

考虑海岸植被影响的水沙动力数学模型研究进展

匡翠萍¹, 丛新¹, 韩雪健¹, 宫立新², 刘会欣², 朱磊²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 介绍了植被模型的不同考虑方式, 分别从水流阻力、床面阻力、植被消长等方面展开讨论。基于工程尺度和实验室尺度水沙动力数学模型的研究, 综述了植被影响下的流速、紊动能、拟序结构, 不同波浪形态的传播特征以及悬沙浓度、地形演变等相关的研究进展。结合大量数学模型研究, 提出了未来的研究趋势。

关键词: 海岸植被; 生态防护; 数学模型; 波流动力; 泥沙输运

中图分类号: P753

文献标志码: A

Review on Hydrodynamic and Sediment Transport Numerical Models Considering Effects of Coastal Vegetation

KUANG Cuiping¹, CONG Xin¹, HAN Xuejian¹,
GONG Lixin², LIU Huixin², ZHU Lei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Eighth Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Different consideration methods of vegetation model are introduced, which are discussed from water flow resistance, bed resistance, vegetation growth and so on. Based on hydrodynamic and sediment transport numerical models of engineering scale and laboratory scale, the research progresses in flow velocity, turbulent energy, coherent structure, wave propagation characteristics of different incident wave shapes, suspended sediment concentration, and morphological evolution influenced by vegetation are reviewed. Combined with a lot of numerical model study, the future research prospects are proposed.

Keywords: coastal vegetation; ecological protection; numerical model; wave and current; sediment transport

海草、盐沼、红树林等沿海植被系统是地球生态的宝贵组成部分, 它们可以减缓水流、衰减波浪、稳定海床、改善水质等, 并能够给丰富的生物资源提供栖息地, 在河口生态系统抵御风暴中发挥着关键作用。受到人类活动和气候变化的影响, 基于植被的以海岸保护为核心的生态防护工程受到极大的关注^[1]。2020 年国家发展改革委和自然资源部发布的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》中明确提出了针对海洋、海岸生态环境的全面保护、修复及防灾减灾目标。

在基于植被的海岸保护解决方案中, 对植被-水动力-泥沙相互作用机制甚至包含风沙输运过程的研究尤为重要, 研究方法包括物理模型、数学模型、现场观测、理论分析等, 数学模型往往以理论分析为基础, 并可有效弥补物理模型和现场观测中的不足, 对于实验室尺度数学模型研究, 则通常围绕理论和物理模型展开。本文针对数学模型方法相关研究展开综述, 包括植被模型的发展及不同尺度数学模型的研究现状。

1 植被模型

由于真实环境的植被刚度和形态千差万别, 因此对于含植被的海岸水沙变化特征的数学模型研究, 一般需基于真实情况的概化植被模型。一维、二维数学模型研究中使用的植被模型局限性较小, 对于不同技术目标及动力条件可用不同植被模型, 而对于三维数学模型研究来说, 则需更精细化的植被模型与之匹配。

1.1 水流阻力

如图 1 所示, 若从植被引起的水流阻力方面考虑, 虽然现实海岸环境中几乎所有的植被都不是绝对的刚性, 但最初大多数数值模型首先使用 Morison

收稿日期: 2023-04-20

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

第一作者: 匡翠萍, 教授, 博士生导师, 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

方程^[2]将植被视为垂直刚性柱体,忽略弯曲效应,不同的是变化条件下水流控制方程的表征以及阻力系数的确定路径。该方法考虑了植被的一些简单特性又忽略了植被本身复杂的柔性变形,是目前应用较广泛的一种概化方法,也称为刚性群杆假设。一般通过确定植被相关的一些参数,包括植被密度、直径、高度、阻力系数等,计算得到植被诱导的阻力,转化为控制方程中的阻力源项、能量损耗项或紊动扩散项。

另外,也有学者直接在模型中利用修正阻力系数或有效长度的刚性植被模型来考虑柔性植被^[3]。在此基础上,很多学者针对不同真实环境下的植被形态进行了研究,包括考虑变刚度茎干植被的作用^[4];同时考虑竖直和水平形态茎干/根系的作用^[5];区分树冠、树干、树根等的植被分层考虑^[6];区分悬浮、淹没等不同植被类型分层的考虑等^[7-8]。

