m, 干湿面的临界坡度分别取为 1 和 0.3。根据 1#、2# 水文泥沙观测资料, 确定研究海域平均波高为 0.5 m, 平均波周期为 10 s, 平均波向为 100° (以正北为 0° , 顺时针为正), 以此确定模型波要素。

借助上述经校验的一维岸滩演变模型, 分析盐沼植被对波浪和水流运动的影响, 分别模拟了盐沼植被不同植被参数(植被密度 N 、植被高度 h_v 和植被直径 b_v) 下波高沿程变化特征。波高衰减量定义为入射波高与透射波高的差值, 消浪系数定义为波高衰减量与入射波高的比值, 波高剩余率为透射波高与入射波高的比值。

2.1 植被密度的影响分析

指定盐沼植被区域长度 x 为 50 m, 植被高度 h_v 为 0.2 m, 植被直径 b_v 为 0.001 m。调整植被密度 N 分别为 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 unit/m², 对比分析 6 种不同密度情况下的消浪情况。

由图 6、图 7 和表 1 可以看出, 波高在滩面 52~100 m 时都稳定在 0.47 m, 在 51 m 位置略有增加, 50 m 处进入植被区域, 波高开始急剧降低; 随着植被密度的增加, 波高衰减幅度变大, 波高剩余率变小, 且岸边植被的极限消浪系数均约为 83%~84%。

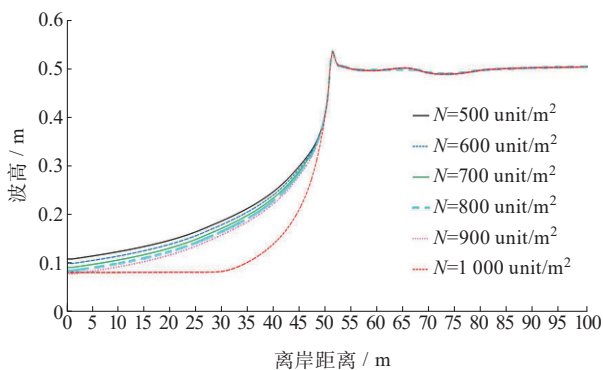


图 6 不同盐沼植被密度下波高沿程变化
Fig. 6 Variation of wave height with different densities of salt marsh vegetation

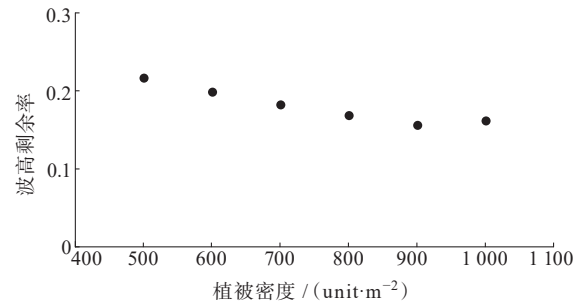


图 7 不同盐沼植被密度下波高剩余率
Fig. 7 Residual rate of wave height with different densities of salt marsh vegetation

表 1 不同密度下波高衰减情况

N /(unit·m ⁻²)	波高衰减量/cm	消浪系数/%
500	37.16	78.31
600	38.03	80.14
700	38.79	81.74
800	39.45	83.15
900	40.03	84.37
1 000	39.78	83.84

2.2 植被高度的影响分析

指定盐沼植被区域长度 x 为 50 m, 植被密度 N 为 600 unit/m², 植被直径 b_v 为 0.02 m。调整植被高度 h_v 分别为 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1 m, 对比分析 6 种不同高度情况下的波高衰减情况。

由图 8、图 9 和表 2 可以看出, 波高在滩面 53~100 m 时都稳定在 0.47 m, 但在 52 m 有一个小的增加, 50 m 时进入植被区域; 随着植被高度的增加, 到达底部的波高减小, 波高剩余率也减小, 消浪系数随之变大。在植被高度达到 0.5 m 之后, 波高衰减最为强烈, 而后趋于稳定, 且岸边植被的极限消浪系数均约为 87%~88%。

