

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.013

红树林生态系统中潮滩与植物消浪特性试验

朱小伟^{1,2}, 侯 棚^{1,3}, 陈俊昂⁴, 刘晓建^{1,3}, 王 强^{1,3}, 王世俊^{1,2}

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 水利部珠江河口海岸工程技术研究中心, 广东 广州 510611; 3. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611; 4. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 采用室内水槽物理模型试验研究了潮滩、植物和红树林生态系统的消浪特性, 量化了潮滩对红树林生态系统波高衰减的贡献。结果表明: 随着植物淹没度的增大, 潮滩、红树林生态系统的波高比均逐渐增大, 即消浪效果越来越弱, 而植物的波高比则是先减小再增大, 水位在树冠中心时消浪率远高于其他植物部位; 随着相对波高的增大, 潮滩的波高比先稳定在 1.0 附近然后再减小, 红树林生态系统的波高比逐渐减小, 而植物的波高比先减小再增大; 随着波长与植物带宽度的相对宽度增大, 潮滩的波高比先略减小再增大, 但多数稳定在 1.0 附近, 而植物与红树林生态系统的波高比先增大再略微减小; 潮滩对红树林生态系统波高衰减贡献随淹没度减小逐渐增大, 最大可达 63%; 波浪在红树林生态系统传播过程呈非线性衰减, 单位长度的波高衰减率在植物带前 1/4 宽度远大于后 3/4 宽度。

关键词: 红树林生态系统; 植物; 潮滩; 不规则波; 消浪特性; 高效区间

中图分类号: TV139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0099-08

Experimental study on wave attenuation characteristics of tidal flat and vegetation in mangrove ecosystem

ZHU Xiaowei^{1,2}, HOU Peng^{1,3}, CHEN Junang⁴, LIU Xiaojian^{1,3}, WANG Qiang^{1,3}, WANG Shijun^{1,2}

(1. Pearl River Water Resources Research Institute, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China;

2. Research Center of Engineering Technology of the Pearl River Coast and Estuary of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China;

3. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China;

4. Guangdong Hydropower Planning and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, China)

Abstract: A physical model experiment was carried out in the laboratory flume to study the wave attenuation characteristics of tidal flat, vegetation and mangrove ecosystem, while the wave-height attenuation contribution of tidal flat to the mangrove ecosystem was quantitatively analyzed. The results show that with the increase of vegetation submergence, the wave height ratio of tidal flat and mangrove ecosystem increases gradually, namely the wave attenuation effect is getting weaker and weaker. The wave height ratio of vegetation first decreases and then increases, and the wave height ratio of vegetation is much higher than that of other vegetation parts when the water level is in the center of vegetation canopy. With the increase of relative wave height, the wave height ratio of tidal flat first stabilizes around 1.0 and then decreases, and the wave height ratio of mangrove ecosystem gradually decreases, while the wave height ratio of the vegetation first decreases and then increases. With the increase of relative width, the wave height ratio of tidal flat first decreases slightly and then increases, but most of them stabilize around 1.0, while the wave height ratio of vegetation and mangrove ecosystem first increases and then decreases slightly. The contribution of tidal flat to the wave height attenuation of mangrove ecosystem increases with the decreases of vegetation submergence, and the maximum contribution can reach 63%. Wave propagation in the mangrove ecosystem is characterized by the nonlinear attenuation and the attenuation rate of wave height per unit length is much larger in the first quarter width than that in the last three quarters width of the vegetation belt.

Key words: mangrove ecosystem; vegetation; tidal flat; irregular wave; wave attenuation; high efficiency district

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000, 2022YFC3202200); 水利部重大科技项目(SKR-2022036); 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学)开放基金项目(202209); 华东师范大学国家河口海岸学重点实验室开放课题(SKLEC-KF202110)

作者简介: 朱小伟(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: xwzhugz@qq.com

通信作者: 侯棚(1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事洪潮灾害防御、海岸带保护修复研究。E-mail: 59879674@qq.com

引用本文: 朱小伟, 侯棚, 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.

