

## 基于数值波浪模型 SWASH 的竹排消浪性能优化

宋海洋

沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110065, 辽宁, 中国

**摘要:** 红树林可保护热带海岸免受淹没与侵蚀, 从而降低全球沿海社区的洪涝风险。然而, 城镇化与水产养殖等活动使红树林大面积消失, 沿岸地区因此直接暴露于波浪作用之下。为在侵蚀岸段恢复红树林, 人们采用竹桩加枝柴填料构成的透空结构为海岸挡浪, 并营造有利于红树林定植的生境。但此类结构在风暴中往往丧失枝柴填料, 维护费用高昂。本文提出一种仅由竖向竹桩、不填枝柴的新型设计以降低维护成本。以印度尼西亚德马克 (Demak) 为例, 采用数值波浪模型 SWASH 预测结构的消浪效果, 对各设计方案进行评价; 通过分析现场实测资料与 WaveWatch III 数据确定德马克的设计工况。SWASH 先经室内试验验证, 再用以研究最优排数及其最优间距 (沿波浪传播方向)。计算表明: 对由两排竹桩构成的结构, 当沿波向排间距由  $s_x = 0.42 \text{ m}$  增至  $s_x = 5.8 \text{ m}$  时, 透射率  $E_t/E_i$  由 75% 降至 55%; 间距再增大并不能进一步减小透射, 且至少需要三排才能使透射率低于 50%——这是结构化生态修复中常用的消浪目标。本文由此识别出使竹结构消浪效果最大化的可行策略, 可在无需枝柴填料的条件下减轻淤泥质海岸所受的波浪冲击, 相比既有枝柴结构方案更经济、更便于施工与维护。此外, 本文还提出了一种在 SWASH 中高效概化此类结构的新方法。

**关键词:** SWASH; 基于自然的解决方案; 消浪; 红树林

## Optimising the Wave Attenuation of Bamboo Fences Using the Numerical Wave Model SWASH

HaiYang Song

College of Water Resources, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110065, Liaoning, China

**Abstract:** Mangroves protect tropical coastlines from flooding and erosion, reducing flood risks along coastal communities worldwide. Nevertheless, mangrove forests have experienced considerable losses due to activities like urbanization and aquaculture, exposing coastal areas to wave attack. To restore mangroves at eroding coastlines, structures formed by bamboo poles and a brushwood filling are used to shelter the coast from waves, and create a favourable habitat for mangrove colonization. However, these structures often lose their brushwood filling during storms, resulting in high maintenance costs. This study proposes a new type of design to reduce maintenance expenses, consisting of only vertical bamboo poles without a filling of brushwood. Structure designs are evaluated for a case study in Demak, Indonesia, using the numerical wave model SWASH to predict wave attenuation through the structures. Field measurements and WaveWatch III data are analyzed to obtain the design conditions for the structures in Demak.

Copyright © 2026 by author(s) and Ufascience Publisher.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution international License (CC BY 4.0)  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**文章引用:** 宋海洋. 基于数值波浪模型 SWASH 的竹排消浪性能优化[J]. 现代工程与应用, 2026, 4(4): 35-47.  
DOI: <https://doi.org/10.61784/mea2040>

SWASH is validated against laboratory experiments, and applied to investigate the optimum number of rows and their optimum spacing (in the direction of wave propagation). The model shows that for a structure consisting of two rows of bamboo poles, the transmission rate  $E_t/E_i$  decreases from 75% to 55% when the row spacing in the wave direction is increased from  $s_x = 0.42$  m to  $s_x = 5.8$  m. Larger spacings do not result in less transmission, and at least three rows are needed to have a transmission rate lower than 50% - a common wave reduction target used in restoration efforts with structures. This study thus identifies potential strategies to maximize wave attenuation by bamboo structures, which can be used to reduce wave attack along muddy coasts without the need of a brushwood filling. Hereby, it provides an economically and user friendly alternative with respect to the previous brushwood structure designs, as it requires less material costs and maintenance. In addition, this study presents a new method to schematize these kind of structures in SWASH in an efficient way.

**Keywords:** SWASH; Nature based solutions; Wave attenuation; Mangroves

## 一、引言

红树林是潮间带生态系统,通常分布于南北纬  $5^\circ$  之间的热带地区,天然生长于海岸与三角洲[1]。红树林提供海岸防护、食物与木材供给等多种生态系统服务[2],对沿海社区而言是极为宝贵的环境资源。

红树林的海岸防护功能源于其消减波浪的能力以及在根系间捕集泥沙的作用[3-6]。因此,红树林能够减轻海岸侵蚀并保护腹地免遭淹没。然而,20 世纪以来世界上不少国家把红树林区改造成了鱼塘。红树林被清除后,其提供的天然防护随之丧失,海岸暴露于更强的波浪作用与侵蚀之中。

近几十年来,红树林生态系统的修复在东南亚许多国家日益受到重视[7-9]。本文关注印度尼西亚北爪哇的德马克海岸,该地大片红树林已被砍伐并改为稻田与养殖塘。邻近的三宝壟市大量抽取地下水,还造成该地区地面沉降速率高达  $16\text{ cm/a}$ 。水位上升叠加红树林丧失所致的波浪暴露加剧,使岸线后退速率达到每年数百米[8]。

在遭受波浪作用与侵蚀的海岸,红树林难以定植,因为红树幼苗需要水动力条件较弱的“机会窗口”才能着床并存活。为减小德马克的波浪作用、减轻侵蚀,2014—2020 年间在距岸约 100 m 的浅水中修建了由竹桩加枝柴填料构成的透空结构。这些结构旨在产生足够的消浪效果以遏制岸线后退,并形成可供红树林定植的淤积区。

在项目实施过程中,由于填料在波浪作用下极易破损,结构需要频繁维护。为降低维护成本,后续项目 (MuMaCo) 实施了新的设计方案,即由一排或多排竖向竹桩构成、不填枝柴。该结构于 2021 年在中试研究中建成,竹桩直径  $D = 0.12 \sim 0.15$  m,横向(垂直波向)间距  $s_y = 0.18$  m,沿波向桩排间距  $s_x = 4.5$  m。不过,这些中试方案是依据工程经验判断确定的,因为当时尚缺乏针对圆柱体构成的各向异性结构的设计工具。

此类结构的设计要求可分为以下几个阶段:

