

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.019

淤泥质海岸多要素协同减灾数值模拟研究

岑 林^{1,2},倪兴也^{1,2},冯 曦^{1,2},陶爱峰^{1,2},郑金海^{1,2}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要:以淤泥质海岸的两类典型生态友好型消浪要素牡蛎礁和红树林为研究对象,基于非静压波浪 SWASH 模型,对规则波经牡蛎礁、红树林传播演变的水动力特征开展数值模拟,探究不同水位与波浪组合工况下淤泥质海岸单一牡蛎礁、单一红树林及二者协同作用的消浪变化规律。结果表明:牡蛎礁与红树林组合工况可有效提升整体减灾效能,消浪过程呈非线性变化特征;协同消浪工况中红树林对牡蛎礁具有显著增益效应,工程布设可优先提升红树林栽种规模以实现高效减灾;低水位条件下牡蛎礁消浪贡献率可达 50% 以上,高水位时红树林依托冠层结构发挥主导消浪作用,二者梯次配合可实现逐级消能减灾。

关键词:红树林;牡蛎礁;淤泥质海岸;协同减灾;生态减灾;SWASH 模型

Numerical simulation study on multi-factor synergistic disaster reduction on muddy coasts

Cen Lin^{1,2}, Ni Xingye^{1,2}, Feng Xi^{1,2}, Tao Aifeng^{1,2}, Zheng Jinhai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection, Ministry Education, Hohai University;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: By taking two typical eco-friendly wave-dissipating elements on muddy coasts, namely oyster reefs and mangroves, as research objects, a numerical simulation was conducted on the hydrodynamic characteristics of regular wave propagation and evolution over oyster reefs and mangroves based on the non-hydrostatic wave SWASH model. Furthermore, the wave dissipation variation laws of a single oyster reef, a single mangrove, and their synergy on muddy coasts under different combinations of water levels and waves were explored. The results indicate that the combined condition of oyster reefs and mangroves effectively improves the overall disaster reduction efficiency, and the wave dissipation process exhibits nonlinear variation characteristics. In the synergistic wave dissipation condition, mangroves have a significant enhancement effect on oyster reefs, and engineering layouts can prioritize increasing the planting scale of mangroves to achieve efficient disaster reduction. Under low-water-level conditions, the wave dissipation contribution rate of oyster reefs can reach more than 50%, while at high water levels, mangroves play a dominant role in wave dissipation relying on the canopy structure, and the sequential coordination of the two can achieve progressive energy dissipation and disaster reduction.

Key words: mangrove; oyster reef; muddy coast; synergistic disaster reduction; ecological disaster reduction; SWASH model

全球约有 70% 的海岸线正在经历着不同程度的海岸侵蚀问题^[1]。现有的海岸防御措施主要分为两大类:一类通过修筑人工构筑物削弱近岸波浪的能量^[2];另一类着重修复和创建生态减灾要素,如红树林、珊瑚礁、牡蛎礁等,以及建立后滨沙丘、种植防护林等生态工程,以增强海岸的自然防护能力^[3]。目前,国际上已有大量涉及红树林、珊瑚礁、盐沼等典型滨海生态系统和自然岸线的保护修复应用案例,我国也正在全面推进海洋生态保护修复工作,加快建设“蓝色海湾”“美丽岸滩”^[4-5]。在此背景下,开展红树林与牡蛎礁协同消浪减灾研究是应对海岸带多重风险、践行生态文明建设的科学路径。

在自然生态系统中,水下生物礁构成了海岸带的第一道防御屏障,其中牡蛎礁可净化水质、储存蓝碳、提供鱼类繁殖场并减缓海洋侵蚀,为亚热带海岸线提供天然的保护^[6]。Chowdhury 等^[7-8]的现场试验显示,在适宜的水深环境下,牡蛎礁确实具备潜在的防波堤功能;波浪传播至礁坪边缘时表现出强烈的非线性特征^[9],可有效衰减波能^[10];Morris 等^[11]发现,牡蛎礁的淹没时长与淹没水深是影响其消浪效果的两个关键因素;Tao 等^[12]分析了相对淹没度、相对波峰宽度及牡蛎密度对波浪衰减的影响,研究了牡蛎城堡周围流场的

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3007900)

作者简介:岑林(2002—),女,硕士研究生,主要从事海岸带生态修复和协同减灾研究。E-mail:lin.cen@hhu.edu.cn

通信作者:倪兴也(1988—),男,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力研究。E-mail:xingye.ni@hhu.edu.cn

空间变化与湍流动能,揭示了波能衰减机理;洪新等^[13]研究发现,双层牡蛎礁在设计高水位和极端高水位条件下均能有效减少波浪的影响。

近岸植被构成的生态缓冲带可有效衰减波能^[14-15]、适应海平面上升^[16]并减轻波浪对近岸构筑物的冲击^[17]。红树林被认为是保护海岸线,降低侵蚀性海浪、暴雨和海啸等灾害破坏程度的重要生态措施^[18],其通过形态阻力和茎秆运动降低水流速度并耗散波能^[19]。目前关于红树林消浪效果的研究主要聚焦于水深、波高、波周期等水动力要素及高度、密度、刚度、宽度和迎水面面积等植被特性对波浪削减效果的影响^[20-26],且水位位于植被冠层时消波效果较好^[27]。

近年来,牡蛎礁、红树林消浪及海岸生态防护相关研究已从单一植被消浪机制逐步转向多要素协同减灾。将红树林和盐沼植被等典型海岸带生态系统与人工构筑物相结合的复合型生态海岸防护与修复模式,已成为海岸工程与生态保护交叉领域的研究热点^[28-29]。研究表明,将鱼礁系统、系泊浮船或防波堤与红树林组合配置,可促进消减波浪能量并提高红树林的存活率^[30-34]。Liu等^[35]分析了竹筏、人工礁石、松木桩与生态牡蛎礁的不同组合对红树林幼苗的侵蚀和沉积过程的影响,发现在5a重现期内,竹筏与人工鱼礁和松木桩与生态牡蛎礁的组合表现出显著的抗侵蚀作用。现有研究主要聚焦于多要素减灾的可行性,而针对生态海岸条件下多要素协同减灾的水动力研究,及对协同减灾过程中各要素的贡献与协同机制的讨论尚不充分,基于自然的减灾要素在协同减灾中的作用研究存在明显不足。

本文将牡蛎礁与红树林自海向岸布置,采用SWASH(simulating waves till shore)模型研究不同潮位及波高组合下牡蛎礁与红树林的协同消浪减灾效果与机制,为海岸生态工程提供针对性的防护对策。

1 非静压波浪 SWASH 模型

1.1 控制方程

SWASH 模型适用于模拟波浪从近海向岸传播的时域演变过程,采用含非静压项的浅水方程作为控制方程,可以有效复现复杂环境下大范围的表面波及浅水流动力过程。SWASH 模型的垂向二维控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

式中: u 、 w 分别为 x 、 z 方向的速度分量; t 为时间; ρ_0 为流体密度; g 为重力加速度; ξ 为波浪自由面高程; q 为非静水压力。

1.2 边界条件

忽略表面张力时,自由面边界条件为:

$$w|_{z=\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} \tag{4}$$

进行底床无渗透近岸地形流体模拟时,底部运动学边界条件为:

$$w|_{z=-d} = -u \frac{\partial d}{\partial x} \tag{5}$$

式中: d 为静水深。

忽略表面张力和黏性效应,自由面压力为常数(通常为大气压),可得自由面的压力边界条件:

$$q|_{z=\xi} = 0 \tag{6}$$

底部边界的垂向流速应满足式(5),水平向流速应满足:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \tag{7}$$

