

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.02.011

河口海岸水动力非静压数学模型研究述评

时健^{1,2}, 郑金海^{1,2}, 严以新^{1,2}, 童朝锋^{1,2}, 王岗^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在回顾非静压模型发展历程的基础上, 概述了其基本方程、常用的数值计算及网格设置方法。针对非静压模型计算效率低的问题, 综述了现有 3 类提高计算效率方法的优缺点。分析了非静压模型与静压模型在控制方程和数值方法方面的差异, 归纳了非静压模型在近岸波浪传播变形以及河口斜压问题的应用情况。已有研究表明, 非静压模型在近岸波浪传播变形、波浪与建筑物相互作用以及河口盐淡水混合的模拟研究中具有优势。但在计算效率、边界条件、浅水非线性、波浪破碎和实际应用等方面还存在需要解决的问题, 针对这些问题提出了今后的研究方向。

关键词: 非静压模型; 波浪模拟; 密度流; 河口海岸水动力; 综述

中图分类号: TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)02-0167-08

Review of non-hydrostatic numerical models for estuarial and coastal hydrodynamics

SHI Jian^{1,2}, ZHENG Jinhai^{1,2}, YAN Yixin^{1,2}, TONG Chaofeng^{1,2}, WANG Gang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The governing equations, discretization method, and grid configuration of non-hydrostatic models are summarized based on review of the development of non-hydrostatic models. As the main limitation of non-hydrostatic models is the low computational efficiency, three kinds of approaches to improving the models' efficiency are analyzed. Moreover, the main differences in the governing equations and numerical method between the non-hydrostatic and hydrostatic models are examined. The applications of non-hydrostatic models in coastal wave transformation and estuarine baroclinic problem are shown. The performances of non-hydrostatic models in these cases show that the models have advantages in simulating wave transformation, wave-structure interactions, and fresh water-salt water mixing in estuarial areas. Nevertheless, there are still many problems in the computational efficiency, boundary conditions, shallow-water nonlinearity, wave breaking, and practical applications of non-hydrostatic models. Finally, based on these problems, future directions for non-hydrostatic models are presented.

Key words: non-hydrostatic models; wave simulation; density flow; estuarial and coastal hydrodynamics; review

非静压模型的发展始于 20 世纪 90 年代末期, 最早由 Casulli 等^[1]和 Stansby 等^[2]提出。相比静压模型, 非静压模型不但可求解表面波、内波等频散性问题, 也适用于地形变化剧烈、盐度层化明显、水流变化较快等垂向流速变化较大区域水动力的模拟。同时, 由于非静压模型中假设自由表面水位是水平位置的单值函数, 简化了自由表面的求解, 计算效率比直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)要高。目前, 非静压模型已成为河口海岸水动力数值模拟领域的研究热点, 出现了很多开源程序代码, 如 NHWAVE^[3]、

收稿日期: 2016-06-21

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51425901); 国家自然科学基金(51339005); 国家重点研发计划(2016YFC1402800)

作者简介: 时健(1987—), 男, 山东日照人, 讲师, 博士, 主要从事非静压模型及盐淡水混合研究。E-mail: jianshi@hhu.edu.cn

通信作者: 郑金海, 教授。E-mail: jhzheng@hhu.edu.cn

SWASH^[4]、SUNTANS^[5],也有在静压模型考虑非静压效应的改进,如 FVCOM-NH^[6], ROMS^[7]等。非静压模型一般有以下3个共同特征:(a)采用分步法。将压力值分为静压部分和动压部分,静压项参与动量方程的计算,动压值由压力泊松方程计算得到;(b)控制方程离散格式都采用 Godunov 型的有限体积法。Godunov 格式可以提供 Riemann 问题的精确解和近似解,从而精确模拟波浪破碎等非连续问题;(c)垂向采用 σ 坐标。这是由非静压模型的适用区域决定的,非静压模型适用于垂向流速变化较大的区域,采用 σ 坐标可使模型能够更好地适应地形变化的需要。非静压模型作为一类全离散模型,最早应用于波浪传播及破碎的模拟中,包括高频驻波、孤立波、海啸等的模拟。由于直接求解 Naiver-Stokes 方程,非静压模型在求解波生流问题时不需要耦合波浪模型,因此也被应用于近岸沿岸流、裂流等的模拟。盐度、泥沙等物质输移的非静压模拟,垂向需要较多的计算网格,现有的计算条件难以进行大范围三维模拟,所以这方面的应用较少。但随着多核并行计算的推广,非静压模型在河口海岸水动力模拟中的重要性将日益凸显^[8]。本文简要回顾了非静压模型的基本方程与数值方法,对比非静压模型与静压模型的主要差异,归纳非静压模型的应用情况,并提出值得深入研究的课题。

