

基于FUNWAVE-GPU模型的近岸海浪传播变形的数值模拟研究

林华东¹, 李本霞^{1,2,3*}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098; 3. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 采用 FUNWAVE-GPU 模型对典型潜堤和缓坡地形上海浪的非线性传播变形进行了数值模拟。与实测数据的对比结果表明, 该模型可以较好地模拟近岸复杂地形上海浪的反射、折射和绕射等现象, 空间步长对数值模拟效果具有较大影响, GPU 并行加速技术有效提高了模型的计算效率。

关键词: Boussinesq 方程; FUNWAVE-GPU; 近岸海浪; 非线性变化; GPU 技术

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)03-0001-10

0 引言

近岸海浪与人类生活息息相关, 它会对近岸海洋环境、资源和工程建设等造成重大影响。当海浪由深水区传播到浅水区时, 受地形、底摩擦、障碍物等因素的影响, 海水会发生反射、折射、绕射和破碎等物理现象, 并影响近岸区域海浪的波高、波向等要素, 从而导致近岸海浪具有比深海和开阔陆架海域海浪更复杂的演变特征和更快速的时空变化规律。准确且快速地模拟上述物理现象是近岸海浪预报的关键。

随着计算机的广泛使用, 海浪数值预报方法得到了快速发展, 并出现了多种海浪数值预报模型, 主要分为4种类型。第一类是基于 Boussinesq 方程的计算模型, 它能直接描述海浪波动过程水质点的运动; 第二类是基于缓坡方程的计算模型, 它基于海浪要素在海浪周期和波长的时空尺度上缓变的事实, 描述海浪波动能量、波高、波长、频率等要素的变化; 第三类是基于能量平衡方程的谱模型, 各种物理过程(如风生浪作用、白浪耗散、底摩擦耗散、海浪破碎、波-波相互作用等)可以用不同的源

函数表示, 主要用于深海和陆架海的海浪计算^[1]; 第四类是基于 Navier-stokes 方程的非静压模型, 它能描述水质点在垂直方向上的特性。后3类模型对于近岸海浪的模拟各有不足。例如: 缓坡方程模型具有很宽的海浪频率和水深的适用范围, 但无法适用于小尺度急剧变化的地形, 没有考虑反射作用, 且具有大区域计算耗时、入射波方向受限等缺陷^[2]; 从能量平衡方程对物理过程的处理和计算量来看, 谱模型适合大范围海浪计算, 可以为近岸浪提供可靠的开边界, 但不能有效反映由近岸海底地形和建筑物引起的海浪绕射和反射效应, 无法准确模拟近岸内的短波; Navier-stokes 方程构成的非静压模型可应用于近岸海浪精细化模拟, 但计算代价相对较高, 应用范围较小。

PEREGRINE^[3]推导出的变水深条件下的二维 Boussinesq 方程, 又称经典 Boussinesq 方程。方程具有弱色散性和弱非线性, 能模拟各种波形并反映海浪运动的变形, 但只能用于相对较浅的水域, 且无法适用于非线性较强的问题。后来的学者在 Boussinesq 方程的改进过程中, 主要对两个无因次参数进行改进, 分别是表达色散程度的 $\mu = h/l$ ($\mu =$

收稿日期: 2022-10-13。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFA0604901)。

作者简介: 林华东(1997-), 男, 硕士在读, 主要从事海浪数值模拟及研究。E-mail: linhd_97@163.com

*通信作者: 李本霞(1972-), 女, 研究员, 博士, 主要从事海浪精细化模拟和数值预报技术研究。E-mail: lbx@nmefc.cn

kh)和表达非线性程度的 $\varepsilon = a/h$,式中 k 是波数, h 是水深, l 是波长, a 是波幅。NWOGU^[4]通过重新定义因变量,使方程的线性色散关系达到 $o(\mu^4)$ 的精度。WEI等^[5]采用NWOGU的方法推导出了没有弱非线性的Boussinesq类模型,给出一个近似到 $o(\mu^2)$ 的完全非线性方程。 $o(\mu^2)$ 近似在预测近岸海浪变形、碎波带海浪破碎和非破碎波爬坡以及海浪诱导环流方面的实用性已得到验证^[6-7]。研究者还侧重在提高模型的非线性性能、色散精度和水深适用范围等方面对方程进行改进^[7-10],但是,由于方程形式更加复杂,偏导数的阶数越来越高,因此给数值求解造成困难^[2]。此外,对于近岸海浪预报而言,网格数目逐渐增多,计算精度的需求不断提高,传统中央处理器(Central Processing Unit, CPU)并行算法效率随核心数的增加而逐渐降低,已难以满足计算效率要求^[11]。计算机图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)的计算能力和效率是传统CPU的数十倍^[12]。GPU的核心数是CPU的数百倍,可以实现并行数值计算,已被广泛应用于计算密集型任务,如深度学习和工程计算领域。KIM等^[13]通过CUDA(Compute Unified Device Architecture) Fortran成功地将Boussinesq模型移植到单个GPU上。孙家文等^[14]利用CUDA C搭建了基于GPU加速的Boussinesq模型。

FUNWAVE是由特拉华大学(The University of Delaware)的研究人员基于Boussinesq方程开发的相位解析的时域模型。KIRBY等^[15]根据WEI等^[5]得出的完全非线性Boussinesq方程和经典的有限差分方法,开发了FUNWAVE的初始版本。SHI等^[16]改进了FUNWAVE模型,使其适用于曲线坐标系。SHI等^[11]还采用有限体积法和有限差分法,开发了FUNWAVE模型的总变差递减版本,即FUNWAVE-TVD(Total Variation Diminishing)。该版本使用限制器方案代替单一滤波器,改善了数值振荡的影响,使其能够进行稳定的长时间模拟,并在模型中应用了MPI并行算法,可实现对大尺度范围的并行计算。YUAN等^[17]将FUNWAVE-TVD移植到GPU上,开发了FUNWAVE-GPU,通过CUDA Fortran将Fortran编写的FUNWAVE-TVD模型移植到了GPU上,实现了Boussinesq方程的GPU并行化,应用于海啸模拟时,加速比(CPU计算时间与GPU计算时