1. 结构首先须消减波浪,营造可使泥沙落淤的掩护环境。结构后方的淤积量取决于其产生的消浪效果与当地的地貌动力条件。随着时间推移,幼苗可在新生陆地上定植。

2. 后方水域应能为漂移的幼苗所抵达,即已有岸线应与新淤成的陆地直接连通。

3. 设计方案应防止已着床的幼苗被侵蚀或波浪作用拔起。

4. 设计方案应能持续防止侵蚀,这要求方案能适应不断变化的地貌动力条件。

5. 结构后方形成的水域应排水通畅,以保证落淤泥沙随时间固结增强。

本文聚焦第一项要求,即建立预测竹桩(不含枝柴)构成的各向异性结构消浪效果的工具。红树林修复文献中的已有研究主要考察枝柴结构的水动力性能。例如,越南的一次现场观测活动监测了波浪通过结构后的变形,这些结构成功地在近岸形成了淤积区。Mai Van 等对枝柴结构 1:1 模型的观测得到了与文献相近的结果:

2016 年在越南湄公河三角洲海岸, 10 个月内淤积 30~60 cm。

为理解挺水植被对波浪与水流的影响, 人们对均匀圆柱体群中的水流也开展了充分研究。Dalrymple 等建立了预测波浪穿过均匀高透水植被区的透射模型, 其假定圆柱体引起的波浪反射可忽略, 且对局部流速场影响甚微。然而, 本文所考虑结构的竹桩虽为圆柱形, 却很可能不满足文献的假定, 因为竹桩的横向间距极小。

试验研究表明, 当圆柱排的横向间距小于  $s_y = 1.5D$  ( $D$  为竹桩直径) 时, 水流被压缩成射流, 并产生反射, 从而显著影响周围流场。值得注意的是, 德马克既有结构的横向间距更小, 最小仅为桩径的 1.25 倍 ( $D = 0.15$  m)。

近十年来, 波浪穿越植被与海岸结构的数值模拟日益受到关注, 许多水动力模型已得到改进并扩展了植被模块。Mendez 和 Losada 以及 Dalrymple 等的理论被广泛用于在各类数值模型中实现植被作用, 其中文献是文献的推广, 把不规则波纳入 SWAN 等相位平均波浪模型; 而在 XBeach、SWASH 等更完备的相位解析模型中, 植被引起的能量耗散则基于 Morison 方程。

数值模型 SWASH 已成功用于模拟波浪穿越植被区以及近岸海岸结构的传播过程, 并已用室内试验数据加以验证。枝柴结构在 SWASH 中的模拟见文献。不过, 以往研究关注的是均匀圆柱排列以及规则波或缓和波况下填充枝柴的结构。与之不同, 本文的竹排既不均匀, 也不填充枝柴, 而且还要承受其寿命期 (2~5 年) 内可能出现的风暴工况。

因此, 本研究考察如何用 SWASH 的植被模块模拟由 (多) 排竹桩构成的结构, 并针对若干可能的竹结构布置形式研究其在风暴工况下的性能。模型性能用 Jansen 的室内实测资料加以验证, 并用于量化消浪效果、识别使竹结构消浪最大化的策略。本研究由此为竹结构在红树林修复中的高效应用迈出了有价值的一步。

本文第一部分为选题引入; 第二部分为方法, 介绍 SWASH 模型、验证算例与设计方案; 第三部分给出不同设计方案的计算结果; 第四部分讨论这些结果对地貌演变意义; 第五部分给出结论。

## 二、方法

### (一) 结构设计条件

德马克海岸位于印度尼西亚北爪哇, 南界为三宝垄市 ( $6^{\circ} 94' 00.44''$  S,  $110^{\circ} 42' 37.76''$  E), 北界为乌兰 (Wulan) 河三角洲 ( $6^{\circ} 75' 81.34''$  S,  $110^{\circ} 54' 90.44''$  E)。当地波候以两个季风期为特征。西北季风期 (11 月至次年 2 月) 曾观测到外海有效波高  $H_{m0} = 2$  m、有效波周期  $T_s = 6$  s; 东南季风期 (3—10 月) 则以缓和波况为主,  $H_{m0} = 0.3$  m,  $T_s = 3$  s。德马克的潮汐为混合潮, 以全日潮为主, 形态数为 1.72, 大潮潮差 85 cm, 小潮潮差 50 cm。

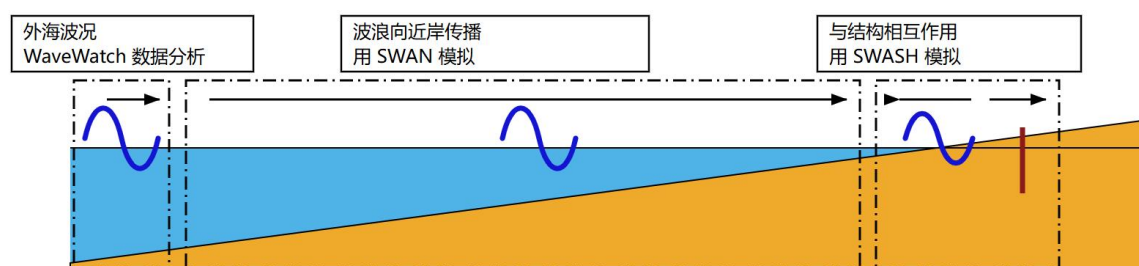


Figure 1 Overview of Used Models, Near the Structures the Waves Are Modelled with SWASH

图 1 所用模型总览: 结构附近的波浪用 SWASH 模拟。

西北季风期的风暴是德马克泥沙向岸输移的主要动力,但风暴同时也造成海岸侵蚀。多数考察红树林修复结构性能的研究只报道缓和波况,或所提供的波浪资料序列过短,无法推求重现期超过一年的设计工况。本文采用跨度 12.5 年的 WaveWatch III 数据集,以广义帕累托分布确定当地外海设计波况,再用 SWAN 模型把重现期 1 年与 5 年的设计工况推算至近岸。需要说明的是,外海波况分析与 SWAN 模拟不属本文内容,详见文献。在更靠近岸线处,则用 SWASH 模拟波浪穿越结构的传播过程,见图 1。

结构的消浪目标取自 Albers 等的监测研究。该研究考察的刚性枝柴结构在 7 个月内造成 17 cm 淤积。取得上述淤积速率时,结构淹没(高水位)状态下透射系数  $K_t = 0.7 \sim 0.8$ ,出水(低水位)状态下  $K_t = 0.5 \sim 0.6$ ;此处透射率定义为  $K_t = H_t/H_i$ ,  $H_t$  与  $H_i$  分别为透射波高与入射波高。换算成能量,则淹没状态对应  $E_t/E_i = 50\% \sim 64\%$ ,出水状态对应  $25\% \sim 36\%$ 。Mai Van 等对枝柴结构 1:1 模型的观测得到与文献相近的结果:2016 年在越南湄公河三角洲海岸,10 个月内淤积 30~60 cm。取得这些淤积速率的结构,淹没状态透射率  $K_t = 0.7 \sim 0.9$ ,出水状态  $K_t = 0.55 \sim 0.7$ ,换算成能量分别为  $E_t/E_i = 50\% \sim 80\%$  与  $30\% \sim 50\%$ 。

