

我国沿海生态植被消波研究进展

陈 橙,李梓萱

(福州大学土木工程学院,福建 福州 350108)

摘要:为对我国沿海生态植被消波研究进行综述,首先以消波植被作为切入点,分析了植被的刚度、分布以及非均匀性对消波效果的影响;进而,以水动力输入条件为切入点,综述了不同波浪情况下生态植被消波研究方法的异同;最后,将传统防波堤与生态植被消波进行对比,探讨二者在海岸条件、消波机制、生态效益、后期维护等方面的差异。认为消波植被刚度、分布、非均匀性等问题可以作为后续研究的方向,同时可尝试将防波堤消波与生态植被消波相结合,兼顾防灾减灾和生态保护的功能。

关键词:生态植被;消波试验;生态堤;研究进展

中图分类号:TV92 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0001-07

Research progress on wave dissipation of ecological vegetation in coastal area of China//CHEN Cheng, LI Zixuan
(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The research progress on wave attenuation of coastal ecological vegetation in China was reviewed. Wave dissipation vegetation was taken as the starting point to analyze the effects of stiffness, distribution and inhomogeneity of vegetation on the wave attenuation effect. Then, taking hydrodynamic input conditions as the hitting-point, the similarities and differences of wave dissipation methods under different wave conditions were summarized. Finally, the comparison between traditional breakwater and ecological vegetation wave attenuation was made to discuss the differences in coastal conditions, wave attenuation mechanisms, ecological benefits, engineering maintenance, etc. It is suggested that the problems of plant stiffness, distribution and non-uniformity can be taken as the direction of future study. The combination of wave attenuation by breakwater and ecological vegetation should be attempted, considering the functions of disaster prevention and mitigation, and ecological protection.

Key words: ecological vegetation; wave dissipation test; ecological breakwater; research progress

我国沿海地区经济发达,城市化水平高,人口密度较大,具有十分重要的地位和作用。但由于其特殊的地理位置,沿海地区却易遭受各类由极端水动力条件引发的自然灾害,如热带气旋引发的强降雨、台风浪、风暴潮等^[1]。当灾害来临时,沿海地区人民的生命财产安全会受到严重威胁。由此,海岸工程防灾减灾(特别是沿海消波问题)成为越来越多学者关注的热点。

工程中常见的消波方法主要有两类:防波堤消波及生态植被消波。防波堤消波是通过阻止波浪传播或使波浪破碎以保护后方岸线与建筑物的消波方式,目前对其研究已较为成熟。而生态植被消波方兴未艾,主要方式为补种防波植物,近年来在我国南方部分海岸已开始应用。本文主要综述生态植被消波的研究进展,旨在为今后的相关研究提供借鉴。

1 生态植被消波研究进展

学者们已通过数模或物模的方式对生态植被消波展开研究,并取得了初步的研究成果。当前研究的热点问题可凝练为以下三方面:①植物的刚度问题。由于现实中植物往往是刚性(枝干、根部)和柔性(树叶)相结合,因此在研究中对模型刚度的概化将影响消波研究结果的精确度;②植物的分布问题。由于工程实践中植物的数量将影响到总投资,因此在研究中植物的分布方式将直接关系到工程应用中的投资效益和消波效果;③植物的非均匀性问题。由于现实中滨海植物由多种群构成,因此在研究中考考虑它们的非均匀性可提高整体消波效果的精确度。

1.1 消波试验中植物的刚度问题

目前,植物消波试验研究的相关文献尚未对植

物的刚性和柔性进行明确界定。在以往的研究中,海草类等草本植物通常被视作柔性植物;而红树林等具有根、茎、叶结构的木本植物常被视作刚性植物。在木本植物的消波试验中,研究者常用竹棍、木棒、有机玻璃管等材料进行概化模拟,从而导致树冠部分的柔性难以准确地进行概化处理。