红树林是一种分布于热带和亚热带地区的潮间带植物群落,具有防风消浪^[1-3]、固碳储碳^[4]和维护生物多样性^[5-6]等重要功能,近年来在海岸带修复和海堤生态化改造中受重视程度不断提高^[7-8]。红树林生态系统主要由植物及其赖以生存的潮滩构成,其对波浪的衰减作用被关注的越来越多^[9-10]。

国内外开展的大量红树林等植物消波研究表明,影响红树林生态系统消波能力的关键控制因子为水动力条件(波高、波周期及水深等)^[11-13]、植物参数^[14-18]、潮滩地形^[19-21]等。潮滩地形在植物消浪中对波高的衰减具有不可忽视的作用:马焱贝^[9]通过在崇明岛现场监测发现,光滩区域与芦苇覆盖区域波高衰减率都随波高的增加而逐渐上升,光滩区域波高衰减率约为芦苇覆盖区的45.45%;Moller等^[20]通过监测盐沼和光滩的波浪衰减情况,发现盐沼区和光滩区波高平均下降了60.96%、15.29%;陈玉军^[21]通过对海南东寨港的光滩和红树林的消波现场数据对比分析,初步推测了红树林的底泥对消波率的影响比例在11.3%~19.8%,受制于现场观测数据局限性,未对水深、波况等多动力变化因子进行深入分析。在植物消浪理论模型中,波浪能量的衰减一般是通过添加植物拖曳力、地形摩阻影响项来考虑,因此量化植物和潮滩对波浪传播变化影响过程可为理论模型参数的率定提供参考。同时,研究红树林生态系统的沿程波高衰减效率,对于更经济、更高效减灾的红树林种植修复布局有一定的指导意义。基于此,本文选取以白骨壤为代表的乡土红树植物建立了树根、树干及树冠模型树,在水槽中构建了潮滩、潮滩和植物组成的红树林生态系统2种不同场景,采用不规则波研究不同植物淹没度、不同相对波高及不同相对宽度等条件下潮滩、植物和红树林生态系统波高沿程变化规律,并量化了潮滩在多动力因子变化条件下对红树林生态系统波高衰减的影响程度。

1 物理模型试验

1.1 模型设计

阳江市江城区新冲河河口西侧(111°56′28.31″E,21°42′46.82″N)具有丰富的红树林资源,以其典型植物白骨壤为试验原型,经现场实地观测,其植物尺寸参数为:树高2.8 m,树干高1.1 m,冠幅尺寸为1.9 m×2 m(制作模型时将该原型尺寸简化为1.95 m×1.95 m),胸径0.08 m,根系范围0.56 m。在物理模型试验时,综合考虑试验水槽尺寸、波浪要素及造波机造波能力等条件,选定本次试验的长度比尺为1:10。模型植株的树干采用硬质PVC圆管,树冠由PE材料制作而成的枝叶组成,根系采用PE材料的仿真草甸。模型植株固定于孔距100 mm的PVC板上,每块PVC板的布置密度为60株/m²,试验中共选用4块板,单块板长1 m。模型植株的尺寸参数(按1:10比尺缩放)及单板布置方式如图1所示。

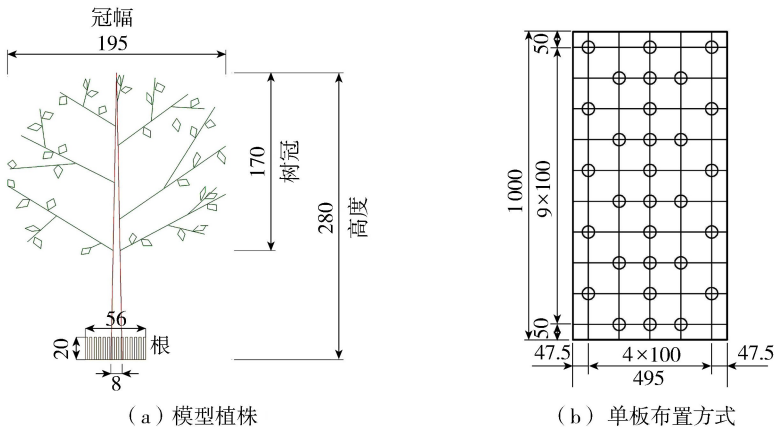


图1 模型树的尺寸参数及单板布置方式(单位:mm)

Fig.1 Dimension parameters of model vegetation and their arrangement on single board (unit: mm)

1.2 试验布置

物理模型试验在珠江水利科学研究院试验基地的波浪水槽内进行,水槽长52 m、宽1 m、高1.3 m,试验布置如图2所示(图中 h 为深水区水深, h_v 为植物高度, h_m 为植物带水深)。在距离造波板25 m处设置潮滩地形,并在水槽中央布置一块厚度为1 cm的玻璃隔板,且左侧(沿波浪传播方向的隔板左侧区域)另外添加植物模型组成红树林生态系统(包含植物和潮滩),右侧仅潮滩。潮滩地形水平段长8.0 m,高0.29 m,前后各设置一个过渡斜坡,坡比约1:7。左侧植物带开始于斜坡顶端,即距离造波板27 m位置处,植物分布带长