1 非静压模型基本方程与数值方法

1.1 控制方程

非静压模型直接求解不可压缩 Naiver-Stokes 方程, σ 坐标下的动量方程为

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \nabla \cdot \Theta(\Psi) = S$$
 (1)

其中 $\Psi = \begin{pmatrix} Du \\ Dv \\ Dw \end{pmatrix}$ $\Theta(\Psi) = \begin{pmatrix} \left[Duu + (\frac{1}{2}gD^2 + gh\eta) \right] i + Duvj + u\omega k \\ Duv i + \left[Dvv + (\frac{1}{2}gD^2 + gh\eta) \right] j + v\omega k \\ Duw i + Dvw j + w\omega k \end{pmatrix}$

式中: $D = h + \eta$ ——总水深; η ——水位; h ——静水深; u, v, w ——沿 x, y, z 方向流速; ω —— σ 坐标下垂向流速; g ——重力加速度; S ——源项; i, j, k ——为 x, y, z 方向单位向量。

动量方程右侧源项包含底摩阻 S_h 、动压梯度 S_p 、斜压项 S_r 和紊流扩散项 S_τ , 公式如下:

$$S = S_h + S_p + S_r + S_\tau$$
 (2)

其中 $S_h = \begin{pmatrix} gD \frac{\partial h}{\partial x} \\ gD \frac{\partial h}{\partial y} \\ 0 \end{pmatrix}$ $S_p = \begin{pmatrix} -\frac{D}{\rho}(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*}) \\ -\frac{D}{\rho}(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*}) \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \end{pmatrix}$ $S_r = \begin{pmatrix} -gD(\frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*}) \\ -gD(\frac{\partial r}{\partial y} + \frac{\partial r}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*}) \\ -g \frac{\partial r}{\partial \sigma} \end{pmatrix}$ $S_\tau = \begin{pmatrix} DS_{\tau x} \\ DS_{\tau y} \\ DS_{\tau z} \end{pmatrix}$

式中: p ——动压; x^*, y^* ——笛卡尔坐标下水平分量; ρ ——水体密度; r ——斜压项; $S_{\tau x}, S_{\tau y}, S_{\tau z}$ ——紊动扩散项分量; τ ——切应力

计算采用分步法,在模型计算的每个迭代过程,首先通过求解不含动压项的动量方程得到速度过渡值(u^*),然后将 u^* 带入压力泊松方程,求解得到动压力值(p),并用 p 修正 u^* 得到真正的速度值(u)。因此, x, y, z 方向的速度值可以写成如下形式:

$$\begin{cases} u^{(k)} = u^* - \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} \right)^{(k)} \\ v^{(k)} = v^* - \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} \right)^{(k)} \\ w^{(k)} = w^* - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{1}{D^{(k)}} \frac{\partial p^{(k)}}{\partial \sigma} \end{cases}$$
 (3)

式中: u^* 、 v^* 、 w^* ——速度过渡值; Δt ——时间步长。

将方程(3)带入连续性方程,可得压力泊松方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} + \left[\left(\frac{\partial \sigma}{\partial x^*}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial y^*}\right)^2 + \frac{1}{D^2}\right] \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\partial p}{\partial \sigma}\right) = \frac{\rho}{\Delta t}\left(\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial u^*}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial v^*}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} + \frac{1}{D} \frac{\partial w^*}{\partial \sigma}\right) \tag{4}$$

自由表面控制方程可由连续性方程沿水深积分得到:

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D \int_0^1 u d\sigma\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D \int_0^1 v d\sigma\right) = 0 \tag{5}$$

1.2 数值计算方法

非静压模型的数值离散格式一般采用 Godunov 型有限体积法离散动量方程,能够在计算区域内精确满足质量、动量守恒,结合黎曼问题近似解 HLL(Harten Lax and van Leer)方法,可使模型具有间断捕捉能力。压力泊松方程采用中心差分格式离散,为保证模型达到二阶精度,时间积分采用二阶龙格-库塔迭代法。

