

基于砂质海岸剖面形态数值模拟的参数敏感度分析

邢浩¹, 张丽丽¹, 李华庆¹, 张旭日¹, 李彬², 石洪源³, 尤再进^{1,4}

(1. 鲁东大学 水利工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116081; 3. 鲁东大学 港口海岸防灾减灾研究院, 山东 烟台 264025; 4. 大连海事大学 港口与航运安全协同创新中心, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了探究 XBeach 模型中系统的参数调试对模拟剖面演变的影响, 该文基于波浪水槽实验通过广义似然不确定性估计法(GLUE)对 XBeach 模型中的波浪非线性(facua)、沙滩湿崩塌临界坡度(wetslp)、波能耗散(alpha)等调试参数进行敏感性分析, 阐述所选参数的物理意义及控制方程, 选取不同的参数值观察岸滩剖面演变过程, 并通过 Brier Skill Score 评价方法对模拟效果进行评价。结果表明改变参数值大小会得到不同的岸滩剖面模拟形态。其中参数 facua 控制波形, 波浪由于非线性作用于岸滩会使剖面发生不同趋势的演变, 改变 facua 参数值能够改变模拟剖面演化的趋势, 使得模拟地形剖面演变产生较大的变化; 参数 wetslp 作为湿崩塌临界斜率, 改变其数值大小模拟地形改变的首要特征为剖面坡度; 参数 alpha 作为波能耗散系数, 改变其值会影响破波所释放的能量, 从而影响剖面的侵蚀程度。最终选取三者值分别为 0.65、0.2、1.3, 与水槽实验结果拟合最好。该结果对于 XBeach 的研究及应用具有一定的参考意义。

关键词: 岸滩形态; 数值模拟; XBeach; 参数敏感性

中图分类号: P731.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2022)09-0000-00

DOI: 10.11759/hyxx20220302001

近年来, 由于海岸侵蚀的范围和程度逐渐加重, 导致全球沿海地区的生态环境和生产经营受到严重影响, 深入研究海岸动力条件对海滩剖面形态变化的影响迫在眉睫。现场观测由于时空的限制性及环境复杂性使得海滩形态变化机理研究受到了限制。数值计算受空间尺度的限制较小, 而且时间周期比较短, 逐渐成为海洋动力学中的一个重要研究手段^[1]。XBeach 是基于 Fortran 77/90 架构的平面海岸动力学数值模型, 模型默认海岸低频波决定地形剖面变化, 通过输入的边界条件耦合平面二维方程来计算波浪传播及流、地形、泥沙运输的变化。由于其高度的模块化与并行化、易于与其他模型整合等优点, 逐渐被广泛用于模拟岸滩剖面侵蚀变化以及预测岸滩冲淤各个阶段的发展状况^[2-3]。

XBeach 模型中各模块可调试的参数很多, 不同的参数代表着不同的物理和数值意义。改变参数值大小, 对模拟以及预测的岸滩剖面变化幅度、趋势等都会产生较大的影响。VAN 等^[4]通过实验总结出 XBeach 一维模型中较为敏感的参数; NATALIA 等^[5]使用 2009 年记录的重要风暴事件对 XBeach 模型进行参数校正; KOMBIADOU 等^[6]通过校正参

数的敏感性分析研究风暴潮后的剖面恢复; 李锐^[7]通过对一维 XBeach 模型中的参数进行敏感性分析来模拟风暴潮作用下的剖面变化; 龚玉萌^[8]通过调试一维 XBeach 模型中的参数值来进行沙滩补沙后的冲淤变化模拟; 张洪艳^[9]通过调试一维 XBeach 模型中的参数值来研究植被对砂质海岸剖面演化的影响。前人对 XBeach 的调参工作缺乏深入的物理机制研究, 缺少系统的选取调试参数方法, 调参导致整个过程的剖面变化是否与最终变化趋势一致也缺乏验证。本文基于 XBeach 模型中应用广泛的 Surfbeat 模式, 利用广义似然不确定性估计法(GLUE)选取关于波浪非线性、沙滩湿崩塌临界坡度、波能耗散 3 个敏感性高的调试参数, 通过波浪水槽实验对 5 h 和最终时刻的模拟剖面演变

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2022-05-11

基金项目: NSFC-山东联合重点基金资助项目(U1806227); NSFC-山东联合重点基金资助项目(U1906231)

[Foundation: NSFC-Shandong Joint Key Fund Project, No.U1806227; NSFC-Shandong Joint Key Fund Project, No. U1906231]

作者简介: 邢浩(1999—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事海岸变化的动力因素方面研究, E-mail: 1184010065@qq.com; 石洪源(1986—), 通信作者, E-mail: shihongyuan1234@163.com

进行参数敏感性对比分析,系统性梳理各参数的影响,深入探究各参数对岸滩整个演变过程的物理机制,为准确预测不同海岸动力条件下的岸滩演变提供借鉴。

1 模型简介及水槽实验概况

1.1 XBeach 模型及重要参数介绍

XBeach 是一种短波平均的波群解析模型,如今发展了 Stationary wave 模式、Surfbeat 模式和 Non-hydrostatic 模式供用户选择^[10]。Stationary wave 模式主要用于解决波浪平均方程,忽略长重力波的作用;Surfbeat 模式定义短波在波群包络线内变化,长波与其相关的部分已经分解。该模式采用了波群的耗散模型以及水滚模型来表示破碎后表面所含的势能,这些变化通过辐射应力梯度对水体产生的作用形成长周期波浪和紊流并通过求解非线性浅水方程。当主要关心的是破波带的水动力过程而不是时均的流和波浪增减水时就需要用这种模式。在耗散性的海滩,大部分短波在传向海岸的过程中已完全耗散,对于这样的海岸这种模式是完全适用的;Non-hydrostatic 模式结合了非线性浅水方程和压力修正系数,使程序能够模拟单个波浪的传播和衰退。这种模式不需要短波作用平衡,节省了计算时间。但是在波浪解析模式中需要更高的空间分辨率和更小的时间步长,所以计算时间比拍岸式模式要大大增加。