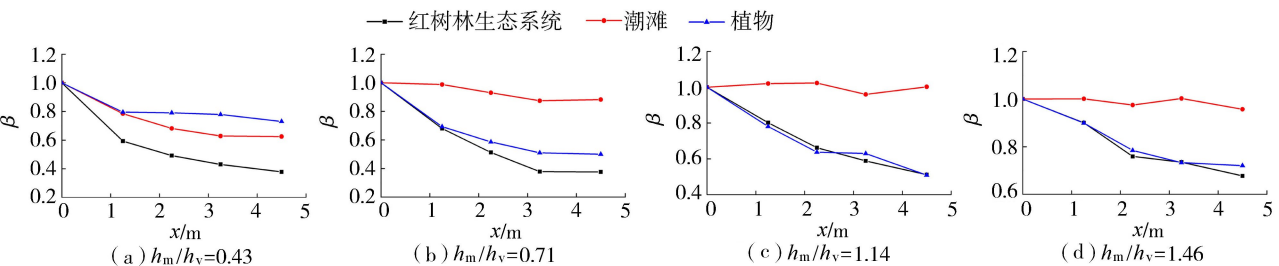


图3 不同植物淹没度情况下波高比的沿程变化

Fig.3 Variation of wave height ratio along path under different vegetation submergence

没有变化,且波高比大于潮滩,即植物波高衰减量小于潮滩。从沿程波高比衰减量看,红树林生态系统和潮滩的前1 m 波高比减小量分别为0.41、0.21,后3 m 的波高比减小量分别为0.21、0.16,即红树林生态系统前1/4 与后3/4 每单位长度内波高比衰减率分别为41%、7%,潮滩则为21%、5.3%,这说明波浪在潮滩、红树林生态系统传播过程中均呈现非线性衰减,且在前1/4 长度内波高迅速减小,后3/4 长度内波高衰减速度明显降低。

由图3 可知随着植物淹没度的增大,潮滩、红树林生态系统的波高比均逐渐增大,即消浪能力逐渐减小,而植物的波高比则是先减小再增大,即消浪能力先增大后减小,这与植物的垂向空间分布有关,随着淹没水位的不同,植物的消浪率也体现一定的差异,淹没度较低时主要消浪层在树干和树根,当淹没度升至0.71 时,主要消浪层在树冠,而树冠的消浪率远高于其他部位。从波高比沿程变化看,植物与红树林生态系统的波高比沿波浪传播方向呈现减小趋势,而潮滩的波高比沿程变化则趋于平缓,稳定在1.0 附近。从沿程波高比衰减量看,随着植物淹没度的增加,红树林生态系统前1 m 波高比衰减量由最初的0.41(图3(a))减小至0.1(图3(d)),衰减逐渐趋缓,后3 m 波高比衰减量由0.21(图3(a))先增大至0.30(图3(b))再减小至0.22(图3(d)),即单位长度波高比衰减量由最初的0.07(图3(a))增大至0.1(图3(b))再减小至0.07(图3(d)),最高点0.1(图3(b))处淹没水位在植物的树冠中部,为消浪率最高的部位。而潮滩前1 m 波高比衰减量由0.21(图3(a))降至0(图3(b)~(d)),后3 m 的波高比减小量由0.16(图3(a))降至0(图3(c)~(d)),衰减量均逐渐趋于0。

综上,随着植物淹没度的增大,由于水深增大,潮滩对波浪传播过程中波高衰减的贡献逐渐变小,导致潮滩的波高比均逐渐增大。由于植物形阻耗散最大的部位为树冠,随着水深增加植物的波高比则是先减小再增大。潮滩、植物两者综合作用后导致红树林生态系统的波高比逐渐增大。从沿程波高比衰减量看,波浪在红树林生态系统传播过程中呈现非线性衰减,单位长度的波高比衰减率在植物带前1/4 宽度远大于后3/4 宽度,说明植物带消浪的高效区间在前1/4 宽度。