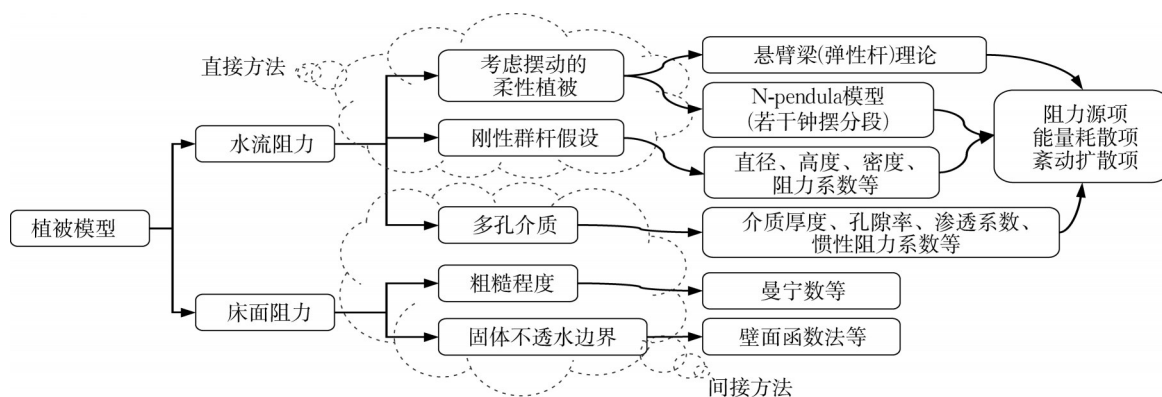


图1 植被模型发展简图

Fig. 1 Schematic diagram of vegetation model development

对于柔性植被而言, Wang等^[9]针对水流作用下垂向变化前缘宽度的沉水植被(例如灌木和莎草),使用自下而上逐渐增大的前缘宽度的植被模型推导出速度分布的解析解。Zhu等^[10]提出一种基于刚性细长杆的索链模型,模拟了沉水柔性植被的非对称摆动特征与波高、波长、叶片长度、弯曲刚度等的关系。多数研究集中在研究波浪作用下植被摆动的影响,通过求解植被运动的受力平衡方程来考虑植被的柔韧性,并将相对速度纳入植被诱导的阻抗效应,该方程包括浮力、阻尼、刚度和重力(恢复力),以及阻力和惯性力(驱动力)^[11],最常用的概化方法就是悬臂梁理论。这种方法一般基于阻尼振荡动力学方程、欧拉-伯努利梁理论等^[12-13],假定杆的挠度非常小、忽略垂直运动,所以这些植被模型只适用于小挠度、小偏转,不适用于茎干的极端偏转,例如在真实环境中反复观察到海草的非线性鞭状运动。Marjoribanks等^[14]根据植被受弯曲力和拉伸力的不同,建立了两种不同的生物力学模型:弯曲植被是基于欧拉-伯努利梁方程的模型^[11];而对于受拉植被,也就是柔性极强可摆动至倒伏状植被,建立了N-pendula模型^[15],也就是将茎干分成若干由扭力弹簧和旋转阻尼器连接的钟摆片段。

水流阻力还可以通过将植被间接定义为不同特

征的多孔介质模型来反映。目前多孔介质区域模拟植被覆盖时,一般假设多孔介质均匀、各向同性,且多孔介质上部边界为刚性可渗,需要设置的参数主要有孔隙率、渗透系数和惯性阻力系数等^[16]。刘达等^[17]将防浪林植被区分为树冠区和树干区两个多孔介质区,分别赋予不同的孔隙率等参数进行研究,同时还提出未来可将刚性群杆假设与多孔介质假设结合起来,在树干层采用刚性群杆模拟、树冠层应用多孔介质模拟,充分利用各自优点,提高数学模型研究精度。Suzuki等^[5]则以刚性群杆假设为基础,以孔隙速度代替平均流速作为特征速度来考虑孔隙效应。

1.2 床面阻力

如图1所示,植被还可间接概化为床面阻力,即将植被概化为床面粗糙高度等处理方法,具体通过参数化设置为达西魏斯巴赫摩擦因子、曼宁数或谢才系数等,这个系数通常是随时间平均的,并假定在一定植被区域是恒定的^[18]。然而当植被茎干在水流作用下重新配置时,又将造成植被的垂向阻流面积相应减少,从而对水流产生反作用。因此,将植被作为附加的床面底层粗糙度并不能较好地反映真实环境情况,因为它忽略了植被茎干的重构对水流造成的影响,实际上植被-水流相互作用是一个双向的过

程。但从工程实际以及经济实用方面来看也具有一定的优势。针对间接考虑方法,也有研究直接将刚性植被考虑为固体不透水边界层,设置若干桩柱形态的床面结构,并由壁面函数法处理^[19]。

1.3 植被的消长

除了从植被引起的阻力方面考虑以外,植被受水沙动力影响后的连根拔起、掩埋等特征的考虑也受到关注,通过将植被区冲淤变化、水位水深等水沙动力或水文条件要素与植被性状、生物量,甚至植被种类链接^[20-21],考虑植被的消长过程。槐文信等^[22]提出了基于临界床面剪切力的植被消长模型,Dang等^[23]则基于流速阈值建立了植被演化模型。关于植被的衰减、扩散、生长过程等生态特性参数的研究也逐渐涌现。Carbonari等^[24]定义了包含上述特征的量纲为一的参数描述时空变化的植被密度,并用数学方法定义了触发自组织植被模式的阈值条件,这些模式呈中心或多行斑块形态。植被的连根拔起与床面侵蚀直接相关,是控制床面演化的重要过程,而侵蚀与植被根系阻力之间的平衡则决定了植被根系对床面演化的影响,可见植被根系的重要性^[21],且植被根系还涉及地下水,其最大深度取决于地下水特征,其密度随床层深度变化。由此可见,植被的消长特征较复杂,不仅涉及到植物自身生态特征,还和水沙动力、地下水特征等密切相关。

2 工程尺度模型

工程尺度模型一般指区域性或长时间尺度的数学模型。对于此类模型而言,目前人们往往更关注植被带来的整体水沙动力效应。随着模型的改进及计算机软硬件设施性能的提升,植被摆动等效应也逐渐通过参数化考虑在内,但广泛应用于工程尺度研究中的还是较简便的植被模型,一方面能够模拟出预想的效果,另一方面也能够节约计算成本。使用的软件平台包括Delft-3D、ROMS、SWAN、XBeach等。该尺度模型包括区域内动力地貌变化的平面二维模型,对于海滩剖面变化的研究则可使用基于XBeach等的一维模型。

生态地貌学或生物动力地貌学是一门研究生物和非生物过程之间的反馈如何塑造地球表面的新学科。植被是生态系统的基本组成元素之一,他们对于地形地貌的演变发挥着重要的作用。不同类型植被生长在不同地理区域,比如盐沼植被和红树林,因此具有不同生产力和稳定机制,但两种类型植被对

海岸系统稳定性的影响相似,他们控制着盐沼平台的高程,即潮上带的平衡^[25]。植被对沼泽表面的侵蚀包括两种相互竞争的效应^[20]:首先,因植被平台上的水流阻力增加,植被促进了水道内的水流汇集,有利于水道的切割;其次,植被使纳潮量减少,因盐沼表面更高的吸积率导致水道淤积。冲淤效应取决于该潮流系统中潮滩盐沼的高程,该高程又由沉积有效性、相对海平面上升速率和植被生物量分布等决定。另外,考虑风沙输运过程时,植被带化分布是控制海岸前丘最大尺度的主要因素,因此也控制了沿海沙丘系统中的储沙量^[26]。Xu等^[27]认为泥沙淤积和植被密度之间具有非线性关系,中等植被密度产生最大的泥沙淤积。因此,植物在改变它们的栖息地和改变沿海脆弱性方面发挥积极的作用。当植被生长速率缓慢降低时,对沙丘演化影响不大,但植被生长速率发生较大扰动(比如一次性全部移除或低于某一阈值)时则影响较明显,此时的低植被生长率导致沙丘从稳定状态向不断流失沙量的移动沙丘发展,造成海滩-沙丘系统的脆弱性^[28]。