根据消波植物特性不同,学者们采用刚性或柔性植被模型分别进行研究。在物理模型试验方面,何飞等^[2]综合考虑刚性植物的根、茎、叶的影响,对刚性植物透射系数的影响因子进行无量纲参数变换,研究了不同密度条件下刚性植物群的消波能力。为进一步探寻植物带各部分波高衰减规律,何飞等^[3]对 Dalrymple 波浪传播模型^[4]和 Kobayashi 波浪传播模型^[5]进行分析,试验表明叶的存在加强了植物的消波效果和植物边界效应,且植物的综合消波效果并非由植物的各个组成部分单纯线性叠加而成。曾思益等^[6]用有机玻璃管对刚性植物进行概化处理(图 1(a)),试验表明在一定淹没度、入射波高条件下,沿水流方向的波高衰减强度的敏感度逐渐降低。Tan 等^[7]对 4 种不同刚度的概化植物模型进行试验(图 1(b)),探究二次波峰、紊流强度、波能耗散等变化,认为刚度越大,湍流强度越大,能量耗散愈加明显。邓伟等^[8]在规则波条件下,用人工柔性植物模拟滩地柔性植物,认为柔性植物对长周期波浪的消减效果较好。Wang 等^[9]通过将数值模拟和物理模型试验相结合,将植物概化为刚性圆柱体,并基于 IHFOAM 求解器建立三维数值模型,得出波浪非线性对波浪衰减起至关重要作用的结论。不仅如此,Yin 等^[10]还指出随着速度比的增加,阻尼因子比均遵循指数增长趋势,但波流反向情况的增长速率远远大于波流同向情况。Zhao 等^[11]将物理模型试验和数值模拟相结合,研究表明刚性植物引起的后方水流和逆向水流均可增强或抑制由植被引起的波浪衰减。

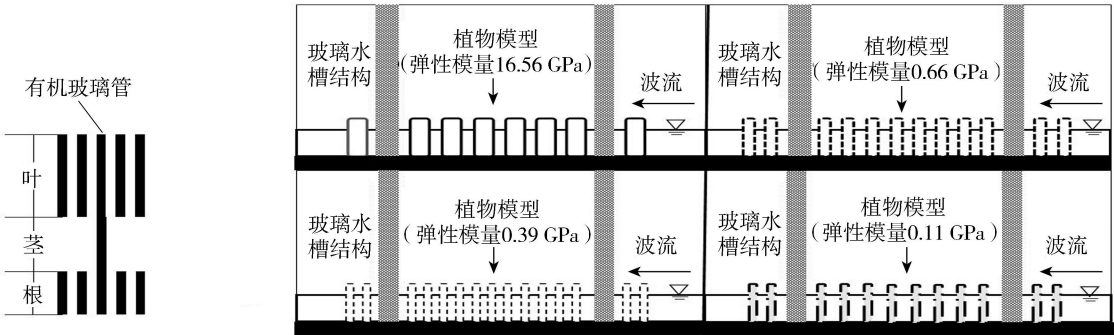
在前人研究的基础上,吉红香等^[12]设计出由刚

性树干和柔性枝叶的组合模型树,并研究不同植物情况下对规则波的消波效果。结果表明,植物整体主要依靠表面糙率、绕流、干-流相互作用对波浪进行消减,但刚性树干的消波效果不及柔性枝叶。何飞等^[13]利用 PVC 管模拟植物树干,用聚乙烯材料模拟树冠,用塑料球架模拟植物根部,得出根部的消波效果弱于冠部的结论。谭超等^[14]通过改变植物杆群的刚度,提出刚性植物杆群内的波峰流速比柔性植物杆群内大;柔性植物杆群内,每个流速周期内均存在双峰结构。

综上所述,目前在生态植被消波试验的相关文献中,对植物的刚度尚未有明确定义。今后的研究可设置更大的植物刚度变化范围,为植物刚性和柔性的划分提供界定依据。

1.2 消波试验中植物的分布问题

在生态植被消波试验中,学者们对植物的分布方式也有一定的研究。陈杰等^[15]设计了 6 种刚性植物分布方式(图 2(a)),认为分布密度相同时,三角形分布消波效果优于其他分布形式;陈橙等^[16]在海啸波冲击红树林模型的试验中,亦得出三角形交错分布最优的结论。张明亮等^[17]改变刚性植物的高度、纵向分布方式,模拟自然条件下刚性植物的淹没和非淹没 2 种状态,使研究结果与实际更加符合。彭浩等^[18]基于 Nepf^[19]对植物带交错分布排列结构的定义,对比分析了矩形、交错、组合 3 种刚性植物分布条件下的消波效果(图 2(b))。彭浩等^[20]研究了单株刚性植物和簇状刚性植物在规则波和不规则波条件下的消波效果,认为对于单株-矩形分布植物带,密度相同时增加相邻植物间沿流向的距离可使消波效果增强;对于单株-交错分布植物带,植物拖曳力系数随植物淹没度和植物间距的增大而增大;对于簇状植物带,适当增加植物因素及减小透射系数影响因素,消波效果增强(植物分布如图 2(c)所示)。Tang 等^[21]基于二阶完全非线性 Boussinesq 方程,建立二维数值模拟水槽,探究植物带宽度变化对波浪爬升的