## (二) SWASH 模型

SWASH 是可在一维、二维或三维条件下模拟非静压、自由表面、有旋及输移流动现象的数值模型(SWASH 用户手册)。本文以二维剖面模式、分多层使用该模型。相应的控制方程为连续方程(式(1))以及沿岸向(式(2))与竖向(式(3))的非静压浅水方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\zeta} u \, dz = 0 \quad (1)$$

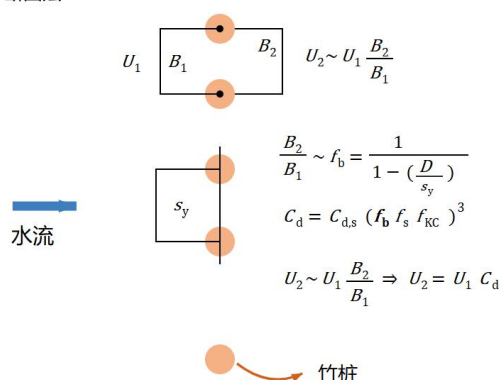
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial q}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} F_z \quad (3)$$

式中,  $\zeta$  为水面高程 [m];  $h$  为水深 [m];  $t$  为时间 [s];  $z$  为竖向位置 [m];  $u$  为  $x$  (岸法向) 方向流速 [m/s];  $w$  为  $z$  (竖直) 方向流速 [m/s];  $x$  为水平面上的位置 [m];  $g$  为重力加速度 [ $\text{m/s}^2$ ];  $q$  为非静压压强;  $F_x$ 、 $F_z$  分别为  $x$ 、 $z$  方向的体积力与表面力 [N]。

竹结构在 SWASH 中借助植被模块实现,竹桩与室内试验中的金属圆柱均概化为刚性植物茎秆。植被模块需要输入以下参数:单位面积茎秆(圆柱)数  $N_{\text{stems}}$ 、圆柱直径  $D$  [m]、拖曳系数  $C_d$  [-] 以及圆柱高度  $h_v$  [m]。圆柱假定在植被斑块内均匀分布。SWASH 计算的是水流通过均匀圆柱体积时的体积加速(图 2b),并不分辨单个圆柱,也不分辨桩间断面上的流速加速(图 2a)或桩后尾流,后者通过拖曳系数加以体现。该处理方式使结构(植被)可在假定横向均匀的二维剖面模式(仅  $x$  与  $z$ )中描述。

a) 断面法



b) 体积法

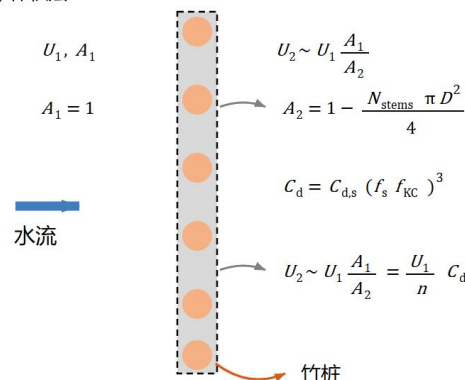


Figure 2 Top View of the Mass Conservation Schematizations

图2 质量守恒概化方式俯视图。a) 断面法的特征是圆柱之间过流断面缩窄 (B2/B1)，以阻塞因子表示，见式 (11); b) 体积法的特征是圆柱之间流体体积 (或水位恒定时的底面积 A2/A1) 减小，以孔隙率 n 表示。

对于竖向圆柱，只把水平力分量  $F_x$  引入非静压浅水方程，其前提是圆柱所受水平荷载远大于水平表面摩阻力。 $F_x$  由 Morison 方程给出：

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_d D u |u| + \rho C_M A \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

式中， $\rho$  为水的密度 [ $\text{kg/m}^3$ ];  $C_d$  为拖曳系数 [-];  $D$  为圆柱直径 [m];  $C_M = C_m + 1$  [-] 为惯性系数;  $C_m$  为附加质量系数 [-];  $A$  为圆柱横截面积 ( $\pi D^2/4$ ) [ $\text{m}^2$ ];  $\partial u / \partial t$  为水流加速度 [ $\text{m/s}^2$ ]。

竹桩对周围流场 (进而对拖曳力分量) 的影响常用整体拖曳系数  $C_{d,b}$  [-] 参数化，即：

$$F_{x,\text{drag}} = \frac{1}{2} C_{d,b} D u_\infty |u_\infty| \rho_w \quad (5)$$

式中， $u_\infty$  [m/s] 为结构上游未受扰动的流速，故流速穿过竹桩时的变化已计入  $C_{d,b}$ 。本文的整体拖曳系数按 Gijon Mancheno 等的经验表达式计算，即把  $C_{d,b}$  表示为单圆柱拖曳系数  $C_{d,s}$  与一个特征流速因子之积：

$$C_{d,b} = C_{d,s} \left( \frac{u_c}{u_\infty} \right)^3 \quad (6)$$

特征流速  $u_c$  反映流速穿过圆柱群时的变化，由三个经验系数给出：

$$u_c = u_\infty f_{KC} f_s f_b \quad (7)$$

式中， $f_b$ 、 $f_s$  与  $f_{KC}$  分别为考虑阻塞、遮蔽以及由  $KC$  数表征的流态的因子。 $KC$  数定义为：

$$KC = \frac{u_\infty T}{D} \quad (8)$$

式中  $T$  为波周期 [s]。因子  $f_{KC}$  表示惯性主导与拖曳主导之间的过渡区，按下式计算：

$$f_{KC} = 0.012 KC + 0.44 \quad (9)$$

上游圆柱尾流造成的遮蔽按下式计算：

$$f_s = 1 - \frac{c_s}{\frac{5x}{D}} \quad (10)$$

式中， $c_s$  为与紊动强度有关的经验系数， $s_x$  为沿流向相邻两圆柱的中心距。Gijon Mancheno 等将模型拟合于圆柱阵列内部的受力实测资料，得到  $c_s = 0.796$ 。

水流通过圆柱断面时因收缩而加速 (即阻塞)，依据结构断面上的质量守恒建模，可得：

$$f_b = \frac{1}{1 - \frac{D}{s_y}} \quad (11)$$

式中， $s_y$  为垂直流向相邻两圆柱的中心距 [m]。阻塞因子  $f_b$  由 Etminan 等与 van Rooijen 等提出，他们发现圆柱之间的水流收缩对拖曳力的影响，用过流断面的缩减来表示要优于用圆柱区内的体积缩减来表示。