开边界包括出流边界和入流边界,入流边界条件为速度入口边界条件,结合弱反射边界条件消除二次反射造成的影响:

$$u_b = \pm \sqrt{g/h} (2\xi_b - \xi) \tag{8}$$
$$h = \xi + d$$

其中 u_b 为入流边界流速; ξ_b 为入射波的表面高程。式中正负号取决于入流边界的位置,东、北两个方向为入流边界时取正号,西、南两个方向时取负号。为了更好地消除反射,在出流边界设置海绵层进行消波。

出流边界采用辐射边界条件并结合海绵层消波方法。在满足线性波理论假设时,采用允许长波无反射出流的 Sommerfeld 边界条件:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \tag{9}$$
$$c = \sqrt{gh}$$

其中 f 一般为波面或速度等变量; c 为波速。

陆边界包括固壁边界和动边界两种形式,其中动边界采用干湿网格法处理,最小水深 $h_{\min}$ 由初始条件确定,之后每一时间步均对网格点进行干湿判断:当网格点水深小于 $h_{\min}$ 时,网格判断为干网格;反之判断为湿网格;干网格水深按给定的 $h_{\min}$ 进行修正。

1.3 植被模拟的数学公式

SWASH 模型中植被效应可由莫里森方程确定。莫里森方程是海洋工程与流体力学领域用于计算波浪对海洋平台支柱、桩柱、管道等细长结构物作用力的半经验公式,其单位长度波浪力 $f(z,t)$ 表达式为:

$$f(z,t) = 0.5\rho_0 C_D u(z,t) |u(z,t)| + 0.5\rho_0 C_M A \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \tag{10}$$

式中: C_D 为无量纲拖曳力系数; C_M 为无量纲惯性力系数; A 为植被的截面积,对于圆柱体, $A = \pi D^2/4$; D 为植被的特征直径; $u(z,t)$ 为波浪水质点的水平速度; $\partial u(z,t)/\partial t$ 为波浪水质点的水平加速度。

2 数值模拟试验设置

2.1 SWASH 模型验证

采用 SWASH 模型,以不透水矩形块体概化牡蛎礁,采用植被模型模拟红树林。首先通过复演 Garcia 等^[36]物理模型试验中测点的水位历时曲线,验证 SWASH 模型模拟多孔介质透水消波的可行性。由图 1 可见,对比规则波经过透水堤坝前数值模拟与物理模型模拟的波浪自由面水位,其历时曲线的波峰、波谷存在一定的误差,而透水堤坝后数值模拟值与物理模型模拟值基本吻合。

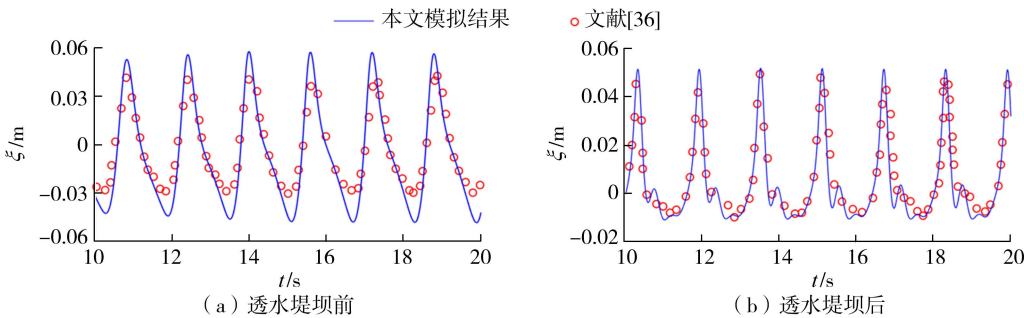


图 1 多孔介质消浪验证结果

Fig. 1 Validation results of wave dissipation by porous media

随后复演 He 等^[37]的物理模型试验,开展考虑红树林根、茎、叶的消波验证。不同水深条件下的拖曳力系数采用 Hu 等^[38]的经验公式计算获得,该经验公式适用于雷诺数 Re 介于 300~4 700 之间。

为较好地模拟根、茎、叶的消浪效果,选取两组植被消浪数值模拟试验工况 A、B,采用密集圆柱模拟红树林的冠层与根部结构,通过调整根、茎、叶 3 层密集圆柱的直径、密度与高度,使其形态及消浪效果与物理模型试验相似。两组工况均为入射波高 $H_0 = 0.05\text{ m}$,周期 $T = 1\text{ s}$,植被密度为 100 株/m^2 ,叶的 C_D 为 4.42,工况 A、B 的 d 分别为 0.25、0.45 m;工况 A 中根、茎的 C_D 分别为 1.70、1.37,工况 B 分别为 1.32、1.19。

图 2 为沿程透射系数 K 随着波浪在植被上传播距离逐步衰减的过程,其中横坐标为沿着植被的距离 x 与波长 L 的比值,工况 A、B 情况下数值模拟与物理模型试验结果吻合良好,表明 SWASH 模型能够较好地模

拟考虑根、茎、叶细节特征的植被消浪过程。

2.2 试验工况设置

本文基于 SWASH 模型构建数值波浪水槽,水槽左侧设置无反射造波边界,右侧边界布设海绵层用于吸收透射波浪。海绵层长度选 L 的 3~5 倍,本文取 9 m。模型垂向采用 4 层分层剖分以获取良好的模拟精度,水平网格尺寸为 0.05 m,计算时间步长取 0.01 s。

根据布拉格共振原理^[39],为取得最大的波浪反射率和最小的波浪透射率,牡蛎礁布设间距取 $0.5L$;综合协同消浪布局要求,牡蛎礁与红树林的间距取 $0.75L$ 。布置 4 排牡蛎礁,红树林植被区总长为 3.0 m,数值模拟试验布置见图 3。按照 1:10 的比例尺,牡蛎礁高度取 0.10 m,宽度取 0.25 m^[40]。

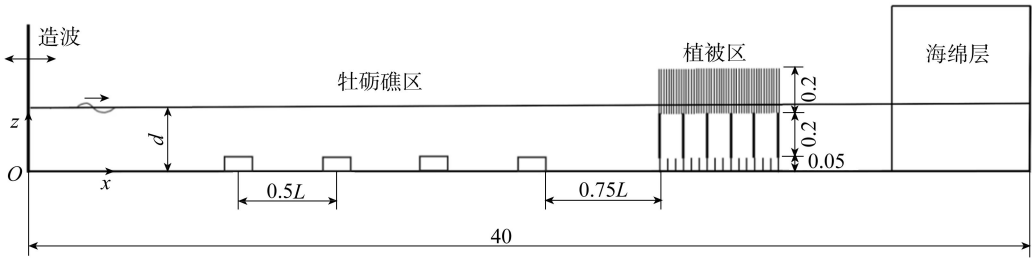


图 3 牡蛎礁与红树林协同消浪数值模拟试验布置(单位:m)

Fig. 3 Layout of numerical simulation test for synergistic wave dissipation by oyster reefs and mangroves (unit: m)