1.3 网格设置

早期的非静压模型网格设置采用交错网格,垂向上压力值被放置在网格中央,因此在最上部网格点与自由表面间存在半个网格的间距,无法直接应用自由表面压力边界条件。通常做法是在这半个网格中假设压力符合静压假设,而表面波引起的动压值在自由水面处以下很小区域达到最大值,并随着深度的增大而迅速减小,所以这一假设会引入误差,从而影响非静压模型对波浪的模拟精度。为减小这一假设的影响,在波浪模拟中一般需要 10 ~ 20 层垂向网格才能较准确地模拟表面波浪的传播变化过程,这增加了非静压模型的计算时间。减少非静压模型精确计算所需的垂向网格数成为早期研究重点方向,Young 等^[9]利用 Boussinesq 方程优化动压在最上层的分布,准确模拟了表面波动。Yuan 等^[10]通过在顶部网格对速度进行积分求得最上层网格的动压分布,精确模拟了高频波浪的传播过程,并与传统非静压模型对比,得出最上层动压值应用静压假设严重影响计算精度的结论。Stelling 等^[11]提出了 Keller-box 模式,该模式在垂直方向将动压值设置在网格界面,从而在顶部网格动压值的表达不需要任何假设,可以直接应用自由表面边界条件。这些方法的提出显著减少了非静压模型计算所需的垂向网格层数,采用相对较少的垂向层数(3 ~ 5 层)均可模拟高频波。

1.4 计算效率的优化方法

目前,非静压模型的并行计算多基于 MPI (message passing interface)并行技术,但即使采用多核并行计算,在进行大范围模拟时,网格还是较多,计算非常耗时。主要原因是在分步法过程中,求解泊松方程极为耗时,一般占总时间的 30% ~ 50%,而且在计算网格比较多时,求解泊松方程的机时占总机时的比重会迅速增加。在 NHWAVE 模型算例中,求解泊松方程的时间最多占总耗时的 70% 以上。所以,应从优化泊松方程的计算入手研究提高非静压模型计算效率的方法。

现有的提高非静压模型计算效率的方法主要有 3 类:(a)不求解泊松方程,直接将动量方程在垂向积分求得动压值的水平向梯度值。此方法的优点是不需要计算泊松方程,且采用显式计算,计算效率较高,但计算存在不稳定问题。Klingbeil 等^[12]对此方法进行了验证,认为在满足不可压缩性与动量平衡的前提下此方法会影响模型的稳定性,需要应用过滤器压制模型的不稳定性。除此之外,模型收敛需要比较多的循环次数,这增加了模型的计算时间。因此,直接垂向积分求解动压值的方法仅能应用于弱动压作用的情况。(b)简化泊松方程的计算。Bermtsen 等^[13]提出一种在 σ 坐标系中求解泊松方程的简化办法,但是此方法的计算误差随地形坡度增大而增大。Scotti 等^[14]把泊松方程求解简化为求解与网格长宽比有关的 3 项,此方法可用于模拟非线性内波问题,但是网格限定于长宽比小于 2。Cui 等^[15]通过把动压在底层的分布参数化,减小了求解泊松方程的计算量,从而提高了非静压模型的计算效率,这种方法垂向仅有 2 层网格时效果比较明显,多层网格时对计算效率的提高很有限。(c)分离计算泊松方程与其他方程的计算网格,采用粗网格求解泊松方程,细网格求解其余方程。van Reeuwijk^[16]建立了基于此方法的垂向二维非静压波浪模型。Shi 等^[17]认为波浪频散性的模拟不需要特别精细的网格,提出了提高非静压模型计算效率的 PDI(pressure

decimation and interpolation method)方法,并将PDI方法应用于驻波及密度流的模拟中,当垂向计算层数较多时,应用PDI方法可有效减少模型的计算时间。测试算例中,垂向压力网格在减少90%的情况下,求解泊松方程的计算时间可减少80%以上。Kirby^[8]认为在非静压模型中采用泊松方程与其他方程网格分离技术提高计算效率很有前景。