体积法在 SWASH 的动量方程中实现，可在模拟中启用或停用。采用该法时，结构的体积孔隙率定义为  $n = A_c/A = 1 - N_{\text{stems}} \cdot 0.25 \pi D^2$  (见图 2b)，浅水方程中每一个流速项均除以  $n$ 。于是，启用孔隙率模块后， $u$  方向动量方程 (式 (2)) 变为：

$$\left(1 + C_m(1 - n)\right) \frac{\partial u}{\partial t} + n \frac{\partial \left(\frac{u}{n}\right)^2}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} + n \left(g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x}\right) + \frac{1}{2} C_D \frac{h_v}{h} N_{\text{stems}} \frac{u}{n} \left| \frac{u}{n} \right| D = 0 \quad (12)$$

式中， $u$  [m/s] 为 SWASH 中各层的流速；作用于圆柱的拖曳力含一个淹没因子，取决于该层内圆柱淹没高度  $h_v$  [m] 与层厚  $h$  [m] 之比、单位面积圆柱密度  $N_{\text{stems}}$  [根/ $\text{m}^2$ ] 以及桩径  $D$  [m]。相应的拖曳系数按式 (7) 确定。

采用体积法时，阻塞因子  $fb$  取 1，因为水流加速效应已由孔隙率体现。此时式 (12) 中的拖曳力项变为：

$$\frac{1}{2}C_{d,s}(f_s f_{KC})^3 \frac{h_v}{h} N_{stems} \frac{u}{n} \left| \frac{u}{n} \right| b_v \tag{13}$$

其中与原式不同之处以粗体标出。

第二种方案是断面法（见图 2a）。此时动量方程中不含孔隙率，而是沿用原方程（式 (1)~(3)），阻塞效应通过式 (7) 中的阻塞因子  $fb$  计入拖曳力项，得：

$$\frac{1}{2}C_{d,s}(f_s f_b f_{KC})^3 \frac{h_v}{h} N_{stems} u |u| b_v \tag{14}$$

（三）验证算例

为验证 SWASH，把模型性能与 Jansen 的试验加以对比。该试验在代尔夫特理工大学波浪水槽中量测了不同圆柱阵列对规则波的削减。本文选取两种结构布置：垂直于波向的单排圆柱（称“单排”）以及由若干排圆柱构成的布置（称“纵向布置”）。波况共 6 组，波高恒为  $H = 0.13\text{ m}$ ，波周期  $T$  在  $1\sim 3\text{ s}$  间变化，见表 1。桩体始终出水，静水深  $55\text{ cm}$ ，单个圆柱直径  $4\text{ cm}$ 。

所有波况均采用网格步长  $dx = 3\text{ cm}$  的二维竖向( $x$  与  $z$ )网格，对最短波可提供 50 个数据点，与 SWASH 所要求的最少点数相当（见 SWASH 手册）。竖向层数取决于波数，对较短、较陡的波需要更多层数才能稳定计算（SWASH 手册）。因此，短波采用 3 个等厚层，周期长于  $T = 1.25\text{ s}$  的波采用 2 层。

Table 1 Wave Conditions Used in Experiments by Jansen

表 1 Jansen 试验所用的波况。

| T    | H    | d    | L    | k     | c     | n    | cg    | kd   | NUr   | KC    |
|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| [s]  | [m]  | [m]  | [m]  | [1/m] | [m/s] | [-]  | [m/s] | [-]  | [-]   | [-]   |
| 1    | 0.13 | 0.55 | 1.53 | 4.11  | 1.53  | 0.55 | 0.84  | 2.26 | 1.82  | 10.43 |
| 1.25 | 0.13 | 0.55 | 2.23 | 2.82  | 1.78  | 0.64 | 1.14  | 1.55 | 3.89  | 11.17 |
| 1.5  | 0.13 | 0.55 | 2.92 | 2.15  | 1.94  | 0.72 | 1.40  | 1.18 | 6.66  | 12.32 |
| 1.75 | 0.13 | 0.55 | 3.57 | 1.76  | 2.04  | 0.79 | 1.60  | 0.97 | 9.96  | 13.65 |
| 2    | 0.13 | 0.55 | 4.22 | 1.49  | 2.11  | 0.83 | 1.75  | 0.82 | 13.91 | 15.13 |
| 3    | 0.13 | 0.55 | 6.68 | 0.94  | 2.23  | 0.92 | 2.05  | 0.52 | 34.87 | 21.46 |

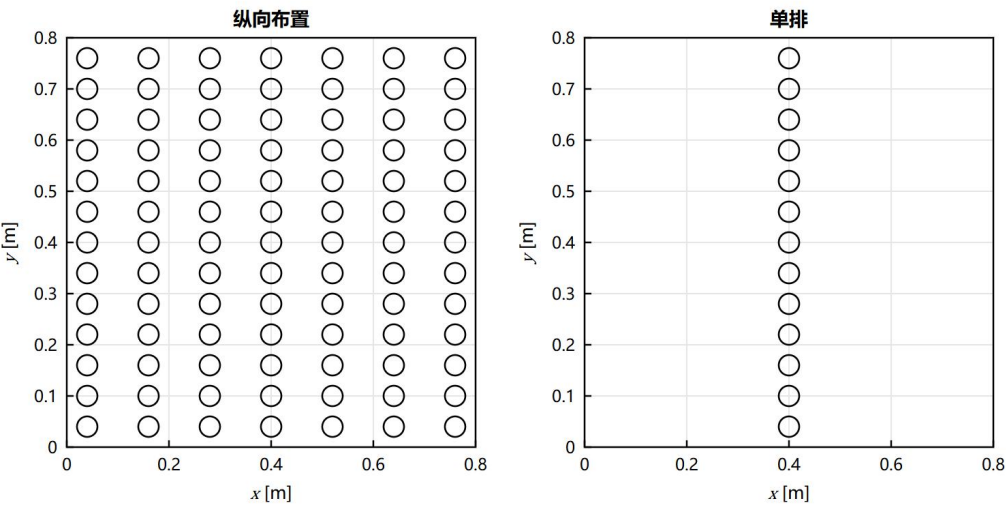


Figure 3 Top View of the Structure Configurations of Jansen, Which Can Also Be Found in Gijon Mancheno Et Al