2.1.2 入射波波况的影响

2.1.2.1 相对波高

J3、J4、J5 和 J6 工况对应的不规则波有效波高分别为0.06、0.08、0.12、0.16 m,对应的相对波高(H_{rmsi}/h_m)分别为0.13、0.18、0.28 和0.37,选取这4 组工况研究在谱峰周期为1.94 s 的不规则波浪作用下,不同 H_{rmsi}/h_m 对红树林生态系统消浪效果的影响,结果如图4 所示。

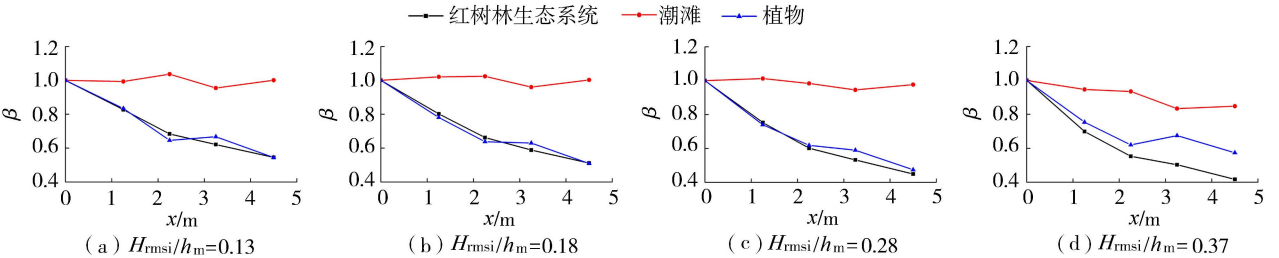


图4 不同相对波高情况下波高比的沿程变化

Fig.4 Variation of wave height ratio along path under different relative wave height

由图4(a)可知,当 $H_{rmsi}/h_m=0.13$ 时,从波高比沿程变化看,潮滩的波高比沿程在1.0 附近波动,红树林

生态系统的波高比则随着波浪的传播逐渐减小,而植物的波高比沿波浪传播方向先减小然后在中部 2 ~ 3 m 区域基本不变而后再减小。植物和红树林生态系统两者的波高比沿程变化差别较小,潮滩几乎不引起波高的衰减,波高衰减主要依赖于植物能量耗散。从沿程波高比衰减量看,红树林生态系统前 1 m 波高比减小量为 0.17,后 3 m 的波高比减小量为 0.28,前 1/4 与后 3/4 单位长度内波高比衰减率分别为 17%、9.3%。

由图 4 可知,随着相对波高的增大,潮滩的波高比先稳定在 1.0 附近然后再减小,红树林生态系统的波高比逐渐减小,而植物的波高比先减小再增大,说明相对波高增大到 0.37 后,波浪在红树林生态系统中的衰减由波浪自身衰减所占比例有所上升,植物所占比例有所下降。从沿程波高比变化看,潮滩在相对波高小于 0.37 时的波高比仍稳定在 1.0 附近(图 4(a) ~ (c)),增大至 0.37 时波高比则有减小的趋势,最小波高比为 0.83(图 4(d))。植物的波高比在小于 0.37 时基本维持之前的变化趋势,大于 0.37 时,在植物带中部略有增大然后再减小。红树林生态系统的波高比沿着波浪传播方向仍然呈现减小趋势。从沿程波高比衰减量看,随着相对波高的增大,红树林生态系统前 1 m 的波高比衰减量由最初的 0.17(图 4(a))增大至 0.30(图 4(d)),而后 3 m 波高比衰减量则维持 0.28 ~ 0.30(图 4(a) ~ (d))之间,基本保持不变,前 1/4 与后 3/4 单位长度内波高比衰减量的比值则由 1.8(图 4(a))增大至 3.2(图 4(d))。

综上,随着相对波高的增大,潮滩对波浪传播衰减的影响增加,潮滩的波高比先基本不变然后再减小。相对波高在一定范围内时(本试验为小于 0.37),植物的波高比逐渐减小,当相对波高增大到一定值后(本试验为 0.37),由于波浪自身破碎衰减量增加导致植物对波高衰减贡献下降,波高比又逐渐增大。综合潮滩、植物两者影响后,红树林生态系统的波高比则逐渐减小。从沿程波高比衰减量看,随着相对波高的增加,前 1/4 长度的波高比衰减量逐渐增大,而后 3/4 长度波高比衰减量则基本保持不变。

2.1.2.2 相对宽度

J9、J5、J8 和 J7 工况对应的谱峰周期分别为 1.45、1.94、2.18、2.42 s,相对宽度 (L_p/B) 分别为 0.63、0.91、1.03、1.20,选取这 4 组工况研究在入射有效波高为 0.12 m 的不规则波浪作用下,不同相对宽度对红树林生态系统消浪效果的影响,如图 5 所示。