(a) 植物模型根茎叶概化处理

(b) 4种不同刚度的植物概化模型

图 1 试验中的植物概化模型

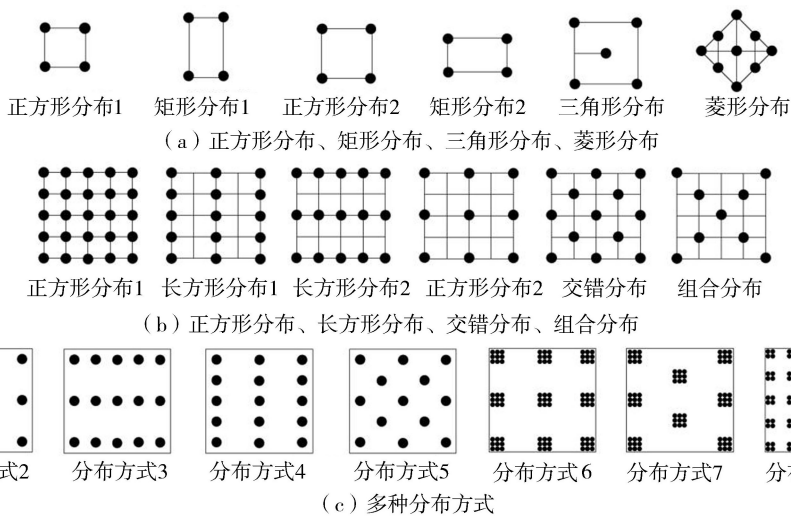


图2 消波试验中植物的不同分布方式

影响,认为在植被区域长度不变的情况下,随着波浪周期增加,波高衰减率总体呈现上升趋势。

有别于对单种植物进行研究,张茂章等^[22]从林相结构角度出发,对乔木、灌木、草本的复合结构进行研究(图3),结果表明:在高水位情况下,单一乔木林消波效果最好;在中低水位情况下,复合林相消波效果好。因此,在工程实践中应因地制宜地搭配适合的植物种类,组成单一林相或复合林相的防浪林,从而达到预期的消波效果。

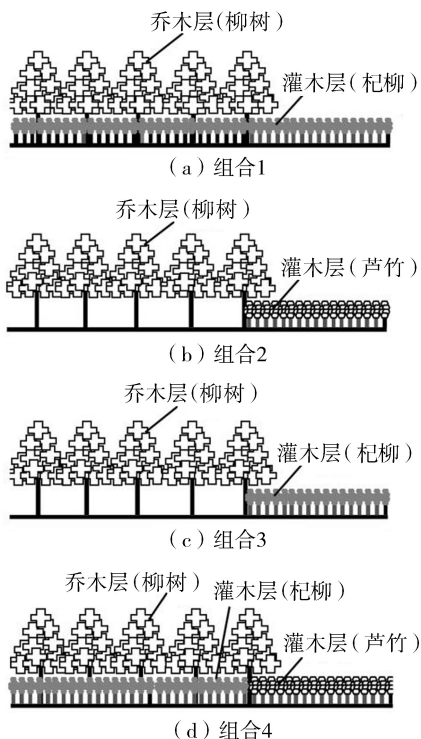


图3 生态消波研究中不同林相复合结构示意图

目前,不同林相组合的研究较为新颖,也更接近于海岸植物多样化的实际情况。今后可在单一植被消波研究的基础上,将适应当地生存环境的多种植物进行林相组合,以期在实际工程中推广应用。此

举不仅能提高消波效果,还能为恢复海岸带生态多样性提供助力。

1.3 消波试验中植物的非均匀性问题

除了上述问题,也有学者考虑植物密度分布的非均匀性问题。蒋昌波等^[23]在植物区设置了4种不同密度线性变化的方式,认为植物区的非均匀性对孤立波的消减作用较小,波高和流速沿程衰减曲线皆呈现出类“0”字形或类“8”字形。由此可推断,在波浪传播的路径上调整植物分布密度,可对消波效果进行优化。Li等^[24]改变波浪条件和植物密度,认为茎密度越大,波高衰减越明显,且该特性在规则波条件下最为明显。考虑到海岸植被呈斑块状分布的实际情况,Zhao等^[25]设定6种不同植物密度分析斜坡上孤立波爬高的衰减过程,得出植物内部均匀分布比非均匀分布具有更强消波效果的结论。Chen等^[26]对植物冠层中的垂直密度变化进行研究,提出植物场内部的湍流主要是由于植物顶部冠层的剪切作用和植物主干后部的尾流共同产生的;在纯波条件下,平均波速和最大波速均出现在冠层顶部附近。