根据 VAN^[4]和 SIMMONS 等^[11]的研究,选定 XBeach 模型计算波浪爬升和海滩侵蚀过程的几个重要参数:

(1) 参数 facua 控制波浪偏度和不对称度对输沙方向的影响程度,较高的偏度和不对称度有利于岸上输沙;Xbeach 模型考虑了波浪非线性对泥沙运动的影响,对于波浪的流速振幅进行了非线性修正并加入到泥沙计算中^[12]。参数 facuaA_s 和 facuaS_k 分别代表了由于波浪不对称性流动和波浪流动偏度定义的平均时间校正因子。波浪的不对称性和偏度的影响在对流扩散方程中的体现见下式^[13]:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC(u^E - u_a \sin \theta_m)}{\partial x} + \frac{\partial hC(v^E - u_a \cos \theta_m)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s}, \quad (1)$$

其中, x 、 y 为水平坐标, C 表示深度平均的悬沙浓度, D_h 为泥沙扩散系数, h 为当地水深, t 为作用时间, C_{eq}

是平衡泥沙浓度, θ_m 代表入射波与 x 轴的夹角, u^E 和 v^E 分别代表欧拉流速的 x 向和 y 向分量, T_s 是和水深除以沉降速度成比例的时间尺度。式中流速 u_a 在 XBeach 模型中是由计算因子 S_k 和 A_s , 均方根速度 u_{rms} 和校准因子 f_{sk} 和 f_{As} 计算得到:

$$u_a = (f_{sk} S_k - f_{As} A_s) u_{rms}, \quad (2)$$

S_k , A_s 分别代表近岸流速的波偏态和不对称态, f_{sk} 和 f_{As} 参数作为平均时间的校正因子来改变 u_a 的大小, u_a 的值越大, 模拟的向岸泥沙输运越强。调整参数 facua 是对参数 f_{sk} 和 f_{As} 进行同时设置。

(2) 参数 eps 表示模型运行期间区分干湿的阈值水深;

(3) 参数 alpha 是一阶波能耗散系数。对于 XBeach 模型的 Surfbeat 模式, 所有的能量耗散都是由于波浪破碎产生的:

$$\overline{D}_w = 2 \frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w, \quad (3)$$

其中, α 在模型中以参数 alpha 代替。 Q_b 为破波系数, 由均方根波高和最大波高值决定。 T_{rep} 代表波周期, E_w 是各方向波能的和;

(4) 沙滩侵淤的主要过程是沙滩崩塌, 不同的崩塌临界斜率会导致沙滩侵淤量的不同^[14]。合理的崩塌临界斜率对最终岸滩剖面演化的模拟效果起着非常关键的作用。参数 wetslp 为湿崩塌临界斜率, 表示发生崩塌发生前湿面的最大海滩坡度。当超过此坡度临界值时, 底床就会发生崩塌滑动^[15]:

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr}, \quad (4)$$

式中, z_b 表示剖面高程, x 表示剖面水平距离, m_{cr} 表示临界坡度值

(5) 参数 gamma 为破碎指数 γ , 其值会影响最大波高值:

$$H_{max} = \gamma \cdot (h + \delta H_{rms}), \quad (5)$$

其中, h 为当地水深, δH_{rms} 为 h 处的均方根波高。

本文将这几个推荐参数为参考, 利用广义似然不确定性估计法, 讨论各参数的灵敏度并确定本文的研究参数。

1.2 水槽实验概况

选定波浪水槽长 60 m、宽 2 m、高 1 m, 配备主动吸收式造波机和块体消浪设施。能进行波、流共同作用或单独作用下的物理模型试验。具备研究港口、海工建筑物在二维规则波、不规则波作用下的各种动

力响应机制及海岸工程中波浪与建筑物相互作用关键技术和理论问题的能力。实验水位为 0.8 m, 非规则波采用 Jonswap 谱、其有效波高为 0.18 m、特征周期为 2 s, 模型岸滩的中值粒径为 0.3 mm。剖面水平距离、高度、坡度如图 2 所示, 坡度采用 1:3+1:15, 剖面总长度为 15.7 m, 采用大靶面高分辨率工业数字相机记录剖面状态, 具有高分辨率、高清晰度、低噪声等特点, 为了探究调试参数对模拟剖面演化过程的影响, 实验剖面需产生明显的侵淤现象, 记录总实验时间为 33 h。