红树科 Rhizophora 约占全球红树林分布总量的 90%,是海岸带生态防护与修复工程中应用最为广泛的典型树种。结合典型淤泥质海岸潮位变化范围及红树林植株生长形态特征^[41-42],采用高度为 0.45 m 的红树林作为概化模型。设置红树林密度为 40、60、80 株/ m^2 ,考虑红树林根、茎、叶的不同形态对消浪效果的不同影响,数值模型中将红树林分层概化为密集圆柱体,其中单株红树林的根、茎、冠层的直径分别为 0.006、0.01、0.001 m,高度分别为 0.05、0.20、0.20 m,布设密度分别为 10、1、90 根/株,红树林的拖曳力系数见表 1。为更好地模拟红树林冠层与根系的垂向消浪作用,需考虑垂向阻力。Suzuki 等^[43]研究表明,SWASH 模型模拟试验需要考虑孔隙率和惯性力作用,惯性力附加质量系数取 1。试验工况采用规则波作为入射波,周期为 1.6 s 保持不变,设置 0.05、0.10 m 两种波高,0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45 m 共 6 种水深工况,布置工况分为单一牡蛎礁消浪 M1、单一红树林消浪 M2 和牡蛎礁与红树林组合消浪 M1-2,共组合形成 84 组数值模拟试验工况,系统探究牡蛎礁、红树林单独作用及二者协同作用下的消浪减灾规律。

表 1 红树林根、茎、叶的拖曳力系数取值

Table 1 Drag coefficient values of roots, stems, and leaves of mangroves

不同植被 部位	拖曳力系数					
	$d=0.20\text{ m}$		$d=0.35\text{ m}$		$d=0.45\text{ m}$	
	$H_0=0.05\text{ m}$	$H_0=0.10\text{ m}$	$H_0=0.05\text{ m}$	$H_0=0.10\text{ m}$	$H_0=0.05\text{ m}$	$H_0=0.10\text{ m}$
根	1.60	1.26	1.82	1.34	1.93	1.38
茎	1.32	1.15	1.43	1.19	1.48	1.21
叶	4.42	3.58	4.42	4.42	4.42	4.42

2.3 经验公式假设与推导

采用 K 评价不同减灾要素组合方案的减灾效能, K 越小,表示综合减灾性能越好。 K 由减灾要素区域后方的透射波高 H_t 与 H_0 的比值确定:

$$K=H_t/H_0$$

(11)

为探讨各减灾要素在协同减灾中的作用,利用不同的水深、波高、红树林密度下的透射系数数据集,拟合确定理论公式的待定参数,建立组合工况透射系数与各单一减灾要素透射系数的理论公式,比较各减灾要素对应的相关参数,分析量化各减灾要素在协同减灾过程中的贡献权重,并揭示其协同减灾机理。以组合工况

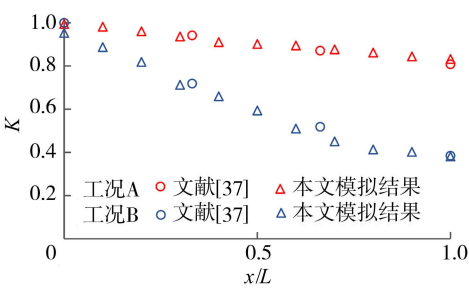


图 2 考虑根、茎、叶的植被消浪验证结果

Fig. 2 Validation results of wave dissipation by vegetation considering roots, stems, and leaves

M1-2 为例,其透射系数 K_{12} 可按式计算:

$$K_{12} = \alpha K_1^\beta K_2^\gamma$$

(12)

式中: K_1 、 K_2 分别为单独布置牡蛎礁和单独布置红树林的透射系数; α 、 β 、 γ 为待定系数,由不同水深、波高和周期条件下得到的透射系数数据集拟合确定。

3 试验结果分析

3.1 牡蛎礁消浪减灾特性

M1 工况下,不同水深和波高组合条件下沿程透射系数变化曲线如图 4 所示。

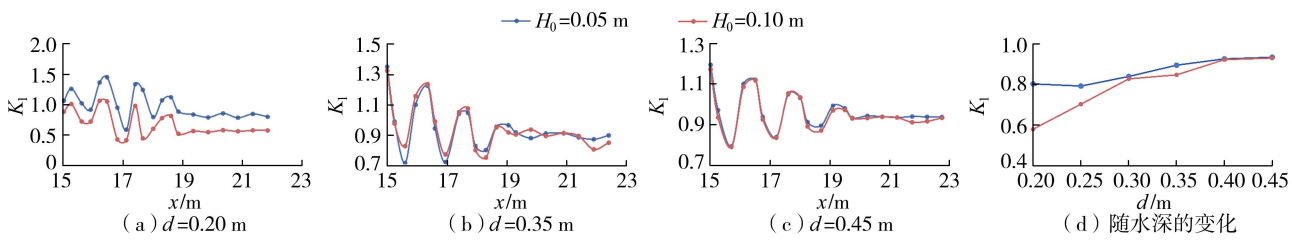


图 4 牡蛎礁沿程透射系数变化

Fig. 4 Variation of transmission coefficient along oyster reef

由图 4(a) 可见, $d=0.20\text{ m}$ 时,波浪在经过前两排牡蛎礁时 K_1 有所增大,在牡蛎礁中间区域前段迅速降低,在下一排牡蛎礁前迅速增大。对比 H_0 分别为 0.05、0.10 m 时的 K_1 差值沿程变化, $H_0=0.05\text{ m}$ 时, K_1 普遍较 $H_0=0.10\text{ m}$ 时高出 20%。

由图 4(b)(c) 可知, $d=0.35, 0.45\text{ m}$ 时,波浪经过单个牡蛎礁和牡蛎礁中间区域前段时 K_1 减小,在下一排牡蛎礁前 K_1 则快速增大,并出现明显波浪壅高现象。两种波高情况对比表明,波浪经过前两座牡蛎礁时沿程 K_1 差异较小;当 d 与牡蛎礁高度之比大于 3 时, H_0 对牡蛎礁沿程 K_1 变化影响微弱。

波浪在经过牡蛎礁过程中, H_1 普遍有明显的下降过程,该过程主要是反射波与入射波叠加作用所致。水深较浅时,受牡蛎礁透水性的影响,波浪发生变形与破碎,致使其沿程 K_1 变化规律与 $d=0.35, 0.45\text{ m}$ 时有所区别。

图 4(d) 为牡蛎礁消浪作用下 K_1 随 d 的变化规律。相同 H_0 时,随着 d 的增大, K_1 普遍呈增大趋势。在 $H_0=0.10\text{ m}$ 、 $d=0.20\text{ m}$ 的工况下,由于波浪在经过牡蛎礁时发生破碎现象,牡蛎礁的消浪作用显著,这一结论与 Tao 等^[12] 的研究结论相似:当相对礁顶高度(水面与礁顶的距离)与 H_0 之比为 1 时,波浪破碎和摩擦耗散共同主导了波浪的衰减; d 由 0.20 m 增大至 0.35 m 时, K_1 迅速增大; d 由 0.35 m 增大至 0.45 m 时, K_1 继续增大但幅度明显放缓。当相对礁顶高度与 H_0 之比大于 2 时,摩擦耗散占主导地位,且随着相对礁体淹没度的增大,摩擦耗散作用逐渐减弱^[44]。因此, K_1 与 d 正相关, d 与牡蛎礁高度的比值较小时, K_1 对 H_0 的敏感性较强, d 与牡蛎礁高度的比值越大, K_1 对 H_0 的敏感性越弱。

3.2 红树林消浪减灾特性

已有研究表明,植被带沿程波高衰减规律与 Dalrymple 幂函数、Kobayashi 指数衰减公式的波高衰减规律较为吻合^[45-46]。波浪与植被结构的相互作用会诱发水体紊动,耗散规则波波浪能量,波高随之降低,且透射系数均随着波浪在植被带传播而呈逐步减小的趋势。本文采用 SWASH 模型,对单株红树林消浪的水动力特性开展研究。