基于应用较为广泛且相对成熟的刚性群杆假设,可较容易地实现对植被高度、茎干直径、密度及阻力系数等参数的设置,因此对于植被群落季节性变化可通过这些参数定量化描述。针对海湾水沙动力,Zhu等^[29]研究发现夏季植被密度达到最大时,海草草甸可有效衰减水流(60%)和波浪(20%),并减少悬沙浓度(85%),且波浪耦合条件下植被区内泥沙再悬浮的显著减少(85%)主要由水流阻抗而非波浪衰减导致;冬季海草植被密度较低时,微小的密度变化会导致剧烈的流动条件变化,但与完全没有植被的情况相比,低海草密度大大减少了冬季泥沙损失。针对多潮汐通道系统,Nardin等^[30]发现植被群落延长了水体滞留时间,考虑其季节性变化后,发现外海波浪增加了海湾潟湖内的泥沙输出,特别是在植被密度较低的冬季。

除此之外,为了更精确地考虑植被姿态相关的影响,Beudin等^[3]提出并证明了与植物姿态相关的阻力参数化的有效性,改进后的模型能够再现有植被存在的平均流场和湍流流场,分别描述了沉水植被斑块对单独潮流、波浪作用及波流耦合作用下的影响。Donatelli等^[31]基于此模型研究了潟湖类型河口盐沼泥沙动力特征。在盐沼边缘侵蚀过程中,有高达42%的沉积物沉积在浅水区域和植被覆盖的盐沼平台上,对剩余未侵蚀盐沼的泥沙冲淤有正向贡献。即使考虑到海湾中盐沼退化释放的沉积物,

以目前来自海洋的沉积物供应,该系统也无法跟上海平面上升的速度,强调了多种沉积物来源对盐沼综合体维护的相关性,而Gourgue等^[32]则认为潮滩沼泽修复能够跟上海平面上升的实际速度,而且它的恢复能力对悬浮沉积物的获取比对海平面上升的速度更敏感。另外,对于海平面上升情景下的地貌演化特征,除泥沙供给的重要影响以外,还包括潮差^[33]、风浪和海岸坡度^[34]等其他因素的影响。

波浪尤其是台风浪作用下,对于单类型植物群影响的海岸,一般情况下随着植被区垂岸方向宽度、植被高度和植被密度的增加,波高衰减增大^[35]。此外,Chen等^[36]发现新型潜堤与盐沼植被组合策略能加强波浪衰减。波浪作用往往伴随潮位变化,甚至受到洪水位的影响,Ren等^[6]将植被模型分层考虑(树冠和树干),提出植被组合消浪的优化方法,使不同季节性水位变化情况下的植被消浪作用都得到较好发挥。组合植被消浪林布置方案如图2所示。图2中刚性植被的冠层高度 h_3 应高于波浪叠加下的设计水位 h ,柔性植被的冠层高度 h_1 应大于刚性植被冠层的下缘树干高度 h_2 。风暴事件海岸剖面演化研究方面,Yin等^[37]利用大区域波流耦合模型确定的时变水动力和波浪条件,设计建立了XBeach模型研究刚性植被影响下的海岸剖面变化特征,研究发现植被可减少风暴引起的剖面后退,随着阻力系数的增大,海滩剖面的侵蚀量相应减小。

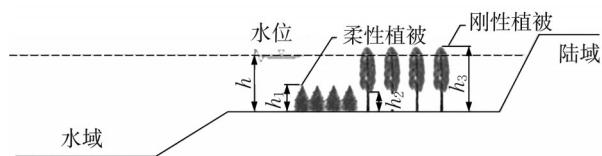


图2 植被组合优化设计模型^[6]

Fig. 2 Optimization design model of combined vegetations^[6]

经济效益方面,湿地在风暴事件中每年平均为每个河口节省270万美元的损失。盐沼可在不同空间和时间尺度上在减轻河口风暴洪水及相关成本方面发挥广泛的作用,包括局部波浪衰减以及河口尺度的风暴潮衰减。其中,风暴潮衰减占主导地位:在有掩护的部分河口湿地,平均减少洪水灾害17%,而在波浪暴露的河口湿地附近,平均减少洪水灾害8%。因此,生态系统服务模型必须整合跨尺度运作的过程应对风暴驱动的沿海洪水日益增长的威胁,否则可能严重低估基于自然的解决方案的价值^[38]。然而,Orton等^[18]通过设置曼宁数考虑植被模型,发

现湿地修复(湿地面积的增加)较航道浅化导致风暴潮水位降低效果并不明显,并提出考虑以自然为基础的海平面上升解决方案时,需更多地关注沉积体系和地形测量,包括湿地地区的较深水道和形态,而不仅仅是湿地的修复。

3 实验室尺度模型

实验室尺度模型一般是以理论模型研究为基础,模型区域一般为实际波流水槽尺寸且需用该物理试验数据进行验证,使用的软件或开源平台包括OpenFOAM、FLUENT、FLOW-3D、XBeach、NHAVE、SWASH等。该尺度模型包括水槽沿程动力及剖面变化的一维数学模型、研究整个水槽平面区域或垂向动力变化的平面或立面二维模型,以及更精细化水流拟序结构的三维模型。

3.1 潮流作用

潮流作用下的研究内容一般以刚性群杆假设的植被模型为基础,多集中在水流结构上,也有最新的研究开始针对水流作用下植被的生长发展过程,且多数研究集中于单一类型植物(群)。

3.1.1 挺水植被

流速结构分布上,挺水植被区上游流态比较均匀,垂向分布符合对数分布,而植被间隙区流速在下游达到最大。紊动方面,含不同密度植被水流的湍流动能和湍流动能耗散率空间分布规律一致,并表现为植株尾流区的湍流动能耗散率较大^[39]。为了探究植被密度与涡流结构的关系,Kingora等^[40]则研究了均匀排布的圆形植被斑块影响下的涡流分布结构,提出不同固相体积分数下的水流模式。除此之外,也有针对水流对挺水植被生长影响的研究。槐文信等^[22]基于植被消长模型,利用等效曼宁系数法概化植被效应,定义床面剪切力阈值区域反映植被的生长或消亡区,构建了植被消长与水动力过程耦合的数学模型。

