

# 海岸植被防护机制的物理模型试验研究进展

匡翠萍, 丛 新, 范家栋, 李宏义

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于自然的海岸修复与防护越来越受到人们关注, 从海岸植被对水动力及泥沙运动影响机制的物理模型试验研究方面, 介绍了试验研究中植被的描述方法, 包括植被的分类、材料选择、特性表征等; 综述了植被影响下的流场结构、消浪特征、形态阻力相关的研究进展; 论述了悬沙浓度分布、泥沙再悬浮、沉积和冲刷模式等泥沙输运方面的研究成果; 结合大量模型试验研究, 提出了未来的研究趋势。

**关键词:** 海岸植被; 海岸防护; 物理模型试验; 波流动力; 泥沙输运

中图分类号: P753

文献标志码: A

## Review of Physical Experiments on Mechanisms of Coastal Protection by Vegetation

KUANG Cuiping, CONG Xin, FAN Jiadong, LI Hongyi  
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Nature-based coastal ecological restoration and protection has attracted increasing attention. In terms of physical experiments on the effects of coastal vegetation on hydrodynamics and sediment transport, the description method of vegetation including classification, material selection and characterization was introduced. The field structure, wave damping and flow resistance under the influence of vegetation were reviewed. Sediment transport aspects such as distribution of suspended sediment concentration, sediment resuspension, deposition and erosion patterns were discussed. Finally, future research prospects were presented.

**Keywords:** coastal vegetation; coastal protection; physical experiments; wave and current; sediment transport

由于人们对海岸资源的过度开发利用, 自然岸线受到严重损害, 再加上气候变化条件下的极端海洋灾害频发, 部分海岸尤其是砂质海岸严重蚀退。海岸生态环境越来越受到人们重视, 2020 年国家发展改革委和自然资源部发布的 2021~2035 年《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划》中, 明确提出全面保护自然岸线, 重点推动典型海洋生态类型的系统保护和修复, 综合开展岸线岸滩修复、生境保护修复、生态灾害防治、海洋保护地建设等, 提高抵御海洋灾害的能力。力争 2035 年我国海洋生态恶化的状况得到全面扭转, 自然海岸保有率不低于 35%。

在海岸保护的生态工程解决方案中离不开植被, 保护、恢复和利用沿海植被生境, 是一项很有前途的战略, 具有显著的减缓和适应气候变化的能力<sup>[1]</sup>。在遵循生态系统的整体性与系统性的同时, 研究其内在响应规律有利于更科学地理解自然海岸的动力地貌演变规律, 并对植被生态修复工程提供重要指导, 研究方法主要包括物理模型试验、现场观测及数值模拟, 而物理模型试验具有可简化和纯化研究过程、可控制研究条件、可再现和重复研究过程等优点, 因此大量学者采用了该研究方法。

本文仅针对使用此方法的相关研究作了进展综述。首先对物理模型试验中常用的植被描述方法进行了简要介绍, 然后分别从水动力、泥沙运动的角度论述了植被的影响, 最后结合现有成果, 提出了海岸植被生态防护机制物理模型试验研究的未来方向, 以期为海岸生态防护工程和相关科学研究提供参考。

## 1 植被的描述方法

实际生态环境中植被多种多样, 试验前必须首

收稿日期: 2022-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3106205); 国家自然科学基金面上项目(41976159)

第一作者: 匡翠萍, 教授, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通信作者: 丛 新, 博士生, 主要研究方向为海岸工程。E-mail: congxin@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

先确定研究区域的代表植物种类及形态,选取的代表植物既要便于物理模型试验的进行,又要尽量与实际植物相似。

物理模型试验模拟的植被分类主要概括为以下三种不同方法:一是按照植被刚度划分为柔性植被和刚性植被;二是按照植被与水深关系划分为挺水植被、沉水植被和浮式植被;三是按照植被生物性状可划分为草本、禾本和木本植被。具体海岸植被分区分类示意如图 1 所示。

植被状态的描述主要分为淹没与非淹没状态,当水深与植被高度相当时,具有一定柔性的植物受水流影响时而挺水时而沉水,根据挺水或沉水优势可进一步划分,具体如表 1 所示。对于植被分布特征的描述方法,最常见的主要是植被的密度,本文介绍以下三种描述方法:植被固相体积分数 $\phi$ (式(1)<sup>[2]</sup>)、植被前缘面积参数 $\phi^*$ (式(2)<sup>[3]</sup>)、植被长度参数 $\eta$ (式(3)<sup>[4]</sup>),式(1)和(2)适用于规则的圆柱形植被,而式(3)则还需要植被按一定的规则排布。此外,对植被特征的描述方法还有很多,包括 Wu 等<sup>[5]</sup>

提出的相对刚度概念,用来判别植被的变形状态;王祥斌等<sup>[6]</sup>使用的表征植被弯曲变形程度和实际淹没程度的相对有效高度(植被高度与水深的比值);蒋昌波等<sup>[7]</sup>采用的表征植物排列方式的植物排列系数,及表征植被分布密度和排列方式综合影响的植物综合系数等。

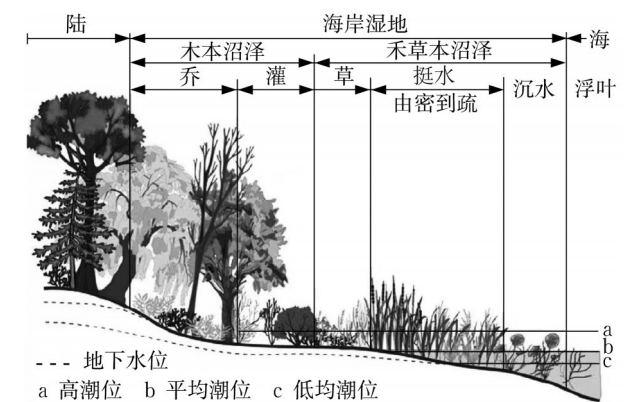


图 1 海岸植被分区分类示意  
Fig. 1 Distribution of coastal vegetation

表 1 植物分类及状态描述

Tab. 1 Classification and description of vegetation											
植物分类								植物状态			
按刚度		按与水深关系			按生物性状			非淹没状态		淹没状态	
柔性	刚性	挺水	沉水	浮式	草本 (大叶藻)	木本 (红树林)	禾本 (芦苇)	直立挺水或弯曲挺水	弯曲摇摆且挺水占优	弯曲摇摆且沉水占优	沉水或倒伏

$$\varphi=m\frac{\pi d_v^2}{4}\tag{1}$$

$$\varphi^*=\alpha h\tag{2}$$

$$\eta=n\frac{d_v^2}{\Delta z\times\Delta x}\tag{3}$$

式中: $m$ 为单位床面面积内植被茎干数量; $d_v$ 为单颗植被茎干直径; $\alpha$ 为单位草甸体积的植被前缘面积; $h$ 为植被高度; $n$ 为水动力方向上植被总行数; $\Delta x$ 、 $\Delta z$ 分别为平行、垂直于水动力方向的两个连续植被茎干之间的距离。