图 3 Jansen 试验的结构布置俯视图（亦见 Gijon Mancheno 等的文献）。波浪穿越这些结构的消浪实测用

于检验 SWASH 对 a) 多排圆柱结构与 b) 单排圆柱的模拟性能。

在 SWASH 中概化 Jansen 所用布置时的重要选择包括：桩体均匀布置的假定、拖曳系数的计算方法、圆柱密度  $N_{\text{stems}}$  以及式 (2) 中质量守恒的描述方式。本文对上述各环节分别分析了若干备选方案。就拖曳系数而言，把采用 Gijon Mancheno 等所定义整体拖曳系数（式 (6)）的模拟结果，与采用单圆柱拖曳系数的模拟结果相比较；对试验所涉  $KC$  范围，单圆柱拖曳系数取  $C_{d,s} = 2$ 。就（竹）桩密度而言，比较两种做法：其一以结构覆盖（海床）面积上的平均值定义桩数，其二逐排定义结构（见图 4）。就质量守恒而言，比较断面法与体积法（图 2）。最后还研究了绕开均匀布置假定的可能性，因为这有助于设计非均匀结构。表 2-4 汇总了验证研究所用的全部算例。第 7 与第 8 号算例的排宽和密度相同，但底层网格不同。

**Table 2** Drag Coefficient for the Longitudinal Configuration for the Two Different Mass Conservation Methods

**表 2** 纵向布置在两种质量守恒方法（体积法与断面法）下的拖曳系数。

| T [s]                                     | 1    | 1.25 | 1.5  | 1.75 | 2    | 3    |
|-------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 体积法 $C_{d,b} = C_{d,s}(f_s f_{KC})^3$     | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.17 |
| 断面法 $C_{d,b} = C_{d,s}(f_b f_s f_{KC})^3$ | 3.87 | 4.05 | 4.35 | 4.71 | 5.14 | 7.27 |

**Table 3** Drag Coefficient for the Single Row Configuration for the Two Different Mass Conservation Methods

**表 3** 单排布置在两种质量守恒方法（体积法与断面法）下的拖曳系数。

| T [s]                                 | 1    | 1.25 | 1.5   | 1.75  | 2     | 3     |
|---------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 体积法 $C_{d,b} = C_{d,s}(f_{KC})^3$     | 0.35 | 0.37 | 0.41  | 0.43  | 0.43  | 0.43  |
| 断面法 $C_{d,b} = C_{d,s}(f_b f_{KC})^3$ | 9.48 | 10.0 | 11.59 | 11.66 | 11.66 | 11.66 |

注：T = 2 s 与 3 s 的拖曳系数已作封顶处理，否则数值将高得不合实际。

**Table 4** Overview of the Numerical Experiments for the Validation Study

**表 4** 验证研究的数值试验一览。

| 算例 | 布置形式 | 质量守恒方法 | 整块或逐排 | dx   | 特殊之处                     | Nstems |
|----|------|--------|-------|------|--------------------------|--------|
| 1  | 单排   | 体积法    | —     | 3 cm | —                        | 278    |
| 2  | 单排   | 断面法    | —     | 3 cm | —                        | 278    |
| 3  | 纵向布置 | 体积法    | 逐排    | 3 cm | —                        | 278    |
| 4  | 纵向布置 | 断面法    | 逐排    | 3 cm | —                        | 278    |
| 5  | 纵向布置 | 断面法    | 整块    | 3 cm | —                        | 154    |
| 6  | 纵向布置 | 断面法    | 整块    | 3 cm | 以 $C_{d,s}$ 代替 $C_{d,b}$ | 154    |
| 7  | 纵向布置 | 断面法    | 逐排    | 2 cm | —                        | 287    |
| 8  | 单排   | 体积法    | —     | 2 cm | —                        | 287    |

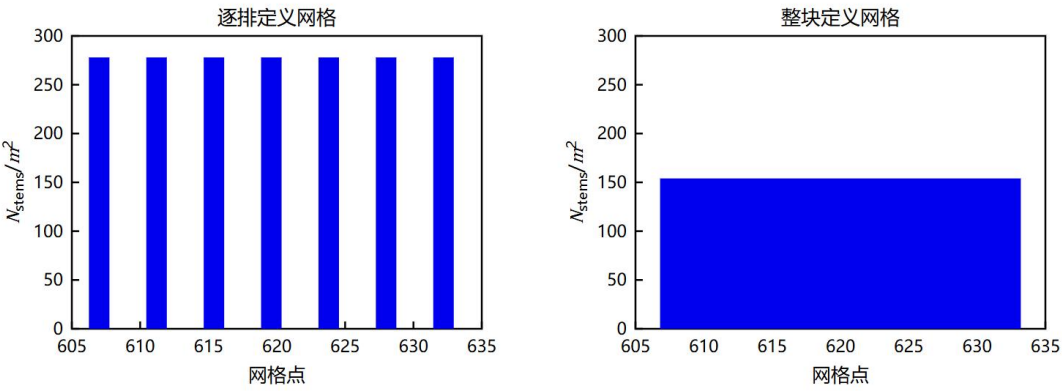


Figure 4 Sideview of the Implementation of the Poles in SWASH

图 4 SWASH 中桩体实现方式的侧视图。左) 逐排定义的网格; 右) 桩体作为一个整块而非若干分块(排) 均匀分布于该区域。两种方案的桩体总数相同。

在模拟室内试验工况时，SWASH 输出水位文件，用代尔夫特理工大学水力试验室的脚本按 Goda 和 Suzuki 的方法处理，以分离入射波高、反射波高与透射波高。再借助能量平衡（式 (15)）即可确定波能耗散：

$$E_i = E_t + E_d + E_r \tag{15}$$

式中， $E_i$  为入射波能， $E_t$  为透射波能， $E_d$  为耗散波能， $E_r$  为反射波能。

（四）设计工况设置

外海波浪在 SWASH 中通过弱反射边界条件给出，按 Fenton 理论生成含 10 个高阶谐波的非线性波，以准确描述波形。计算采用网格步长  $dx = 5\text{ cm}$  的二维（ $z$  与  $x$ ）布置，时间步长由 CFL 条件确定，库朗数上下限分别取 0.5 与 0.2。需要说明的是，设计阶段所用网格步长大于验证阶段，因为所考虑的波周期更长（见表 5）。对设计波采用竖向两层，以更好地反映流速剖面，因为对这类波而言，沿水深平均的流速会高估实际流速。

为涵盖现场可能出现的波况范围，共模拟三组波况，均为规则波。第一组描述德马克全年大部分时间存在的日常波况，依据 Tas 等的实测资料确定。第二组取重现期 1 年的波况，作为研究结构透射目标的代表性工况。第三组为最极端波况，取重现期 5 年，因为结构寿命约为 2~5 年；其  $H_{\max}$  按 Battjes 和 Groenendijk 的方法确定，取  $H_{\max} = H_{0.1\%}$ 。