图 1 水槽实验现场
Fig. 1 Experimental flume

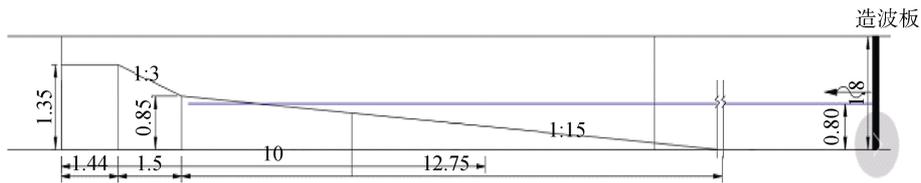


图 2 实验要素示意图
Fig. 2 Schematic diagram of experimental elements

2 方法与分析

2.1 模拟评价方法

2.1.1 BSS 评价方法

BS 评价方法(Brier Score)定义了一种均方概率误差, 该评价方法综合考虑了数据预测的可靠性、不确定性和分辨性, BSS 评价方法(Brier Skill Score)是对 BS 评价方法的一种改进, 在 BS 方法的基础上将评价分数标准化, 从而用计算数值大小来判定事件预测的准确性^[16]。BSS 值越大, 预测效果越好, BSS 值的范围及所代表预测效果见表 1^[7]。BSS 评价方法适用于海岸动力模拟, 如今已被广泛使用^[17]。本文用此方法评价数值模拟沙滩剖面演变的准确性, 其计算公式如下:

$$BSS = 1.0 - \frac{MSE(Y, X)}{MSE(I, X)}, \quad (6)$$

$$MSE(Y, X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2, \quad (7)$$

其中, MSE 代表着均方误差值, 一系列 X 值代表着波浪作用后的高程实际观测值, Y 值代表着 XBeach 模型模拟的高程值, I 值代表着初始地形高程值, n 表示坐标个数, 也代表模型一维网格数量。选定模型参数, 计算采用不同参数值模拟的地形剖面所对应的 BSS 值, 对模拟岸滩过程中参数的敏感性进行分析与探讨。

表 1 BSS 评价范围及所代表预测效果

Tab. 1 Range of BSS value and corresponding prediction quality

BSS 值范围	预测效果
1.0~0.8	极好
0.8~0.6	好
0.6~0.3	合理
0.3~0.0	不好
<0	差

2.1.2 广义似然不确定性估计法

广义似然不确定性估计法(GLUE)是一种通过抽样选取一定数量参数集评估不同参数组合的似然方法。GLUE 方法已经在哲学及相关领域普遍使用, RUESSINK 的两项研究^[18-19]开创了 CLUE 在海岸工程领域的应用。由于系统 GLUE 方法选取最佳参数集需要进行大量参数集的模拟运行, 作者对 1.1 节提及的几个基础参数随机抽样构建 200+组合参数集选取出敏感度较高的参数, 然后对选取的参数进行手动调试, 既能保证系统选取参数的严谨性, 也减少了模型模拟计算量。GLUE 方法步骤包括构建似然函数、设置阈值选取调试参数集、分析模拟结果的不确定性。具体步骤如下:

(1) 构建似然函数:

$$L_{BSS} = \frac{BSS_i}{\sum_{i=1}^n BSS_i}, \quad (8)$$

其中, BSS_i 表示每个参数集的 BSS 评分值, n 表示模型运行计算超过阈值的总次数。当 BSS 阈值不小于 0 时, 此似然函数成立。

(2) 设置阈值: 本文用此方法的目的是确定基础参数的敏感度而不是选择最佳参数集, 因此选择阈值 BSS 值为 0

(3) 分析模拟结果: 根据手册推荐基础参数的数值范围见表 2。假设基础参数的各数值区间似然函数均匀分布, 将各参数的模拟累积似然函数与假设累积均匀函数进行对比分析, 分析结果见图 3。两者差距越大, 表示参数越敏感^[1]。图 3 表明, 在选择的基础参数中, 参数 $facua$ 和 $wetslp$ 最敏感, 其次是参数 $alpha$, 参数 eps 和 $gamma$ 的两曲线差别不大, 参数最不敏感。由此选择参数 $facua$, $wetslp$ 和 $alpha$ 作为本文的敏感性调试参数。

表 2 基础参数的数值范围

Tab. 2 Value ranges of basic parameters

参数	推荐值	范围
$facua$	0.1	0.1~1.0
eps	0.005	0.001~0.1
$gamma$	0.55	0.4~0.9
$wetslp$	0.3	0.1~1.0
$alpha$	1.0	0.5~2.0

2.2 参数敏感度分析

为了保证调试结果合理, 探究各参数数值改变对剖面演变的规律。敏感性越大的参数应优先调试。由图 3 可得调试参数顺序为: $facua$ 、 $wetslp$ 、 $alpha$ 。按此顺序选取大量的参数集, 对各参数进行敏感度分析。

