

鄱阳湖水动力形态结构模式的模拟系统设计与应用

赖格英^{1,2}, 潘瑞鑫², 黄小红³

(1. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022; 2. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022;
3. 江西省吉安市气象局, 吉安 343000)

摘要: 在一般的水动力模拟中, 入湖河口的数量和位置基本是不变的。鄱阳湖水位高动态变化的特征, 导致了入湖河口数量和位置变化等特殊的运动边界问题。本文在分析水动力模拟的湖泊形态结构特征的基础上, 概括了高水位湖相型、中水位涨水型、中水位退水型和低水位河相型 4 种水动力形态结构模式, 以解决高水位变幅导致的边界移动、入湖河口数量和位置变化等运动边界序列问题, 4 种水动力形态结构模式之间的运动边界问题, 采用在计算流体力学领域中现有的干-湿网格法运动边界处理技术, 从而形成浅水湖泊复杂边界高动态水位条件下复合模式的运动边界处理方法; 并利用 MapWinGIS 开发控件, 实现了不同模式的边界拟合正交曲线格网的生成与模拟结果的可视化; 系统采用面向对象的 Visual Studio C# 和 Visual Fortran 编程语言, 以松散耦合方式将数据前后处理与交互模块与水动力模拟的核心模块进行集成。利用集成的鄱阳湖水动力模拟系统并采用低水位河相型模式对 1999 年 12 月 6—14 日的鄱阳湖水动力进行了模拟, 模拟结果表明系统具有较好的运动边界处理效果。

关键词: 鄱阳湖; 水动力模拟; 复合模式运动边界; 开发; MapWinGIS

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00447

1 引言

随着水质恶化及富营养化等水环境问题的日益凸显, 对河流、湖泊或河口等进行定量的水环境数值模拟, 已成为理解和解决各类水环境问题的重要方法, 受到不同研究部门和管理部门的广泛关注, 得到了国内外大量的应用^[1-6], 并开发了众多的水环境数值模型, 如 Delft3D、EFDC、WASP 和 CE-QUAL-W2 等就是国内外著名的通用水环境模型^[1,7-10]。在所有这些数值模型中, 水动力模型是其不可或缺的基础。因此, 对水动力模型有关理论的研究及可操作的计算机软件开发具有重要的意义。由于应用这些数值模型进行模拟时, 会涉及到大量的复杂运动边界问题, 同时由于研究区域如河流、湖泊或河口等具有较大范围的空间域, 其模拟的初始条件、边界条件及计算格网无不包含着大量的地理信息, 因而客观上要求这些模型应能较好解决地理信息的前处理和后处理等问题^[11]。

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊, 位于江西省北

部, 其地理坐标为北纬 $28^{\circ}24' \sim 29^{\circ}46'N$, 东经 $115^{\circ}49' \sim 116^{\circ}46'E$, 上承赣、抚、信、修、饶五河, 下接长江, 流域面积约 $162\,225\text{km}^2$ ^[12]。季节变化导致了湖泊水位的高动态变化, “高水似湖, 低水似河”的水文特征, 决定了鄱阳湖的水陆分界线(即边界)是典型的且是高度复杂的运动边界, 其复杂性不仅表现在高动态水位导致了湖岸线的位移, 而且还由于湖岸线的位移引起了入湖河流不同程度的分流与合流, 造成入湖河口数量和空间位置的变化, 直接影响湖泊流场的分布格局。然而, 在一般的水动力模拟模型中, 入湖河口数量和空间位置作为基本边界条件是不变的。因此, 如果采用常规的模拟模型和模拟方法, 其模拟精度必然受到影响。鄱阳湖水位高动态变化所导致的特殊运动边界问题, 一直是鄱阳湖水动力模拟中的一个难题。如何在现有固定边界的模型和数值计算方法中寻求其解决方案, 不仅是鄱阳湖水动力模拟的一项关键技术, 同时也是以水动力为基础的浅水湖泊水环境模拟的一项关键技术。

收稿日期: 2010-05-01; **修回日期:** 2011-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971266); 科技部科技支撑计划课题(2007BAC23B05-04); 江西省科技厅国际合作课题(05201209)。