3.1.2 沉水植被

与挺水植被类似,沉水植被的相关研究一般集中在流速和紊动变化规律上。李绍武等^[41]考虑了刚性植被的遮蔽效应,发现上层非植被区流速垂向梯度较大,而下层植被区的流速梯度较小,且当植被密度较大时,植被区的流速更接近线性分布。丁雪等^[16]则将植被考虑为多孔介质区域,研究了不同流量、不同植被密度条件下流速和紊动强度的垂向分布规律。Liu等^[42]研究了植被密度、相对直径(单株

植被直径与植被阵列直径之比)对水流阻力的影响,它们通过改变贯穿流(水流穿越植被时,被分成侧向水流和顺流穿越植被斑块)强度影响阻力。沉水植被引起的水流拟序结构也逐渐引起学者的注意。采用高分辨率的大涡模拟(LES)方法,Liu等^[43]对不同密度的刚性沉水植被影响下的平均和瞬时流场及三维水流拟序结构特征进行了研究,包括植被斑块前的马蹄涡、植被斑块尺度的涡旋特征等。Chang等^[44]则采用分离涡模拟(DES)方法考虑了不同植被密度、不同相对高度的刚性植被斑块,模拟了斑块周围涡流变化特征。

3.2 波浪作用

波浪作用下的水流运动具有往复性,对于刚性植被而言,仍可使用刚性群杆假设来进行研究,而对于柔性较大植被而言,植被在波浪作用下必然会产生复杂的摆动,因此,波浪作用下的数学模型往往对柔性植被的摆动影响考虑得更多。

3.2.1 规则波

规则波不管是对于物理模型试验还是数学模型来说都相对基础。首先,如果验证数据的物理模型中植被刚柔性影响不大,数学模型中基本上直接采用刚性群杆假设。一般情况下,植被相对淹没度(水深/植被高度)或波浪周期与波浪衰减负相关,而植被密度与波浪衰减正相关,三者对消浪效果的影响都是单调的,但波浪周期对波浪衰减影响的敏感程度较弱^[45-46],而刘达等^[17]发现海堤前植被种植密度对波浪衰减的影响存在重要拐点。除了针对波浪衰减的研究以外,波浪爬高也是影响岸滩演变的重要因素。Yin等^[47]研究了斜坡上挺水刚性植被对波浪爬高的影响,并得到简单数学关系式。另外,在波浪引起的水流结构方面,Rooijen等^[48]深入分析了平均水水平动量项对沉水植被冠层内部及上部平均水流的影响。

实际环境中的植被多数为柔性植被,尤其是沉水植被。Hemavathi等^[49]对物理模型中使用的人工柔性海草进行了三维数值模拟,模拟结果与物理试验结果的误差在9%以内。Magdalena等^[50]发现将人工海草考虑为长波作用的扩散项、短波作用的阻力项时模拟结果最好,且研究范围内的波浪衰减强烈依赖于植被区域的布置尺寸。虽然植被摆动情况十分复杂,但理论模型的发展与创新使得越来越多的数学模型研究开始考虑植被摆动情况。针对植被小幅度偏转运动,基于欧拉-伯努利梁理论,Hu等^[13]提出一种新的理论框架,研究发现杨氏模量对波高

衰减的影响比材料密度大;与刚性圆柱相比,柔性圆柱与流体之间的相对运动较小、对流体的阻力较小,因此波衰减较小;柱体运动的偏移量从植被区向海侧到背风侧单调减小,且柱体在不同位置的运动为异步运动。与之类似,Veelen等^[51]提出了一种新的工作因子来模拟柔性植被场上的波浪阻尼,成功预测了在中高能波浪条件下植物引起的波浪衰减。基于阻尼振荡运动方程,Maza等^[12]提出了两种新的阻力系数公式,将现有公式的适用范围扩大到更低的雷诺数。Zhu等^[11]采用高阶有限元的方法求解植被运动方程,导出了阻尼相对于其他恢复力较显著时的植被茎干运动与水质点之间的理论关系,并得到一个可综合波浪和植被材料及几何特性的量纲为一的参数。Chen等^[52]详细分析了植被弯曲刚度的影响,并发现紊动能最大值出现在波峰/波谷出现前后时的近床面处及植被冠层顶部,这些地方相对于植被的流速较大。

基于XBeach波浪模型,Yin等^[53]拓宽了非静压模型只能模拟刚性植被波浪衰减的应用范围,提出了柔性植被动态模型(FVDM),证明了FVDM在模拟单个水下柔性茎干受力和运动方面的有效性,进一步证实了柔性植被能够衰减波高,在其他变量都不变的情况下,柔性植被的弹性模量对波浪衰减起着至关重要的作用。紧接着,Yin等^[54]又以FVDM为基础,定量研究了波浪非线性对沉水柔性植被动力学和波浪衰减的影响,并分析了不同波浪理论和不同特征波速确定方法的影响。最后,Yin等^[55]将XBeach相位平均类波浪模型扩展到垂向均匀和不均匀沉水柔性植被方面的研究,发现采用线性波浪理论参数的衰减率较Stokes二阶波浪理论小。同时,随着Ursell数的增加,两种波浪理论的衰减模拟偏差增大。

以上针对柔性植被弯曲的研究,基本上都是基于悬臂梁理论的较大幅度摆动情况,对于类似于鞭状摆动的柔性极大的植被的研究还较少。基于N-pendula植被模型,Familkhalili等^[15]采用非静压双向完全耦合水动力-植被模型,通过求解瞬时植被茎干偏移运动得到时空变化的植被阻力系数,在无需对参数进行调整的情况下重现试验结果,这种新机制比使用刚性植被的结果有所改善。该植被模型可计算植被茎或枝的瞬时方向这种高度细致的状态,这对植物自身光合作用等生态的研究也有重要意义。