间之比)达到10以上,一定程度上解决了Boussinesq方程计算效率低的问题。FUNWAVE-GPU模型已在近岸裂流模拟中^[18]得到应用和验证。

FUNWAVE-GPU模型是FUNWAVE的GPU移植版本,为了验证其在地形下对各类海况的模拟能力以及相较于CPU版本的加速性能,本文采用该模型对经典的近岸潜堤和缓坡地形的海浪非线性变形进行了数值模拟研究,并将模型结果与物理模型实验数据进行比较,评估了该模型在近岸海浪方面的模拟能力。本文还开展了模型对海浪模拟精度影响较大的空间步长敏感性分析,验证了模型的色散性和非线性性能。此外,还利用缓坡地形比较了FUNWAVE-GPU和FUNWAVE-TVD的运算时间,分析了GPU的加速效率,可为该模型的进一步推广使用提供参考。

1 模型简介

1.1 控制方程

FUNWAVE模型基于流体内部Laplace方程的级数解,构造了控制方程的完全非线性形式。在无粘无旋运动的边界值问题中引入参数 ε 和 μ ,得到下列方程:

$$\phi_{zz} + \mu^2 \nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$w|_{z=\varepsilon\eta} = \mu^2 \left[\frac{\partial \eta}{\partial t} + \varepsilon \left(u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

$$w|_{z=-h} = -\mu^2 \left(u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中: ϕ 为速度势, ϕ_{zz} 是速度势在垂向坐标 z 上的二阶导数; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$ 为水平梯度算子; μ 和 ε 分别表示色散程度和非线性程度; t 为时间; x 和 y 为水平坐标; u 和 v 表示海水在 x 和 y 方向上的速度; $w|_{z=\varepsilon\eta}$ 和 $w|_{z=-h}$ 分别为海水在海表面和海底的垂向速度; h 为静水深, η 为波面升高, $d = h + \eta$ 为总水深。式(2)为自由表面的运动学边界条件,式(3)为底部运动学边界条件。通过对式(1)的 z 进行从 $-h$ 到 $z = \varepsilon\eta$ 的积分,并利用式(2)和(3),可以得到体积通量守恒方程:

$$\eta_t + \nabla \cdot \mathbf{M} = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{M} = H \{ \mathbf{u}_\alpha + \bar{\mathbf{u}}_2 \} \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_2 = \left(\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{1}{6} (h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla B + \left(z_\alpha + \frac{1}{2} (h - \eta) \right) \nabla A \quad (6)$$

式中: η_t 为波面升高对时间的一阶导数; \mathbf{M} 为水平体积通量; \mathbf{u}_α 是参考高度 $z_\alpha = -0.53h + 0.47\eta$ 处的速度; $\bar{\mathbf{u}}_2$ 是深度平均后的垂向速度修正项; $A = \nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha)$; $B = \nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha$ 。

水平动量方程为:

$$\mathbf{u}_{\alpha,t} + (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) \mathbf{u}_\alpha + g \nabla \eta + \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \mathbf{V}_3 + \mathbf{R} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{V}_1 = \left\{ \frac{z_\alpha^2}{2} \nabla B + z_\alpha \nabla A \right\}_t - \nabla \left[\frac{\eta^2}{2} B_t + \eta A_t \right] \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_2 = \nabla \left\{ (z_\alpha - \eta) (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) A + \frac{1}{2} (z_\alpha^2 - \eta^2) (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) B + \frac{1}{2} [A + \eta B]^2 \right\} \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_3 = [(\nabla \times \mathbf{u}_\alpha) \cdot \mathbf{i}^z] \mathbf{i}^z \times \bar{\mathbf{u}}_2 + [(\nabla \times \bar{\mathbf{u}}_2) \cdot \mathbf{i}^z] \mathbf{i}^z \times \mathbf{u}_\alpha \quad (10)$$

式中: $\mathbf{u}_{\alpha,t}$ 为 \mathbf{u}_α 对时间的一阶导数; A_t 和 B_t 分别为 A 和 B 对时间的一阶导数; g 是重力加速度; \mathbf{R} 表示扩散项和耗散项, 包括底部摩擦和子网格横向湍流混合项; \mathbf{V}_1 和 \mathbf{V}_2 是色散项, \mathbf{V}_3 是垂直涡度粘度项; \mathbf{i}^z 为 z 方向的单位向量; 将 \mathbf{V}_1 分解为时间导数项 $\mathbf{V}'_{1,t}$ 和二阶导数项 \mathbf{V}''_1 :

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}'_{1,t} + \mathbf{V}''_1 \quad (11)$$

$$\mathbf{V}'_1 = \frac{z_\alpha^2}{2} \nabla B + z_\alpha \nabla A - \nabla \left[\frac{\eta^2}{2} B + \eta A \right] \quad (12)$$

$$\mathbf{V}''_1 = \nabla \eta_t (A + \eta B) \quad (13)$$

对各项进行定义:

$$\mathbf{u}_\alpha = (u, v); \quad \bar{\mathbf{u}}_2 = (U_4, V_4);$$

$$\mathbf{V}'_1 = (U'_1, V'_1); \quad \mathbf{V}''_1 = (U''_1, V''_1); \quad \mathbf{V}_2 = (U_2, V_2);$$

$$(\bar{U}, \bar{V}) = H(u + U'_1, v + V'_1);$$

$$(P, Q) = H(u + U_4, v + V_4)$$

Boussinesq 方程的广义保守形式:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \theta(\psi) = S \quad (14)$$

$$\psi = \begin{pmatrix} \eta \\ \bar{U} \\ \bar{V} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\theta = \begin{pmatrix} Pi + Qj \\ \left[\frac{P^2}{H} + \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) \right] i + \frac{PQ}{H} j \\ \frac{PQ}{H} i + \left[\frac{Q^2}{H} + \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) \right] j \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ g\eta \frac{\partial h}{\partial x} + \psi_x + HR_x \\ g\eta \frac{\partial h}{\partial y} + \psi_y + HR_y \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中: ψ 和 $\theta(\psi)$ 分别表示守恒变量向量和通量向量; (R_x, R_y) 为近似为二次摩擦方程的底部压力; ψ_x 和 ψ_y 定义如下:

$$\psi_x = \eta_t (U'_1 - U_4) + H(uU_{4,x} + vU_{4,y} + U_4u_x + V_4u_y - U''_1 - U_2 - U_3) \quad (18)$$

$$\psi_y = \eta_t (V'_1 - V_4) + H(uV_{4,x} + vV_{4,y} + U_4v_x + V_4v_y - V''_1 - V_2 - V_3) \quad (19)$$