作者简介: 赖格英(1963-), 男, 江西省寻乌县人, 教授, 博士, 研究方向为湖泊环境模拟。E-mail: laigeying@126.com

本文针对鄱阳湖水位高动态变化的特征,利用不同水位的遥感影像,分析鄱阳湖水动力的形态结构特征,并在此基础上,探讨了浅水湖泊高动态水位条件下复合模式的运动边界处理方法;并利用MapWinGIS开发控件,实现了不同模式的边界拟合正交曲线格网的生成与模拟结果的可视化;系统采用面向对象的编程语言,以松散耦合方式对系统进行了集成。

2 鄱阳湖的水动力形态结构特征分析

图1表示了鄱阳湖主要水位站多年月平均水位的变化情况,从图上可以看出,鄱阳湖大多数水位站的水位变幅都在4~10m之间,而湖口、星子等水位站的水位变幅高达8~10m。高动态的水位变化,导致了高度复杂的运动边界问题,从而又导致了鄱阳湖水文形态结构的变化,其中,包括湖岸线的变化和由于湖岸线移动而导致的入湖河口数量和空间位置的变化,这些水动力形态结构的变化给水动力模拟带来了复杂因素,直接影响了湖泊流场的格局,因而难于用单一模型来解决。为此,在分析鄱阳湖水动力形态结构特征的基础上,本文提出了一种高动态水位条件下复合模式的运动边界处理方法,并将该方法集成到鄱阳湖水动力模拟系统(PLHMS, Poyang Lake Hydrodynamic Modelling System)中。

根据水动力模拟对模拟区域物理边界和河流入口的要求,利用不同时相的Landsat TM/ETM

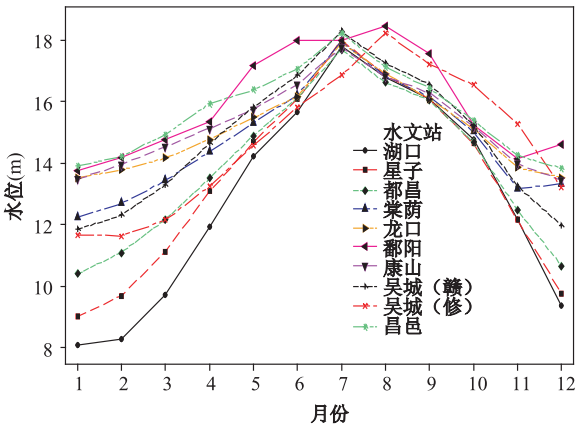


图1 鄱阳湖主要水位站多年月平均水位变化曲线图
Fig. 1 Annual changes of average water level in 10 hydro-stations of Poyang Lake

遥感影像资料,对鄱阳湖不同水位条件下水动力形态/结构(MSHC, Morphological Structure and Hydrological Characteristics)进行分析。

丰水期时的鄱阳湖具有典型的“倒灌型”和“顶托型”特征。鄱阳湖从湖口到外洲等不同水位站的水位大约为18~20m左右,水面南高北低且向西北倾斜,高水面使鄱阳湖呈现出典型的“湖相”特征。由于此时水量较大,入湖河流分流比较明显。根据遥感影像资料分析,此时的鄱阳湖水动力形态/结构特征表现为9个湖泊入口和1个湖泊出口,分别是:修河(入口)、赣江西支(入口)、赣江中支(入口)和赣江南支(入口)、抚河(入口)、信江西支(入口)信江东支(入口)、乐安河(入口)、昌江(入口)和湖口(出口),参见图2(a)。

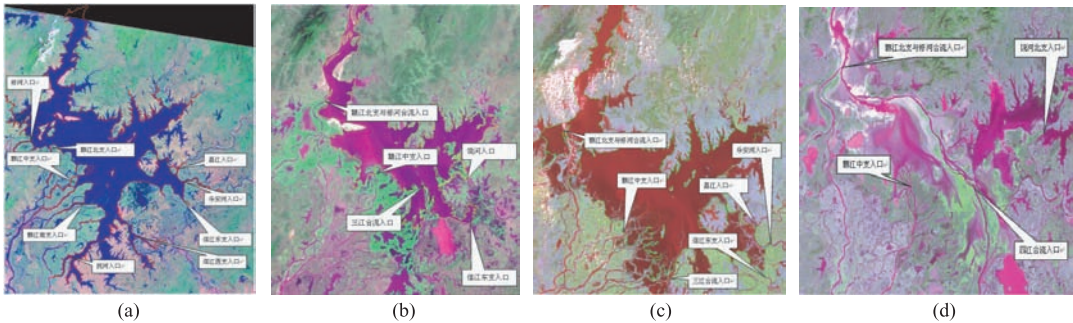


图2 据遥感影像分析的鄱阳湖4种水动力形态/结构模式及特征
Fig. 2 Four patterns of MSHC in Poyang Lake and their characteristics