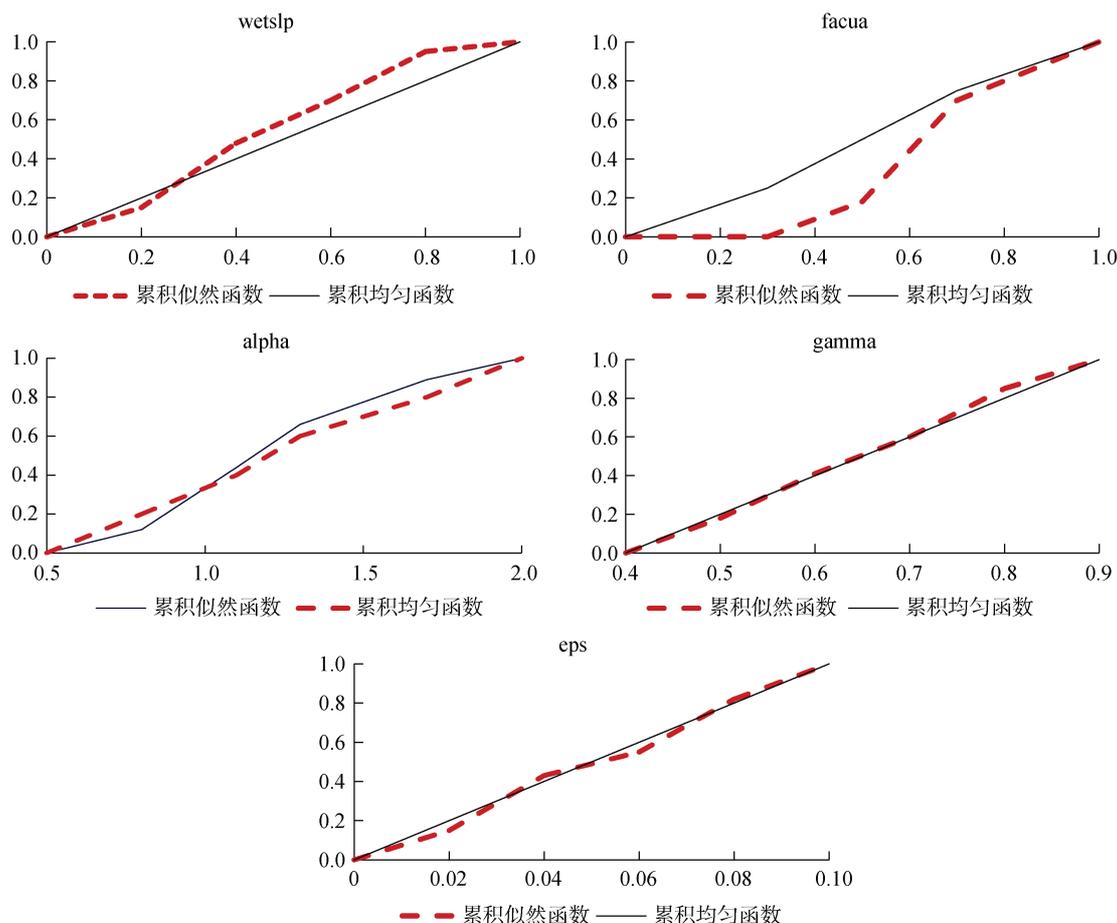


图 3 各参数累积似然函数与累积均匀函数

Fig. 3 For each parameter, the cumulative likelihood function and cumulative uniformity function

2.2.1 参数 $facua$

根据 5 h 和实验结束时的实测剖面可知, 剖面的

变化趋势始终为上淤下侵, 侵淤程度也随着时间点的增加而增加。 $facua$ 作为敏感度最高的参数, 在推

荐范围内按照由小到大的顺序密集取值。模拟发现当 *facua* 取值为 0.1~0.4 时, 剖面呈现上侵下淤的状态; 当取值为 0.4~0.5 时, 剖面呈现侵淤的过渡状态, 剖面变化不明显; 当取值为 0.5~1 时, 剖面呈现上淤下侵的状态, 与实测剖面演变趋势相符; 取值在 0.5~0.8 时, 模拟剖面与实测剖面符合较好, 作为重

点研究取值区间。经不同比值选取, 文章最终展示 0.1、0.3、0.5、0.65、0.8 这 5 个代表性数值的计算结果, 其他参数均采用默认值。选取水槽实验第五个小时和结束时刻不同 *facua* 参数值的模拟地形和实测地形, 观察整个模拟剖面演化过程的准确性。模拟地形和实测地形见图 4, 计算的 BSS 值见表 3。

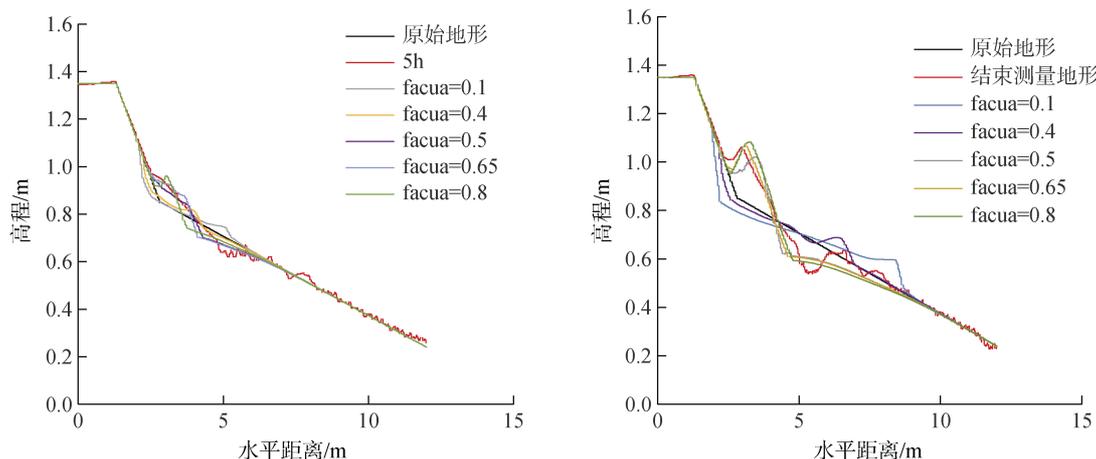


图 4 不同 *facua* 值所对应的沙滩特征剖面在 5 h 和最终时刻的模拟结果

Fig. 4 Simulated terrain of beach profiles simulated with different *facua* values at 5-hour and final moment

表 3 采用不同的 *facua* 参数值计算的 BSS 值

Tab. 3 BSS values calculated by different values of *facua*

BSS 值	<i>facua</i>				
	0.1	0.3	0.5	0.65	0.8
5 h 模拟地形	-0.667	0.261	0.633	0.655	0.489
最终时刻模拟地形	-0.541	-0.356	0.585	0.758	0.659