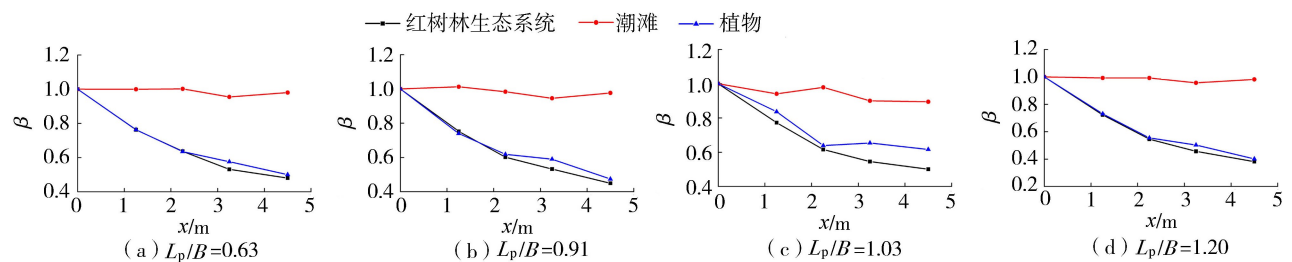


图 5 不同相对宽度情况下波高比的沿程变化

Fig.5 Variation of wave height ratio along path under different relative width

由图 5(a)可知,当相对宽度为 0.63 时,从波高比沿程变化看,潮滩波高比沿程稳定在 1.0 附近,红树林生态系统的波高比则沿波浪传播方向逐渐减小,植物波高比变化趋势基本与红树林生态系统一致,且两者的波高比沿程变化差别较小,潮滩几乎不引起波高比的衰减。从沿程波高比衰减量看,红树林生态系统前 1 m 波高比衰减量为 0.28,后 3 m 的波高比衰减量为 0.34,前 1/4 与后 3/4 单位长度内波高比衰减率分别为 28%、11.3%。

由图 5 可知,随着相对宽度的增大,潮滩的波高比先略有减小再增大,但多数稳定在 1.0 附近,而植物与红树林生态系统的波高比先增大再略微减小。从沿程波高比变化看,红树林生态系统的波高比沿波浪传播方向仍然呈现减小趋势,而在相对宽度大于 1.03 和小于 1.03 时潮滩的波高比沿程则稳定在 1.0(图 5(a) (b) (d))附近,等于 1.03 时波高比沿程略有减小,最小波高比为 0.89(图 5(c)),可能是由于特定周期条件下的波浪在潮滩聚焦波高增大后再衰减引起的。在相对宽度大于 1.03 和小于 1.03 时,植物和红树林生态系统两者的波高比在植物带前半段几乎没有差异,而在后半段植物的波高比略大于红树林生态系统。从沿程波高比衰减量看,随着相对宽度的增大,红树林生态系统前 1 m 的波高比衰减量由最初的 0.28(图 5(a))减小至 0.24(图 5(d)),而后 3 m 波高比则由 0.34(图 5(a))减小至 0.28(图 5(d)),前 1/4 与后 3/4 单位长度内波高比衰减量的比值为 2.4 ~ 2.5(图 5(a) ~ (d)),波动范围较小。

综上,随着相对宽度的增大,潮滩的波高比除了在特定周期波浪由于波浪聚焦波高增大再衰减引起减小外,其余基本无大的变化。植物和红树林生态系统的波高比则是先增大再略微减小,即植物和红树林生态系统对长周期波的衰减效果总体要差于短周期波,这与长周期波有较强的透浪特性难以被衰减有关。从沿程波高比衰减量看,红树林生态系统前 1/4 与后 3/4 内单位长度波高比衰减量比值基本不随相对宽度变化而变化。

2.2 潮滩对红树林生态系统波高衰减的贡献

波高衰减率 α 表示潮滩、红树林生态系统沿程波高衰减变化率:

$$\alpha = (1 - \beta) \times 100\%$$

2.2.1 不同植物淹没度的影响

由图 6(a)可知,随着波浪的传播,潮滩与红树林生态系统的波高衰减率不断增加但速度趋缓,其中潮滩波高衰减率从 21% 增长到 37%,占红树林生态系统的波高衰减率约 53% ~ 63%。由图 6 可知,随着植物淹没度的增大,潮滩波高衰减率不断减小,在 $h_m/h_v=0.71$ 时降低为 12%,在红树林生态系统的波高衰减率中占比约 19%。当 $h_m/h_v>0.71$ 后,波高衰减率降低至 0 附近,对红树林生态系统波高衰减几乎没有贡献。