2 不同波浪情况下的植被消波研究

在生态植被消波研究中,实验室及数值模拟所使用的波浪分类方式有所不同:规则波和不规则波、线性波和非线性波、孤立波(模拟深水海啸波)和破碎波(模拟上岸海啸波)等。表1将生态植被消波研究依据植物刚度进行分类,列出了实验室及数值模拟中所使用的波浪类型。

从表1可知,有关规则波和不规则波研究较多,但对孤立波(如深海中的海啸)、破碎波(如浅水区或上岸后的波流)的研究较少。实际上,沿海地区地形复杂、潮位和水深多变,波浪的浅水变形和破碎

表 1 依据植物刚度进行分类的波浪种类

植物刚度	研究方法	波浪种类
刚性	物理模型:用木质材料(木棒、牙签、桧柏树枝)模拟植物 ^[19,26-28]	规则波
	物理模型:用有机玻璃管模拟植物 ^[29-31]	规则波、不规则波、孤立波
	数学模型:基于非静压假设的单相流模型 NHWAVE 建立二维数值波浪水槽 ^[32]	规则波、不规则波
	数学模型:立面二维紊流波浪模型,树干区和树冠区分别用异同参数多孔介质区模拟 ^[33]	破碎波
柔性	物理模型:聚乙烯材料模拟植物 ^[8,16,34]	规则波、不规则波、海啸波
刚性柔性相结合	数学模型:SWAN-VEG 模型 ^[35]	规则波
	物理模型:用高分子材料制作矩形植物生长框,封闭 PVC 管制作浮筒,圆叶聚乙烯模拟植物 ^[36]	规则波
	物理模型:用聚乙烯材料模拟植物树干并带有柔性树叶 ^[3,12]	规则波、不规则波
多种刚度	物理模型:用不同刚度硅胶圆杆模拟植物群 ^[7]	规则波

情况具有多样性和当地的局限性,由此植物的消波能力也会受到上述因素的影响。

针对波流结合情况,Wang 等^[37]观察了海三棱草植被区域的水流形态,认为在单一水流条件下,植物的存在会抑制水深 10 cm 以下区域的湍流,同时加强该深度以上、植物冠层以下区域的平均湍流强度;存在波浪的情况下,植物能吸收由波浪引起的湍流。Zhao 等^[38]认为在孤立波与水流同向情况下,正向水流对波流阻尼系数影响较大,并且会导致较大的波能量衰减率。Zhang 等^[39]基于有限体积 Roe 方法提出了海啸波传播的水动力模型,表明增大植被宽度和植被密度可以提升海啸波的波高衰减率,同时也会影响海啸波到达高地的时间。Li 等^[40]采用 3D RANS 模型研究在植被场中规则波、不规则波和随机波的传播情况,阐明在植被区域波浪能量耗散导致波浪振幅和速度减小,并通过黏性阻尼传递给上游区域。Zhan 等^[41]基于 Navier-Stokes 方程、RNG 湍流模型和 VOF 方法,建立部分区域带有植被的三维数值模型,研究单向和多向不规则波在该区域上的传播情况,模拟结果与 Vincent 等^[42]的试验数据吻合度较高,并揭示了在多向不规则波条件下植被区域对波浪的阻挡效应机制。

对于波浪爬升斜坡的情况,Yin 等^[43]基于 RANS 的三维数值模型,对带有植被的斜坡进行波浪爬升试验和数值模拟计算。结果显示,当波浪在斜坡上爬升时,会表现出非线性并出现浅滩效应,并指出植物消减效果与波长、斜坡坡度、水平距离相关。姚宇等^[44]研究孤立波沿斜坡的爬升情况,基于改进的 Boussinesq 方程得到植被的拖曳力系数,明确了当入射波高和岸滩坡度不变时,植被密度越大,波浪爬高越小。Tang 等^[45]提出适用于沿海缓坡区域的波浪折射-衍射模型,阐明在刚性植物淹没区域,植物直径、密度越大,随着波浪传播距离的增加,波高非线性减小。Cao 等^[46]基于 Cao 等^[47-48]的数据与分析,通过数值模拟研究波浪破碎、底摩擦、植被引起波浪耗散等因素与波浪沿斜坡爬升之间的关系,发现有植被覆盖时,波浪耗散明显,而无植被时,波浪只在水位情