2 非静压模型与静压模型对比分析

河口海岸水域一般具有宽浅特性,为提高计算效率一般采用静压模型模拟。典型的静压模型有ROMS^[18]、Delft3D^[19]、FVCOM^[20]、HHU-ECR3D^[21]、MIKE21^[22]等,这些模型已广泛应用于河口海岸的工程实际和相关研究中。但静压模型难以精确模拟非静压作用产生的高频表面波、内波及剧烈的垂向混合,在河口盐淡水垂向混合以及水体底部紊动细部结构的高精度模拟中,非静压模拟的计算精度与DNS模型相当^[23-24],这也是静压模型不能比拟的。非静压模型与静压模型的差异主要体现在以下2个方面:

a. 控制方程。非静压模型基于不可压缩Navier-Stokes方程,静压模型基于忽略动量方程动压项的浅水方程。动压项对垂向流速的影响最大,所以两类模型计算结果的差异主要体现在垂向流速分布上。Navier-Stokes方程为描述水流运动的基本方程,非静压模型不仅适用于潮波传播、盐度、泥沙等物质输移的模拟,也可用于高频波浪的模拟。在波流相互作用的研究中,非静压模型也不需要耦合波浪模型进行计算,可以避免不同模型数据交换产生的误差。

b. 数值方法。静压模型计算过程普遍采用模式分裂法求解,将控制方程分为沿垂向积分的外模式和计算垂向分布的内模式,为保证物质守恒,内模式计算流速需经外模式修正。非静压模型则多采用直接并行三维计算,也有非静压模型借鉴静压模型中模式分裂法的研究^[6],但因非静压模型能够精确求解流速的垂向分布,在模式修正步则采用垂向计算值修正水平值。静压模型数值离散方法多采用有限差分法不同,非静压模型则采用Godunov型有限体积法离散动量方程,此方法使模型能够模拟不连续问题,但对于急变水流附近导数限制器引入的数值耗散值得进一步研究^[8]。

3 非静压模型在近岸波浪模拟中的应用研究

波浪是港口、航道、海岸及海洋工程建设和防护的关键动力因素。受地形及建筑物的影响,近岸波浪传播存在折射、反射、绕射、破碎等物理过程,准确模拟波浪从深水到近岸传播变形的模拟需同时考虑以上物理过程,计算较为复杂。近岸波浪传播常用的数学模型是Boussinesq类波浪模型,此类模型能够模拟近岸波浪的传播变形过程,但求解波浪频散范围存在限制,模型对于高阶项的求解能够扩展频散模拟范围,但计算量会显著提高。非静压模型基于不可压缩Navier-Stokes方程,为全频散模型,克服了Boussinesq类模型计算波浪频散范围的限制,采用Godunow型有限体积法,具有激波捕捉能力,适用于溃坝波、波浪破碎等不连续问题的模拟。

3.1 波浪传播变形

非静压模型最先在近岸波浪浅水变形、反射、折射、绕射等物理现象的模拟中都取得了较好的模拟效果。艾丛芳^[25]采用半隐、分步法建立了具有自由表面的三维非静压模型,通过对波浪浅水变形、折射、绕射等现象的精确模拟,验证了非静压模型的有效性。吕彪^[26]基于非结构网格建立了可以模拟具有自由表面的二、三维水波运动的数值模型,在表层采用对垂向动量方程积分的方式得到表层动压值的分布,从而可采用较少的垂向分层数模拟波浪的传播过程,提高了模型的计算效率。Lai等^[6]基于FVCOM建立了非静压模型FVCOM-NH,模拟了驻波的传播及孤立波受地形影响的传播变形过程,模型计算结果与理论解及物理模型结果较为吻合。陈同庆^[27]对非静压模型SUNTANS中水平涡黏系数的计算方法和网格参数的计算方面进行了优化,提高了模型的稳定性,并应用改进的模型模拟了我国南海东北部孤立波的形成和发展过程。王岗等^[28]将欧拉方程通过泰勒级数展开推导出水平方向最高导数为二阶的新型非静压波浪数值模式,在垂向各层交界处匹配连续条件,三层即可应用于 $kd \leq 10\pi$ 的范围,具有空间导数低和易于数值求解的优势,但在浅水非线性计算方面仍需进一步探讨。

非静压模型也被应用于海啸波的模拟。相比静压模型,非静压模拟能够考虑海啸波的弥散性,模拟结

果更加准确^[29];相比 Boussinesq 类波浪模型,它可以模拟地震、滑坡等海啸的产生过程,还能同时模拟滑坡引起的泥沙运动^[30]。由于目前非静压模型计算效率较低,在大范围海啸波的模拟中,也有采用非静压模型与 Boussinesq 类波浪模型相结合的方法。Grilli 等^[31]利用 NHWAVE 模拟了美国东海岸海底地震导致的海啸产生过程,耦合 FUNWAVE 对海啸波从深水传播到近岸的过程进行了模拟。