由图 5(a)~(c) 可见,波高越大、植被密度越高,植被带沿程波高衰减效应越显著,且能衰减主要集中于植被带前半段。以 $d=0.35\text{ m}$ 、 $H_0=0.10\text{ m}$ 、红树林密度 60 株/ m^2 工况为例,植被带整体消浪率为 53.84%,其中前半段达 36.67%,后半段仅为 17.17%;当 $H_0=0.05\text{ m}$ 时,植被带整体消浪率为 37.64%,前、后半段分别为 22.55%与 15.09%。随着水深增加,红树林植被消浪能力逐步提升,且植被带前半段波高衰减速率明显更大。

图 5(d) 为红树林密度为 40、60、80 株/ m^2 、 $H_0=0.05, 0.10\text{ m}$ 时, K_2 随 d 的变化规律。结果表明:相同水深条件下, K_2 与植被密度、 H_0 均呈负相关关系^[47]。 $H_0=0.05\text{ m}$ 对应的 K_2 较 $H_0=0.10\text{ m}$ 时平均偏高 17.3%,且 K_2 随着植被密度的增大而减小,其对植被密度的敏感程度受 d 影响。当 d 由茎层抬升至冠层中

心高度时, K_2 对植被密度的敏感性随 d 增加逐渐增强; 当 d 由冠层中心继续上升至冠层顶部时, 该敏感性基本不再随 d 发生明显变化。

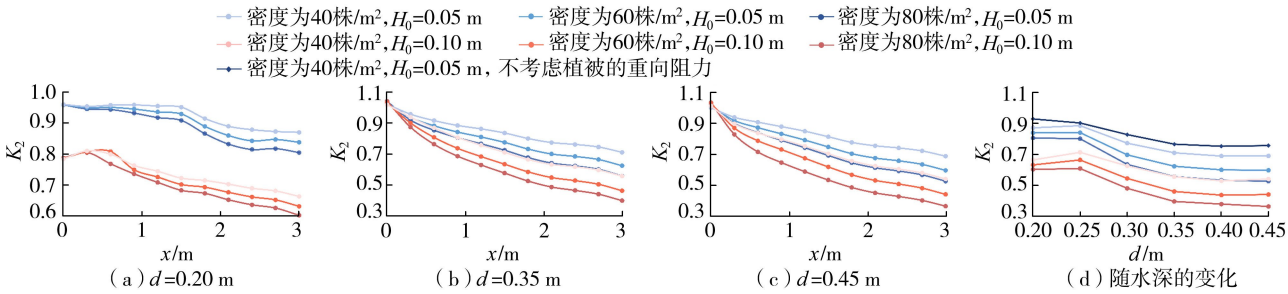


图5 红树林沿程透射系数变化

Fig.5 Variation of transmission coefficient along mangrove

整体来看, K_2 随 d 增大普遍呈现先增大、后减小并逐渐趋于稳定的变化特征。红树林复杂形态对波浪衰减过程影响显著。由于植被消浪时以植被形状阻力能量耗散效应为主导^[48]; $d=0.20\text{ m}$ (淹没度 0.44) 时, 水面低于冠层底部 0.05 m, 波浪仅与茎层产生紊动作用, 由于茎层圆柱体结构密度较小, 能量耗散有限, K_2 偏大; $d=0.25\text{ m}$ 时, 水面与冠层底部齐平, 此时 K_2 受植被密度与 H_0 共同影响, 表现为 H_0 越大、植被密度越小, K_2 反而增大。

设置红树林密度为 40 株/ m^2 、 $H_0=0.05\text{ m}$, 将考虑与不考虑植被垂向阻力的工况进行对比, 结果显示: 不考虑植被垂向阻力时 K_2 普遍较考虑垂向阻力时大 5%, 但在 $d=0.25\text{ m}$ 时二者差值较小, 说明非静压模型在模拟不同密度、不同直径的植被与波浪耦合作用时, 可能会低估植被实际的消浪效能, 而冠层密度越大, 波浪受高密度冠层垂向阻力作用越强, 消浪效果进一步提升; d 由 0.25 m 继续上升时, 波浪全部与冠层接触, 茂密枝叶与树干间的空隙被最小化^[19], K_2 迅速减小; d 介于 0.35~0.45 m 时, K_2 基本趋于稳定; $d=0.45\text{ m}$ 时, 波浪下半部分与冠层接触、上半部分在冠层顶部受界面摩擦作用, 红树林密度越大, 植被冠层与水体的界面摩擦耗能越显著, 同时冠层可促使波浪提前破碎并增强水体紊动, 进一步耗散波浪能量, 因此 K_2 最小值多出现于淹没度趋近于 1 的工况。

3.3 牡蛎礁与红树林协同减灾机制

3.3.1 不同潮位下沿程透射系数变化特性

为探讨牡蛎礁与红树林的协同消浪作用, 试验设置 $d=0.20, 0.35, 0.45\text{ m}$, 红树林密度为 80、60、40 株/ m^2 和 $H_0=0.05, 0.10\text{ m}$ 的 18 组试验工况。

a. 低潮位($d=0.20\text{ m}$)。低潮位条件下, 波浪与牡蛎礁相互作用强烈, 波浪传入红树林消浪区后, 主要与植被茎层产生摩擦耗散作用。图 6(a) 显示, 低潮位时, 波高的改变对沿程波高变化产生显著的影响。牡蛎礁与红树林协同消浪过程中, 波浪在牡蛎礁消浪区的沿程波高变化规律与牡蛎礁单独消浪时的曲线规律一致。由于低潮位水面仅接触植被茎层, 而茎层密度小, 自身反射较弱, 因此红树林密度的改变对牡蛎礁消浪区沿程波高变化的影响十分微弱。受到布拉格共振的影响, 牡蛎礁消浪区内入射波与反射波叠加, 形成沿程波动性透射系数变化曲线。 $H_0=0.05\text{ m}$ 时任意位置的沿程 K_{12} 均大于 $H_0=0.10\text{ m}$ 的工况, 因此在低潮位时, 由于波浪与牡蛎礁相互作用较强, K_{12} 随 H_0 的增大而减小, H_0 越大, 消浪效果越显著。波浪经过红树林消浪区后, $H_0=0.05\text{ m}$ 时沿程波高衰减呈现显著波动性, 且红树林密度越大, K_{12} 越小, 消浪衰减作用越强。

b. 平均潮位($d=0.35\text{ m}$)。平均潮位条件下, 波浪与牡蛎礁接触减弱, 在传播至红树林消浪区时与植被的冠层完全接触。图 6(b) 显示, 平均潮位时, 波高的改变对沿程波高变化影响较低潮位相对微弱。两种波高情况下, 牡蛎礁消浪区的沿程波高变化趋势一致, 红树林消浪区的沿程波高变化趋势也较为相似。波浪在进入红树林消浪区前发生波高壅高现象, 波高越大, 红树林消浪区波浪衰减速率越快, 衰减效应更集中于区域前半段。由于本文所设置的红树林密度较小, 可忽略密集冠层间的遮蔽作用, 因此红树林反射作用较弱, 对牡蛎礁消浪区沿程波高变化影响微弱。红树林密度的变化对植被区沿程波高变化曲线影响显著, 波浪传播至红树林区最前端时, 植被密度的改变对沿程波高变化的影响开始显现, 植被密度越大, 波浪在植被区前端 0.50 m 的衰减越剧烈。随着红树林密度的增大, 对 K_{12} 的抑制存在阈值效应, 因此随着红树林密度的增