从图 4 和表 3 可以看出当参数 *facua* 设置值 0.1 和 0.3 时, 5 h 模拟剖面计算 BSS 值 < 0, 模拟效果差, 在水平距离 2~8 m 之间呈现上侵下淤的趋势, 与实测剖面地形趋势相反。参数值为 0.5~0.8 时, 5 h 模拟剖面变化趋势与实测相同, 均呈现上淤下侵的趋势。值为 0.65 时, BSS 值最大为 0.758, 模拟效果最好。水平距离 8 m 以后, 剖面地形基本不发生变化。

实验结束的模拟剖面地形变化趋势与 5 h 模拟变化趋势相同, 当 *facua* 值为 0.1 和 0.3 时, BSS 计算值仍 < 0, 模拟效果差; 当 *facua* 值为 0.65 时 BSS 值仍最大, 整个剖面变化过程的模拟效果最好。

2.2.2 参数 *wetslp*

参数 *wetslp* 实验中, 在模式推荐范围内对其进行大量取值模拟, 模拟发现当取值在 0.1~0.3 时, 模拟剖面与实测剖面符合性较好, 将此区间作为重点

研究区间; 取值 > 0.3 时, 模拟剖面坡度愈加背离实测剖面。经计算比选, 本文仅展示 0.1、0.2、0.3、0.5、0.8 这 5 个代表性数值的计算结果, 将 *facua* 设为 0.65, 其他参数均采用默认值。模拟地形和实测地形见图 5, 计算的 BSS 值见表 4。

由图 5 和表 4 可以看出, 改变参数 *wetslp* 值, 剖面主要变化范围仍在水平距离 2~8 m, 沙滩剖面改变的首要特征是坡度, 没有改变剖面地形上淤下侵的趋势, 5 h 的模拟沙滩剖面与最终时刻的模拟沙滩剖面具有相同的变化趋势。当 *wetslp* 值调为 0.2 时, 5 h 模拟剖面与最终模拟剖面计算出的 BSS 值分别为 0.761 和 0.806, 模拟剖面变化坡度与实测剖面坡度最相符。增大 *wetslp* 值, 计算出的 BSS 值越低, 模拟效果越不理想。改变 *wetslp* 值对 XBeach 模型沙滩剖面变化的模拟效果有很大影响。

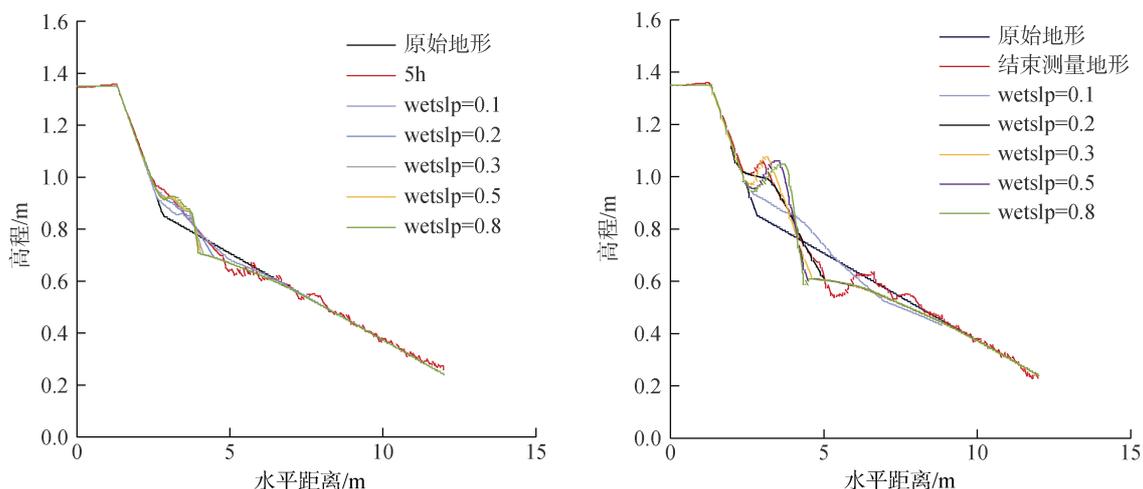


图 5 不同 wetslp 值所对应的沙滩特征剖面在 5 h 和最终时刻的模拟结果

Fig. 5 Simulated terrain of beach profiles with different wetslp values at 5-hour and final moments

表 4 采用不同的 wetslp 参数值计算的 BSS 值

Tab. 4 BSS values calculated by different values of wetslp

BSS 值	wetslp				
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8
5 h 模拟地形	0.592	0.718	0.655	0.590	0.523
最终时刻模拟地形	0.302	0.806	0.758	0.585	0.517

2.2.3 参数 alpha

alpha 是本文研究敏感度最低的参数，在模式推荐范围内对其进行大量取值模拟。模拟发现当取值在 0.8~1.4 时，模拟剖面与实测剖面符合性较好；当取值在 1.2~1.4 时符合性最好，将此区间作

为重点研究区间。最终本文仅展示 0.8、1、1.2、1.3、1.4 这 5 个代表性数值的计算结果。facua 设置为 0.65，wetslp 设置为 0.2，其他参数使用默认值。模拟地形和实测地形见图 6。计算的 BSS 值见表 5。