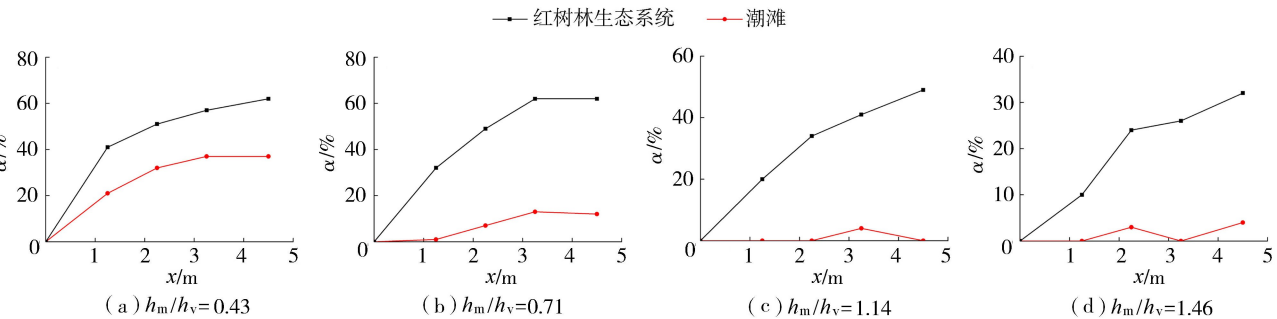


图 6 植物淹没度对沿程波高衰减率的影响

Fig. 6 Influence of vegetation submergence on the attenuation rate of wave height

2.2.2 不同入射波况的影响

由图 7(a)可知,随着波浪的传播,潮滩波高衰减率在 0 附近小幅波动,红树林生态系统波高衰减率不断增大但速度趋缓,其中潮滩波高衰减率不超过 5%,在红树林生态系统的波高衰减率中占比小于 10%。由图 7 可知,随着相对波高的增大,红树林生态系统波高衰减率逐渐增大,在 H_{rmsi}/h_m 为 0.18 ~ 0.28 时,潮滩波高衰减率及对红树林生态系统波高衰减的贡献变化不大,而在 H_{rmsi}/h_m 达到 0.37 时,潮滩波高衰减率增大至 17%,在红树林生态系统的波高衰减率中占比增大至约 34%。

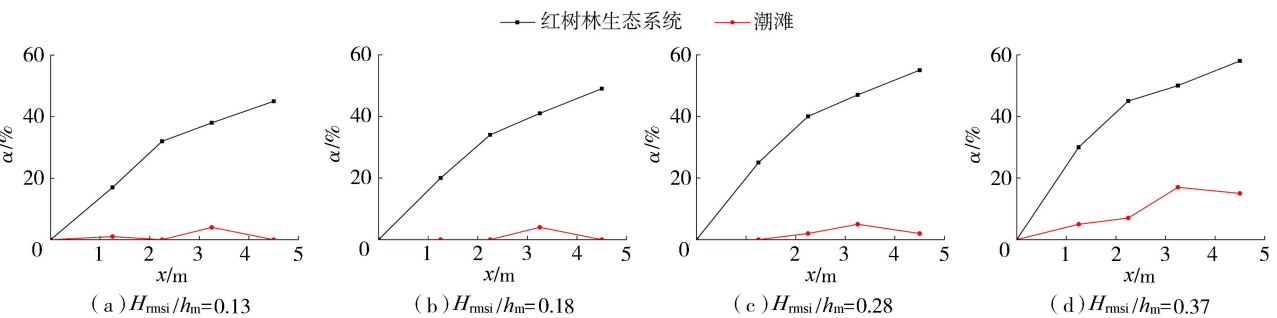


图 7 相对波高对沿程波高衰减率的影响

Fig. 7 Influence of relative wave height on the attenuation rate of wave height

由图 8(a)可知,随着波浪沿植物带传播,潮滩波高衰减率在 0 附近小幅波动,红树林生态系统波高衰减率不断增大但速度趋缓,潮滩波高衰减率不超过 5%,在红树林生态系统的波高衰减率中占比小于 10%。随着相对宽度的增大(图 8),红树林生态系统波高衰减率逐渐减小,潮滩波高衰减率在相对宽度为 1.03 时(即约 1 倍波长时)在 $x=4.5$ m 波高衰减率增至 11%,在红树林生态系统的波高衰减率中占比约 21%,其余相对宽度条件下对红树林生态系统的沿程波高衰减贡献变化不大。