式中: (U'_1, V'_1) 、 (U''_1, V''_1) 、 (U_2, V_2) 、 (U_3, V_3) 和 (U_4, V_4) 表示离散项; (u_x, v_x) 为 u 和 v 方向的速度对 x 的偏导, (u_y, v_y) 为 u 和 v 方向的速度对 y 的偏导。

1.2 GPU 技术

GPU 采用单指令多线程的执行模式。CUDA 内核是由一系列特定用途的指令形成用户定义的函数。在启动时生成一个由线程块组成的网格, 然后使这些线程同步流经所有的 CUDA 内核。在每个 CUDA 核心中, 有一批活动的线程在串行执行, 执行完成后退出, 另一批线程以零开销流入。这一特点适用于计算中的大规模并行化。CUDA 核心由 GPU 中的流处理器 (Streaming Multiprocessors) 管理。

FUNWAVE-GPU 模型尽可能地保留了 FUNWAVE-TVD 模型的原始结构, 有利于用户在两个版本之前切换。模型编程采用 CUDA Fortran, 对于多 GPU 编程, 使用 CUDA-aware 中的 OpenMPI 来处理 GPU 间的通信。模型对数值方案中最耗时的三对角求解器进行优化。三对角求解器即求解模

型中三对角矩阵的Thomas算法。通过重构三角求解器的代码结构,并尝试并发内核,利用线程解决三对角矩阵,实现计算优化。

CUDA Fortran实现步骤的流程图如图1所示。步骤如下:①将MPI排列映射到不同节点的不同GPU卡上;②分配设备内存,上传变量;③更新前一个时间步长的自由表面高度 η 和流速分量;④根据CFL(Calibrated Focal Length)准则估计自适应时间步长;⑤计算高阶色散项;⑥利用改进的四阶MUSCL-TVD和van-Leer限幅器构造界面水平通量 $\theta(\psi)$,然后利用黎曼求解器估算界面通量;⑦计算源项,包括静水压力梯度、底部应力、高阶色散项;⑧使用三阶Runge-Kutta推导出 η^{n+1} , $(\bar{U}^{n+1}, \bar{V}^{n+1})$;⑨使用Thomas算法计算速度场;⑩通过MPI实现海浪破碎算法,并在相邻子域之间沿内外边界交换变量;⑪对 η 、速度分量等现场变量进行统计,检查模型溢出情况。

步骤①和②只被调用一次,而步骤③—⑪被重复执行,直到时间积分完成。在每个时间步骤中,

步骤④—⑩被迭代3次。

1.3 中心模块

中心模块包含造波器、边界条件和海绵层等基本功能。造波器分为内部造波和边界造波两种类型,均适用于规则波和不规则波。FUNWAVE模型使用一种特别的造波源机制,其中水团沿着计算域内的直线源(汇)线增加(减少)。在非交错网格的模型上使用部分分布式的质量源,以解决单源线产生的高频噪声导致模型溢出的问题。对于不规则波造波器,为了消除海浪模拟中的边界效应,模型调整了每个频率库中的海浪方向分布以获得沿岸周期性^[19]。

FUNWAVE模型可采用3种边界条件,即壁边界、吸收边界和周期性边界。壁边界为全反射边界,边界处的法向速度、法向梯度和切向速度、切向梯度都为0。吸收边界由设置海绵层实现,海绵层分为L-D型^[20]、摩擦型和扩散型3类,其中L-D型海绵层使变量 (η, u, v) 在每个时间步长处直接衰减,摩擦型和扩散型直接使用模型中存在的摩擦项和扩散项。周期性边界采用干湿法模拟移动的边界。

1.4 数值方法

FUNWAVE模型采用有限体积法和有限差分法相结合的方法进行空间离散,需要两个步骤实现^[21]。第一步使用重构技术计算界面上的值,第二步使用局部黎曼求解器得到界面通量,通量项和一阶导数项采用带有van-Leer限幅器的高阶MUSCL-TVD法求解, van-Leer限幅器能够提供更平滑的极值。时间步长采用Runge-Kutta法,并根据CFL准则选取自适应时间步长,以保证计算收敛。

模型的海浪破碎方案采用TONELLI等^[22]的方法,利用非线性浅水方程和TVD求解器模拟水跃。当Froude数超过阈值时,通过从Boussinesq切换到非线性浅水方程来模拟海浪破碎。

2 结果及分析

本文选取3个典型的近岸地形进行数值研究,并将模型计算结果与物理模型实验结果进行对比。潜堤地形主要为了体现模型的色散性和非线性性能,缓坡地形为了体现模型对海浪折射和绕射的模拟能力。模型设置中均不考虑底摩擦的影响,时间步长

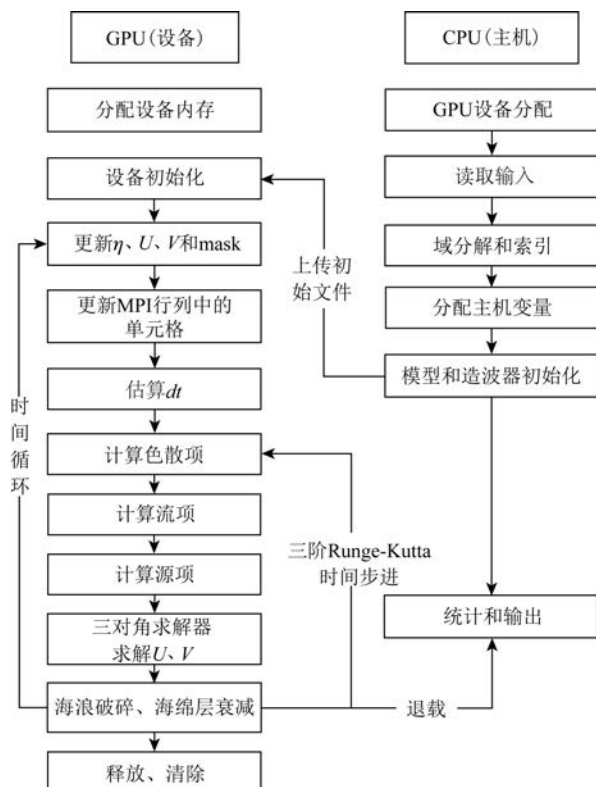


图1 利用CUDA Fortran实现FUNWAVE-TVD的流程图^[17]