大, K_{12} 减小速率减小。

c. 高潮位($d=0.45\text{ m}$)。高潮位条件下,波浪与牡蛎礁接触微弱,在传播至红树林消浪区时与植被的冠层一半接触、一半越过冠层顶部。图 6(c) 显示,波高对牡蛎礁消浪区沿程波高变化影响微弱,且随着 d 增大,布拉格共振作用下的反射减弱,使得牡蛎礁消浪区沿程透射系数变化区间减小。波浪在红树林消浪区前受到植被的反射作用影响,形成较强的波浪壅高,且波浪在传播至牡蛎礁与红树林的间隔段时出现了显著的波动性, H_0 对红树林消浪区的沿程波高变化曲线影响显著, H_0 越大, K_{12} 越小。随着红树林密度的增加, K_{12} 减小速率减小。植被密度改变对沿程波高变化的影响在波浪传播至红树林区时便已显现。

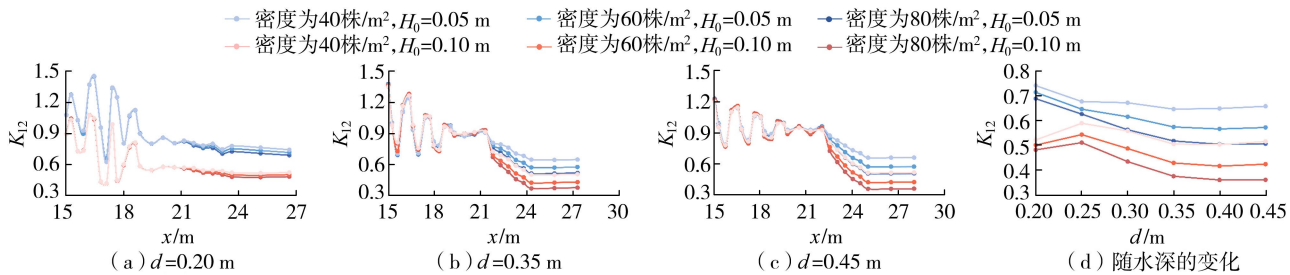


图 6 红树林与牡蛎礁协同消浪时沿程透射系数变化

Fig. 6 Variation of transmission coefficient along course during synergistic wave dissipation by mangroves and oyster reefs

3.3.2 不同水深对红树林、牡蛎礁协同减灾特性的影响

为了探究水深对牡蛎礁与红树林协同消浪效果的影响,图 6(d) 给出了相同密度、入射波高条件下透射系数随水深的变化曲线,表 2 为不同水深、密度条件下牡蛎礁单独消浪,不同密度条件下红树林单独消浪及二者协同消浪的透射系数。由表 2 可知, $d=0.20,0.25\text{ m}$ 时,牡蛎礁协同减灾效果显著,且明显削弱了植被密度对减灾效果的影响;当 d 由 0.20 m 增大至 0.25 m 时,牡蛎礁消浪作用有所减弱,而红树林消浪作用则呈先减小后增强的趋势。波高对透射系数随水深的变化规律具有显著影响, $H_0=0.05\text{ m}$ 时, K_{12} 随 d 增大而减小;大波条件下牡蛎礁消浪效果对水深敏感度较高, d 仅增大 0.05 m , K_{12} 便明显增大,因此 $H_0=0.10\text{ m}$ 时, K_{12} 随 d 增大呈先增大后减小的变化趋势。

表 2 不同条件下牡蛎礁、红树林及两者协同消浪的透射系数

Table 2 Transmission coefficients of wave dissipation by oyster reefs, mangroves, and their synergy wave under varying condition								
H_0/m	工况	密度/(株/ m^2)	透射系数					
			$d=0.20\text{ m}$	$d=0.25\text{ m}$	$d=0.30\text{ m}$	$d=0.35\text{ m}$	$d=0.40\text{ m}$	$d=0.45\text{ m}$
0.05	M1		0.806	0.779 5	0.843	0.898	0.929	0.937
		80	0.805	0.800	0.636	0.557	0.534	0.528
	M2	60	0.838	0.840	0.697	0.624	0.601	0.598
		40	0.870	0.884	0.772	0.710	0.689	0.690
	M1-2	80	0.688	0.626	0.563	0.518	0.505	0.507
		60	0.714	0.646	0.616	0.574	0.567	0.572
		40	0.741	0.677	0.672	0.646	0.649	0.658
0.10	M1		0.583	0.706	0.831	0.850	0.925	0.933
		80	0.603	0.609	0.482	0.398	0.381	0.365
	M2	60	0.632	0.664	0.546	0.462	0.438	0.442
		40	0.664	0.713	0.626	0.556	0.530	0.541
	M1-2	80	0.482	0.511	0.435	0.376	0.361	0.361
		60	0.501	0.544	0.487	0.429	0.417	0.424
		40	0.522	0.589	0.558	0.505	0.504	0.516

d 继续增大,牡蛎礁消浪的透射系数对波高的敏感性减弱,植被在减灾中起主导作用,植被密度越大,牡蛎礁对协同减灾的影响越小。 d 在 $0.25\sim0.35\text{ m}$ 时,波浪与植被冠层接触面积的增大使得植被缓流削能效益增强, K_{12} 呈减小趋势。 d 由 0.35 m 增至 0.45 m 时,红树林密度对 K_{12} 与 d 的关系产生影响,由于牡蛎礁消浪作用持续减弱,不同红树林密度下 K_{12} 变化趋势不同,这是由于红树林密度越大,其消浪效果随 d 增加的增强幅度越显著。因此在红树林与牡蛎礁的综合影响下,红树林密度为 $80\text{ 株}/\text{m}^2$ 时, K_{12} 随 d 的增大呈减

小趋势;密度为 60 株/m² 时, K_{12} 随 d 的增大基本保持稳定;密度为 40 株/m² 时, K_{12} 随 d 的增大呈上升趋势。

相较于单一牡蛎礁情况,红树林、牡蛎礁组合工况下波浪衰减率可在单一牡蛎礁情况基础上增大 6.0%~57.2%。波浪衰减率同时受到水深、红树林接触形态及牡蛎礁的共同影响;随着 d 的增大,波浪与红树林的接触面积增大,同时牡蛎礁的影响逐渐减弱,红树林的波浪衰减率逐渐增加;相较于单一红树林情况,红树林、牡蛎礁组合工况的波浪衰减率在单一红树林的基础上进一步增强了 2%~21%,当 d 与牡蛎礁高度之比小于 2.5 时,牡蛎礁对波浪削弱作用最强,波浪衰减率的增幅可达 10%~21%。

牡蛎礁作为第一道防线,通过物理阻挡和波浪反射削弱波浪能量;红树林作为第二道防线,通过摩擦阻力和能量耗散进一步减弱波浪。在低水位条件下,牡蛎礁能够更好地参与协同减灾,而红树林则更适合在高水位条件下利用冠层消浪,进而实现逐渐消能减灾。红树林、牡蛎礁两者结合形成了更加稳定的生态屏障,可以有效减少海岸侵蚀和风暴潮破坏。

3.3.3 红树林、牡蛎礁协同减灾经验公式

理论上 K_{12} 为 K_1 与 K_2 的乘积,但是从单一要素和组合要素的波浪透射系数可见,组合工况下,波能的削减并不是线性递减,而呈现多元非线性特征,因此选择对自变量进行幂函数计算。利用数值模拟试验得到的数据集,通过多元非线性回归分析建立了 K_1 、 K_2 与 K_{12} 的经验公式:

$$K_{12} = 0.8766K_1^{0.378}K_2^{0.831}$$

(13)