对于模型植物材料的选择,由于相同条件下不同植被材料的消浪特性也不同,需要针对模拟的实体植物的形态大小和性质确定,常用的材料有木棒(包括竹棒、竹签)、塑料、实体植物等,也有学者直接采用现场植被携带其生长底质的移植方式,或者通过培养箱直接栽培育苗的方式进行试验,几种典型试验植被形式如图 2 所示。

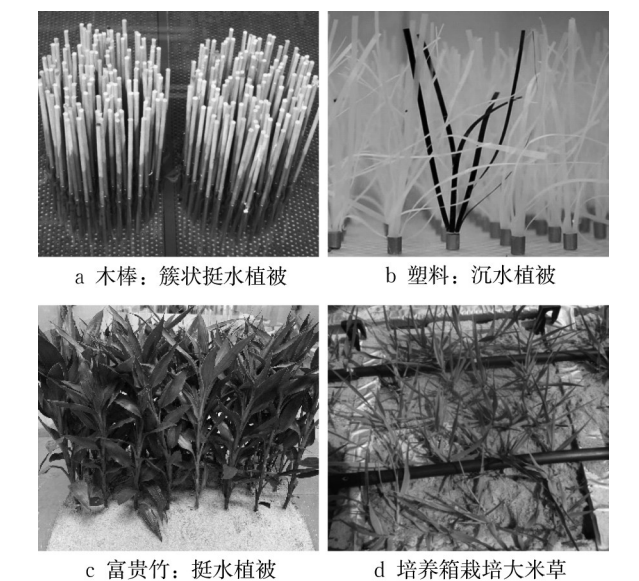


图 2 几种试验植被形式示意<sup>[8-11]</sup>  
Fig. 2 Several types of experimental vegetation

## 2 植被对水动力的影响

基于生态系统恢复的植被海岸防护工程被认为是更好更可持续的方法之一,不同动力环境(潮流、波浪、床面形态等)与不同植被特性(布置密度、根茎叶特征、分布形式等)之间的相互作用机理成为各国学者们研究的热点话题,而植被对水动力环境的影响是其他相关研究的基础,本节综述了植被作用下水动力环境的响应特征,包括潮流、波浪及波流耦合条件。

### 2.1 流场结构

本节将从两种植被类型:沉水植被和挺水植被展开对流畅结构的研究。

#### 2.1.1 沉水植被影响

水流在沉水海草植被作用下由于底部阻力作用产生尾流效应,因而具有掩护效果,如图3所示,植被区内及植被区后方均产生不同形式的紊动和涡流。Villanueva等<sup>[12]</sup>研究发现生态恢复工程在低流量区域将产生更大的掩护距离,能更好地保护并提供良好的生境。此外,随着植被布置横向宽度逐渐变窄,流速调整长度更短、冠层内流速更小<sup>[11]</sup>。海草往往具有不同程度的柔韧性,水流经过时,他们通过改变姿态与流场相互作用。Taphorn等<sup>[13]</sup>采用不同力学和形态特征的单个植物模型来模拟海草,研究其对流场的影响,提出了流速衰减率与植被抗弯刚度、浮力和特征直径之间的经验关系,并发现人工柔性海草引起的涡旋脱落频率低于刚性圆柱形结构。因此,人工海草草甸设计中需要考虑植被弹性模量、浮力和横截面尺寸三个主要表征特性。

随着研究的逐渐深入,逐渐涌现出针对海岸带波流耦合条件下的研究,针对沉水刚性植被,布置较稠密时,波流耦合条件下的平均流速明显低于纯流条件;而布置较稀疏时,与纯流相比,波流耦合平均流速在底层减小,在上层增加<sup>[15]</sup>。实际环境下的植被密度不止表现在水平面上,还在垂向上有所变化<sup>[16]</sup>,对于垂向变化密度的植被,纯波作用时的冠层顶部剪应力较小,因此速度及湍流垂向分布较平滑;纯流和波流组合作用时,由于冠层顶的不均一,冠层尺度紊动(由于冠层顶部阻力不连续产生)贯穿整个水体,波流耦合紊动能比纯流条件下略有下降,尤其是在接近底部的位置。

#### 2.1.2 挺水植被影响

挺水植被往往分布于较沉水植被更浅水的海岸区域,不同形态的植被具有不同的茎干及叶片结构,

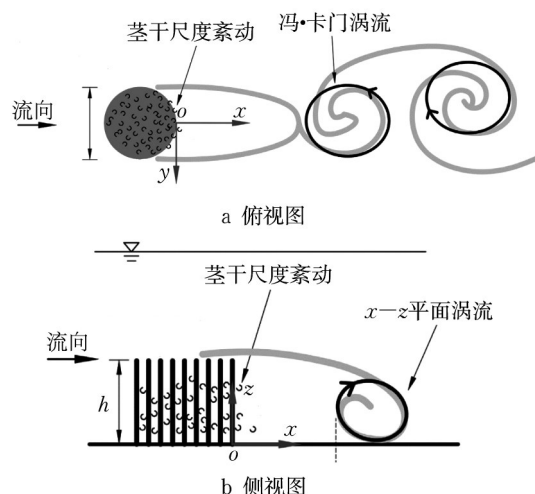


图3 簇状沉水植被主导的水流结构示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 3 Flow structure dominated by cluster submerged vegetation