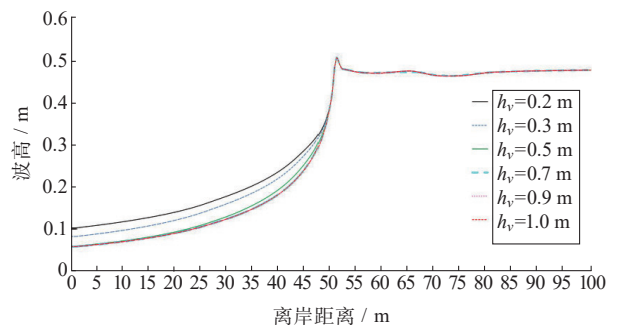


图 8 不同盐沼植被高度下波高沿程变化
Fig. 8 Variation of wave height with different heights of salt marsh vegetation

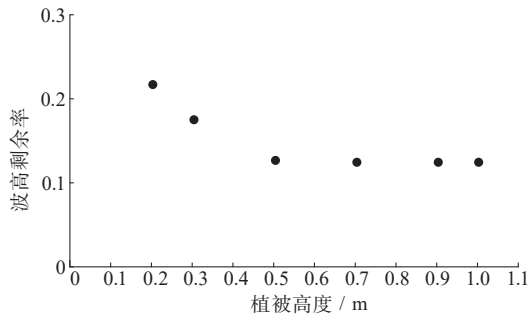


图 9 不同盐沼植被高度下波高剩余率

Fig. 9 Residual rate of wave height with different heights of salt marsh vegetation

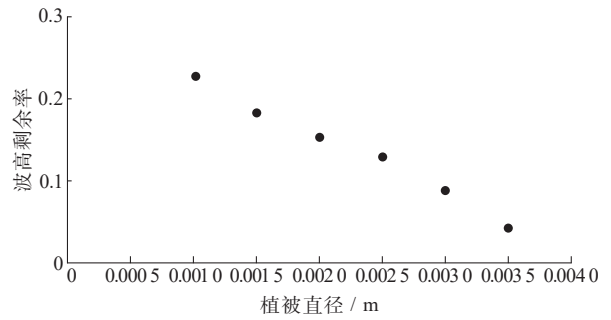


图 11 不同盐沼植被直径下波高剩余率

Fig. 11 Residual rate of wave height with different diameters of salt marsh vegetation

表 2 不同高度下波高衰减情况

Table 2 Wave height attenuation under different heights

h_v/m	波高衰减量 / cm	消浪系数 / %
0.2	37.16	78.31
0.3	39.17	82.56
0.5	41.43	87.32
0.7	41.56	87.59
0.9	41.56	87.59
1.0	41.56	87.59

2.3 植被直径的影响分析

指定盐沼植被区域长度 x 为 50 m, 植被密度 N 为 600 unit/m², 植被高度 h_v 为 0.2 m。调整植被直径 b_v 分别为 0.001 0, 0.001 5, 0.002 0, 0.002 5, 0.003 0, 0.003 5 m, 对比分析 6 种不同直径下的波高衰减情况。

由图 10、图 11 和表 3 可以看出, 当波浪进入植被区域, 随着直径的增加, 波高随之减小, 直径越大, 波高变化曲线越陡, 波高剩余率越小, 消浪系数也随之增加。消浪系数随着直径的增加变大得十分明显, 在直径 b_v 为 0.003 5 m 时, 消浪系数可达 95.79%。

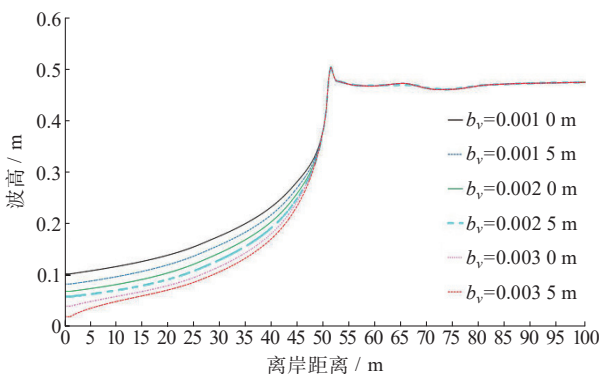


图 10 不同盐沼植被直径下波高沿程变化

Fig. 10 Variation of wave height with different diameters of salt marsh vegetation