公式拟合基于数值模拟试验的 12 组牡蛎礁消浪 K_1 、36 组红树林消浪 K_2 和 36 组红树林与牡蛎礁协同消浪 K_{12} 的试验数据,采用 SPSS 统计软件进行多元非线性回归分析,选择 K_{12} 为因变量, K_1 、 K_2 为自变量,输入非线性表达式与参数初设值,运用非线性最小二乘法拟合,通过多次迭代观察参数变化是否稳定,确保最终残差平方和不再显著下降。图 7(a) 为数值模拟所得 K_{12} 与式(13) 计算所得 K_{12} 的拟合结果, R^2 为 0.9928,表明 K_{12} 经验公式计算值与数值模拟结果非常吻合。可见,除 $d=0.25\text{ m}$ 、 $H_0=0.05\text{ m}$ 的工况外,数值模拟结果与经验公式拟合较好,相对误差普遍小于 3%。图 7(b) 为不同水深下静水面与植被及牡蛎礁的相对关系,相同入射波高条件下,相对水深越大,红树林的消浪作用增强, K_{12} 越小。

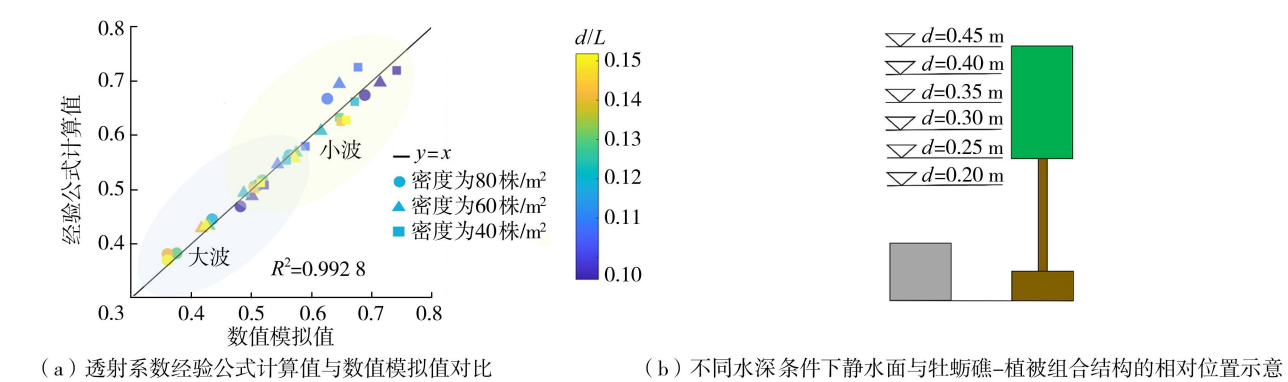


图 7 牡蛎礁与红树林组合消浪结构透射系数验证与水深影响机理

Fig. 7 Verification of transmission coefficients and water depth influence mechanism for oyster reef-mangrove combined wave dissipation structures

式(13)中, K_1 的幂指数为 0.378, K_2 的幂指数为 0.831,二者均小于 1,表明当 K_1 与 K_2 在 0~1 间变化时,牡蛎礁与红树林在协同减灾过程中存在性能差异;公式系数为 0.8766,表明牡蛎礁与红树林协同减灾组合方案的减灾效能水平得到了提升。由此可以认为,红树林在协同减灾中起主导作用,在考虑牡蛎礁与红树林协同消浪减灾时,可优先增强红树林的布置,以实现高效减灾的目的。

为进一步定量评估各减灾要素的协同效应,定义减灾要素的协同效应系数 σ ,其中减灾要素 a 对减灾要素 b 的 σ 按式(14)计算,表示在原有 b 的基础上,新增 a 后, K 的变化。 $\sigma>1$ 时表明 a 对 b 协同增强,反之表示协同削弱。

$$\sigma = K_b / K_{ab}$$

(14)

即

$$\sigma_1 = K_1 / K_{12} \quad \sigma_2 = K_2 / K_{12}$$

(15)

式中: σ_1 为 K_2 对 K_1 的协同效应系数; σ_2 为 K_1 对 K_2 的协同效应系数。

图 8(a) 为不同组合工况下红树林对牡蛎礁的协同效应,左上方存在一定的协同削弱区域,表明在原有牡蛎礁基础上新增红树林,该区域代表的工况下协同减灾效果反而比原先更差;右下方为减灾效果变好的区域, σ_1 最大可达 10 以上,协同增强效应较显著。图 8(b) 为不同组合工况下牡蛎礁对红树林的协同效应,左上方有较小一块区域存在协同削弱的可能,剩余组合工况皆可实现协同增强, σ_2 大多在 1~2 范围内,很难超过 3。综合来看,红树林协同增强潜能是牡蛎礁的 3 倍以上。

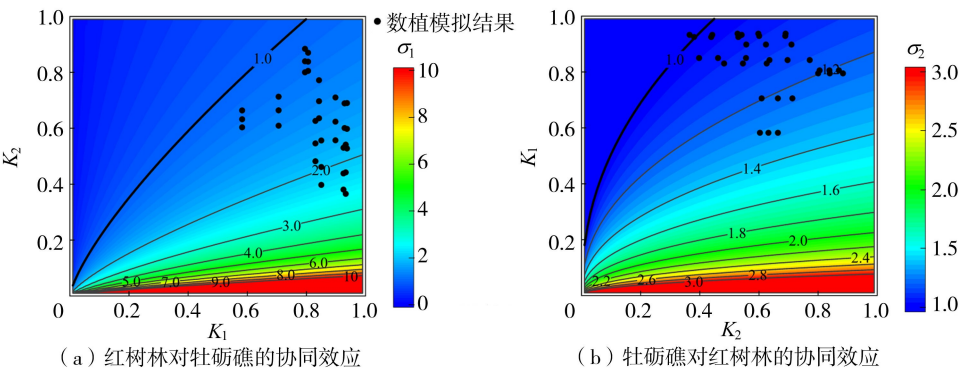


图 8 协同效应系数
Fig. 8 Synergistic effect coefficients

3.3.4 牡蛎礁对协同减灾的贡献率

为探究牡蛎礁与红树林协同减灾对消浪的贡献率,定义牡蛎礁的贡献率 P 为波浪传播经过牡蛎礁衰减波能 ΔE_1 与经过牡蛎礁和红树林衰减波能 ΔE_{12} 之比:

$$P = (H_0^2 - H_1^2)/(H_0^2 - H_{12}^2) \tag{16}$$

式中: H_1 为波浪传播至牡蛎礁与红树林中间段时的平均波高; H_{12} 为波浪传播通过红树林与牡蛎礁消浪区后的波高。

由表 3 可见, P 随 d 的增大呈先减小后趋于稳定的变化趋势。 P 受到牡蛎礁与红树林消浪性能的共同作用:低水位条件下,牡蛎礁礁顶的破波作用显著,而红树林茎秆形态密度较小,消浪作用偏弱,因此牡蛎礁 P 普遍达到 50% 以上;且红树林密度越小, P 越大,红树林密度由 80 株/ m^2 降低至 40 株/ m^2 , P 平均增加 10%;随着 d 的增大,牡蛎礁主要起摩擦消浪的作用,而红树林冠层的摩擦耗散在协同减灾中起主导作用,且红树林密度越大,波浪与植被接触面积越大, P 越小。但是高水位下,牡蛎礁仍发挥着 20% 左右的消浪贡献。

表 3 不同红树林密度下牡蛎礁在协同减灾中的贡献率

Table 3 Contribution rate of oyster reefs to synergistic disaster mitigation under different mangrove densities						
d/m	贡献率/%					
	$H_0=0.05\text{ m}$			$H_0=0.10\text{ m}$		
	80 株/ m^2	60 株/ m^2	40 株/ m^2	80 株/ m^2	60 株/ m^2	40 株/ m^2
0.20	51	55	61	81	84	89
0.25	53	55	59	64	67	73
0.30	35	38	42	25	28	31
0.35	31	33	37	23	23	25
0.40	17	18	20	16	17	16
0.45	18	19	22	18	18	19