况才表现出轻微耗散。Gong 等^[49]针对 3 种不同形式植物模型,利用 GP、ANNs 和 MNLN 进行分析,指出与植被场的相对宽度和相对高度相比,增加植被场的固体体积分数可以更有效地衰减波高。以上均是波浪应用于植被场中的研究,而 Yin 等^[50]还将研究对象从植被场聚焦于单株植被,并用 XBeach 模型对柔性植被消波进行数值计算,阐释了柔性植物的弹性模量对消波效果的影响表征。

在消波研究中,一些学者还将植被与结构物相结合以探究其消波特性。Chen 等^[51]对漂浮的植被平台进行数值模拟研究,指出最大流速位于植物冠层底部与平台上层间。基于此,Wang 等^[52]提出带植被平台的浮式防波堤,并构建数模水槽探究其与孤立波间的相互作用,指出波浪通过植被平台分层后可视为不稳定单向流,并提出简单浮台和植被浮台的波浪反射系数经验公式。

综上,对于不同波浪作用下植被消波的相关研究,一方面需进一步探索波浪与植被相互作用的内在机理,另一方面还可将植被与传统消波结构相结合,以探究其消波效果的优越性。

3 防波堤与生态植被消波的对比

无论是防波堤还是生态植,均能在一定程度上抵御或消减海岸极端水动力(如台风浪、风暴潮、海啸等)的作用。防波堤与生态植被在海岸条件、消波机制、生态效益、后期维护等方面均有所差异。

在海岸条件方面,传统防波堤适用的海岸条件范围较广。防波堤在采取适当的工程措施后,其建设地点不受气候、土壤、水动力等因素的制约。而生态植被消波的主体是植株,其所生长的海岸区域受到气候、土壤、水动力条件等严格的约束。例如,有“海岸卫士”之称的红树林仅可分布在我国浙江省以南的沿海地区,且植株种类由北向南逐渐丰富。在海岸带地区种植红树林需位于潮间带,且需有陆地淡水径流汇入。此外,植株幼苗若受大浪频繁侵袭则不易成活。因此,生态植被消波对海岸条件的需求较为苛刻,学者们在进行生态植被消波研究时

需考虑当地海岸特点。

在消波机制上,传统防波堤可认为是硬性消波,防波堤建成之后对波浪的消减作用立竿见影。而对于生态植被消波,可认为是软性消波。生态植被幼苗在种植后需足够的生长周期,故种植初期的消波效果不佳。我国沿海多为短周期波,硬性消波消减短周期波效果较好。而我国援建港口的“一带一路”沿线国家多为中长周期波,此时软性消波机制将更有利于中长周期波的消减^[8]。

在生态效益上,植被消波对海岸的环境友好度高。在工程实施后,可提升海岸带景观,完善生态系统,丰富海岸带生物的多样性。从该角度考虑,则生态植被消波与我国“十四五规划”相契合,更有可能成为未来新的发展方向。

在后期维护方面,属于硬性消波的防波堤在遭受极端水动力条件后需要定期修复和维护,否则消波效果将有所降低;而属于软性消波的植被会随着植株种群和范围的扩大而逐渐提升消波效果,且遭受极端水动力条件后基本能做到自我修复,不需频繁维护。

综合防波堤和生态植被二者来看,今后的研究可尝试将硬性消波与软性消波相结合,发展“生态堤”等新型消波形式。

4 结 语

海岸防灾减灾(特别是消波问题)是海岸工程中的重要课题。本文从消波的效果、方法、机理等方面对我国沿海地区生态植被消波的研究现状进行了总结。首先,分析了消波植被研究中的刚度问题、分布问题、非均匀性问题。进而,综述了不同波浪情况下的生态植被消波研究方法。最后,将防波堤消波与生态植被消波进行对比,分析二者在海岸条件、消波机制、生态效益、后期维护等方面的异同,为今后的生态植被消波研究提供一定的思路。

参考文献:

[1] 刘存荣. 我国沿海地区自然灾害的种类及危害[J]. 中学地理教学参考, 2006(5): 15-16. (LIU Cunrong. Types and hazards of natural disasters in coastal areas of China [J]. Teaching Reference of Middle School Geography, 2006(5): 15-16. (in Chinese))

[2] 何飞, 陈杰, 蒋昌波, 等. 考虑根茎叶影响的刚性植物消浪特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2017, 32 (6): 770-778. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental investigation on wave attenuation under the effects of rigid vegetation with root, stem and crown [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics

A, 2017, 32(6): 770-778. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 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.