Fig.1 Flowchart for CUDA Fortran implementation of FUNWAVE-TVD^[17]

均为自适应时间步长。

2.1 海浪在潜堤上的传播

2.1.1 DINGEMANS 地形实验

DINGEMANS^[23]地形实验总长为 50 m(见图 2),左端设置造波器,右端设置 2 倍波长海绵层,4 个斜坡坡度从左到右依次为 1:20、1:20、1:10、1:20。4 个波高观测点分别为 $x_1=26.04$ m、 $x_2=33.64$ m、 $x_3=37.04$ m、 $x_4=41.04$ m。入射波 CaseA 的波幅 $a=0.02$ m,周期 $T=2.86$ s, $kh=0.7$,波长 $\lambda=7.7$ m。空间步长选取 0.10 m、0.05 m、0.02 m 进行敏感性分析。

模拟结果与实测数据对比见图 3。从图中可以看出,当海浪向潜堤传播时,水深变浅,海浪变陡,由于受到非线性作用的影响,海浪中高次谐波增加,并在堤后被释放出来,使得堤后 $kh \approx 4$,超出弱色

散模型($o(\mu^2)kh=3$)的预报精度。因此,导致堤顶处 x_1 模拟数据与实测数据较为吻合, x_2 、 x_3 、 x_4 模型数据与实测数据出现偏差。当空间步长为 0.10 m 时,模拟结果与实测数据偏差较大,但随着空间步长逐渐缩小,两者的匹配度逐渐增加,模型数据达到稳定。

2.1.2 OHYAMA 地形实验

OHYAMA^[24]地形实验总长为 65 m,33~42 m 的实验设置见图 4。左端 9.25 m 处设置造波器,左右两端设置 5 m 海绵层,两侧斜坡坡度均为 1:2,模拟时间为 120 s。5 个波高观测点为 $x_1=34.1$ m、 $x_2=36.8$ m、 $x_3=38.3$ m、 $x_4=39.0$ m、 $x_5=41.1$ m。3 个入射波工况的波幅 a 均为 0.025 m,波周期 T 分别为 1.341 s(Case1)、2.012 s(Case2)、2.683 s(Case3)。空间步长选取 0.10 m、0.05 m、0.02 m 进行敏感性分析。

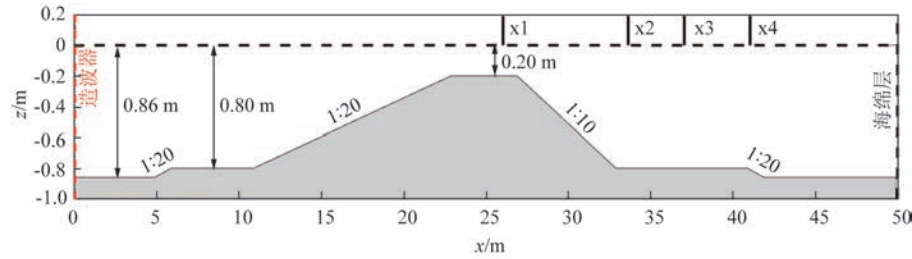


图2 DINGEMANS 实验设置

Fig.2 Setup of DINGEMANS experiment

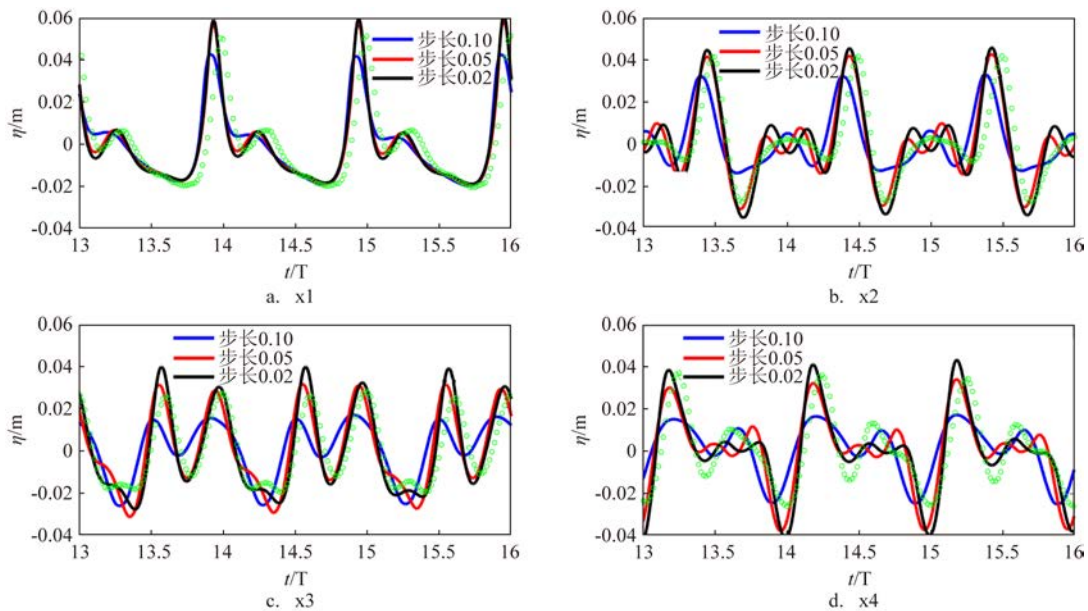


图3 DINGEMANS 实验模拟结果与实测数据(●)对比

Fig.3 The comparison between DINGEMANS experiment results and measured data(●)