4 结 论

a. 多排间隔布置的牡蛎礁单一消浪时,沿程透射系数变化曲线是由布拉格共振影响下的强反射波与入射波叠加、牡蛎礁的消能共同作用形成的,且入射波高越大、水深越小,透射系数越小;红树林单一消浪时,相同条件下,透射系数与植被密度、波高均呈负相关关系:入射波高越大,植被带沿程波高衰减越剧烈,波能衰减更集中于植被带前半部分。在水位不大于红树林高度的情况下,随着淹没度增大,由于红树林冠层密集,透射系数继续减小。

b. 在考虑牡蛎礁与红树林协同消浪减灾时,可优先增强红树林的栽种密度,以达到高效减灾的目的。低潮位时,牡蛎礁消浪作用显著,波高对沿程波高变化影响较为突出;平均潮位与高潮位时,红树林消浪起主导作用,波高对牡蛎礁消浪区沿程波高变化影响微弱,且波高和红树林密度越大,红树林消浪区波浪衰减越迅速。

c. 牡蛎礁作为第一道防线,通过物理阻挡和波浪反射削弱波浪能量;植被作为第二道防线,通过摩擦阻力和能量耗散进一步减弱波浪。在低水位条件下,牡蛎礁能够更好地参与协同减灾,其贡献率在 50% 以上,而红树林则更适合在高水位条件下利用冠层消浪,进而实现逐级消能减灾。两者结合形成更加稳定的生态屏障,可以有效减少海岸侵蚀和风暴潮破坏。

d. 牡蛎礁与红树林组合方案能有效提升减灾效能水平,呈现非线性协同模式。本文首次提出的多元非线性经验公式,可用于计算组合方案的协同消浪透射系数。通过量化分析减灾要素协同效应系数,牡蛎礁与红树林均能较大概率提升彼此减灾效果,且红树林对牡蛎礁的协同增强效应要显著强于牡蛎礁对红树林的协同增强效应。因此在淤泥质海岸的实际工程中,可优先考虑加强红树林的栽种,以达到高效协同减灾的目的。

参考文献:

[1] Sunkur R,Kantamaneni K,Bokhoree C,et al. Mangroves' role in supporting ecosystem-based techniques to reduce disaster risk and adapt to climate change:a review[J]. Journal of Sea Research,2023,196:102449.

[2] 王旭晨,孙林云,肖立敏,等. 沙质海岸建筑物下游海岸侵蚀及防护措施研究综述[J]. 中国港湾建设,2023,43(8):1-8. (Wang Xuchen,Sun Linyun,Xiao Limin,et al. Summary of research on downstream coast erosion and protection measures of sandy coastal buildings[J]. China Harbour Engineering,2023,43(8):1-8. (in Chinese))

[3] Jordan P,Fröhle P. Bridging the gap between coastal engineering and nature conservation? A review of coastal ecosystems as nature-based solutions for coastal protection[J]. Journal of Coastal Conservation,2022,26(2):4.

[4] Zheng Jinhai,Xu Wei,Tao Aifeng,et al. Synergy between coastal ecology and disaster mitigation in China:policies,practices,and prospects[J]. Ocean & Coastal Management,2023,245:106866.

[5] 邵光学. 海洋生态文明建设的历史进程、基本经验与深化路径[J]. 水利经济,2024,42(5):54-61. (Shao Guangxue. Historical process,basic experience and deepening path of marine ecological civilization construction in China[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(5):54-61. (in Chinese))

[6] Scyphers S B,Powers S P,Heck K L,et al. Oyster reefs as natural breakwaters mitigate shoreline loss and facilitate fisheries[J]. Plos One,2011,6(8):e22396.

[7] Chowdhury M S N,Walles B,Sharifuzzaman S M,et al. Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast[J]. Scientific Reports,2019,9(1):8549.

[8] Wiberg P L,Taube S R,Ferguson A E,et al. Wave attenuation by oyster reefs in shallow coastal bays[J]. Estuaries And Coasts,2019,42(2):331-347.

[9] 冯卫兵,华伟豪,张俞. 基于 FUNWAVE-TVD 模型的岸礁次重力波数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):349-357. (Feng Weibing,Hua Weihao,Zhang Yu. Numerical simulation of infragravity wave over fringing reef based on FUNWAVE-TVD model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(4):349-357. (in Chinese))

[10] 陈松贵,陈汉宝,赵洪波,等. 珊瑚礁地形上胸墙波浪力大水槽试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):65-70. (Chen Songgui,Chen Hanbao,Zhao Hongbo,et al. Experimental study of wave forces on the seawall of coral reef in large wave flume[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(1):65-70. (in Chinese))

[11] Morris R L,La Peyre M K,Webb B M,et al. Large-scale variation in wave attenuation of oyster reef living shorelines and the influence of inundation duration[J]. Ecological Applications,2021,31(6):1-15.

[12] Tao Aifeng,Liu Jianhao,Xu Wei,et al. Investigation on wave attenuation characteristics and mechanism of oyster castles under regular waves[J]. Ocean Engineering,2025,323:120617.

[13] 洪新,程建婷,李庆杰,等. 滨州双层牡蛎礁消浪效果的试验研究[J]. 海洋湖沼通报,2023,45(4):106-111. (Hong Xin,Cheng Jianting,Li Qingjie,et al. An experimental study on dissipating effect of double-layer oyster reefs in Binzhou coastal seawater[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2023,45(4):106-111. (in Chinese))

[14] Gong Shangpeng,Xu Sudong,Yin Kai,et al. Experimental study on wave attenuation and cross-shore profiles by submerged flexible vegetation[J]. Ocean Engineering,2024,307:118218.