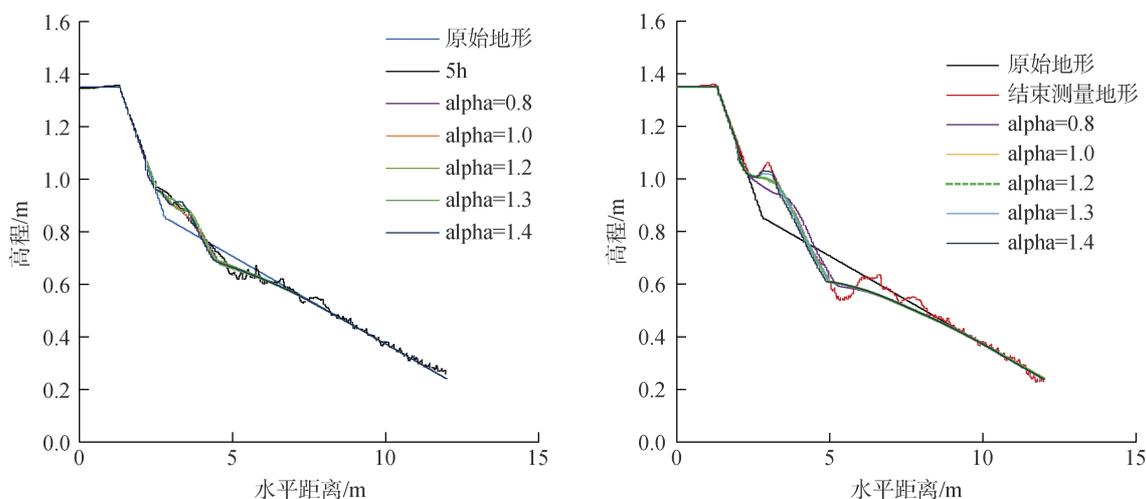


图 6 不同 alpha 值所对应的沙滩特征剖面在 5 小时和最终时刻的模拟结果

Fig. 6 Simulated terrain of beach profiles with different alpha values at 5-hour and final moment

表 5 采用不同的 alpha 参数值计算的 BSS 值

Tab. 5 BSS values are calculated by different values of alpha

BSS 值	alpha				
	0.8	1	1.2	1.3	1.4
5 h 模拟地形	0.693	0.718	0.720	0.763	0.733
最终时刻模拟地形	0.797	0.806	0.812	0.824	0.813

由图 6 和表 5 可以看出, 在参数 *facua* 和 *wetslp* 值分别为 0.65 和 0.2 的情况下, 改变参数 *alpha* 值, 剖面主要变化范围仍在距离 2~8 m, 沙滩剖面的坡度基本没有变化, 并且没有改变剖面地形上淤下侵的趋势, 5 h 模拟沙滩剖面与最终模拟沙滩剖面变化趋势相同。改变最明显的部分是剖面淤积部分的最大淤积厚度, “*alpha* 值越大, 模拟剖面的最大淤积厚度越大, 最大侵蚀厚度相对变化幅度较小。当 *alpha* 值调为 1.3 时, 5 h 模拟剖面与最终模拟剖面计算出的 BSS 值分别为 0.761 和 0.824, 模拟效果好。随着 *alpha* 值的增大, 模拟剖面的侵淤分界点 *alpha* 值为 1.4 时, 模拟剖面的最大淤积厚度最大, 但其形态与实测剖面偏离, 模拟剖面的侵淤分界点相对实测剖面偏上, 计算出的 BSS 值小于 *alpha* 为 1.3 的 BSS 值。故 1.3 为最优值。当数值范围在 0.8~1.3, 增大 *alpha* 值, 计算出的 BSS 值越大, 模拟效果越理想。

3 讨论

结合波浪水槽实验, 通过数值试验对 XBeach

模型中的参数 *facua*、*wetslp* 和 *alpha* 进行敏感度分析, 考察剖面在 5 h 及最终时刻的模型模拟及实测的剖面变化, 计算各自的 BSS 值, 对参数调试所导致的模拟剖面变化进行讨论总结。参数 *facua* 影响的是波浪偏斜和不对称性, 改变其值大小能够改变波形。波浪作用于海滩剖面, 非线性作用会影响向岸泥沙输运, 进而影响剖面的演变^[20-21]。当参数 *facua* 为默认值 0.1 时, XBeach 模型模拟的剖面变化为上侵下淤, 而实际水槽实验的剖面变化为上淤下侵。*facua* 值的增大首先阻碍了沙滩的崩塌过程, 模拟的上部侵蚀量和下部淤积量均减小, 继续增大 *facua* 到 0.5, 模拟剖面的演变趋势发生变化, 转变为上淤下侵, 且随着 *facua* 值继续增大, 侵淤量也逐渐增加, 不同 *facua* 值的模拟与实测剖面单位淤积量见表 6。剖面侵淤坡度没有发生大的变化, 5 h 模拟剖面与最终时刻模拟剖面的演变趋势相同。改变 *facua* 参数值改变了波浪非线性对地形的影响, 能够改变模拟剖面演化的趋势, 当增大到一定值时, 模拟剖面地形演变产生较大的变化。

表 6 *Facua* 取不同数值时模拟与实测的剖面单位淤积量

Tab. 6 Siltation per unit volume simulated with different *facua* values and corresponding measured values

剖面单位侵蚀/淤积量/m ³	<i>facua</i>					实测
	0.1	0.3	0.5	0.65	0.8	
5 h	0.041	0.015	0.069	0.095	0.097	0.091
最终时刻	0.186	0.064	0.199	0.218	0.265	0.225