模拟结果与实测数据的对比见图5。横坐标 t 被定义为从 x_1 处的表面高程为零开始经过的时间,取观测点 x_3 和 x_5 作波高分析。从图中同样可以看出,空间步长越精细,模型波峰越陡,模拟结果与实验结果的吻合性越好。当空间步长达到 0.02 m 时,除Case3 x_5 外,模型结果与实测数据的契合度均较高,能较好地呈现非线性及色散性。在Case3 x_5 处, 0.05 m 空间步长的实验效果比 0.02 m 好。

2.1.3 WILLMOTT方法评估

为了更精确地量化两种潜堤地形在不同分辨率和观测点下的差异,本文使用WILLMOTT^[25]方法评估了不同方案模型的有效性。方程为:

$$G = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [x(i) - x_r(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [x(i) - \bar{x}_r + |x_r(i) - \bar{x}_r|]^2} \quad (20)$$

式中: $x_r(i)$ 代表实测数据; $x(i)$ 代表模型数据; \bar{x}_r 是 $x_r(i)$ 的平均值; G 越接近1表示模型数据与实测数据匹配度越高,反之,匹配度越低。

从两个实验在不同分辨率和观测点下的 G 值评估结果可以看出(见表1),各个观测点的模型精度存在差异,在大多条件下,网格越精细,模型精度越高。通过使用更精细的网格,能够改善预测效果。在网格精度达到要求的条件下,计算误差主要

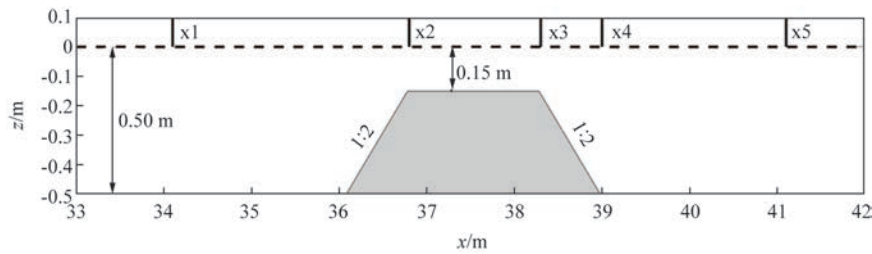


图4 OHYAMA实验设置

Fig.4 Setup of OHYAMA experiment

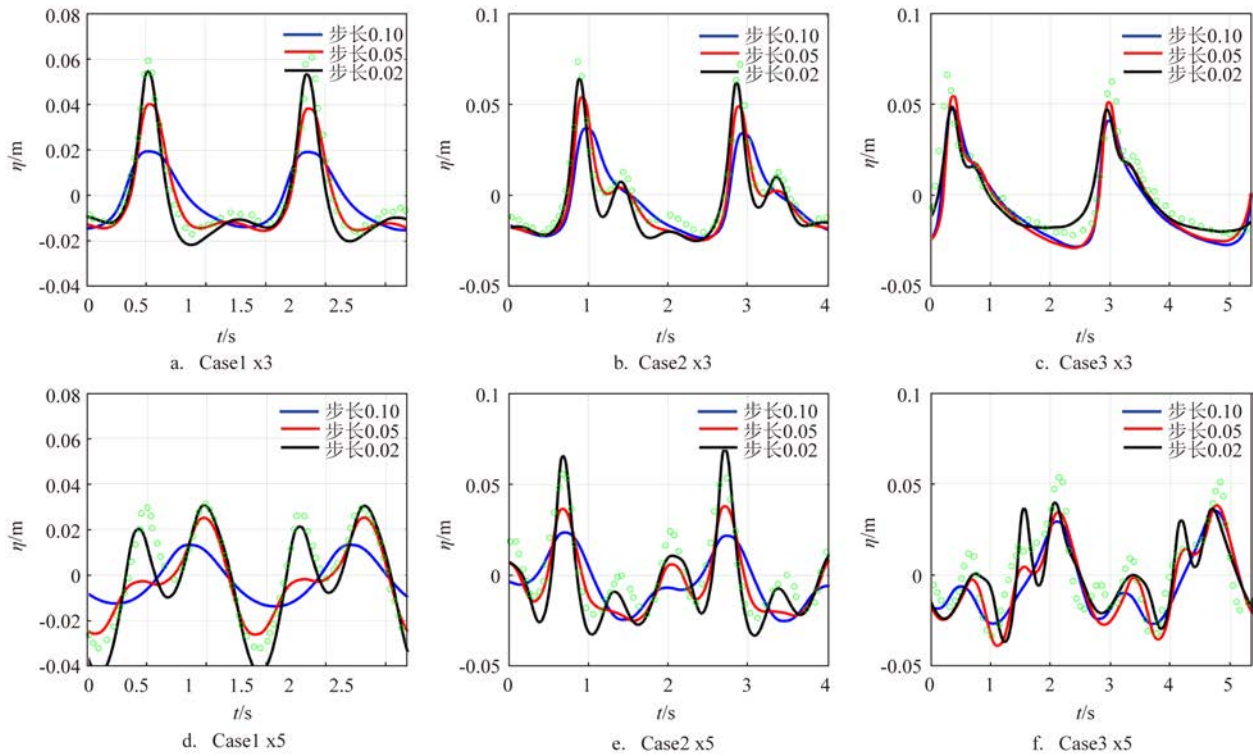


图5 OHYAMA实验中3个模型数据与实测数据(●)对比图

Fig.5 The comparison of 3 cases between OHYAMA experiment results and measured data(●)

表1 DINGEMANS和OHYAMA实验在不同分辨率和观测点下的G值

Tab.1 G values of DINGEMANS and OHYAMA experiments at different resolutions and observation points

分辨率/m	CaseA				Case1		Case2		Case3		平均值
	x1	x2	x3	x4	x3	x5	x3	x5	x3	x5	
0.10	0.878	0.735	0.780	0.811	0.818	0.674	0.886	0.748	0.941	0.897	0.817
0.05	0.890	0.892	0.899	0.883	0.970	0.893	0.969	0.912	0.935	0.912	0.916
0.02	0.880	0.915	0.944	0.922	0.980	0.965	0.968	0.939	0.942	0.875	0.933