Table 5 Nearshore Design Wave Conditions and Parameters at Depths Varying between 0.8 and 1.9 M

表 5 水深 0.8~1.9 m 处的近岸设计波况与参数。

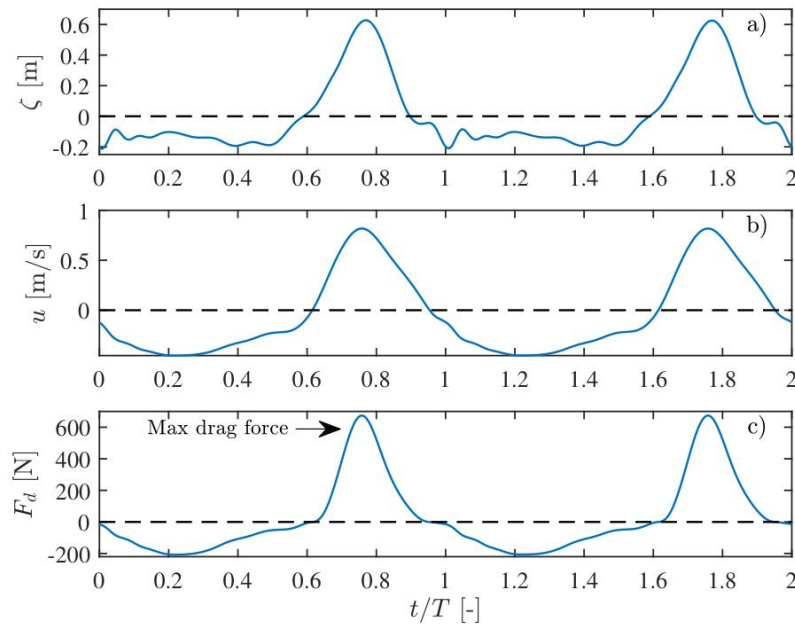
| 工况   | R   | H                 | $T_p$ | 增水   | 潮位    | d    | L   | NUr  | KC   | Re                 |
|------|-----|-------------------|-------|------|-------|------|-----|------|------|--------------------|
|      | [a] | [m]               | [s]   | [m]  | [m]   | [m]  | [m] | [-]  | [-]  | [-]                |
| 日常   | —   | $H_{m0} = 0.25$   | 3     | 0    | 0     | 0.8  | 7.9 | 30.5 | 10.0 | $4.90 \times 10^4$ |
| 透射目标 | 1   | $H_{m0} = 0.80$   | 6.88  | 0.63 | 0.35  | 1.78 | 29  | 111  | 47.3 | $1.01 \times 10^5$ |
| 极端   | 5   | $H_{\max} = 1.32$ | 7.47  | 0.68 | 0.425 | 1.91 | 32  | 189  | 81.7 | $1.61 \times 10^5$ |

注：KC 与 Re 按线性波理论求得的规则波最大轨道流速确定。

由于波浪呈非线性，本文采用 Dekkers 的方法处理 SWASH 的输出结果以求得现场结构引起的透射率。该方法是 Hughes 方法的推广，最早见于 Guza 和 Thornton。需要注意，室内试验模拟与现场设计模拟采用了不

同的处理方法，因为现场工况的非线性强得多（见表 5），Goda 和 Suzuki 的方法无法对其准确处理。

拖曳力按 Morison 方程（式 (4)）在设计方案第一排桩的位置计算，因该处受力最大。以规则波作用下一个波周期内的最大拖曳力表征各设计工况。对出水方案（日常波况与  $R=1$  年）在静水线处计算拖曳力，对淹没方案则在桩顶处（ $d=1.78\text{ m}$ ）计算。由于结构位于浅水，假定水流沿垂线均匀，故将拖曳力与水深相乘。



**Figure 5** Drag Force Calculation for a Design Condition with a Return Period of 1 Year and Structure with Three Rows, with a Row to Row Distance of  $S_x = 5.8\text{ M}$

**图 5** 重现期 1 年设计工况、三排结构（排间距  $s_x = 5.8\text{ m}$ ）的拖曳力计算。a) 相对静水深的水面高程；b) 静水深处的流速；c) 拖曳力。以最大拖曳力作为特征值。

本文考虑三类设计：单排、双排与多排，见图 6。单排由一排竹桩构成，可用以研究波浪与无遮蔽结构的相互作用，竹桩横向间距取  $s_y = 1.5D = 0.21\text{ m}$ 。

双排设计由两排竹桩构成，排间距  $s_x$  可变。该设计可用以研究排间距对波浪穿越结构的影响，以及两排桩之间能否形成共振型式而产生额外耗散。多排设计由两至七排竹桩构成，可用以研究排间距固定时排数对波浪透射的影响。

**Table 6** General Parameters of the Designs

**表 6** 各设计方案的总体参数。

| 设计方案 | D    | $s_x$    | $s_y$ | n      | 桩高   | Nstems          |
|------|------|----------|-------|--------|------|-----------------|
| 单位   | m    | —        | —     | —      | m    | 根/ $\text{m}^2$ |
| 单排   | 0.14 | —        | 1.5 D | 44.5 % | 1.78 | 25              |
| 双排   | 0.14 | 3 D 至 L1 | 1.5 D | 44.5 % | 1.78 | 25              |
| 多排   | 0.14 | L/5      | 1.5 D | 44.5 % | 1.78 | 25              |

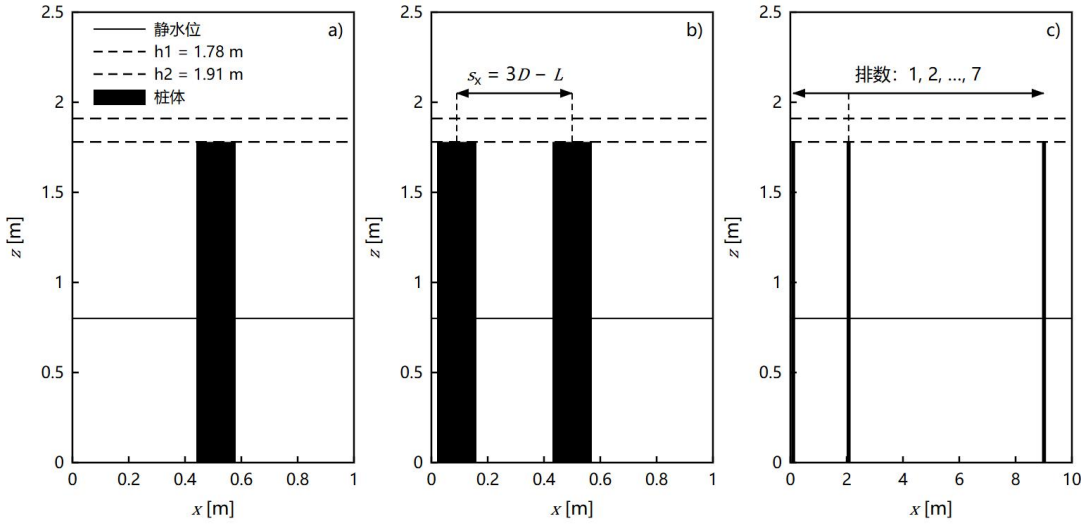


Figure 6 From Left to Right the Sideviews of the Single Row, Double Row and Extended Row Designs