分布形式也各不相同。当植被不完全布满整个水槽宽度时,植被区流速结构在纵向上(水流方向)与并列的空槽区具有不同趋势,但他们具有相同的纵向调整距离<sup>[17]</sup>。Xu等<sup>[18]</sup>考虑了两种不同真实形态的模拟植被:叶片束集在基部、叶片均匀分布在茎干。对于叶片束集在基部的情况,距离床面越远,前缘面积越大,流速、湍流、紊动能均越小;而对于叶片垂向均匀分布于茎干的植被,流速、湍流、紊动能的垂向分布是基本均一的。对于红树林海岸,分布较密集的呼吸根对护岸具有重要意义。非均一高度的真实呼吸根有效减小了冠层剪切强度,并使得最大紊动向上方移动,移动距离约为呼吸根高度的标准差;均一高度的模拟木钉呼吸根条件下的床面剪应力达到相同密度下真实呼吸根条件的2倍,这将会导致对泥沙沉积效率的低估。同时,冠层内流速与冠层上方自由流速的比值不随呼吸根高度、形状、空间分布而明显改变<sup>[19]</sup>。

### 2.2 消浪特征

消浪特征可通过波高、波压力、波浪爬高、波能等表征,除了针对一般情况下的规则波与不规则波的研究以外,还有针对海啸波(孤立波)等不同形式波浪的研究。

通常情况下,植物的冠部消波能力最强,其次为杆部和根部,且植物密度越大、相对宽度越大,消波效能越高,但消波效果的增速会随之放缓<sup>[20]</sup>。除此以外,消浪效果还与植物的分布方式有关,彭浩等<sup>[21]</sup>发现波浪衰减效果随入射波高、植被纵向宽度的增大而增大,且植被由淹没状态到非淹没状态时,消浪



效果随植被高度的增大而增强<sup>[22]</sup>。对于浮式植被的消浪装置,在植物带高度大于波高的前提下,同样地,植物带密度和相对宽度( $B/L$ : $B$ 为装置宽度, $L$ 为波长)是影响消浪效果的最重要因素<sup>[23]</sup>。对于树状防浪林来说,水深与树干树冠高度的相对关系均在不同程度上影响消浪效果,在同一相对水深条件下,植被的冠干比越大,消浪效果越好,防浪林的波浪衰减系数越大<sup>[24]</sup>。波浪受到植被影响后,不同频域的波能也发生转变,规则波作用下,植物区产生相对于主频的二倍频波浪,随着波浪穿过植被区,谐波能量向主频波浪转移<sup>[25]</sup>。另外,波压力也是反应波浪特征的重要参数,在海堤前布置柔性植物能有效减小作用在海堤上最大波压力,且最大波压力消减系数在柔性植物高度与试验水深一致时达到最大<sup>[26]</sup>。植被柔韧性是波浪—植被相互作用中控制波浪衰减和速度结构的重要参数。柔性植被由于摇曳作用造成的波浪衰减较刚性植被弱,刚性植被改变了速度结构而柔性植被没有。具体来说,在波浪传播方向上,刚性植被冠层内诱导了一种流动,且在冠层上方水平方向的速度被放大<sup>[27]</sup>。

波浪衰减作用同样受到近岸水流的影响,因此波流耦合条件的波浪衰减特征也是一个重要的更贴合实际的研究方向。Zhang等<sup>[28]</sup>发现形似互花米草的柔性模型植被的波能耗散取决于水流流速( $U_c$ )与波速( $U_w$ )的比值,与纯波条件相比,较大 $U_c/U_w$ 值可加强波能耗散。进一步地,Hu等<sup>[29]</sup>使用木棒模拟红树林并考虑了波流同向及波流反向条件,研究发现同向强流将加强植被区内波浪耗散,而随反向流的增加,与同向流相比,植被内波浪耗散被提高到更高水平。在大尺度场地和足够大的水深条件下,Lara等<sup>[8]</sup>和Maza等<sup>[30]</sup>使用真实植被进行了研究,结果同样表明波流同向时波浪衰减较小,波流反向时波浪衰减增加。

海啸波的首波与孤立波相近,因此孤立波成为研究海啸波首波的方式。与规则波或随机波类似,Gong等<sup>[31]</sup>以水槽试验数据为基础,研究发现与植被相对宽度和相对高度相比,增大植被密度对波高衰减更有效。曾思益等<sup>[32]</sup>则基于根茎叶定量概化模型探究了植物根、茎、叶对孤立波衰减特性的影响,发现该影响与根和叶的分布密度、淹没度及相对波高均相关。姚宇等<sup>[33]</sup>得出了孤立波作用下岸滩爬高与相对入射波高、非淹没刚性植被密度和岸滩坡度的幂函数经验关系式。

## 2.3 形态阻力

植被以形态阻力、茎干及叶片运动的形式来减弱水流、耗散波能,对植被主导的水流阻力的全面认识至关重要。目前该方面的研究主要是阻力系数 $C_D$ 与雷诺数 $R_e$ 和KC数(Keulegan-Carpenter数,用于描述流体中惯性力与黏性力的关系,KC数越大表示紊动的影响越大)的关系。本节将从水流和波浪两种动力条件分别展开介绍。

### 2.3.1 水流作用

对于随机分布、均一直径的挺水圆形刚性模拟植被产生的阻力,平均阻力系数 $C_D$ 随柱体雷诺数 $R_e$ 的增加而减小,随植被密度( $\phi$ )的增加而增大<sup>[2]</sup>。对于柔韧性较强的植被来说,叶片的重构是该类植被的重要特征,也对水动力环境具有重要影响,Zhang等<sup>[34]</sup>分别使用塑料植被和真实植被,测量了一定速度范围内的单个植物的阻力和形态,主要通过遮蔽系数考虑了叶片的遮蔽作用,该系数是植物形态、叶片角度、叶片距离和叶片长度的函数,且从1降低到叶片完全倾覆、茎干水平状态下的最小值。对水产养殖类浮式植被海带来说,海带叶片和叶柄对总阻力均有贡献。在海藻叶片基本水平的试验速度范围内,随着流速的增加,海带柄的重构缩减了海带束的垂直范围。由于这种重构,测得的力 $F$ 随速度 $U$ 的增加而增加( $F$ 与 $U^{\alpha}$ 正相关, $\alpha=1.35\pm0.17$ )<sup>[35]</sup>。