3.2.2 不规则波

实际海浪是不规则的,与规则波类似,随着周期

的减小和波高的增大,植物引起的波能衰减率增大^[56]。斜坡上的植被可减少20%~50%的波浪爬高,且较大的植被面积与高度可使波高、波浪增水、波浪爬高衰减更多^[57]。水平床面上模拟数据的能谱分析显示^[58],植物使整个频域内的波能均有衰减,谱峰频率处衰减幅度最大,低频波的衰减幅度大于高频波,且斜坡床面上植物削弱了由于浅水变形引起的波高增大,导致破波点更接近岸线。另外,随着水深的增加,波高沿程衰减梯度变小,植被对波浪能量耗损也愈微弱。随着植被密度和植被阻力系数的增加,波高衰减、波能损耗增大,且波高越大衰减梯度越大^[59]。然而,在复式斜坡床面上,植被引起的波浪耗散率呈现出频率越高耗散率越高的趋势^[60]。针对斜坡上具有复杂根部结构的红树林,Suzuki等^[5]同时考虑了竖直与水平生长的茎干/根系形态,同时将孔隙率和惯性力考虑在内,发现植被竖直和水平形态对波浪衰减的影响在短波情况下差异较大,孔隙率和惯性力效应在植被密度较大时更加明显。孔隙效应会引起波浪反射,导致植被区域内和区域后的波高均降低,而惯性力导致负的能量耗散,降低了植被的消浪能力。总的来说,考虑这两种影响可使波浪衰减更大,且孔隙度的存在增加了最大水位。

3.2.3 海啸波或聚焦波

在全球气候变化及地质灾害频发的背景下,引发海啸波的频次也越来越多,而孤立波成为研究海啸波的代表性波型。随着入射波高、植被密度和植被淹没高度的增加,波浪传播中波面壅高程度、波高衰减率、波能损耗率都愈加强烈^[61]。针对传统挺水与沉水植被,Wang等^[62]将时变和周期平均的植被阻力系数分别量化,通过考虑植被淹没比,提出新的通用阻力系数计算公式。同时,Wang等^[63]还使用简易平台、植被茎干与植被根部组装成一种新型浮式植被防浪平台,研究了孤立波与浮式植被平台的相互作用。由于海啸波可能冲破海堤束缚危害人民生命财产安全,因此很多研究将植被与海堤越浪结合起来。蒋昌波等^[64]考虑海堤前非淹没刚性植被分布密度及宽度、波高等因素,研究了沿程波形特征、海堤堤顶越浪空间分布特征,发现波能衰减随植被分布密度和宽度的增大而增大。随着入射波高的增大,植被对堤顶前缘水流厚度影响增强,而对后缘水流厚度影响减弱,植被的存在对堤顶流速的空间分布趋势影响极小,但相对堤顶流速(定义为 $v_c(x_c)/v_c(x_c=0)$,如图3所示)增加程度均大于无植被情况。

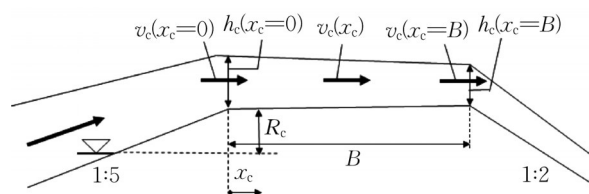


图3 堤顶越浪流厚度及速度定义示意^[69]

Fig. 3 Definition of overtopping layer thickness and flow velocity on crest^[69]

使用孤立波模拟海啸波的传统方法,与实际的海啸波在时空尺度上(波周期和波长)有着较大区别,为了得到更真实更准确的结果,Qu等^[65]使用参数化的类海啸波研究了挺水刚性植被对海啸波衰减的影响,主要考虑了波高、水深、植被密度和宽度等因素。研究发现植被斑块可耗散相当一部分类海啸波的总能量,然而,与孤立波相比,类海啸波具有更高的总波能且波能耗散率较低,因此用孤立波代替海啸波会高估沿海防护林的波浪衰减率。为了得到实际的极限波浪情况,在指定的时间和地点由不同频率的组成波的波峰和波谷叠加产生的聚焦波浪能较好模拟实际极限波浪情况。Qu等^[66]研究了该种极端波浪条件下挺水刚性植被的波浪衰减作用,植被斑块密度和布置宽度(水流方向)对聚焦波的波峰和波谷的衰减均有正向影响,最大波幅的衰减系数和总波能的耗散系数均随植被密度和宽度的增加而增大,但植被密度对波浪衰减效率的影响强于宽度;植被斑块能平均降低聚焦波的最大波幅31%,平均降低总波能45%,表明海岸植被能有效减弱极端海浪对海岸的影响。

3.3 波流耦合与泥沙输运

实际海岸带环境中波浪与潮流耦合相互作用,且其方向多变,共生水流较复杂,因此,研究植被在波流耦合中的波浪衰减作用对准确理解海岸带植被保护效率至关重要,同时对于了解海岸植被系统的水动力、沉积和交换过程也具有重要指导意义。多数实验室尺度模型中考虑植被作用后仅停留在水动力研究上,较少真正添加泥沙项、考虑植物对泥沙的影响,而湿地植被在海岸泥沙输运特征中却扮演着重要角色。

3.3.1 波流耦合作用

不少学者进行了物理模型试验相关的研究,但数学模型方面的相关研究还较少。Yin等^[67]通过建立准三维数学模型拓展了物理模型试验,定量研究了纯波与波流耦合作用下的阻力系数,分别得到了波流耦合作用下阻力系数与雷诺数 Re 、 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)的经验关系,相关性较好,并发现同向流是否促进波浪衰减取决于施加的流速与水平最大波速的比值 α ,反向流总是能够增强波浪衰减。然而,Zhao等^[68]则发现波流同向和反向都可以增强或抑制因植被而引起的波浪衰减,这主要取决于 α ,且对于该研究范围内的植被密度和水深条件,随着 α 的增加,植被对海流中波浪衰减的影响先减小后增大。