图 6 自左至右依次为单排、双排与多排设计的侧视图。sx 定义为桩体中心线之间的距离。

三、结果

(一) SWASH 波浪变形验证

为在 SWASH 植被模块中实现 Jansen 所研究的布置，本文考察四个参数：（竹）桩数、拖曳系数、质量守恒的描述方式以及圆柱均匀布置的假定。

把采用 Gijon Mancheno 等整体拖曳系数所得的模拟结果与采用单圆柱拖曳系数所得结果相互比较。采用整体拖曳系数  $C_{d,b}$  与实测吻合更好。

可以看出，透射实测与体积法吻合更好，而反射与两种方法均吻合良好。就耗散率而言，断面法给出的数值偏高，而体积法给出的耗散率总体偏低，并在  $T = 2\text{ s}$  处出现极小值。纵向布置的 SWASH 模拟结果可以看出，此时断面法对透射与耗散率吻合良好，而体积法产生的耗散不足，与实测吻合较差；两种方法对反射率的再现均较为合理。

上述结果中与实测总体吻合最好的是断面法，故用其在 SWASH 中实现多排设计。与单排布置所见相反，纵向布置下另一种质量守恒方法反而给出更好的结果。这说明并不存在一种适用于全部工况的简明方法。

(二) 设计方案评价

在 SWASH 中模拟的第一个设计是单排。该布置采用体积法描述质量守恒，相应的拖曳系数见表 3。需要注意，日常波况的拖曳系数略大于更极端工况，因为  $KC = 10$  时  $C_{d,s} = 2$ ，而  $R = 1$  年与 5 年时  $C_{d,s} = 1.4$ ——对这些波况（ $KC$  分别为 47.3 与 81.7），单圆柱拖曳系数  $C_{d,s}$  不再受  $KC$  状态影响，而是渐近于该值。据此，日常工况、重现期 1 年与 5 年工况的  $C_{d,b}$  分别为 0.35、0.31 与 0.31。

三组波况（日常工况以及重现期 1 年与 5 年的风暴工况）的计算结果见表 7。可以看出，各透射率均超过 82%，未能达到 50% 的目标透射率。因此需要更强的耗散，才能得到可引起足够淤积的设计。

Table 7 Results Single Row Design, with from Left to Right: Transmission, Reflection, Dissipation and Drag Forces

表 7 单排设计的计算结果，自左至右依次为：透射、反射、耗散与拖曳力。

| 波况      | Et/Ei | Er/Ei | Ed/Ei | Fd [N] |
|---------|-------|-------|-------|--------|
| 日常      | 0.82  | 0.028 | 0.15  | 3.7    |
| R = 1 年 | 0.85  | 0.014 | 0.1   | 30     |
| R = 5 年 | 0.93  | 0.01  | 0.06  | 72.6   |

注：各透射率均高于所要求的 50%。

接着，仅在入射波条件下改变沿波向的排间距，考察两排竹桩的效果；透射率随排间距增大而升高，直至  $s_x = L/5$ ，此后各波况的结果均稳定在 55% 上下。越过该点后，在  $s_x = (0.5 \sim 1)L$  处出现若干离群点，其透射率更高而受力显著更低。此外，日常波况的透射率在  $s_x = L/2 = 7.9 \text{ m}$  之前也出现上升，该距离与较大波况出现同类离群点的位置（ $s_x = L/2$  与  $L/5/2$ ）相对应。该设计的反射率很低，始终不超过 6%。

借助对离群点作进一步分析。给出有效波高  $H_{m0}$  随岸法向距离  $x$  的变化，共三种布置，均为两排，排间距分别取  $s_x = L/5$ 、 $L/2$  与  $L$ 。第一排位于  $x = 320 \text{ m}$ ，清晰可辨；第二排在第一种布置（ $s_x = L/5$ ）中位于  $x = 326 \text{ m}$ ，第二种（ $s_x = L/2$ ）位于  $x = 335 \text{ m}$ ，第三种（ $s_x = L$ ）位于  $x = 350 \text{ m}$ 。可以看出， $s_x = L/2$  与  $L$  时  $x = 320 \text{ m}$  处的波高比  $s_x = L/5$  时高 5 cm。按理论，该位置对应于自第二排向海侧（左侧）距离  $L/2$  处的波腹，故  $s_x = L/5$  时不出现，而另两种布置中出现，图中清晰可见。本应出现在  $x = L/4$  或  $3L/4$  处的波节则因高阶谐波的存在而不甚明显。由于第一排处存在波腹，作用于结构的水平流速也随之减小，使波能耗散降低、穿越结构的透射增大。同时，由于拖曳力按 Morison 方程计算而其中用到水平流速（见式 (4)），在这些特定排间距下拖曳力也较小。

多排桩对波能耗散的影响用多排设计加以研究。为此，排间距取恒定值  $s_x = 5.8 \text{ m} = L/5$ ，这是间距再增大也不会带来更多耗散的最优间距。至少需要三排才能达到 50% 的透射目标。此外还可看出，随着排数增加，再增设一排的效果逐渐减弱，这与 Dalrymple 关于波高渐近衰减的理论相符。另外，拖曳力保持稳定，说明内部波浪反射并未使受力增大。

四、讨论

（一）结构后方淤积的不确定性

本文考察了旨在减轻侵蚀的结构对波浪传播的影响。为说明各设计方案对泥沙输移可能产生的作用，针对上一部分模拟的三组波况，估算了双排设计前、后的床面剪应力。波致剪应力按下式计算：

$$f_w = \exp \left\{ -6 + 5.2 \left[ \frac{u_w}{2.5 d_{n50} \frac{2\pi}{T_s}} \right]^{-0.19} \right\} \tag{16}$$

$$\tau = \frac{1}{2} \rho_w f_w |u_w| u_w \tag{17}$$

计算剪应力所用参数为  $d_{n50} = 7 \times 10^{-6} \text{ m}$ 、 $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$ ，并取波峰下的（最大）底部流速。