XBeach 模型引入崩塌算法来模拟风暴潮环境下的岸沙滑塌。参数 *wetslp* 作为湿崩塌临界斜率, 在模型中控制水下的崩塌过程。模型默认值为 0.3, 可以解释为超过此临界斜率泥沙就在相邻单元间移动, 使坡面恢复临界状态。从此参数实际代表的物理意义来看, 采用不同的 *wetslp* 参数取值最终会模拟出坡度不同的剖面地形。上文关于参数 *wetslp* 的敏感性分析结果验证了这一点, 当 *wetslp* 取值为 0.1 和

0.8 时, 所模拟出的剖面侵淤部分坡度差异明显。当 *wetslp* 值为 0.1 时, 两个时刻的模拟剖面侵淤峰值间坡度值最小, 且淤积峰值与实测也存在差异, 侵淤分界点相对下降。增大 *wetslp* 值模拟剖面侵淤峰值间坡度也会随之增加, 原因是 *wetslp* 值越大, 泥沙恢复临界状态的趋势越慢, 导致剖面演变的坡度越大。不同 *wetslp* 值模拟与实测剖面侵淤峰值间坡度见表 7。

表 7 Wetslp 取不同数值时模拟与实测的剖面侵淤峰值间坡度

Tab. 7 Slope between peak deposition simulated with different wetslp values and corresponding measured value

模拟地形侵淤峰点间坡度	wetslp					
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	实测
5 h	0.111	0.180	0.322	0.375	0.548	0.1627
最终时刻	0.113	0.205	0.302	0.412	0.536	0.214

在 XBeach 模型的 Surfbeat 模式中, 波浪破碎是短波耗散的一种重要方式。通过对选取的一阶波能耗散系数 α 进行敏感度分析, 发现改变此参数所模拟剖面过程演变的首要特征是侵淤程度, 剖面演化趋

势和坡度基本没有发生改变。参数 α 取不同数值时模拟与实测的最大侵淤厚度见表 8。可以得出当模拟剖面演变趋势为上淤下侵时, 在调试数值范围内 α 的变化引起模拟剖面的淤积部分变化更为明显。

表 8 Alpha 取不同数值时模拟与实测的剖面的最大侵淤厚度

Tab. 8 Maximum erosion and deposition thickness simulated with different alpha values and corresponding measured values

最大侵淤厚度	alpha						
	0.8	1	1.2	1.3	1.4	实测剖面	
5 h	最大淤积厚度/cm	5.82	6.53	7.82	8.70	9.36	8.98
	最大侵蚀厚度/cm	4.93	4.99	5.38	5.20	5.42	6.29
最终时刻	最大淤积厚度/cm	12.70	15.52	15.81	18.42	19.02	20.39
	最大侵蚀厚度/cm	9.03	9.13	9.04	9.71	9.79	12.64

4 结论

本文基于 XBeach 模型的 Surfbeat 模式, 通过广义似然不确定性估计法选取控制波形的参数 facua 、湿崩塌临界斜率 wetslp 及一阶波能耗散系数 α , 基于波浪水槽实验开展 XBeach 模型模拟岸滩演变过程的参数敏感度分析, 在 BS 评价方法的基础上将评价分数标准化, 以 BSS 评价方法来判定模拟效果, 得出以下主要结论:

(1) 本文对 3 个参数的物理意义及控制方程进行了阐述, 基于 33 h 的波浪水槽实验将不同时刻的实测剖面 and 不同参数取值的模拟地形进行对比, 结果验证模拟剖面演变结果对选取的 3 个参数非常敏感, 改变的参数值大小会得到不同趋势、坡度、侵淤程度的模拟剖面地形。

(2) 参数 facua 控制波形, 波浪由于非线性作用于岸滩会使剖面发生不同趋势的演变。 facua 数值越大, 模拟的向岸泥沙输运越强, 模拟剖面的变化越大; 参数 wetslp 作为湿崩塌临界斜率, 改变其数值大小模拟地形改变的首要特征为剖面坡度, 当模拟剖面演变趋势为上淤下侵时, wetslp 值越大, 模拟剖面坡度越大; 参数 α 作为波能耗散系数, 改变其值会影响破波所释放的能量, α 越大, 剖面侵淤

程度越大, 当模拟剖面演变趋势为上淤下侵时, 剖面淤积部分变化程度更为明显。在地形演变为上淤下侵时, 最终选取三者值分别为 0.65、0.2、1.3, 与水槽实验结果拟合最好。

(3) 通过分别对 5 h 和最终时刻剖面变化的参数敏感度分析, 计算的 BSS 值和剖面演化过程图验证了 XBeach 模型模拟剖面演化过程的准确性。

XBeach 一维模型计算会忽略两岸地形和沿岸流对沙滩剖面演变的影响。在实际现场模拟及预测过程中, 要结合不同参数代表的物理意义、当地的水动力及地形条件, 加之参数数值敏感性分析, 为准确预测海岸动力条件的岸滩演变等动态海岸过程提供借鉴。

参考文献:

- [1] 蒋昌波, 黄琼, 伍志元, 等. 沙质岸滩形态对海平面变化响应的数值研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2017, 32(1): 81-87.
JIANG Changbo, HUANG Qiong, WU Zhiyuan, et al. Numerical study on the response of sandy shoreline morphology to sea level change[J]. Hydrodynamics research and progress (series A), 2017, 32(1): 81-87.
- [2] HARLEY M D, ARMAROLI C, CIAVOLA P. Evaluation of XBeach predictions for a real-time warning system in Emilia-Romagna, Northern Italy[J]. Journal of