[15] 高翔,王柯萌,武国相,等. 黄河三角洲互花米草整治对潮滩湿地防灾功效和沉积动力的影响[J]. 海洋与湖沼,2023,54

- (6):1586-1596. (Gao Xiang, Wang Kemeng, Wu Guoxiang, et al. Effects of spartina alterniflora removal on storm surge attenuation and sediment trapping in the intertidal zone of the yellow river delta[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*,2023,54(6):1586-1596. (in Chinese))
- [16] Luo Feng, Wu Hongbo, Chen Zhipeng, et al. Long-term simulation of saltmarsh landscape based on hydro-sediment and vegetation dynamics: assessing future stability[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2025, 323: 109400.
- [17] 吴毅, 武国相, 张红, 等. 盐沼植被对海堤防护增效的量化研究[J/OL]. *海洋工程*, 1-9. [2025-4-13]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1423.P.20250409.1500.006>. (Wu Yi, Wu Guoxiang, Zhang Hong, et al. Quantification of the enhanced protective effects of salt marsh vegetation on coastal dikes[J/OL]. *The Ocean Engineering*, 1-9. [2025-4-13]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1423.P.20250409.1500.006>. (in Chinese))
- [18] Weaver R J, Stehno A L. Mangroves as coastal protection for restoring low-energy waterfront property[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(3): 470.
- [19] Kamil E A, Takaijudin H, Hashim A M. Mangroves as coastal bio-shield: a review of mangroves performance in wave attenuation[J]. *Civil Engineering Journal*, 2021, 7(11): 1964-1981.
- [20] Liu Shuo, Xu Sudong, Yin Kai. Optimization of the drag coefficient in wave attenuation by submerged rigid and flexible vegetation based on experimental and numerical studies[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285: 115382.
- [21] Qu Ke, Lan Gangyun, Sun Weiyi, et al. Numerical study on wave attenuation of extreme waves by emergent rigid vegetation patch[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109865.
- [22] 张小霞, 林鹏智. 滨海植物的海岸带减灾特性研究综述[J]. *海洋通报*, 2023, 42(5): 585-600. (Zhang Xiaoxia, Lin Pengzhi. A review of coastal disaster mitigation by vegetation[J]. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(5): 585-600. (in Chinese))
- [23] Xie Danghan, Schwarz C, Kleinhaus M G, et al. Implications of coastal conditions and sea level rise on mangrove vulnerability: a bio-morphodynamic modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2022, 127(3): e2021JF006301.
- [24] Yin Kai, Lin Ming, Xu Sudong, et al. Numerical investigation of submerged flexible vegetation dynamics and wave attenuation under combined waves and following currents[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 278: 114437.
- [25] 朱小伟, 侯珊, 陈俊昂, 等. 红树林生态系统中潮滩与植物消浪特性试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6): 99-106. (Zhu Xiaowei, Hou Peng, Chen Junang, et al. Experimental study on wave attenuation characteristics of tidal flat and vegetation in mangrove ecosystem[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2023, 51(6): 99-106. (in Chinese))
- [26] Lian Yushun, Ma Jiantao, Li Dongang, et al. Experimental investigation on wave attenuation capacity of kelp farms[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 337: 121906.
- [27] 周悦, 董增川, 徐伟, 等. 基于SWAN模型的风生波河道防浪林消浪模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(4): 323-328. (Zhou Yue, Dong Zengchuan, Xu Wei, et al. Wave attenuation simulation of vegetation based on the SWAN model in rivers[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2019, 47(4): 323-328. (in Chinese))
- [28] Chen Zhipeng, Luo Feng, Zhou Guanghai, et al. Hydrodynamic modeling study of nature-based hybrid coastal defense strategy applied in salt marsh restoration[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2024, 298: 108666.
- [29] Chen Cheng, Peng Chen, Nandasena N A K, et al. Protective effect of ecological embankment on a building subjected to tsunami bores[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114638.
- [30] Sreeranga S, Takagi H, Shirai R. Community-based portable reefs to promote mangrove vegetation growth: bridging between ecological and engineering principles[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(2): 590.
- [31] Raju R D, Arockiasamy M. Coastal protection using integration of mangroves with floating barges: an innovative concept[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(5): 612.
- [32] Jiang Beihan, Fu Chenming, You Tuofu, et al. A laboratory study on wave attenuation by oyster reefs-mangrove system[J]. *Geo-Marine Letters*, 2025, 45(1): 13.
- [33] Magdalena I, Karima N, Delfina P, et al. Wave damping by breakwater and mangrove for protecting shoreline[J]. *Results in Engineering*, 2022, 16: 100693.
- [34] Peng Ming, Zhang Jingliang, Zhu Yan, et al. Experimental study on wave attenuation and stability of ecological dike system composed of submerged breakwater, mangrove, and dike under storm surge[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 151: 104144.
- [35] Liu Qinqin, Liu Xiaojian, Zhu Xiaowei, et al. Experimental study on the restoration and protection of mangrove tidal ecosystems flat located in a high wave area[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2025, 323: 109386.
- [36] Garcia N, Lara J L, Losada I J. 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51(10): 991-1020.

[37] He Fei, Chen Jie, Jiang Changbo. Surface wave attenuation by vegetation with the stem, root and canopy[J]. Coastal Engineering, 2019, 152: 103509.

[38] Hu Zhan, Suzuki T, Zitman T, et al. Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current-wave flow[J]. Coastal Engineering, 2014, 88: 131-142.

[39] 郑金海, 余豪丰, 陶爱峰, 等. 波浪布拉格共振研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 83-87. (Zheng Jinhai, Yu Haofeng, Tao Aifeng, et al. Research progress in wave Bragg resonance[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(3): 83-87. (in Chinese))

[40] Morris R L, Bilkovic D M, Boswell M K, et al. The application of oyster reefs in shoreline protection: are we over-engineering for an ecosystem engineer? [J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 56(7): 1703-1711.

[41] Maza M, Adler K, Ramos D, et al. Velocity and drag evolution from the leading edge of a model mangrove forest[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(11): 9144-9159.

[42] Wang Yanxu, Yin Zegao, Liu Yong. Experimental investigation of wave attenuation and bulk drag coefficient in mangrove forest with complex root morphology[J]. Applied Ocean Research, 2022, 118: 102974.

[43] 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.

[44] Xu Wei, Tao Aifeng, Wang Risheng, et al. Review of wave attenuation by artificial oyster reefs based on experimental analysis [J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117309.

[45] Kobayashi N, Raichle A W, Asano T. Wave attenuation by vegetation [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1993, 119(1): 30-48.

[46] Dalrymple R A, Kirby J T, Hwang P A. Wave diffraction due to areas of energy dissipation[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1984, 110(1): 67-79.

[47] 陈杰, 何飞, 蒋昌波, 等. 植物消波机制的试验与理论解析研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 433-445. (Chen Jie, He Fei, Jiang Changbo, et al. Advances in laboratory experiment, theoretical analysis of mechanism of wave attenuation by vegetation [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 433-445. (in Chinese))

[48] Zhang Rong, Chen Yongping, Lei Jiaxin, et al. Experimental investigation of wave attenuation by mangrove forests with submerged canopies[J]. Coastal Engineering, 2023, 186: 104403.

(收稿日期: 2025-04-15 编辑: 胡新宇)

(上接第 36 页)

[24] 王其松, 邓家泉, 刘诚, 等. 叠加风场在南海台风浪数值后报中的应用研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(7): 70-79. (Wang Qisong, Deng Jiaquan, Liu Cheng, et al. Application of superimposed wind fields to the hindcast modelling of typhoon-induced waves in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(7): 70-79. (in Chinese))

[25] 林金波, 毛鸿飞, 吴光林, 等. 基于混合风场的南海台风浪数值模拟[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(6): 44-52. (Lin Jinbo, Mao Hongfei, Wu Guanglin, et al. Numerical modeling of typhoon waves in South China Sea based on mixed wind field[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(6): 44-52. (in Chinese))

[26] 尹超. 海南岛近海热带气旋引起的台风浪风险评估研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2022.

[27] 田奇, 毕恺峰, 谢凌曦. 基于人工智能大模型的中期全球气象预报新方法[J]. 中国基础科学, 2024, 26(1): 7-13. (Tian Qi, Bi Kaifeng, Xie Lingxi. Accurate medium-range global weather forecasting based on large AI models [J]. China Basic Science, 2024, 26(1): 7-13. (in Chinese))

[28] 李江夏, 胡玉植. ERA-Interim 和 ERA-5 再分析资料中台风模拟精度评估[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 62-69. (Li Jiangxia, Hu Yuzhi. Assessment of typhoons in ERA-Interim and ERA-5 reanalysis datasets[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1): 62-69. (in Chinese))

[29] 季余, 朱业, 李莉, 等. 浙江沿海台风浪模式的参数适应性研究[J]. 海洋预报, 2023, 40(2): 22-31. (Ji Yu, Zhu Ye, Li Li, et al. Study on the parameters adaptability of typhoon wave model in Zhejiang coastal area[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(2): 22-31. (in Chinese))

[30] Pan Y, Chen Y, Li J, et al. Improvement of wind field hindcasts for tropical cyclones[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(1): 58-66.

(收稿日期: 2024-09-13 编辑: 彭桃英)