从绝对剪应力看，结构可使剪应力降低，但由于  $\tau > \tau_c = 0.017 \text{ N/m}^2$ （ $\tau_c = 0.017 \text{ N/m}^2$  为德马克的侵蚀临界剪应力），预计不会发生淤积。不过，在这类强风暴事件中完全阻止侵蚀未必必要，只要全年净淤积足以支持红树林定植即可（前提是红树林能在较平静时期长出足够长的根系）。另一方面，从相对剪应力看，结构的存在使剪应力降低 60% 以上，这有可能带来淤积。但该结论仍须由第一部分所述中试研究的实测资料加以验证。

Albers 等的观测活动虽给出了与淤积相关联的消浪率，但其时段仅 7~8 个月，所考察结构的长期效果尚不清楚。Deltares 在德马克开展的 4 年监测研究表明，枝柴结构在第一个西北季风季后平均造成 0.3 m 淤积，

此后淤积几乎可以忽略。然而该区域地面沉降严重，而当地沉降速率未作量化，因此难以就结构对床面高程的净影响得出结论。结构后方水深减小会进一步削减波能，形成有利于淤积的条件；但由于泥沙主要由涨潮流带入，而涨潮流可能被结构偏转，泥沙未必能到达后方水域[8]。

在圭亚那淤泥质海岸识别出的一种重要泥沙输移方式是波致浮泥流动，据推测德马克也存在这一过程，并可能被透空结构阻断。对 2014—2020 年间在德马克建成的结构，其解决办法是在各结构之间留出缺口，使含沙水流得以进入后方水域。这些开口同时也便于后方水域排水，使新落淤泥沙干燥固结。本文提出的设计更为通透，可能无需留设此类缺口，但其与浮泥流动所致泥沙输移的相互作用仍不确定。

## （二）整体拖曳系数参数化的局限

用于确定  $C_{d,b}$  的 Gijon Mancheno 等的模型含有一个描述整体拖曳系数与  $KC$  数关系的因子 ( $f_{KC}$ )。然而，单圆柱  $C_d$  的取值同样取决于  $KC$  数。因此在拖曳力预测中，对  $KC$  的依赖可能被重复计入（从而被高估）。

遮蔽因子  $f_s$  的取值由 Jansen 的试验拟合而得，本文却在其率定范围之外使用。由于现场波浪比室内试验更高更长，德马克的  $Re$  值在  $1 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5$  之间，而室内试验仅为  $6.7 \times 10^3 \sim 11.9 \times 10^3$ 。据此可以预期，现场的紊动强度更高，尾流因而比试验中更长，整体拖曳系数则更低。整体拖曳系数偏低又会导致波能耗散率降低、波浪透射增大。

本文中垂直波向的中心距  $s_y$  保持不变，因为 Jansen 的试验未考察小于  $s_y = 1.5D$  的取值。更小的横向间距可能导致高反射率以及结构周围更强的水流加速。因此最优横向间距有待今后研究。

在验证结果中，纵向布置以断面法与实测吻合最好，而单排布置则以体积法结果更佳。这意味着不同方法可能重现相同结果，故今后关于 SWASH 植被模块的研究应对此加以评估。

## （三）水位变化的影响

现场水深并非定值，而是随潮汐与增水而变。为此，本文取从设计水位 ( $d = 1.8 \text{ m}$ ) 到平均海平面 ( $d = 0.8 \text{ m}$ ) 的五种水深，研究水深对波浪透射率的影响。波高取为水深的函数， $H = 0.55d$ ，波周期恒取  $T = 6.88 \text{ s}$ 。结构在不同水位下的消浪性能与 Albers 等的实测结果相比较。

在结构出水的水位区间，波浪透射率与 Schmitt 等的实测呈现相同趋势，说明相对出水高度与透射之间的关系可能与结构型式无关。在设计水位 ( $R_c/H_i = 0$ ) 下，至少需要 3 排竹桩才能把结构后方的波能降至 55%。

## 五、结论

本文研究了用于红树林修复的竹结构设计优化，以印度尼西亚德马克为例，采用数值波浪模型 SWASH 开展评价。用 Gijon Mancheno 等的经验模型估算竹结构的整体拖曳系数，并作为 SWASH 的输入。计算结果与检验波浪穿越圆柱排结构的室内实测吻合良好。模型验证之后，把 SWASH 应用于若干设计情景以寻求最优方案。这些情景考虑了三类设计：单排、双排与多排。依据现场实测与 WaveWatch III 数据，为德马克定义了从日常工况到极端工况的三组特征波况。研究发现：对双排设计，当排间距超过有效波长的 20% 后，波浪透射率趋于稳定；在部分较大间距处，排间透射波与反射波的相互作用会在第一排形成波腹，使波浪透射略有增大。

计算结果还表明，沿波向间距取波长 20% 的结构可能是最优的；为在结构后方产生足够淤积，应至少考虑 3 排。建议进一步开展包括结构地貌动力评价与结构稳定性在内的研究，以优化今后的竹结构设计。

## 参考文献

- [1] 陈新平, 王斌, 尹子祺, 等. 红树林防灾减灾功能研究进展及保护修复建议. 海洋通报, 2023(4).
- [2] Barbier E B, Hacker S D, Kennedy C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 2011, 81(2): 169-193.
- [3] Quartel S, Kroon A, Augustinus P G, et al. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(4): 576-584.
- [4] 张云兰. 广西红树林生态系统服务基准价值评估与价值实现模式研究. 广西大学, 2024.
- [5] 杭岑, 潘军宁, 琚烈红, 等. 秋茄类红树林消浪特性及其与海堤协同防浪效应. 水利水运工程学报, 2025.
- [6] Massel S R, Furukawa K, Brinkman R M. Surface wave propagation in mangrove forests. *Fluid Dynamics Research*, 1999, 24(4): 219-249.
- [7] Bao T Q. Effect of mangrove forest structures on wave attenuation in coastal Vietnam. *Oceanologia*, 2011, 53(3): 807-818.
- [8] 王娜, 王刚, 刘年飞, 等. 近岸区红树林对堤前设计波浪要素的影响. 科学技术与工程, 2025, 25(22): 9523-9532.
- [9] 吴一凡, 江鎰倩, 李瑞利, 等. 红树林生态系统固碳服务价值评估及其应用对策. 生态学杂志, 2026, 45(1): 49-60.