3.2 波浪破碎及增水

非静压模型具有激波捕捉能力,耦合 $k-\epsilon$ 、大涡模拟等紊流模型,可以精确模拟波浪破碎过程中的波面变化及紊动过程。Bradford^[32]利用非静压模型模拟了近岸波浪破碎过程,结果显示非静压模型的计算精度与 DNS 模型精度相当。张娜等^[33]应用非静压 SWASH 模拟规则、不规则波作用下的波浪在斜坡上的传播变形、破碎与越浪过程。房克照等^[34]建立了非静压模型模拟波浪破碎问题,并借鉴 Boussinesq 波浪模型中处理破碎波浪的思路,引入波浪破碎指标,将破碎波处理为间断,由静压步中的非线性浅水方程自动捕捉。目前非静压模型对波浪破碎的模拟还存在争议。Smit 等^[35]认为在破碎带内需关闭非静压项,否则需大幅度增加垂向网格数。Ma 等^[3]及 Derakhti 等^[36]研究表明 NHWAVE 对波浪破碎的模拟无需增加垂向网格数,也无需关闭非静压项。这说明非静压模型中对于急变水流处的数值处理方式还值得研究,在采用 Godunov 类型有限体积法离散的模型中,急变水流附近导数限制器引入的数值耗散是总能量耗散的重要组成部分,未来对于此问题的解决也是很有意义的研究课题^[8]。

3.3 波浪与建筑物相互作用

在波浪与建筑物相互作用的数值模拟研究中,其中以基于 VOF 技术的 DNS 模型应用最多。这类模型计算精度较高,但计算耗时较多,因此计算范围一般较小。非静压模型能够克服 DNS 模型缺陷,无需采用自由表面追踪技术,计算效率得以提高。Ma 等^[37]将非静压模型 NHWAVE 应用于波浪与透水建筑物的相互作用模拟中,结果显示非静压模型不仅能够准确模拟波浪的反射、绕射、破碎及在透水建筑物内的传播,对于建筑物周围紊流场的分布也能精确计算。Casulli 等^[38]利用 SWASH 研究了受潜堤影响的波浪变形,模型计算结果与物理模型试验吻合较好。值得注意的是由于假设波面是位置的单值函数,非静压模型难以模拟建筑物底部透水表面露出水面的情况。

3.4 植物对波浪传播的影响

植物对波浪传播的影响是近年来波浪模拟的热点之一。相位平均波浪模型能够模拟波浪经过植物后的波高分布,但无法模拟瞬时的波面变化;波浪解析模型不仅能够模拟波面的变化,也能模拟水流的三维特性以及紊动过程。非静压模型作为波浪解析模型的一种,也被应用于波浪与植物的相互作用研究中^[39]。Li 等^[40]利用非静压模型研究了植物引起的波浪衰减,但未考虑波浪破碎的情况。Ma 等^[41]模拟了随机波受植物影响的破碎过程,发现波浪受植物影响,在植物存在区域形成较强的离岸流,而在不受植物影响区域形成向岸流。这些研究都假设植物为刚体,未考虑波浪引起的植物形变。

此外,非静压模型在波浪与船舶相互作用^[42]、浮冰引起的波浪问题^[43]中也有应用,也有学者研究了非静压模拟与大范围波浪谱模型的嵌套问题^[44]。不过,目前的研究多是基于实验室尺度的模拟,实际应用较少,未来非静压模型的应用需增加实际海岸波浪的模拟,从而更好地研究和解决实际问题。