- Coastal Research, 2011, 64(2): 1861-1865.
- [3] ROELVINK D, RENIERS A, VAN D A, et al. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(11-12): 1133-1152.
- [4] VAN G, DEN B J, HOONHOUT B, et al. XBeach 1D-probabilistic model. ADIS settings, model uncertainty and graphical user interface[R]. The Netherlands: Delatares, 2014.
- [5] NATALIA B, KAZIMIERZ F, JOANNA D. Application of XBeach to model a storm response on a sandy spit at the southern Baltic[J]. Oceanological and Hydrobiological Studies, 2015, 44(4): 552-562.
- [6] KOMBIADOU K, COSTAS S, ROELVINK D. Simulating destructive and constructive morphodynamic processes in steep beaches[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(1): 86-86.
- [7] 李锐. 风暴潮作用下的厦门岛沙滩剖面数值演变模拟[D]. 南京: 东南大学, 2017.
LI Rui. Numerical evolution simulation of Sandy beach profile in Xiamen Island under the action of storm surge[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [8] 龚玉萌. 泥化沙滩的修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
GONG Yumeng. Study on restoration of mud-sand beach[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [9] 张洪艳. 植被与人工沙坝对砂质海岸剖面演化的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
ZHANG Hongyan. Study on the evolution of sandy coastal profile by vegetation and artificial sand dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [10] ROELVINK D, VAN D A, MCCALL R T, et al. Xbeach technical reference: kingsday release[R]. The Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education & Delft University of Technology, 2015.
- [11] SIMMONS J A, HARLEY M D, MARSHALL L A, et al. Calibrating and assessing uncertainty in coastal numerical models[J]. Coastal Engineering, 2017, 125(7): 28-41.
- [12] SUTHERLAND J, PEET A H, SOULSBY R L. Evaluating the performance of morphological models[J]. Coastal Engineering, 2004, 51: 917-939.
- [13] WILLIAMS J J, ALEGRIa-ARZABURU A R D, MCCALL R T, et al. Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: Laboratory and field results[J]. Coastal Engineering, 2012, 63(5): 62-80.
- [14] DE VET P L M, MCCALL R T, DEN BIEMAN J P, et al. Modelling dune erosion, overwash and breaching at fire island(NY) during hurricane sandy[J]. Coastal Sediments 2015, 2015, 3(5): 13-17.
- [15] ROELVINK D, VAN D A, MCCALL R T, et al. XBeach manual[R]. The Netherlands: WL Delft Hydraulics, 2015.
- [16] 赵琳娜, 刘琳, 刘莹, 等. 观测降水概率不确定性对集合预报概率技巧评分结果的分析[J]. 气象, 2015, 41(6): 685-694.
ZHAO Linna, LIU Lin, LIU Ying et al. The analysis of observation precipitation probability uncertainty to probability technique score result of ensemble forecast[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(6): 685-694.
- [17] RIJIN L C V, WALSTRA D R, GRASMEIJER B, et al. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models[J]. Coastal Engineering, 2003, 47(3): 295-327.
- [18] RUESSINK B G. A bayesian estimation of parameter-induced uncertainty in a nearshore alongshore current model[J]. Journal of Hydroinformatics, 2006, 8(1): 37-49.
- [19] RUSSINK B G. Predictive uncertainty of a nearshore bed evolution model[J]. Continental Shelf Research, 2005, 25(9): 1053-1069.
- [20] 王睿. 非线性波浪作用下岸滩演变模拟方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
WANG Rui. Study on simulation method of beach evolution under nonlinear wave action[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [21] 朱磊, 杨燕雄, 杨雯, 等. 工程养护海滩对“803”风暴潮的响应过程研究[J]. 海洋通报, 2019, 38(1): 102-114.
ZHU Lei, YANG Yanxiong, YANG Wen, et al. Study on response process of engineering conservation beach to “803” storm surge[J]. Marine bulletin, 2019, 38(1): 102-114.

Parameter sensitivity analysis based on numerical simulation of sandy coast profile

XING Hao¹, ZHANG Li-li¹, LI Hua-qing¹, ZHANG Xu-ri¹, LI Bin², SHI Hong-yuan³, YOU Zai-jin^{1, 4}

(1. School of Hydraulic Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China; 3. Institute of Port and Coastal Disaster Prevention and Mitigation, Ludong University, Yantai 264025, China; 4. Collaborative Innovation Center of Port and Shipping Security, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Received: Mar.2, 2022

Key words: beach morphology; the numerical simulation; XBeach; parameter sensitivity

Abstract: The generalized likelihood uncertainty estimated (GLUE) method is used to perform sensitivity analysis of wave nonlinearity (facua), beach wet collapse critical slope (wetslp), wave energy dissipation (alpha), and other tunable parameters in the XBeach model based on the wave flume experiment. Selected parameters' physical meanings and governing equations are described. Different parameter values are selected to observe the evolution process of the shoreline profile, and the simulation result is evaluated by Brier Skill Score. The results show that different morphology of shoreline profiles can be obtained by changing parameter values. Due to the nonlinear action on the shoreline, the parameter facua controls the waveform, and the wave will change the profile with different trends. Changing the parameter value of facua can change the evolution trend of the simulated profile, resulting in great changes in the terrain evolution of the simulated profile. The parameter wetslp is used as the critical slope of wet collapse, and the profile slope is the primary characteristic of simulating topographic changes by changing its numerical value. The parameter alpha is the wave energy dissipation coefficient, and changing its value affects the energy released by the breaking wave, thus affecting the degree of erosion and deposition of the profile. Finally, the three values were 0.65, 0.2, and 1.3, respectively, which fit the best with the flume experiment results. The results have certain reference significance for XBeach research and application.

(本文编辑: 谭雪静)