3.3.2 泥沙输运

首先,在泥沙悬浮研究方面,不同于传统的希尔兹数模型中泥沙悬浮与平均流速相关,Lou等^[69]以紊动强度为基础,使用修正的希尔兹数解释冠层内尾流紊动引起的泥沙悬浮,密集植被冠层内平均流速作用较弱,茎干尺度紊动对泥沙悬浮起主要作用。同时,植被密度越大,冠层内悬沙浓度越高,冠层上方悬沙浓度越低。陈明等^[70]模拟了植物影响下波浪动力特征和泥沙悬浮过程,从紊动能角度修正了希尔兹数,对泥沙模块进行了改进,考虑了植物尾流紊动对泥沙悬浮运动的影响。除此以外,Lu等^[71]提出考虑挺水刚性植被情况下估算床面切应力的分析方法,并计算得到推移质输沙率,该方法不仅适用于均匀分布植被,也适用于植被斑块布置形式。另外,在溃坝的相关研究中,滩地植被能减慢水流速度,减少溃坝水流对植被区的冲刷,进一步减少岸滩崩塌风险,但同时降低了植被区泄洪能力,导致洪水在上游区水位升高^[72]。地形剖面演化方面,张洪艳^[73]基于物理模型试验数据,使用XBeach泥沙输运模式对海岸演化进行了模拟,得到植被特性与滩肩侵蚀量、坡脚堆积量的关系。

4 总结与展望

本文首先介绍了植被模型的不同考虑方式,然后分别基于工程尺度、实验室尺度数学模型方法的研究,从海岸植被对水流结构、波浪传播、地形演变等的影响方面进行了全面综述。

4.1 总结

植被模型方面,就植被引起的阻抗而言可从水流阻力与床面阻力两个方面考虑,目前应用较广泛的为刚性群杆假设,随着理论模型研究的发展和计算机软硬件设施的快速更新,越来越多的学者开始注重真实条件下植被随水流的摆动过程,从基于悬臂梁理论的小幅度摆动研究发展到可模拟倒伏状大幅

度摆动的N-pendula模型。从水沙条件对植被的影响方面考虑,则需要关注植被的连根拔起、埋没、生长及衰退等因素,不少研究将水沙动力特性(临界冲淤水深、临界剪切应力、临界流速等)与植被的消长(密度等)联系起来。

对于工程尺度模型研究,一方面体现在植被对海岸地貌形态演化趋势的影响及在海岸灾害性事件中的作用,包括考虑海平面上升或风沙输运过程的水沙特征,灾害性事件后的植被经济效益评估等。另一方面,则是通过改变概化植被模型参数模拟植被季节性变化、植被类型及组合等,研究其对水沙动力的影响。

实验室尺度模型方面,主要总结的是水槽尺度方面的研究。潮流作用下区分了挺水植被、沉水植被等不同植被类型,但主要研究内容都是水流结构特征,包括流速、紊动能、拟序结构等。波浪作用下,以规则波、不规则波、海啸波、聚焦波等不同波浪类型为要素分别对波浪衰减、爬高、越浪等方面展开综述,最后对潮流的影响进行了简要介绍。波浪作用下水流具有往复运动特性,对于柔性植被的摆动影响尤为重要,因此很多学者将植被的摆动对波浪衰减的作用或植被摆动引起的阻力特性的变化作为研究重点。对波流耦合、泥沙输运方面的水槽尺度的研究相对较少。

4.2 展望

植被模型方面,柔性植被的摆动尤其是在波浪作用下的复杂运动仍将是未来关注的一个重点;对于植被茎叶-茎叶间相互重叠遮蔽影响的作用机制研究、植被不同假设模型的优化组合效应(比如刚性群杆假设与多孔介质假设组合)尚需进一步拓展;植被的消长(包括短时间尺度及跨年尺度时间窗口的可变性)与水沙动力(包括临界床面剪切应力、临界流速、临界水深、临界冲淤厚度等)之间的相互作用机理也是未来仍需进一步展开的方向,需综合考虑地形、泥沙、植被自身生长规律、地下水、风等因素,建立更全面的植被消长模型。工程尺度模型方面,植被密度空间梯度变化、植被斑块的分辨率、植被生长动态过程及生物积累等因素仍需进一步完善;在模型垂向分层、短期极端事件及植被组合作用的考虑上也尚有欠缺。就实验室尺度模型而言,植被使湍流存在明显各向异性特征,各向异性数值模拟研究仍需深入开展;部分研究中经率定设置的参数应进一步提出经验公式,对于已经采用的经验公式,则仍需更多现场观测或物理模型试验数据的验证与评

估,并包含更广的参数范围;波流耦合方面的研究集中于波流同向或反向条件,而实际环境往往是波流斜交,因此,波流耦合方面的研究仍需进一步拓宽;与泥沙相关的水槽尺度数学模型基础研究相对较少,未来关于植被影响下的泥沙输运方面的实验室尺度模型仍需进一步探究。