4 非静压模型在河口斜压问题中的应用研究

非静压模型在地形突变、密度分层明显、水流急剧变化等垂向物理量变化较大水域的模拟中独具优势,在河口盐淡水分层混合以及内部水跃的模拟中应用较多。

a. 河口盐淡水混合。在河口盐淡水混合过程中,会产生内波、Kelvin-Helmholtz (K-H) 不稳定性等一系列非静压现象。内波由于具有频散性,基于等密度面坐标的非静压模型在内波的模拟中应用较多^[45],这类模型可以采用较少的垂向分层数模拟内波的传播。K-H 不稳定性研究的经典算例为 Lock-Exchange^[46-47] (LE) 算例,非静压模型对 LE 算例的模拟精度可以与 DNS 方法相媲美,且能大幅减少计算时间。河口高精度的非静压模拟目前多是垂向二维模拟。Wang 等^[48]利用 SUNTANS 对 Macrotidal 河口盐淡水混合过程进行了高精度模拟,并对比了非静压模型与静压模型计算结果,认为非静压项对径流、潮流结果的影响较小,但对于盐淡水混合过程中小尺度紊动结构的模拟至关重要。Vlasenko 等^[49]对美国 Columbia 河口冲淡水过程进行

了高精度非静压模拟,水平网格约为 12.5 m,模型捕捉到河口内波的形成和衍化过程,结果与实测一致。模型可以准确地模拟河口盐淡水混合过程中内波的传播及剪切应力引起的混合,但是对于 K-H 涡精细结构的模拟需要更为细密的网格。时健^[50]对长江口北槽盐淡水垂向混合过程进行了非静压垂向二维模拟,模型最小网格仅为 2.5 m,成功捕捉到 K-H 涡的存在,并分析了长江口北槽 K-H 涡的尺度和持续时间。

b. 内部水跃。分层流受地形凸起的影响,易形成内部水跃。内部水跃的发生往往伴随剧烈的垂向水体交换,促进分层流的混合。现有内部水跃的数值模拟以垂向二维居多,Cummins^[51]利用垂向二维非静压模型研究了 Knight 湾水跃的发生和传播过程,结果显示水跃的产生既受上游来流量的影响也受变化的潮汐作用,同时与弗洛德数的大小密切相关,然而他们未能很好地模拟边界层分离的产生。为解决这一问题,Lamb^[52]在模型中增加了垂向涡黏扩散项和无滑移边界条件,从而验证了 Cummins 的结论,模型模拟的高阻尼状态明显延后。Berntsen 等^[53]研究了不同网格尺度下动压在水跃形成的作用,结果显示动压对速度场与温度场的影响随网格尺度的减小而增大。

5 结 语

非静压模型经历了近 20 a 的发展,在波浪传播变形和河口斜压问题中都得到成功应用,但在计算效率、边界条件、浅水非线性、波浪破碎和实际工程应用方面存在需要解决的问题。

a. 计算效率的提高。首先现有的非静压模型效率提高方法的验证算例都较少,能否将这些方法应用于更复杂的算例进行长时间模拟,需要进一步验证。其次网格分离方法的适用范围及如何减少网格数也是需要进一步研究的问题。

b. 边界条件的优化。非静压模型波面是位置单值函数的假设使得现有非静压模型难以模拟建筑物造成的自由波面不连续的情况,浸没边界条件的引入可能会解决这一问题,但需要进一步证实。同时如何在垂向流速较大的情况下避免侧边界的反射,也是非静压模型需克服的难点。

c. 浅水非线性的改进。非静压模型在模拟极浅水非线性波浪与经典 Stokes 理论有一定出入,究其原因可能是数值格式的因素或非静压模型理论推导过程中忽略了波浪在浅水区的运动特性,这需从理论上深入探讨。

d. 波浪破碎的处理。三维非静压模型未对破波点能量耗散进行特殊处理,此过程中数值耗散和物理耗散的相互影响的研究还较少。非静压模型也未对自由表面应力、水滚区及波前波形做细致刻画,在计算平均流速及紊流时需特别处理,精确的波浪破碎过程模拟需进一步研究。

e. 实际工程的应用。实际河口海岸区域大多具有宽浅特性,非静压效应显著的区域可能仅局限于地形变化较大或者盐水楔区域,如何在静压模型中引入非静压效应参数,仅在非静压效应明显区域采用非静压模拟以节省计算时间,是值得研究的课题。此外,非静压模型对实际工程三维水动力的模拟精度,也需通过实测资料进行验证和检验。

参考文献:

[1] CASULLI V, STELLING G. Numerical simulation of 3D quasi-hydrostatic, free-surface flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(7):678-686.

[2] STANSBY P, ZHOU J G. Shallow-water flow solver with non-hydrostatic pressure: 2D vertical plane problems [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 28(3):541-563.

[3] MA Gangfeng, SHI Fengyan, KIRBY J T. Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes [J]. Ocean Modelling, 2012, 43/44:22-35.