来自于理论近似而不是数值格式,即海浪的非线性和色散性超出了模型方程的使用范围,导致模型数据与实测数据存在一定的误差。在计算成本允许的范围内,建议选取更精细的网格准确地模拟海浪。

FUNWAVE-GPU模型对所有情况都提供了良好的预测,能够准确模拟规则波跨越潜堤的海浪状态,具有非线性和色散性能。

2.2 海浪在椭圆形浅滩上的传播

2.2.1 BERKHOFF地形实验

BERKHOFF^[26]地形实验计算区域为25 m×20 m(见图6),在x=1.5 m处设置造波器,左右两侧设置1.5 m海绵层,缓坡坡度为1:50,缓坡梯度方向与海浪入射边界的法向夹角为20°,以x₀=10 m, y₀=10 m为中心,有一长半轴为4 m、短半轴为3 m的椭圆浅滩,模拟时间为30 s。8个观测截面位置如图6中①—⑧所示。空间步长为0.05 m,入射波波周期T=

1.0 s,波高H₀=2a=0.023 2 m。

斜坡旋转后的斜率方向坐标(x', y')坐标为:

$$\begin{cases} x' = (x - x_0) \cos 20^\circ - (y - y_0) \sin 20^\circ \\ y' = (y - y_0) \sin 20^\circ + (x - x_0) \cos 20^\circ \end{cases} \quad (21)$$

椭圆浅滩边界:

$$\left(\frac{y'}{4}\right)^2 + \left(\frac{x'}{3}\right)^2 = 1 \quad (22)$$

浅滩外水深:

$$h_s = \begin{cases} 0.45 & x' < -5.84 \\ 0.45 - 0.02(x' + 5.84) & x' \geq -5.84 \end{cases} \quad (23)$$

浅滩内水深:

$$h = h_s + 0.3 - 0.5 \sqrt{1 - \left(\frac{y'}{5}\right)^2 - \left(\frac{x'}{3.75}\right)^2} \quad (24)$$

图7为数值模拟得到的不同时刻波面的空间分布,其中,图中右下角空白区域为露出水面的缓坡,没有波面分布。从图中可以看出,入射波遇到斜坡上的椭圆形浅滩后发生折射和绕射,波峰线不平行,以y=10 m为界,下侧波长变短,波高增加,上侧波长变长,波高减小。当入射波传播至浅滩后方,两侧海浪的叠加使波能集中,波高显著增加。图8给出了模拟结果与实测数据的对比,纵坐标为平均波高H与入射波高H₀之比。由图可见,FUNWAVE-GPU模型模拟得到的波高比与实测数据吻合较好,说明该模型对椭圆形浅滩上海浪的折射和绕射变形具有较好的模拟能力。

2.2.2 GPU加速分析

本文采用的两个潜堤实验由于网格数过少,受内存约束,不会完全占用GPU设备,不能较好地体现GPU的优越性。而BERKHOFF实验网格数达到了200 000(500×400),故选取该实验对FUNWAVE-GPU的加速性能进行研究分析。地形与模型设置皆与2.2.1中相同,将FUNWAVE的GPU版本