### 2.3.2 波浪作用

波浪作用下的植被阻力预测通常与KC数相关联,相较于雷诺数和厄塞尔数,KC数可更好地预测阻力系数,且只有试验设置,特别是植被密度,才能影响预测公式<sup>[36]</sup>。为了更好描述柔性植被受到波浪作用引起的阻力,建立预测波浪衰减的理论模型,Zhang等<sup>[37]</sup>使用物理模型试验及现场观测的数据验证了采用遮蔽系数解释叶片和茎干间相互作用带来的阻力减少作用。通过进一步研究波浪作用下叶片和茎干的重构,Zhang等<sup>[38]</sup>发现虽然叶片表现出比茎干更强的重构现象,但他们贡献了超过70%的植物阻力。重构产生的植物阻力大小表现出对波速的依赖性,且弱于波速的二次方。Wang等<sup>[39]</sup>使用平均孔隙速度(植物单元间的流速)和植被相关的水力半径(植被区水体体积与植被与水接触表面积之比),重新定义了雷诺数 $R_e$ 和KC数,提出了一种新的 $C_D$ 预测方法,发现新的 $C_D$ 值不仅取决于新KC数,还包括植被淹没率(与第1节提到的相对有效高度算法相同)与厄塞尔数,该方法的预测能力有了很大改善。

### 3 植被对泥沙输运的影响

植被改变了局部水动力环境,进而通过改变沉积物再悬浮及输移过程中的挟带能力影响泥沙冲刷和淤积演变,本节将从悬沙特征及冲淤模式方面展开综述。

#### 3.1 悬沙浓度及泥沙再悬浮

悬沙浓度及泥沙再悬浮不仅关乎该海域冲淤演变过程,同时对水质生态方面也至关重要,本节将从不同动力条件分别综述。

##### 3.1.1 水流作用

为探究挺水植被茎干特征(直径、密度 $\phi$ )对紊动和泥沙再悬浮的影响,在Liu等<sup>[40]</sup>的试验范围内,相同泥沙粒径情况下,泥沙再悬浮的临界紊动能相同,随着植被密度的增加,水流紊动增强,因此泥沙再悬浮的临界流速减小。再悬浮临界紊动与临界流速均与茎干直径无关。但是对于较密集且/或较小茎干尺寸时,再悬浮将需要更大的能量梯度(更大的床面坡度或水面坡度)。在挺水植被斑块对水流调整及流速的影响研究中,如图4所示,图中: $b$ 为植被布置横向宽度的一半; $B$ 为水槽宽的一半; $U_0$ 为初始水槽平均流速; $U_{bare(f)}$ 为完全发展区空槽平均流速; $U_{veg(f)}$ 为完全发展区植被内平均流速; $U_{veg(c)}$ 为植被内泥沙再悬浮临界流速; $L_{min}$ 为最小距离,该距离外无茎干尺度紊动; $L_d$ 为植被内部调整距离; $L$ 为植被斑块长度。当植被不完全布满水槽整个宽度时,细沙再悬浮刚刚被抑制时距植被前缘的距离( $L_{min}$ )与局部流速降低至生成茎干尺度紊动的位置有关,且 $L_{min}$ 主要取决于流动阻塞(与阻力系数和植被所占水平面积相关)和茎干直径,较短的 $L_{min}$ 是流动阻塞较大和茎干直径较小的结果<sup>[41]</sup>。使用刚性圆棒模拟沉水植被时,植被阵列减小了水流流速,但由于紊动作用,达到悬浮状态的泥沙量随植被密度的增大而增多,这可能与植被直径大小、泥沙粒径分布、植被淹没率等因素有关<sup>[42]</sup>。悬沙浓度是评价泥沙输移特征的关键因子,植被内的垂向悬沙浓度分布与经典的裸床Rouse分布不同,在冠层茎干区域,垂向分布趋于统一,而在有叶片分布的上部冠层区域,悬沙浓度则随着高度增加而减小,悬沙浓度分布反应了由植被形态引起的垂向紊动弥散的不均匀性<sup>[43]</sup>。

##### 3.1.2 波浪作用

波浪是导致掀沙的重要因素,波浪驱动下,床面紊动能与波速均方根的平方呈线性关系,沉积物再悬浮的临界波速与植被密度( $\phi$ )相关<sup>[44]</sup>。具有发达

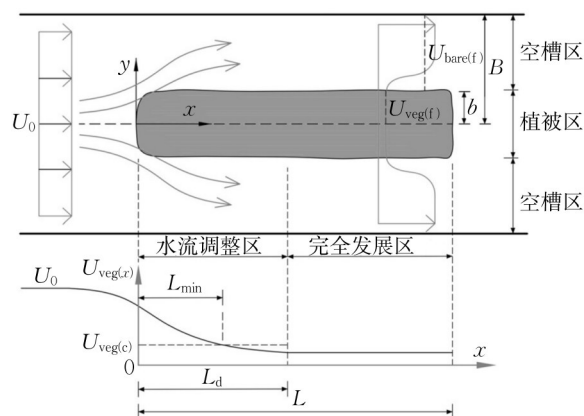


图4 挺水植被影响下的水流调整示意<sup>[41]</sup>

Fig. 4 Flow adjustment under the influence of emergent vegetation

根和根状茎的大叶藻植被群落对泥沙稳定十分重要,Marin-Diaz等<sup>[45]</sup>针对其地上和地下生物量对床面泥沙运动的影响进行了研究,发现暴露在轨道速度 $27\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,地下生物量可减少约一半的推移质侵蚀,而悬沙输运则是相反的效果。在泥质系统下,再悬浮使得光照水平降低到大叶藻承受的最小水平之下,这可能是由于大叶藻植被布置斑块过小,导致增强了植被群落边缘的紊动及冲刷,因此,为了降低泥沙再悬浮还应考虑植被草甸斑块尺度。

##### 3.1.3 波流耦合作用

为了更真实地模拟现实海岸环境,Lou等<sup>[46]</sup>研究了沉水刚性植被在波流耦合情况下对沉积物悬浮的影响,并考虑了植被的不同布置密度以及垂向上的密度变化。结果表明,植被引起的紊动是泥沙悬浮的主要驱动力,植被越密,尤其是垂向密度变化时,泥沙2悬浮浓度越大。利用有效床面剪切流速,提出了适用于有植被及光滩情况的近底悬沙浓度的指数形式预测公式,并考虑垂向紊动强度变化改进了基于湍流扩散理论预测的悬沙垂向分布。