[4] ZIJLEMA M, STELLING G, SMIT P. SWASH: an operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters [J]. Coastal Engineering, 2011, 58(10):992-1012.

[5] HEGGELUND Y, VIKEB F, BERNTSEN J, et al. Hydrostatic and non-hydrostatic studies of gravitational adjustment over a slope [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(18):2133-2148.

[6] LAI Zhigang, CHEN Changsheng, COWLES G W, et al. A nonhydrostatic version of FVCOM: 1. validation experiments [J].

- Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C11):73-77.
- [7] KANARSKA Y, SHCHEPETKIN A, MCWILLIAMS J C. Algorithm for non-hydrostatic dynamics in the regional oceanic modeling system[J]. Ocean Modelling, 2007, 18(3/4): 143-174.
- [8] KIRBY J T. Boussinesq models and their application to coastal processes across a wide range of scales[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2016, 142(6):03116005.
- [9] YOUNG C C, WU C H. An efficient and accurate non-hydrostatic model with embedded Boussinesq-type like equations for surface wave modeling[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 60(1):27-53.
- [10] YUAN H, WU C H. An implicit three-dimensional fully non-hydrostatic model for free-surface flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2004, 46(7):709-733.
- [11] STELLING G, ZIJLEMA M. An accurate and efficient finite-difference algorithm for nonhydrostatic free-surface flow with application to wave propagation[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2003, 43(1):1-23.
- [12] KLINGBEIL K, BURCHARD H. Implementation of a direct nonhydrostatic pressure gradient discretization into a layered ocean model[J]. Ocean Modelling, 2013, 65(5):64-77.
- [13] BERNTSEN J, FURNES G. Internal pressure errors in sigma-coordinate ocean models-sensitivity of the growth of the flow to the time stepping method and possible nonhydrostatic effects[J]. Continental Shelf Research, 2005, 25(7):829-848.
- [14] SCOTTI A, MITRAN S. An approximated method for the solution of elliptic problems in thin domains: application to nonlinear internal waves[J]. Ocean Modelling, 2008, 25(3):144-153.
- [15] CUI Haiyang, PIETRZAK J, STELLING G. Optimal dispersion with minimized Poisson equations for non-hydrostatic free surface flows[J]. Ocean Modelling, 2014, 81(9):1-12.
- [16] van REEUWIJK M. Efficient simulation of non-hydrostatic free-surface flow[D]. Delft :Delft University of Technology, 2002.
- [17] SHI J, SHI F, KIRBY J T, et al. Pressure decimation and interpolation (PDI) method for a baroclinic non-hydrostatic model[J]. Ocean Modelling, 2015, 96(1):265-279.
- [18] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(4):347-404.
- [19] STELLING G S. On the construction of computational methods for shallow water ow problems[D]. Delft: Delft University of Technology, 1983.
- [20] CHEN Changsheng, LIU Hedong, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1):159-186.
- [21] ZHENG Jinhai, YAN Yixin, ZHU Yuliang. Three dimensional baroclinic numerical model for simulating fresh and salt water mixing in the Yangtze Estuary[J]. China Ocean Engineering, 2002, 16(2):227-238.
- [22] WARREN I R, BACH H K. MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas[J]. Environmental Software, 1992, 7(4):229-240.
- [23] ZHANG Shuang, ALFORD M H. Instabilities in nonlinear internal waves on the Washington continental shelf[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(7), 5272-5283.
- [24] HORNER-DEVINE A R, HETLAND R D, MacDonald D G. Mixing and transport in coastal river plumes[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2015, 47, 569-594.
- [25] 艾丛芳. 具有自由表面水流问题模拟研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [26] 吕彪. 基于非结构化网格的具有自由表面水波流动数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
- [27] 陈同庆. 基于非静压模型的南海东北部内孤立波数值模拟研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [28] 王岗, 郑金海. 非静压波浪模型新理论[C]// 中国海洋工程学会. 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [29] SMIT P B. Non-hydrostatic modelling of large scale tsunamis[D]. Delft :Delft University of Technology. 2008.
- [30] MA Gangfeng, KIRBY J T, SHI Fengyan. Numerical simulation of tsunami waves generated by deformable submarine landslides[J]. Ocean Modelling, 2013, 69(3):146-165.
- [31] GRILLI S T, O'REILLY C, HARRIS J C, et al. Modeling of SMF tsunami hazard along the upper US East Coast: detailed impact around Ocean City, MD[J]. Natural Hazards, 2015, 76(2):705-746.