对比分析几种盐沼植被参数的结果发现, 盐沼植被对波浪的衰减作用会随着密度 N 、高度 h_v 、直径 b_v 的增加而增强, 消浪系数也随之变大。但是这种增强作用并不是简单的线性相关, 不同参数对波浪削弱的强度影响有所不同, 其中直径是影响作用最强的参数。

表 3 不同直径下波高衰减情况

Table 3 Wave height attenuation under different diameters

b_v/m	波高衰减量 / cm	消浪系数 / %
0.001 0	37.16	78.31
0.001 5	39.13	82.47
0.002 0	40.55	85.46
0.002 5	41.59	87.65
0.003 0	43.43	91.53
0.003 5	45.45	95.79

3 结论

本文根据盐城国家级珍禽自然保护区核心区近岸实测剖面地形资料, 采用数学模型的方法针对滨海盐沼植被不同植被参数 (植被密度、植被高度、植被直径) 的消浪效果进行研究。研究表明: 盐沼植被的消浪作用会随着密度、高度、直径的增加呈正相关, 但消浪系数也存在一定的限度。随着植被密度增加, 消浪系数可达 84% 左右, 而植被密度从 800 unit/m² 增加到 1 000 unit/m², 消浪系数变化并不显著。随着植被高度增加消浪系数可达 87%, 其中在植被高度从 0.3 m 增加到 0.5 m 期间波高衰减最为显著, 而植被高度从 0.5 m 增加到 1 m 时, 消浪系数变化并不明显。值得注意的是, 当植被直径从 0.001 m 增加到 0.003 5 m 时, 消浪系数呈明显上升趋势, 消浪系数可达 96%。由此表明, 在 3 个参数中, 盐沼植被的直径对消浪效果的影响最为显著。

本文构建的一维岸滩模型仅能揭示正向入射波浪条件下的盐沼植被消浪特征,接下来将结合二维与三维数值模型,进一步研究斜向入射波浪条件下的盐沼植被消浪特征。

参考文献:

- [1] 李华, 杨世伦. 潮间带盐沼植物对海岸沉积动力过程影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 583-591.
- [2] 周曾, 陈雷, 林伟波, 等. 盐沼潮滩生物动力地貌演变研究进展[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 470-484.
- [3] MÖLLER I, SPENCER T. Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes; effects of marsh edge typology and vegetation change [J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, 36 (sp1): 506-521.
- [4] 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: Earth Surface*, 2010, 115(3): 1-14.
- [5] 侯明行, 刘红玉, 张华兵. 盐城淤泥质潮滩湿地潮沟发育及其对米草扩张的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 400-409.
- [6] 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[J]. 海洋学报(中文版), 2006(1): 92-99.
- [7] 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.
- [8] ZHANG Xiaoxia, NEPF H. Wave damping by flexible marsh plants influenced by current [J]. *Physical Review Fluids*, 2021, 6(10): 100502.
- [9] SUZUKI T, HU Zhan, KUMADA K, et al. Non-hydrostatic modeling of drag, inertia and porous effects in wave propagation over dense vegetation fields [J]. *Coastal Engineering*, 2019, 149: 49-64.
- [10] 王建婷, 董增川, 徐伟, 等. 嫩江干流防浪林消浪影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 30-36.
- [11] 王磊, 房克照, 尹晶, 等. 近岸波浪在刚性植被区域传播的数值模型[J]. 海洋工程, 2015, 33(6): 62-69.
- [12] 张之琳, 黄本胜, 刘达, 等. 滩地刚性植物消浪作用特性研究[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 910-919.
- [13] LI Hua, YANG Shilun. Trapping effect of tidal marsh vegetation on suspended sediment, Yangtze delta [J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(4): 915-924.
- [14] 刘硕. 基于物理模型实验和 XBeach 数值模拟的植被消浪研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [15] 赵秧秧. 江苏中部海岸盐沼前缘的地貌动力过程[D]. 南京: 南京大学, 2015.

(责任编辑: 褚金红)