#### 3.2 冲刷与沉积模式

植被影响下,水动力条件是泥沙运动的基础,而剖面、地貌形态特征则是泥沙运动的最终表现,本节将对冲刷和沉积模式的研究展开介绍。

##### 3.2.1 水流作用

不同植被分布特征和形态特征对床面冲淤具有不同影响,包括植被的密度、排布方式、渗透性、弯曲程度等。对于完全舒展的、具有透水性的单个树状植物,水流作用下床面形成两道细长的冲刷沟并带有明显的山脊;而被紧紧包裹的不透水的相同植被使得冲刷趋于局部化,在观测区域内形成更多沉积,



且其位置距植被更短。对于易弯曲的植被而言,随着弯曲后投影面积的减少及沉水部分体积的增加,冲刷也相应减少,同时将形成更细长的冲刷沟并向下游扩展<sup>[47]</sup>。在植被排布方式方面,植被斑块间的相互作用不容忽视,斑块间相互作用可促进水流流向上的沉积发展,中心线上的沉积最终导致两个相邻斑块的合并,这是一种横向斑块生长的机制。在斑块对的外侧边缘存在速度减小区域,导致沉积增强,但沉积发展趋势在流向上比在横向上扩展得更远,因此植被演化发展主要由流向上沉积发展区域控制<sup>[9]</sup>。当植被采用16个圆形斑块、斑块内植被茎干随机分布时,不同组内又考虑了斑块直径的变化,研究发现相同流速条件泥沙输移量随总茎干数的增加而增加,但茎干聚集成更小的斑块直径时(占底床面积的比例减小)泥沙输移减小,水槽平均湍流也随着聚集度的增加而下降,总茎干数和聚集度成为水槽尺度上很好的泥沙输移预测因子,提供了一种描述亚网格尺度植被斑块对泥沙输移影响的方法<sup>[48]</sup>。

沉水植被往往具有更强柔性的叶片,对于横跨水槽的沉水植被斑块,纵剖面(顺流—垂向)的回旋涡流或湍流扩散决定了尾迹长度,此区域内流速减小、沉积增加,且随着植被密度减小,回旋涡流向更远的下游移动,尾迹长度增大,柔性叶片的存在也扩展了尾迹长度,因而增大了泥沙沉积区域;相反,圆形植被斑块布置情况下,尾迹在水平面上(顺流—水平侧向)产生振荡,尾迹不稳定的开始决定了沉积区域的长度。不管是圆形还是横跨水槽植被斑块形态,沉积量越大,沉积区域越长<sup>[14]</sup>。Zhang等<sup>[3]</sup>研究了沉水植被前缘区域和完全发展区域(图5,  $h$ 为植被高度;  $H$ 为水深;  $X_D$ 为初始水流调整长度;  $\bar{u}$ 为时均流速;  $\delta_c$ 为剪切层穿透植被内的穿透距离),在前缘附近,水流速度随调整长度( $X_D$ )的增大而减小,与无因次草甸密度(式(2))成反比。在草甸前缘( $x < X_D$ ),相对于裸床,净沉积减少,这是由于上扬水流和增大的茎生湍流动能,这表明草甸边缘具有明显不同的颗粒滞留趋势。净沉积量随着离前缘距离的增加而增加。在草甸完全发展区( $x > X_D$ ),净沉积量与草甸密度、水深和流速有关。随着茎干密度的降低和流速的增加,沉积量逐渐减少。净沉积减少与茎生湍流驱动的再悬浮有关,该湍流动能随草甸密度和淹没深度( $H/h$ )的降低而增加。

### 3.2.2 波浪作用

近岸波浪引起的上冲流、波浪爬高及越浪等是造成海岸侵蚀的重要影响因素,盐沼边缘陡坎在波

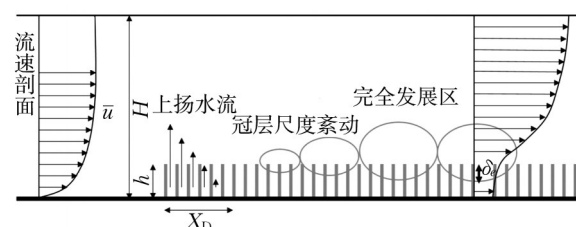


图5 沉水植被前缘水流调整示意<sup>[3]</sup>

Fig. 5 Flow adjustment in the margin of submerged vegetation

浪作用下不断蚀退,而通常情况下植被作用可使岸坡破坏延迟,且与根部的生长有一定关系,总体上提供了稳定岸坡的作用<sup>[49]</sup>,根系发达的植物比根系不成熟的植物更能减少沙丘侵蚀量<sup>[50]</sup>,不同研究表明:地上和地下植被的共同存在可使沙丘侵蚀减少37%<sup>[51]</sup>;植被减少了波浪爬高对沙丘的侵蚀约40%<sup>[52]</sup>。岸滩平衡剖面的动态平衡对波浪条件较为敏感,植被带改变了波浪向岸传播过程中的浅化、破碎特征,研究表明,植被影响下,平衡剖面的槽—坝位置随着波高增大向海推移,且波陡与岸滩冲刷和侵蚀无量纲参数相关性良好<sup>[53]</sup>。对于柔性沉水圆形斑块冠层,Holzenthall等<sup>[54]</sup>研究表明波浪作用下其后方将形成滨岸沉积丘,并将沉积丘生长机制与近岸水动力状态联系起来。从能量的角度来讲,由植被或其他结构引起的局部耗散形成了一个低波能区,这可能对邻近海岸线的响应具有重要意义<sup>[55]</sup>。基于扰动沉积物颗粒起动的单位面积能量变化速率<sup>[56]</sup>,Türker等<sup>[4]</sup>提出经过植被带后的波能与侵蚀海岸沙丘剖面所必需的能量呈线性相关关系。

随着海岸灾害频率的不断升高,风暴浪也成为研究重点,基于Sallenger<sup>[57]</sup>提出的障壁岛的四种风暴影响机制(冲流、击岸、越浪、淹没),Silva等<sup>[58]</sup>考虑滩肩形态及植被密度的影响,研究了含植被沙丘—岸滩系统对风暴的响应,结果表明植被可减少沙丘的净侵蚀;Odériz等<sup>[59]</sup>使用内部碎石岩心结构来提高沙丘强度,研究了风暴条件下的系统剖面变化,发现植被在风暴初始冲流和击岸阶段起到更好的保护作用,而内部碎石则能更好抵抗风暴后期的越浪及沙丘破坏。然而,在盐沼向海边缘区域,Feagin等<sup>[60]</sup>通过对室内试验及野外试验数据的分析,发现有植被与无植被情况下的海岸侵蚀没有明显区别,提出海岸植被更适合改善长时间尺度的沉积过程,比如海平面上升等,而不太适合抵抗盐沼近海边缘波浪破碎区域受到的频繁扰动,且土壤性质(包括堆积密度、植物残骸碎片含量等)是影响冲刷的重要因素,