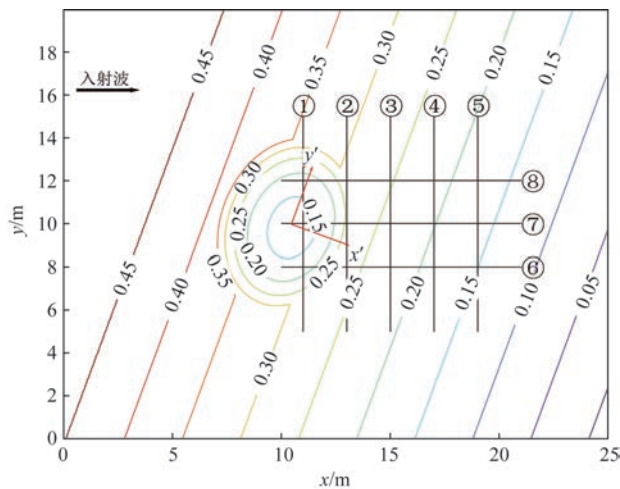


图6 BERKHOFF实验设置
Fig.6 Setup of BERKHOFF experiment

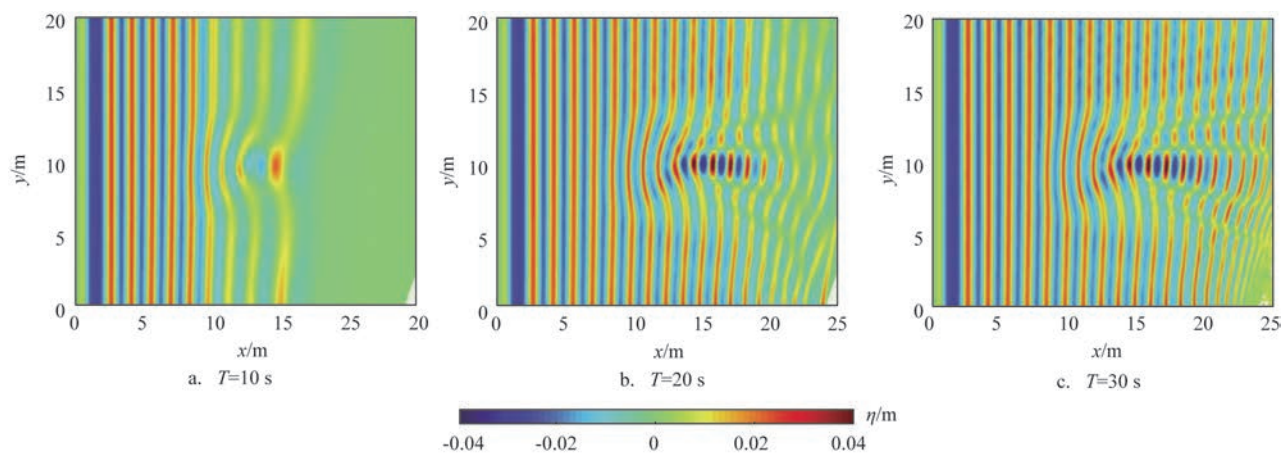
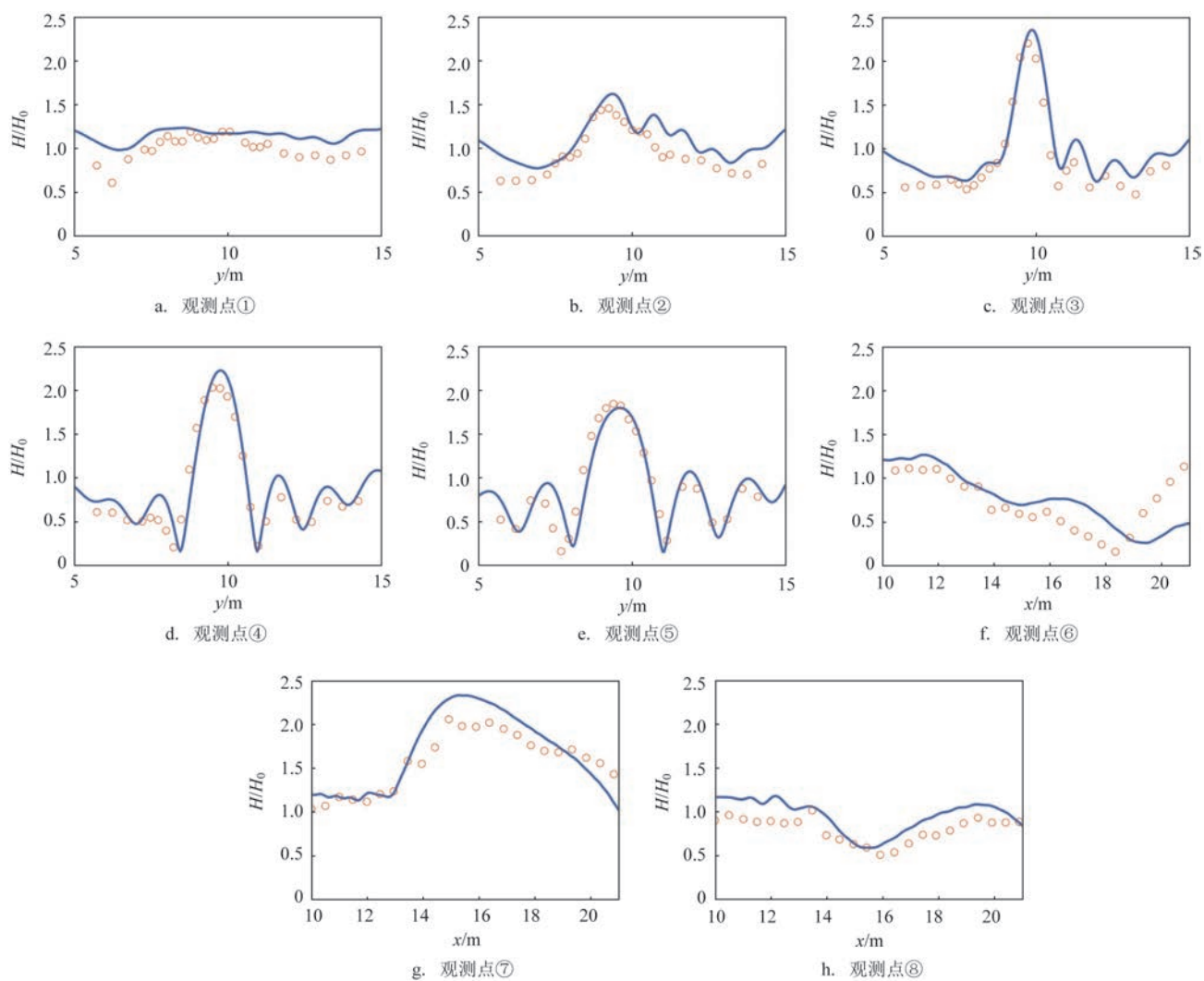
图7 不同 T 时刻波面分布图Fig.7 Wave surface elevation distribution diagram at different T time

图8 各断面处波高比的模型结果与实测数据(○)的对比

Fig.8 The comparison of wave-height ratio at each section between model results and measured data (○)

(FUNWAVE - GPU) 与 FUNWAVE 的 CPU 版本 (FUNWAVE-TVD) 进行对比。实验中 CPU 参数为: AMD 7452, 时钟频率为 2.35 GHz, 64 核心, 浮点运算能力为 4.8 TFLOPs; GPU 参数为: NVIDIA GeForce RTX 3080, 加速时钟频率为 1.71 GHz, 8 704 个流处理器单元, 浮点运算能力为 29.7 TFLOPs。

加速比主要取决于分别用于 CPU 版本和 GPU 对应版本的硬件、工作负载和算法^[17]。在考虑计算成本的情况下, 为了使 CPU 和 GPU 设备相匹配, CPU 选取 36 核心进行并行计算。CPU (36 核) 模型的计算时间为 110.25 s, GPU 模型的计算时间为 85.98 s。值得注意的是, BERKHOFF 实验运行过程中的 GPU 占用率维持在 76% 左右, 未完全占用 GPU 内存 (1.8/10 GB), 但 GPU 模型的计算效率仍优于 CPU 模型, 加速比达到 1.28。

3 结论

本文采用基于完全非线性 Boussinesq 方程的 FUNWAVE-GPU 模型, 对规则波在潜堤地形和缓坡地形的传播进行数值模拟和结果分析, 并简要对 FUNWAVE-GPU 模型和 FUNWAVE-TVD 模型的计算效率进行了分析。结论如下:

① FUNWAVE-GPU 模型能够较好地模拟规则波跨越潜堤的非线性传播变形。模拟结果与实测数据在堤顶处吻合度较高, 堤后精度略差; 模型在缓坡地形上的模拟结果与实测数据吻合良好, 能够有效地体现海浪的折射和绕射等现象。

② 由 WILLMOTT 方法评估的结果来看, 在两潜堤实验中, 当网格分辨率为 0.02 m 时, 平均 G 值达到 0.933, 说明模型结果与实测数据匹配度较高; 网格分辨率为 0.02 m 的平均 G 值大于网格分辨率为 0.05 m 和 0.10 m 时的 0.916 和 0.817, 且网格越精细, 模型精度越高。

③ 将本模型与 CPU 版本模型的计算效率进行对比, 在考虑计算成本和硬件的情况下, CPU 版本选取 36 核心 CPU、GPU 版本选取 RTX 3080 显卡进行计算, GPU 在未完全占用显卡性能的情况下仍起到了加速作用, 加速比达到 1.28。

参考文献:

[1] 冯芒, 沙文钰, 朱首贤. 近岸海浪几种数值计算模型的比较[J]. 海

洋预报, 2003, 20(1): 52-59.