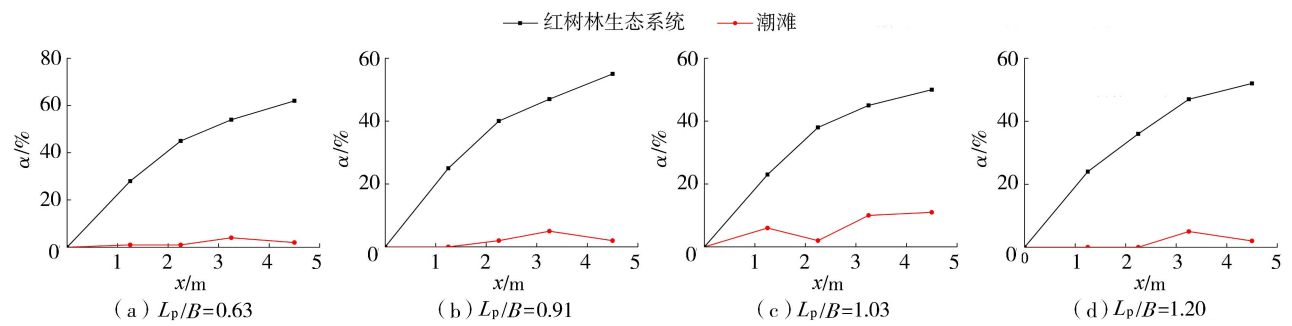


图 8 相对宽度对沿程波高衰减率的影响
Fig. 8 Influence of relative width on the attenuation rate of wave height

3 结 论

- a. 随着植物淹没度的增大,潮滩、红树林生态系统的波高比均逐渐增大,即消浪效果越来越弱,而植物的波高比则是先减小再增大,水位在树冠中心时消浪率远高于其他部位。随着相对波高的增大,潮滩的波高比先稳定在 1.0 附近然后再减小,红树林生态系统的波高比逐渐减小,而植物的波高比先减小再增大。随着相对宽度的增大,潮滩的波高比先略有减小再增大,但多数稳定在 1.0 附近,而植物与红树林生态系统的波高比先增大再略微减小。
- b. 从沿程波高衰减量看,波浪在红树林生态系统传播过程呈非线性衰减,单位长度的波高衰减速率在植物带前 1/4 宽度远大于后 3/4 宽度,说明植物带消浪的高效区间在前 1/4 宽度,对于本文试验来说,高效区间在原型植物带的前 10 m。
- c. 在本文试验工况条件下,潮滩对红树林生态系统波高衰减贡献随着植物淹没度的减小、相对波高的增大逐渐增大,贡献最大可达 63%,除了特定周期条件下波浪外,潮滩贡献一般不随相对宽度变化。需要指出的是,本文红树林生态系统中植物消浪因素是除去红树林生态系统中潮滩贡献外的,剩余的消波作用均由植物贡献,但实际植物和潮滩的相互作用可能也会对波浪传播变化产生影响,有待后续进一步的研究。

参考文献:

[1] 邹学锋. 红树林区域的波浪传播数学模型和消波特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.

[2] 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. (WANG Lei,FANG Kezhao,YIN Jing,et al. A numerical model for coastal wave propagation in the rigid vegetation area[J]. The Ocean Engineering, 2015,33(6):62-69. (in Chinese))

[3] 任杰,董增川,徐伟,等. 基于 MIKE21 FM 模型的河道防浪林行洪影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):420-424. (REN Jie,DONG Zengchuan,XU Wei,et al. Study on influence of river wavebreak forest on flood discharge ability based on MIKE21 FM Model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(5):420-424. (in Chinese))

[4] 陈小刚,李凌,杜金洲. 红树林和盐沼湿地间隙水交换过程及其碳汇潜力[J]. 地球科学进展,2022,37(9):881-898. (CHEN Xiaogang,LI Ling,DU Jinzhou. Porewater exchange and the related carbon sink potential in mangroves and saltmarshes [J]. Advances in Earth Science,2022,37(9):881-898. (in Chinese))