近岸侵蚀防护应着重关注植被对底质长时间尺度的作用。Feagin等<sup>[52]</sup>通过水槽试验进一步提出被冲刷暴露于水体中的植被根部可使波浪衰减且可减缓陡坎坍塌破坏,而当植被在波浪上冲流或波浪爬高影响下完全倾覆且连根拔起时,冲刷则会被加剧。因此,植被的根、茎、叶只要暴露于水体中且未发生完全倾覆,对波能都有衰减作用,但是在特定外界条件下,植被可能会加剧海岸向海边缘区域的冲刷。

除此之外,海堤在世界沿海地区广泛应用,用于保护低洼地区,抵御沿海灾害。因此,堤顶和向陆坡的破坏机制<sup>[61]</sup>、波浪越顶和单波越浪量的分布<sup>[62]</sup>成为重要的设计考虑因素。草皮覆盖广泛应用于海岸堤防系统的防护中,Ponsioen等<sup>[63]</sup>将陆向坡面草皮的破坏与波浪越顶引起的法向应力联系起来,据此可以预测破坏发生的时间和位置。为了强化植被护坡,提高植被护坡的抗侵蚀能力,一种高性能加筋草皮护坡(HPTRM)技术被提出。研究发现,由于具有较高抗侵蚀能力的有植被覆盖的HPTRM的暴露,其侵蚀速率呈下降趋势<sup>[64]</sup>。

对不同类型海岸的生态修复工程而言,如果不够了解其生态系统恢复的动力地貌响应特征,粗放化的工程实施可能带来一系列海岸侵蚀或淤积问题。针对典型沙坝-潟湖海岸,我们进行了系列植被影响下的物理模型试验研究,包括不同材料不同类型植被作用,引入了考虑植被布置带宽的植被加权密度,并考虑沙坝出水高度、水深和入射波高的新参数,提出了布置于坝顶的挺水植被作用下波高衰减率与新参数的线性数学关系,同时分析得到了前丘最大侵蚀厚度与植被加权密度的二次多项式数学关系<sup>[65-67]</sup>。另外,布置于坝前坡的沉水植被而言<sup>[68-69]</sup>,侵蚀浪作用下,植被使沙坝和前丘最大侵蚀厚度均减小,且减少了沙坝净侵蚀量、潟湖内淤积量及离岸输沙量,对海岸前丘有较好的保护作用。

## 4 总结与展望

本节将基于对现有研究的总结,提出未来相关研究的展望。

### 4.1 总结

植被对水动力的影响主要分为:水流、波浪和波浪耦合条件下的流场结构或消浪特征研究,以及植被产生的水流阻力的研究。流场结构方面主要针对横向、纵向、垂向流速结构分布特征,以及紊动能变化特征;消浪特征则主要从波高的衰减、波压力变

化、波能转换等方面切入研究,除了规则波与随机波两种波浪类型外,还有考虑典型孤立波等不同形式波浪的研究,同时,还有少数针对波流同向与波流反向条件的相关探究;水流阻力则主要是研究阻力系数与雷诺数、KC数之间的关系,同时开始关注叶片与茎干的相互作用,提出遮蔽系数来描述这一点。植被对泥沙输运的影响主要分为再悬浮特征、悬沙浓度变化规律,以及不同沉积与冲刷模式,包括冲淤形态变化规律、波浪爬高和越浪的冲刷机制等方面的研究。而针对植被特征而言,除了考虑沉水与挺水、刚性与柔性的不同特性以外,还包含了单株植物、簇状植被、植被斑块等不同布置特征的影响。除此以外,还有针对典型海岸形式——沙坝-潟湖海岸上植被影响的研究,以及海堤植被护坡的研究等。

### 4.2 展望

结合以上研究进展的详细论述,本文提出海岸植被生态防护机制物理模型试验研究的未来展望。在研究植被对海岸动力地貌影响的过程中,植被本身也将受到水动力条件、盐度、地下水、土壤种类、季节等的反作用,包括连根拔起、种群分布、季相变化等,因此,未来可增加以植被生长状态为研究对象,探究水动力阈值问题,比如早期育苗脱落的临界流速问题;岸滩冲淤演变应与植被特征、动力条件联系起来,更好地为相关工程提供科学指导;物理模型试验中应朝着更接近真实环境植被的方向发展,包括不同季节地上生物量与地下生物量的变化和水动力变化、底质土壤类型等方面的考虑,这也对试验技术的创新提出更高的要求;本文尚未发现在波流耦合试验条件下的针对植被对泥沙输运影响的试验研究,所以波流耦合下植被对床面冲淤影响的试验研究需要将来深入的探索;另外,几乎所有物理模型试验研究均为单一植被形式,而真实环境下常常是沉水植被-漂浮植被,以及海岸陆域的草本-灌丛-乔木等不同类型植被的组合作用情况。因此,植被组合作用成为未来物理模型试验研究的一个重要方向;除此之外,针对典型海岸的植被防护机制研究十分欠缺,未来应完善归纳针对典型海岸动力地貌对植被响应特征的研究;同时,在研究方法上可结合数学模型和现场观测,弥补物理模型试验的欠缺和不足之处。