FENG M, SHA W Y, ZHU S X. Study on some numerical methods calculating waves in shore[J]. Marine Forecasts, 2003, 20(1): 52-59.

[2] 李孟国, 王正林, 蒋德才. 近岸波浪传播变形数学模型的研究与进展[J]. 海洋工程, 2002, 20(4): 43-57.

LI M G, WANG Z L, JIANG D C. A review on the mathematical models of wave transformation in the nearshore region[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(4): 43-57.

[3] PEREGRINE D H. Long waves on a beach[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 27(4): 815-827.

[4] NWOGU O. Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1993, 119(6): 618-638.

[5] WEI G, KIRBY J T, GRILLI S T, et al. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 294: 71-92.

[6] CHEN Q, DALRYMPLE R A, KIRBY J T, et al. Boussinesq modeling of a rip current system[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104(C9): 20617-20637.

[7] MADSEN P A, SØRENSEN O R, SCHÄFFER H A. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves[J]. Coastal Engineering, 1997, 32(4): 255-287.

[8] GOBBI M F, KIRBY J T. A fourth order Boussinesq-type wave model[C]//25th International Conference on Coastal Engineering. Orlando: ASCE, 1996: 1116-1129.

[9] 邹志利. 高阶 Boussinesq 水波方程[J]. 中国科学(E 辑), 1997, 27(5): 460-473.

ZOU Z L. High-order Boussinesq equations[J]. Science in China (Series E), 1997, 27(5): 460-473.

[10] 邹志利. 高阶 Boussinesq 水波方程的改进[J]. 中国科学(E 辑), 1999, 29(1): 87-96.

ZOU Z L. Improvement of high-order Boussinesq equations[J]. Science in China (Series E), 1999, 29(1): 87-96.

[11] SHI F Y, KIRBY J T, HARRIS J C, et al. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation[J]. Ocean Modelling, 2012, 43-44: 36-51.

[12] 张尧, 谢欣, 陶爱峰, 等. Boussinesq 相位解析的海岸水动力学数学模型研究进展[J]. 海洋通报, 2018, 37(5): 481-493.

ZHANG Y, XIE X, TAO A F, et al. Review of Boussinesq phase-resolving coastal hydrodynamic model[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(5): 481-493.

[13] KIM B, OH C, YI Y, et al. GPU-accelerated boussinesq model using compute unified device architecture FORTRAN[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 85(sp1): 1176-1180.

[14] 孙家文, 朱桐, 房克照, 等. 基于 GPU 加速的 Boussinesq 类波浪传播变形数值模型[J]. 海洋工程, 2020, 38(2): 111-119.

- SUN J W, ZHU T, FANG K Z, et al. A GPU accelerated Boussinesq wave propagation model[J]. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(2): 111-119.
- [15] KIRBY J T, WEI G E, CHEN Q, et al. FUNWAVE 1.0: fully nonlinear Boussinesq wave model[M]//Center for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware. Documentation and User's Manual. Newark: University of Delaware, 1998.
- [16] SHI F Y, DALRYMPLE R A, KIRBY J T, et al. A fully nonlinear Boussinesq model in generalized curvilinear coordinates[J]. *Coastal Engineering*, 2001, 42(4): 337-358.
- [17] YUAN Y, SHI F Y, KIRBY J T, et al. FUNWAVE-GPU: multiple-GPU acceleration of a boussinesq-type wave model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, 12(5): e2019MS001957.
- [18] 杨怀玮, 原野, 高义, 等. 裂流危险性的数值预报方法及其在三亚大东海浴场的应用[J]. *海洋预报*, 2022, 39(2): 59-69.
- YANG H W, YUAN Y, GAO Y, et al. A numerical forecasting method of the hazard of rip current and its application in Dadonghai beach, Sanya[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(2): 59-69.
- [19] CHEN Q, KIRBY J T, DALRYMPLE R A, et al. Boussinesq modeling of longshore currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C11): 3362.
- [20] LARSEN J, DANCY H. Open boundaries in short wave simulations — A new approach[J]. *Coastal Engineering*, 1983, 7(3): 285-297.
- [21] TORO E F. Splitting schemes for PDEs with source terms[M]//TORO E F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction*. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 531-542.
- [22] TONELLI M, PETTI M. Hybrid finite volume – finite difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(5-6): 609-620.
- [23] DINGEMANS M W. Comparison of computations with Boussinesq-like models and laboratory measurements[R]. Deltares (WL), 1994.
- [24] OHYAMA T, KIOKA W, TADA A. Applicability of numerical models to nonlinear dispersive waves[J]. *Coastal Engineering*, 1995, 24(3-4): 297-313.
- [25] WILLMOTT C J. On the validation of models[J]. *Physical Geography*, 1981, 2(2): 184-194.
- [26] BERKHOFF J C W, BOOY N, RADDER A C. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves[J]. *Coastal Engineering*, 1982, 6(3): 255-279.

Numerical simulation of nearshore wave propagation deformation based on FUNWAVE-GPU model

LIN Huadong¹, LI Benxia^{1,2,3*}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the FUNWAVE-GPU model is used to simulate the nonlinear propagation deformation of coastal waves on typical submerged bars and mild slope. The comparison with the measured data shows that the model can correctly simulate the reflection, refraction and diffraction of waves on the nearshore complex terrain. The spatial step has a great influence on the numerical simulation result. The GPU parallel acceleration technology can improve the computational efficiency of the model effectively.

Key words: Boussinesq equation; FUNWAVE-GPU; nearshore waves; nonlinear variations; GPU technology