[5] KOBAYASHI N, RAICHEL A W, ASANO T. Wave attenuation by vegetation [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1993, 119(1): 30-48.

[6] 曾思益, 陈杰, 蒋昌波, 等. 基于根茎叶概化模型的孤立波消减特性实验[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(4): 588-600. (ZENG Siyi, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental investigation of the effects of vegetation on solitary wave attenuation based on a generalized model of root, stem and canopy [J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(4): 588-600. (in Chinese))

[7] TAN Chao, HUANG Bensheng, LIU Da, et al. Effect of mimic vegetation with different stiffness on regular wave propagation and turbulence [J]. Water, 2019, 11(1): 109.

[8] 邓伟, 冯卫兵, 汪涛, 等. 柔性植物对海堤堤前波高的影响试验[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(3): 816-820. (DENG Wei, FENG Weibing, WANG Tao, et al. Experimental on wave dissipation by flexible vegetation in front of breakwater [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(3): 816-820. (in Chinese))

[9] WANG Yanxu, YIN Zegao, LIU Yong. Numerical investigation of solitary wave attenuation and resistance induced by rigid vegetation based on a 3-D RANS model [J]. Advances in Water Resources, 2020, 146: 103755.

[10] YIN Zegao, WANG Yanxu, LIU Yong, et al. Wave attenuation by rigid emergent vegetation under combined wave and current flows [J]. Ocean Engineering, 2020, 213: 107632

[11] ZHAO Chuyan, TANG Jun, SHEN Yongming, et al. Study on wave attenuation in following and opposing currents due to rigid vegetation [J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109574.

[12] 吉红香, 黄本胜, 邱秀云, 等. 滩地植物对波浪变形及消浪效果影响试验研究[J]. 广东水利水电, 2008(8): 14-18. (JI Hongxiang, HUANG Bensheng, QIU Xiuyun, et al. Experimental study on influence of beach plants on wave deformation and wave attenuation effect [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2008(8): 14-18. (in Chinese))

[13] 何飞, 陈杰, 蒋昌波, 等. 考虑根茎叶的近岸植物对海啸波消减实验研究[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(5): 9-

15. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental investigation on tsunami wave attenuation under the effects of coastal vegetation with root, stem and crown [J] . Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36 (5): 9-15. (in Chinese))
- [14] 谭超, 黄本胜, 刘达, 等. 不同刚度植物杆群对规则波传播及紊动特性影响研究 [J] . 海洋工程, 2016, 34 (6): 38-45. (TAN Chao, HUANG Bensheng, LIU Da, et al. Preliminary study on effect of rod groups of different stiffness on regular wave propagation and turbulence characteristics [J] . The Ocean Engineering, 2016, 34 (6): 38-45. (in Chinese))
- [15] 陈杰, 赵静, 蒋昌波, 等. 非淹没刚性植物对规则波传播变形影响实验研究 [J] . 海洋通报, 2017, 36 (2): 222-229. (CHEN Jie, ZHAO Jing, JIANG Changbo, et al. Laboratory investigation on the effects of emergent rigid vegetation on the regular wave transformation [J] . Marine Science Bulletin, 2017, 36 (2): 222-229. (in Chinese))
- [16] 陈橙, 陈池威, 林鹏, 等. 红树林防护溃坝态海啸波冲击集装箱消能试验研究 [J] . 海洋工程, 2019, 37 (5): 79-88. (CHEN Cheng, CHEN Chiwei, LIN Peng, et al. Experimental study on energy dissipation of container impacted by dam-break-like tsunami flow under mangrove protection [J] . The Ocean Engineering, 2019, 37 (5): 79-88. (in Chinese))
- [17] 张明亮, 张洪兴, 徐红印, 等. 规则波和不规则波在刚性植物区波能衰减的试验研究 [J] . 大连海洋大学学报, 2017, 32 (3): 369-372. (ZHANG Mingliang, ZHANG Hongxing, XU Hongyin, et al. Energy attenuation of regular and irregular waves in rigid vegetated waters [J] . Journal of Dalian Ocean University, 2017, 32 (3): 369-372. (in Chinese))
- [18] 彭浩, 陈杰, 蒋昌波, 等. 刚性植物分布方式对海啸波消减影响实验研究 [J] . 海洋与湖沼, 2018, 49 (6): 1159-1168. (PENG Hao, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental investigation on tsunami wave attenuation under the effect of rigid vegetation distribution [J] . Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2018, 49 (6): 1159-1168. (in Chinese))
- [19] NEPF H M. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation [J] . Water Resource Research, 1999, 35 (2): 479-489.
- [20] 彭浩, 陈杰, 蒋昌波, 等. 单株和簇状植物分布方式对消波的影响试验 [J] . 水利水电科技进展, 2019, 39 (4): 27-34. (PENG Hao, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental study on wave attenuation effects by single and patchy rigid vegetation [J] . Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (4): 27-34. (in Chinese))
- [21] TANG Jun, ZHAO Chuyan, SHEN Yongming. Numerical investigation of the effects of coastal vegetation zone width on wave run-up attenuation [J] . Ocean Engineering, 2019, 189: 106395.
- [22] 张茂章, 宋正明. 不同林相结构防浪林的消波性能计算 [J] . 水利水电科技进展, 2013, 33 (6): 40-43. (ZHANG Maozhang, SONG Zhengming. Calculation on wave dissipation performance for different wave break forest structures [J] . Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (6): 40-43. (in Chinese))
- [23] 蒋昌波, 徐进, 邓斌, 等. 沿程非均匀分布植物区对海啸波消减的数值研究 [J] . 海洋工程, 2020, 38 (3): 1-11. (JIANG Changbo, XU Jin, DENG Bin, et al. Numerical investigation of tsunami waves attenuation through non-uniform vegetation [J] . The Ocean Engineering, 2020, 38 (3): 1-11. (in Chinese))
- [24] LI Yiping, ANIM D O, WANG Ying, et al. Laboratory simulations of wave attenuation by an emergent vegetation of artificial phragmites australis; an experimental study of an open-channel wave flume [J] . Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2015, 23 (4): 251-266.
- [25] ZHAO Chuyan, TANG Jun, SHEN Yongming, et al. Study on wave attenuation in following and opposing currents due to rigid vegetation [J] . Ocean Engineering, 2021, 236: 109574.
- [26] CHEN Ming, LOU Sha, LIU Shuguang, et al. Velocity and turbulence affected by submerged rigid vegetation under waves, currents and combined wave-current flows [J] . Coastal Engineering, 2020, 159: 103727.
- [27] 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))
- [28] 陈明, 刘曙光, 娄厦, 等. 刚性植物对波高衰减和水流结构的影响 [J] . 水利水电科技进展, 2018, 38 (6): 32-37. (CHEN Ming, LIU Shuguang, LOU Sha, et al. Impact of rigid vegetation on wave attenuation and flow structure [J] . Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (6): 32-37. (in Chinese))
- [29] 曾思益, 陈杰, 蒋昌波, 等. 基于根茎叶定量概化模型的植被区沿程波高衰减机制试验研究 [J] . 北京林业大学学报, 2020, 42 (10): 117-125. (ZENG Siyi, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental investigation on wave decay through vegetation patch with the quantitative generalized model of root, stem and leaf [J] . Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42 (10): 117-125. (in Chinese))
- [30] 陈杰, 龚尚鹏, 官志鑫, 等. 根、茎、叶定量概化植物模型沿程不规则波消减实验 [J] . 海洋学研究, 2019, 37 (4): 48-59. (CHEN Jie, GONG Shangpeng, GUAN Zhixin, et al. Experimental investigation on irregular wave attenuation under the effects of vegetation with roots, stems and canopies [J] . Journal of Marine Sciences, 2019, 37