总的来说,未来需要结合海洋科学、海岸工程、生态环境等不同领域来研究植被对海岸防御的关键贡献,应从交叉学科的视角出发,更加全面地展开基础研究。

## 作者贡献声明:

匡翠萍:论文撰写与修改;  
丛新:论文撰写与修改;  
范家栋:资料整理;  
李宏义:资料整理。

## 参考文献:

- [1] DUARTE C M, LOSADA I J, HENDRIKS I E, *et al.* The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(11): 961.
- [2] TANINO Y, NEPF H M. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(1): 34.
- [3] ZHANG J, LEI J, HUAI W, *et al.* Turbulence and particle deposition under steady flow along a submerged seagrass meadow [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(5): e2019JC015985.
- [4] TÜRKER U, YAGCI O, KABDASLI M S. Impact of nearshore vegetation on coastal dune erosion assessment through laboratory experiments [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(19): 1.
- [5] WU L, YANG X. Factors influencing bending rigidity of submerged vegetation [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(6): 723.
- [6] 王祥斌, 吴龙华. 挺水植被弯曲变形对水流阻力的影响研究 [J]. *人民长江*, 2019, 50(5): 160.  
WANG X, WU L. Influence of emerged vegetation bending deformation flow resistance [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(5): 160.
- [7] 蒋昌波, 管喆, 陈杰, 等. 红树林对规则波作用下岸滩剖面变化影响实验研究 [J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(1): 95.  
JIANG C B, GUAN Z, CHEN J, *et al.* Experimental study on changes of cross-shore beach profile by regular waves under the influence of mangroves [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(1): 95.
- [8] LARA J, MAZA M, ONDIVIELA B, *et al.* Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 1: Guidelines for physical modeling [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 107: 70.
- [9] YAMASAKI T N, JIANG B, JANZEN J G, *et al.* Feedback between vegetation, flow, and deposition: A study of artificial vegetation patch development [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126232.
- [10] CONG X, KUANG C, HAN X, *et al.* Experimental observation on wave and profile changes in a sandbar-lagoon system with emergent aquatic plants on the sandbar crest [C]// *The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference: OnePetro*, 2021: 2216-2226.
- [11] LEI J, NEPF H. Evolution of flow velocity from the leading edge of 2-D and 3-D submerged canopies [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 916: A36.
- [12] VILLANUEVA R, THOM M, VISSCHER J, *et al.* Wake length of an artificial seagrass meadow a study of shelter and its feasibility for restoration [J]. *Journal of Ecohydraulics*, 2021, 7(1): 77.
- [13] TAPHORN M, VILLANUEVA R, PAUL M, *et al.* Flow field and wake structure characteristics imposed by single seagrass blade surrogates [J]. *Journal of Ecohydraulics*, 2021, 7(1): 58.
- [14] HU Z, LEI J, LIU C, *et al.* Wake structure and sediment deposition behind models of submerged vegetation with and without flexible leaves [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 118: 28.
- [15] CHEN M, LOU S, LIU S, *et al.* Velocity and turbulence affected by submerged rigid vegetation under waves, currents and combined wave-current flows [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 159: 103727.
- [16] LOU S, CHEN M, MA G, *et al.* Laboratory study of the effect of vertically varying vegetation density on waves, currents and wave-current interactions [J]. *Applied Ocean Research*, 2018, 79: 74.
- [17] YAN C, SHAN Y, SUN W, *et al.* Modeling the longitudinal profiles of streamwise velocity in an open channel with a model patch of vegetation [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2020, 20: 1441.
- [18] XU Y, NEPF H. Measured and predicted turbulent kinetic energy in flow through emergent vegetation with real plant morphology [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(12): e2020WR027892.
- [19] HORSTMAN E, BRYAN K, MULLARNEY J, *et al.* Are flow-vegetation interactions well represented by mimics? A case study of mangrove pneumatophores [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 111: 360.
- [20] 李佳皓, 宋启蒙, 刘佳安, 等. 航道生态护岸消波效能的研究进展 [J]. *中国水运(下半月)*, 2019, 19(9): 136.  
LI J, SONG Q, LIU J, *et al.* Review of wave dissipation efficiency of waterway ecological revetment [J]. *China Water Transport*, 2019, 19(9): 136.
- [21] 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.  
PENG H, CHEN J, JIANG C, *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.
- [22] 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.  
ZHANG M, ZHANG H, XU H, *et al.* Energy attenuation of regular and irregular waves in rigid vegetated waters [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(3): 369.
- [23] 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.  
ZHAO D, HAN M, YU G. Experimental study on



- effectiveness of floating vegetation on wave dissipater [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(5): 53.
- [24] 孙彪, 董增川, 韦一鸣, 等. 水深与刚性植被高度的相对关系对防浪林消浪效果的影响[J]. *黑龙江水利科技*, 2020, 48(11): 1.
- SUN B, DONG Z, WEI Y, *et al.* Influence of the relative relationship between water depth and height of rigid vegetation on wave dissipation effect of wave break forest [J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2020, 48(11): 1.
- [25] 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.
- GONG S, CHEN J, JIANG C, *et al.* Experimental study on wave elimination of vegetation generalized model under regular wave action [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(2): 213.
- [26] 石麒麟, 冯卫兵, 邓伟, 等. 柔性植物对海堤最大波压力的影响试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(31): 9454.
- SHI Q, FENG W, DENG W, *et al.* Experimental study of the effect of flexible vegetation on the maximum wave pressure [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(31): 9454.
- [27] VEELLEN T J V, FAIRCHILD T P, REEVE D E, *et al.* Experimental study on vegetation flexibility as control parameter for wave damping and velocity structure [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 157: 103648.
- [28] ZHANG X. Wave damping by flexible marsh plants influenced by current [J]. *Physical Review Fluids*, 2021, 6(10): 100502.
- [29] HU Z, LIAN S, WEI H, *et al.* Laboratory data on wave propagation through vegetation with following and opposing currents [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(10): 4987.
- [30] MAZA M, LARA J, LOSADA I, *et al.* Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 2: Experimental analysis [J]. *Coastal Engineering*, 2015, 106: 73.
- [31] GONG S, CHEN J, JIANG C, *et al.* Prediction of solitary wave attenuation by emergent vegetation using genetic programming and artificial neural networks [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 234: 109250.
- [32] 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.
- ZENG S, CHEN J, JIANG C, *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.
- [33] 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.
- YAO Y, TANG M, TANG Z, *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.
- [34] ZHANG X, NEPF H. Flow-induced reconfiguration of aquatic plants, including the impact of leaf sheltering [J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65(11): 2697.
- [35] LEI J, FAN D, ANGERA A, *et al.* Drag force and reconfiguration of cultivated *Saccharina latissima* in current [J]. *Aquacultural Engineering*, 2021, 94: 102169.
- [36] ZHANG Z, HUANG B, TAN C, *et al.* A study on the drag coefficient in wave attenuation by vegetation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(9): 4825.
- [37] ZHANG X, LIN P, NEPF H. A simple-wave damping model for flexible marsh plants [J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(12): 4182.
- [38] ZHANG X, NEPF H. Wave-induced reconfiguration of and drag on marsh plants [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2021, 100: 103192.
- [39] WANG Y, YIN Z, LIU Y. Predicting the bulk drag coefficient of flexible vegetation in wave flows based on a genetic programming algorithm [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 223: 108694.
- [40] LIU C, SHAN Y, NEPF H. Impact of stem size on turbulence and sediment resuspension under unidirectional flow [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(3): e2020WR028620.
- [41] LIU C, SHAN Y. Impact of an emergent model vegetation patch on flow adjustment and velocity [C]//*Proceedings of the Institution of Civil Engineers-water Management: Thomas Telford Ltd.*, 2021: 55-60.
- [42] TINOCO R O, COCO G. A laboratory study on sediment resuspension within arrays of rigid cylinders [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 92: 1.
- [43] XU Y, NEPF H. Suspended sediment concentration profile in a typha latifolia canopy [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(9): e2021WR029902.
- [44] 易雨君, 唐彩红, 张尚弘. 波浪条件下刚性植被茎干紊流对沉积物再悬浮的促进作用[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(6): 1827.
- YI Y, TANG C, ZHANG S. Effect of stem-generated turbulence on sediment resuspension within rigid vegetation canopies in waves [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(6): 1827.
- [45] MARIN-DIAZ B, BOUMA T J, INFANTES E. Role of eelgrass on bed-load transport and sediment resuspension under oscillatory flow [J]. *Limnology and Oceanography*, 2019, 65(2): 426.
- [46] LOU S, CHEN M, MA G, *et al.* Sediment suspension affected by submerged rigid vegetation under waves, currents and combined wave-current flows [J]. *Coastal Engineering*, 2022(1): 104082.
- [47] YAGCI O, CELIK M F, KITSIKOUDIS V, *et al.* Scour patterns around isolated vegetation elements [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 97: 251.
- [48] SHAN Y, ZHAO T, LIU C, *et al.* Turbulence and bed load transport in channels with randomly distributed emergent patches of model vegetation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(12): e2020GL087055.