[5] 张灿,王传珺,孟庆辉,等. 我国典型海洋生态系统健康状况及生物多样性分析[J]. 海洋环境科学,2022,41(3):423-429. (ZHANG Can,WANG Chuanjun,MENG Qinghui,et al. Ecosystem health status and biodiversity of typical marine ecosystems in China[J]. Marine Environmental Science,2022,41(3):423-429. (in Chinese))

[6] 于一雷,郭菊兰,武高洁,等. 清澜港红树林浮游植物群落结构及水质对应分析[J]. 水资源保护,2018,34(2):102-110. (YU Yilei,GUO Julan,WU Gaojie,et al. Phytoplankton community structure and water quality correspondence analysis of mangrove forests in Qinglan Harbor[J]. Water Resources Protection,2018,34(2):102-110. (in Chinese))

[7] 易雨君,刘奇,王雪原,等. 生态海岸防护工程研究进展与展望[J]. 海洋与湖沼,2022,53(4):806-812. (YI YuJun,LIU Qi,WANG Xueyuan,et al. Coastal ecological infrastructure: research progress and prospect[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022,53(4):806-812. (in Chinese))

[8] 夏继红,严忠民. 生态河岸带的研究进展与发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(3):252-255. (XIA Jihong,YAN Zhongmin. Advances in research of ecological riparian zones and its trend of development[J]. Journal of Hohai

University (Natural Sciences),2004,32(3): 252-255. (in Chinese))

[9] 马烨贝. 崇明岛东南侧盐沼滩消浪研究[D]. 上海:华东师范大学,2021.

[10] 沈颖,刘洁. 滩地红树林引起的波浪衰减特性实验分析[J]. 科学技术与工程,2016,16(22):100-104. (SHEN Ying, LIU Jie. The laboratory study on wave attenuation by mangroves forests[J]. Science Technology and Engineering,2016,16(22): 100-104. (in Chinese))

[11] BLACKMAR P J, COX D T, WU W C. Laboratory observations and numerical simulations of wave height attenuation in heterogeneous vegetation[J]. Journal of Waterway,Port,Coastal,and Ocean Engineering,2014,140(1): 56-65.

[12] 曹海锦,冯卫兵. 人工柔性植物场中波浪衰减特性研究[J]. 海洋工程,2014,32(3): 36-44. (CAO Haijin, FENG Weibing. Study on the characteristic of wave dissipation by artificial flexible vegetation field[J]. The Ocean Engineering,2014,32(3): 36-44. (in Chinese))

[13] HU Z, SUZUKI T, ZITMAN T, et al. Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current-wave flow[J]. Coastal Engineering,2014,88(3): 131-142.

[14] 何飞,陈杰,蒋昌波,等. 规则波作用下植物带波高衰减特性实验研究[J]. 海洋科学进展,2018,36(1):146-158. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental study on wave height attenuation induced by the coastal vegetation under regular waves[J]. Advances in Marine Science,2018,36(1):146-158. (in Chinese))

[15] 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))

[16] 赵东梁,韩梅,喻国良. 浮式植物体消浪效果的试验研究[J]. 水资源保护,2015,31(5):53-57. (ZHAO Dongliang, HAN Mei, YU Guoliang. Experimental study on effectiveness of floating vegetation on wave dissipater[J]. Water Resources Protection, 2015,31(5): 53-57. (in Chinese))

[17] 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. (WANG Jianting, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Influencing factors analysis of wave dissipation of the wavebreak forest in mainstream of Nenjiang River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1): 30-36. (in Chinese))

[18] 龚尚鹏,陈杰,蒋昌波,等. 规则波作用下植物概化模型消波实验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2020,35(2): 213-221. (GONG Shangpeng, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental study on wave elimination of vegetation generalized model under regular wave action[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2020,35(2):213-221. (in Chinese))

[19] MAZA M, LARA J L, LOSADA I J. Experimental analysis of wave attenuation and drag forces in a realistic fringe Rhizophora mangrove forest[J]. Advances in Water Resources,2019,131: 103376.

[20] MOLLER T, SPENCER J R. Wave transformation over salt marshes:field and numerical modelling study from North Norfolk, England[J]. Estuarine, Coastal, and Shelf Science,1999,49(3): 411-426.

[21] 陈玉军. 红树林消波效应观测与模拟[D]. 北京:中国林业科学研究院,2012.

[22] GODA Y. A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum[J]. Coastal Engineering,1999,41(1): 1-20.

(收稿日期:2022 - 11 - 14 编辑:刘晓艳)