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。

韩雪健:资料整理。

宫立新:资料整理。

刘会欣:资料整理。

朱 磊: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] MORISON J R, O'BRIEN M P, JOHNSON J W, *et al.* The force exerted by surface waves on piles [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1950, 2(5): 149.
- [3] BEUDIN A, KALRA T S, GANJU N K, *et al.* Development of a coupled wave-flow-vegetation interaction model [J]. *Computers and Geosciences*, 2017, 100: 76.
- [4] MARJORIBANKS T I, PAUL M. Modelling flow-induced reconfiguration of variable rigidity aquatic vegetation [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2022, 60(1): 46.
- [5] SUZUKI T, HU Z, 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.
- [6] REN Jie, DONG Zengchuan, JIN Dawei, *et al.* Wave-attenuation characteristics of combined-vegetation wave break forests for big rivers with large flood water level changes [J]. *Water Science and Technology*, 2021, 83(4): 831.
- [7] ZHU Longhuan, ZOU Qingping. Three-layer analytical solution for wave attenuation by suspended and nonsuspended vegetation canopy [C]//Coastal Engineering Proceedings. Antalya:[s.n.], 2016: 1-8.
- [8] CHEN Haifei, LIU Xiaofeng, ZOU Qingping. Wave-driven flow induced by suspended and submerged canopies [J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 123: 160.
- [9] WANG Weijie, HUAI Wenxin, LI Shuolin, *et al.* Analytical solutions of velocity profile in flow through submerged vegetation with variable frontal width [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124088.
- [10] ZHU Longhuan, ZOU Qingping, HUGUENARD K, *et al.* Mechanisms for the asymmetric motion of submerged aquatic vegetation in waves: a consistent-mass cable model [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125 (2) : e2019JC015517.
- [11] ZHU Ling, CHEN Qin. Numerical modeling of surface waves over submerged flexible vegetation [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2015, 141(8): A4015001.
- [12] MAZA M, LARA J L, LOSADA I J. A coupled model of submerged vegetation under oscillatory flow using Navier-Stokes equations [J]. *Coastal Engineering*, 2013, 80: 16.
- [13] HU J, MEI C C, CHANG C W, *et al.* Effect of flexible coastal vegetation on waves in water of intermediate depth [J]. *Coastal Engineering*, 2021, 168: 103937.
- [14] MARJORIBANKS T I, HARDY R J, LANE S N, *et al.* High-resolution numerical modelling of flow-vegetation interactions [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2014, 52 (6): 775.
- [15] FAMILKHALILI R, TAHVILDARI N. Computational modeling of coupled waves and vegetation stem dynamics in highly flexible submerged meadows [J]. *Advances in Water Resources*, 2022, 165: 104222.
- [16] 丁雪, 吉庆丰, 朱宇泽. 含刚性沉水植物水槽二维流场的数值模拟研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(4): 215.
- [17] 刘达, 黄本胜, 邱静, 等. 海岸破碎带植物消浪数值模拟研究 [J]. *海洋工程*, 2016, 34(2): 16.
- [18] LIU Da, HUANG Bensheng, QIU Jing, *et al.* Numerical simulation of vegetation-induced wave dissipation in the surf zone [J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(2): 16.
- [19] ORTON P M, TALKE S A, JAY D A, *et al.* Channel shallowing as mitigation of coastal flooding [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2015, 3(3): 654.
- [20] CHATELAIN M, PROUST S. Open-channel flows through emergent rigid vegetation effects of bed roughness and shallowness on the flow structure and surface waves [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(10): 106602.
- [21] SGARABOTTO A, D'ALPAOS A, LANZONI S. Effects of vegetation sediment supply and sea level rise on the morphodynamic evolution of tidal channels [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(7): e2020WR028577.
- [22] CAPONI F, VETSCH D F, SIVIGLIA A. A model study of the combined effect of above and below ground plant traits on the ecomorphodynamics of gravel bars [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 17062.
- [23] 槐文信, 朱政涛, 杨中华, 等. 基于水动力的植被消长模型及河道植被演替模拟[J]. *人民长江*, 2020, 51(1): 174.
- [24] HUAI Wenxin, ZHU Zhengtao, YANG Zhonghua, *et al.* Growth-decay model of vegetation based on hydrodynamics and simulation on vegetation succession in river [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(1): 174.
- [25] DANG Xiaofeng, HUAI Wenxin, ZHU Zhengtao. Numerical simulation of vegetation evolution in compound channels [J].

- Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(1):1595.
- [24] CARBONARI C, CALVANI G, SOLARI L. Explaining multiple patches of aquatic vegetation through linear stability analysis [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2022, 22(2): 645.
- [25] KAKEH N, COCO G, MARANI M. On the morphodynamic stability of intertidal environments and the role of vegetation [J]. Advances in Water Resources, 2016, 93: 303.
- [26] DURÁN O, MOORE L J. Vegetation controls on the maximum size of coastal dunes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(43): 17217.
- [27] XU Y, ESPOSITO C R, BURGOS M B, *et al.* Competing effects of vegetation density on sedimentation in deltaic marshes [J]. Nature Communications, 2022, 13: 4641.
- [28] KEIJERS J G S, GROOT A V, RIKSEN M J P M. Modeling the biogeomorphic evolution of coastal dunes in response to climate change [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(6): 1161.
- [29] ZHU Q G, WIBERG P L, REIDENBACH M A. Quantifying seasonal seagrass effects on flow and sediment dynamics in a back-barrier bay [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(2): e2020JC016547.
- [30] NARDIN W, LERA S, NIENHUIS J. Effect of offshore waves and vegetation on the sediment budget in the Virginia coast reserve (VA) [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(12): 3055.
- [31] DONATELLI C, KALRA T S, FAGHERAZZI S, *et al.* Dynamics of marsh-derived sediments in lagoon-type estuaries [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020, 125(12): e2020JF005751.
- [32] GOURGUE O, BELZEN J, SCHWARZ C, *et al.* Biogeomorphic modeling to assess the resilience of tidal-marsh restoration to sea level rise and sediment supply [J]. Earth Surface Dynamics, 2022, 10(3): 531.
- [33] CAI Xun, QIN Qubin, SHEN Jian, *et al.* Bifurcate responses of tidal range to sea-level rise in estuaries with marsh evolution [J]. Limnology and Oceanography Letters, 2022, 7(3): 210.
- [34] XIE D H, SCHWARZ C, KLEINHANS 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.
- [35] 王哲, 唐军. 近岸植被对台风浪传播影响的数值模拟分析 [J]. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 647.
- WANG Zhe, TANG Jun. Numerical study for typhoon wave propagation in vegetation field [J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(5): 647.
- [36] CHEN Zhipeng, LUO Feng, ZHOU Guanghuai, *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.
- [37] YIN Kai, XU Sudong, HUANG Wenrui, *et al.* Modeling beach profile changes by typhoon impacts at Xiamen coast [J]. Natural Hazards, 2019, 95(3): 783.
- [38] FAIRCHILD T P, BENNETT W G, SMITH G, *et al.* Coastal wetlands mitigate storm flooding and associated costs in estuaries [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(7): 074034.
- [39] 赵帅印, 江涓, 倪培桐. 芦苇类典型挺水植物对水流的影响模拟研究 [J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2017, 15(1): 5.
- ZHAO Shuaiyin, JIANG Wei, NI Peitong. Simulation study on the effects of the typical emerged plant bulrush on hydrodynamic characteristics [J]. Journal of Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, 2017, 15(1): 5.
- [40] KINGORA K, SADAT H. Flow and scalar transfer characteristics for a circular colony of vegetation [J]. Physics of Fluids, 2022, 34: 083606.
- [41] 李绍武, 涂伟伟, 李明哲. 基于三维浅水方程的刚性植被水流特性研究 [J]. 水道港口, 2022, 43(1): 8.
- LI Shaowu, TU Weiwei, LI Mingzhe. Study on flow characteristics of rigid vegetation based on 3D shallow water equation [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2022, 43(1): 8.
- [42] LIU Mengyang, HUAI Wenxin, JI Bin, *et al.* Numerical study on the drag characteristics of rigid submerged vegetation patches [J]. Physics of Fluids, 2021, 33(8): 085123.
- [43] LIU Mengyang, HUAI Wenxin, JI Bin. Characteristics of the flow structures through and around a submerged canopy patch [J]. Physics of Fluids, 2021, 33(3): 035144.
- [44] CHANG W Y, CONSTANTINESCU G, TSAI W F. Effect of array submergence on flow and coherent structures through and around a circular array of rigid vertical cylinders [J]. Physics of Fluids, 2020, 32(3): 035110.
- [45] 才多, 褚裕良. 基于弱非线性RIDE模型的植物消浪数值模拟研究 [J]. 海洋工程, 2014, 32(6): 41.
- CAI Duo, ZHU Yuliang. Numerical study of vegetation-induced wave damping by weakly nonlinear RIDE model [J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(6): 41.
- [46] 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.
- 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.
- [47] 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.
- [48] ROOIJEN A, LOWE R, RIJNSDORP D P, *et al.* Wave-driven mean flow dynamics in submerged canopies [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(3): e2019JC015935.
- [49] HEMAVATHI S, MANJULA R. Numerical modelling and laboratory observation for wave attenuation by coastal vegetation [J]. Indian Journal of Environmental Protection, 2020, 40(7): 735.
- [50] MAGDALENA I, ANDADARI G R, REEVE D E. An