- [49] FRANCALANCI S, BENDONI M, RINALDI M, *et al.* Ecomorphodynamic evolution of salt marshes Experimental observations of bank retreat processes [J]. *Geomorphology*, 2013, 195: 53.
- [50] FIGLUS J, SIGREN J M, ARMITAGE A R, *et al.* Erosion of vegetated coastal dunes [C]//Coastal Engineering Proceedings.Seoul:[S.n.], 2014: 20-28.
- [51] FIGLUS J, SIGREN J M, POWER M J, *et al.* Physical model experiment investigating interactions between different dune vegetation and morphology changes under wave impact [C]//Proceedings of Coastal Dynamics. Helsingor: [S. n.], 2017: 470-480.
- [52] FEAGIN R, FURMAN M, SALGADO K, *et al.* The role of beach and sand dune vegetation in mediating wave run up erosion [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 219: 97.
- [53] 江晨辉,曹海锦,冯卫兵,等.规则波作用下刚性植被海岸准静态平衡剖面试验[J].*水运工程*, 2019(4): 7.  
JIANG C, CAO H, FENG W, *et al.* Experiment of quasi-static equilibrium profile of rigid vegetation coast under regular wave action [J]. *Port and Waterway Engineering*, 2019(4): 7.
- [54] HOLZENTHAL E R, WENGROVE M E, HILL D F. Mechanisms of sediment transport around finite patches of submerged aquatic vegetation [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 273: 107905.
- [55] 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.
- [56] TURKER U, KABDAŞLI M S. Average sediment dislocation analysis for barred profiles [J]. *Average Sediment Dislocation Analysis for Barred Profiles*, 2004, 31(14): 1741.
- [57] SALLENGER A H. Storm impact scale for barrier islands [J]. *Journal of Coastal Research*, 2000, 16(3): 890.
- [58] SILVA R, MARTÍNEZ M, ODÉRIZ I, *et al.* Response of vegetated dune—beach systems to storm conditions [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 109: 53.
- [59] ODÉRIZ I, KNÖCHELMANN N, SILVA R, *et al.* Reinforcement of vegetated and unvegetated dunes by a rocky core: A viable alternative for dissipating waves and providing protection? [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 158: 103675.
- [60] FEAGIN R A, LOZADA B S M, RAVENS T M, *et al.* Does vegetation prevent wave erosion of salt marsh edges? [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(25): 10109.
- [61] SCHÜTTRUMPF H, OUMERACI H. Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at seadikes [J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(6): 473.
- [62] PAN Y, LI L, AMINI F, *et al.* New understanding on the distribution of individual wave overtopping volumes over a levee under negative freeboard [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 75(S1): 1207.
- [63] PONSIOEN L, DAMME M V, HOFLAND B, *et al.* Relating grass failure on the landside slope to wave overtopping induced excess normal stresses [J]. *Coastal Engineering*, 2019, 148: 49.
- [64] PAN Y, CHEN Y, ZHANG T, *et al.* Laboratory study on erosion of vegetated HPTRM system under high-speed open-channel flow [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2018, 144(1): 04017038.
- [65] KUANG C, HUANG G, CONG X, *et al.* Experimental study on wave attenuation by a sandbar with emerged rigid vegetation [C]//The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference. Onepetro:[S.n.], 2021: 2211-2215.
- [66] CONG X, KUANG C, HUANG G, *et al.* Experimental study on the morphodynamic evolution of sandbar-lagoon system with emergent vegetation [J]. *Coastal Engineering*, 2023, 184: 104340.
- [67] CONG X, KUANG C, LI H, *et al.* Nonlinear wave propagation in a vegetated sandbar-lagoon system [C]// The 12th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics. [S.l.]:IOP Publishing, 2023:1-9.
- [68] 丛新,匡翠萍,武云龙,等.侵蚀浪条件下沉水植被对沙坝-潟湖海岸的冲淤影响研究[J].*热带海洋学报*, 2022, 41(4): 31.  
CONG X, KUANG C, WU Y, *et al.* Study on erosion and deposition in a sandbar-lagoon system influenced by submerged vegetation under erosion wave conditions [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(4): 31.
- [69] CONG X, KUANG C, LIU H, *et al.* Experimental observation on wave and profile changes in a sandbar-lagoon system by submerged vegetation on the sandbar slope [C]// Australasian Coasts & Ports 2021 Conference. Christchurch: [S.n.], 2022: 1014-1019..