- [32] BRADFORD S F. Godunov-based model for nonhydrostatic wave dynamics[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2005, 131(5):226-238.
- [33] 张娜, 邹国良. 斜坡上波浪破碎与越浪非静压数值模拟[J]. *海洋工程*, 2015(2):32-41. (ZHANG Na, ZOU Guoliang, Numerical simulation of wave transformation and overtopping based on non-hydrostatic model[J]. *The Ocean Engineering*, 2015(2):32-41. (in Chinese))
- [34] 房克照, 孙家文, 刘忠波, 等. 近岸波浪传播的非静压数值模型[J]. *水科学进展*, 2015(1):114-122. (FANG Kezhao, SUN Jianwen, LIU Zhongbo, et al. A non-hydrostatic model for water waves in nearshore region[J]. *Advances in Water Science*, 2015(1):114-122. (in Chinese))
- [35] SMIT P, ZIJLEMA M, STELLING G. Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 76(6):1-16.
- [36] DERAKHTI M, KIRBY J T, SHI F, et al. Wave breaking in the surf zone and deep-water in a non-hydrostatic RANS model. part 1: organized wave motions[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 107:125-138.
- [37] MA Gangfeng, SHI Fengyan, HSIAO S C, et al. Non-hydrostatic modeling of wave interactions with porous structures[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 91:84-98.
- [38] CASULLI V, ZANOLLI P. Semi-implicit numerical modeling of nonhydrostatic free-surface flows for environmental problems [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2002, 36(9):1131-1149.
- [39] LI C W, YAN K. Numerical investigation of wave-current-vegetation interaction[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(7):794-803.
- [40] LI C W, ZHANG M L. 3D modelling of hydrodynamics and mixing in a vegetation field under waves[J]. *Computers & Fluids*, 2010, 39(4):604-614.
- [41] MA Gangfeng, KIRBY J T, SU S F, et al. Numerical study of turbulence and wave damping induced by vegetation canopies[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 80(4):68-78.
- [42] RIJNSDORP D P, ZIJLEMA M. Simulating waves and their interactions with a restrained ship using a non-hydrostatic wave-flow model[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 114:119-136.
- [43] ORZECH M D, SHI Fengyan, VEERAMONY J, et al. Incorporating floating surface objects into a fully dispersive surface wave model[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 102:14-26.
- [44] 邹国良, 张庆河. 非静压方程与波作用谱模型的波浪传播嵌套模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014(1):126-131. (ZOU Guoliang, ZHANG Qinghe. Simulation of wave transformation by nesting the non-hydrostatic equation and wave action spectrum model [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014(1):126-131. (in Chinese))
- [45] VITOUSEK S, FRINGER O B. A nonhydrostatic, isopycnal-coordinate ocean model for internal waves[J]. *Ocean Modelling*, 2014, 83:118-144.
- [46] OZGOKMEN T M, ILIESCU T, FISCHER P F. Large eddy simulation of stratified mixing in a three-dimensional lock-exchange system[J]. *Ocean Modelling*, 2009, 26(3/4):134-155.
- [47] BERSELLI L C, FISCHER P F, ILIESCU T, et al. Horizontal large eddy simulation of stratified mixing in a lock-exchange system[J]. *Journal of Scientific Computing*, 2011, 49(1):3-20.
- [48] WANG B, FRINGER O, GIDDINGS S, et al. High-resolution simulations of a macrotidal estuary using SUNTANS[J]. *Ocean Modelling*, 2009, 26(1/2):60-85.
- [49] VLASENKO V, STASHCHUK N, MCEWAN R. High-resolution modelling of a large-scale river plume[J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(11/12):1307-1320.
- [50] 时健. 河口盐淡水垂向混合的非静压模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- [51] CUMMINS P F. Stratified flow over topography: time-dependent comparisons between model solutions and observations[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2000, 33(1):43-72.
- [52] LAMB K G. On boundary-layer separation and internal wave generation at the Knight Inlet sill[J]. *Proceedings of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2004, 460(2048):2305-2337.
- [53] BERNTSEN J, XING J, DAVIES A M. Numerical studies of internal waves at a sill: sensitivity to horizontal grid size and subgrid scale closure[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(10):1376-1393.