- integrated study of wave attenuation by vegetation [J]. *Wave Motion*, 2022, 110: 102878.
- [51] VEELLEN T J, KARUNARATHNA H, REEVE D E. Modelling wave attenuation by quasi-flexible coastal vegetation [J]. *Coastal Engineering*, 2021, 164: 103820.
- [52] CHEN Haifei, ZOU Qingping. Eulerian-Lagrangian flow-vegetation interaction model using immersed boundary method and OpenFOAM [J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 126: 176.
- [53] 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.
- [54] YIN Kai, XU Sudong, GONG Shangpeng, *et al.* Effects of wave nonlinearity on submerged flexible vegetation dynamics and wave attenuation [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 241: 110103.
- [55] YIN Kai, XU Sudong, GONG Shangpeng, *et al.* Modeling wave attenuation by submerged flexible vegetation with XBeach [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111646.
- [56] 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.
- JIANG Changbo, XU Jin, DENG Bin, *et al.* Numerical investigation of wave attenuation through non-submerged rigid vegetation by a non-hydrostatic model [J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(5): 591.
- [57] ZHU L, CHEN Q J, JAFARI N, *et al.* Modeling effects of vegetation on setup and runup of random waves [C]//*Coastal Engineering Proceedings*. Baltimore: [s.n.], 2018: 1-2.
- [58] 才多, 徐凡. 基于改进的RIDE-VEG模型的随机波下植物消浪数值模拟研究[J]. *水道港口*, 2016, 37(6): 584.
- CAI Duo, XU Fan. Numerical study of vegetation-induced wave damping under random wave by improved RIDE-VEG model [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2016, 37(6): 584.
- [59] 张明亮, 赵楷宾, 孙圳, 等. 基于波能量平衡方程模拟波浪在柔性植物区的传播与变形[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(3): 467.
- ZHANG Mingliang, ZHAO Kaibin, SUN Zhen, *et al.* Wave propagation and transformation in flexible vegetated water based on the wave energy balance equation [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017, 25(3): 467.
- [60] MATTIS S A, KEES C E, WEI M V, *et al.* Computational model for wave attenuation by flexible vegetation [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2019, 145(1): 04018033.
- [61] 崔坤明, 唐军, 杨志勇. 基于Boussinesq模型的刚性植被水域波浪传播特性数值分析[J]. *水运工程*, 2017(1): 41.
- CUI Kunming, TANG Jun, YANG Zhiyong. Numerical study for wave propagation in rigid vegetation based on Boussinesq equation [J]. *Port and Waterway Engineering*, 2017(1): 41.
- [62] 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.
- [63] WANG Yanxu, YIN Zegao, LIU Yong. Numerical study of solitary wave interaction with a vegetated platform [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 192: 106561.
- [64] 蒋昌波, 熊玉章, 屈科, 等. 非淹没刚性植物对海啸作用下海堤水动力特性影响数值模拟研究[J]. *海洋工程*, 2021, 39(5): 1.
- JIANG Changbo, XIONG Yuzhang, QU Ke, *et al.* Numerical investigation on effects of emergent rigid vegetation patch on hydrodynamic characteristics of seawall under tsunami wave [J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(5): 1.
- [65] QU K, LANG Y, KRAATZ S, *et al.* Numerical study on wave attenuation of tsunami-like wave by emergent rigid vegetation [J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2021, 15(6): 2150028.
- [66] QU K, LANG Y, SUN W Y, *et al.* Numerical study on wave attenuation of extreme waves by emergent rigid vegetation patch [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109865.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] LOU Sha, CHEN Ming, MA Gangfeng, *et al.* Modelling of stem-scale turbulence and sediment suspension in vegetated flow [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2021, 59(3): 355.
- [70] 陈明, 娄厦, 刘曙光, 等. 刚性沉水植物影响下波浪传播及泥沙悬浮数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6): 861.
- CHEN Ming, LOU Sha, LIU Shuguang, *et al.* Numerical simulation of wave propagation and sediment suspension affected by submerged rigid vegetation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(6): 861.
- [71] LU Yesheng, CHENG Niansheng, WEI Maoxing. Formulation of bed shear stress for computing bed-load transport rate in vegetated flows [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(11): 115105.
- [72] 许媛媛, 张明亮, 乔洋, 等. 考虑植被作用下的二维溃坝水沙耦合数学模型[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(12): 73.
- XU Yuanyuan, ZHANG Mingliang, QIAO Yang, *et al.* Numerical simulation of dynamic interaction between flow and sediment for dam-break floods with vegetation effect [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(12): 73.
- [73] 张洪艳. 植被与人工沙坝对砂质海岸剖面演化影响的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- ZHANG Hongyan. Study on the influence of vegetation and artificial sand bar on the evolution of sandy beach profile [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.