- (4);48-59. (in Chinese))
- [31] 龚尚鹏,陈杰,蒋昌波,等. 海岸植物带对孤立波的波能耗散研究[J]. 海洋科学进展,2020,38(3):522-531. (GONG Shangpeng, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Solitary wave energy dissipation by coastal vegetation[J]. Advances in Marine Science,2020,38(3):522-531. (in Chinese))
- [32] 蒋昌波,徐进,邓斌,等. 基于非静压模型的非淹没刚性植物消波特性数值模拟研究[J]. 海洋通报,2019,38(5):591-600. (JIANG Changbo, XU Jin, DENG Bin, et al. Numerical investigation of wave attenuation through non-submerged rigid vegetation by a nonhydrostatic model[J]. Marine Science Bulletin,2019,38(5):591-600. (in Chinese))
- [33] 刘达,黄本胜,邱静,等. 基于分层建体的多孔介质模型在植物消浪模拟中的应用[J]. 长江科学院院报,2016,33(8):59-63. (LIU Da, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Application of model of porous media to simulate the effects of wave-attenuating[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2016,33(8):59-63. (in Chinese))
- [34] 何飞,陈杰,蒋昌波,等. 波浪非线性对海草消波特性的影响[J]. 海洋学报,2018,40(5):24-36. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Effects of wave nonlinearity on wave attenuation by seagrass[J]. Acta Oceanologica Sinica,2018,40(5):24-36. (in Chinese))
- [35] 曹海锦,冯卫兵. 人工柔性植被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))
- [36] 赵东梁,刘毅,喻国良. 新型浮式植物体消浪试验[J]. 水运工程,2015(8):48-54. (ZHAO Dongliang, LIU Yi, YU Guoliang. Effectiveness of floating wave dissipater with vegetation planted[J]. Port & Waterway Engineering,2015(8):48-54. (in Chinese))
- [37] WANG X Y, XIE W M, ZHANG D, et al. Wave and vegetation effects on flow and suspended sediment characteristics;a flume study[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2016,182:1-11.
- [38] ZHAO Chuyan, TANG Jun, SHEN Yongming. Experimental study on solitary wave attenuation by emerged vegetation in currents[J]. Ocean Engineering,2020,220(1608):108414.
- [39] ZHANG Hongxing, ZHANG Mingliang, JI Yongpeng, et al. Numerical study of tsunami wave run-up and land inundation on coastal vegetated beaches[J]. Computers and Geosciences,2019,132:9-22.
- [40] LI C W, ZHANG M L. 3D modelling of hydrodynamics and mixing in a vegetation field under waves[J]. Computers and Fluids,2009,39(4):604-614.
- [41] ZHAN Jiemin, YU Linghui, LI Chiwei, et al. A 3-D model for irregular wave propagation over partly vegetated waters[J]. Ocean Engineering,2014,75:138-147.
- [42] VINCENT L, BRIGGS M J. Refraction—diffraction of irregular waves over a mound[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,1989,115(2):269-284.
- [43] YIN Zegao, WANG Yanxu, YANG Xiaoyu. Regular wave run-up attenuation on a slope by emergent rigid vegetation[J]. Journal of Coastal Research,2019,35(3):711-718.
- [44] 姚宇,唐梦君,唐政江,等. 非淹没刚性植被影响下孤立波在岸滩上的爬高[J]. 水利水电科技进展,2019,39(2):31-36. (YAO Yu, TANG Mengjun, TANG Zhengjiang, et al. Solitary wave run-up on beach slopes influenced by unsubmerged rigid vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(2):31-36. (in Chinese))
- [45] TANG Jun, SHEN Shaocong, WANG Hui. Numerical model for coastal wave propagation through mild slope zone in the presence of rigid vegetation[J]. Coastal Engineering,2015,97:53-59.
- [46] CAO Haijin, FENG Weibing, CHEN Yujin. Numerical modeling of wave transformation and runup reduction by coastal vegetation of the South China Sea[J]. Journal of Coastal Research,2016,75(Sup1):830-835.
- [47] CAO Haijin, FENG Weibing, HU Zhan, et al. Numerical modeling of vegetation-induced dissipation using an extended mild-slope equation[J]. Ocean Engineering,2015,110:258-269.
- [48] CAO Haijin, CHEN Yujun, TIAN Ye, et al. Field investigation into wave attenuation in the mangrove environment of the South China Sea Coast[J]. Journal of Coastal Research,2016,32(6):1417-1427.
- [49] GONG Shangpeng, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Prediction of solitary wave attenuation by emergent vegetation using genetic programming and artificial neural networks[J]. Ocean Engineering,2021,234:109250.
- [50] YIN Kai, XU Sudong, HUANG Wenrui, et al. Numerical investigation of wave attenuation by coupled flexible vegetation dynamic model and XBeach wave model[J]. Ocean Engineering,2021,235:109357.
- [51] CHEN Xuebin, CHEN Qin, ZHAN Jiemin, et al. Numerical simulations of wave propagation over a vegetated platform[J]. Coastal Engineering,2016,110:64-75.
- [52] WANG Yanxu, YIN Zegao, LIU Yong. Numerical study of solitary wave interaction with a vegetated platform[J]. Ocean Engineering,2019,192:106561.

(收稿日期:2022-01-03 编辑:刘晓艳)