春季和秋季的鄱阳湖具有典型的“吞吐型”湖流特征,水位从湖口到外洲等不同水位站的水位大约为9~17m。秋季受长江来水影响还偶有“顶托型”特征,且此时鄱阳湖处于退水时期,退水后的湖

区草洲植被茂盛,与春季的草洲有明显的不同,河漫滩的粗糙度较大。因此,把这两个时期的水动力形态/结构分别定为中水位涨水型、中水位退水型概化模式。从鄱阳湖区的遥感影像分析可知,春秋

两季鄱阳湖的水文形态/结构特征比较相似,五河入流都呈现不同的合流状态,但中水位涨水型概化模式有 1 个出口 5 个入口,它们分别为:赣江北支与修河合流入口、赣江中支入口、三江合流入口、信江东支入口、饶河入口、湖口出口,而中水位退水型概化模式则 1 个出口、6 个入口,它们分别为:赣江北支与修河合流入口、赣江中支入口、三江合流入口(赣江南支、抚河和信江西支)、信江东支入口、昌江入口、乐安河入口、湖口出口(见图 2b、图 2c)。

冬季的鄱阳湖处于枯水期,具有典型的“河相型”特征,水位大约为 8~10m 左右,由于地形的影响因素增加,其动力结构更为复杂。由于五河入湖的水量明显减少,湖区边界、中心地带和狭长地带的水动力特征存在比较明显的差异,同时五河入湖出现不同程度的合流和新的分支,根据遥感影像资料分析,五河通过以下 4 个入口汇入鄱阳湖:赣江北支与修河合流、赣江中支、四江合流(赣江南支、抚河、信江西支和饶河西支)、饶河北支,并经湖口流向长江。

3 高动态水位条件下复合模式的运动边界处理方法

3.1 鄱阳湖水动力形态/结构的模式概化

在上述分析的基础上,对鄱阳湖水动力形态/结构进行概化,得出了高水位、中水位和低水位 3 种水动力形态/结构模式,考虑到中水位多半发生在春秋两季,而这两个季节鄱阳湖漫滩草洲植被发育状态和淹水过程的差异,使水底的粗糙度有所不同,由此又将中水位模式分成中水位涨水型和退水型两种水动力形态/结构模式。概化的 4 种水动力形态/结构模式分别为高水位湖相型、中水位涨水型、中水位退水型和低水位河相型。

3.2 水动力形态/结构模式内部的干-湿网格判断方法

概化的 4 种水动力形态/结构模式解决了水位变幅导致的入湖河口数量和位置变化等运动边界问题,4 种水动力形态/结构模式之间的运动边界问题即采用在计算流体力学领域中现有的干-湿网格法运动边界处理技术^[13]。

干-湿网格法运动边界处理技术的基本原理,是在运动边界浅水区域的连续性方程求解过程中

增加干-湿的判断过程。运动边界浅水区域的连续性方程求解采用两步法,第一步主要进行隐式外模式的水动力求解(式(1)):

$$\begin{aligned} (m_x m_y \zeta)^* - (m_x m_y \zeta)^n + \frac{\theta}{2} \partial_x (m_y H \bar{u})^{n+1} + \\ \frac{\theta}{2} \partial_x (m_y H \bar{u})^n + \frac{\theta}{2} \partial_y (m_x H \bar{v})^{n+1} + \\ \frac{\theta}{2} \partial_y (m_x H \bar{v})^n = \theta \bar{Q}_H^{n+1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, θ 是在 n 和 $n+1$ 的时间步, ζ 为水位,由 $\zeta = z_s^* = H + \eta$ 定义, η 由 $\eta = B + z_{tb}^*$ 定义, B 为沉积层的厚度, z_{tb}^* 为与时间无关的水底高程, m_x 和 m_y 为水平坐标的比例因子, \bar{u} 、 \bar{v} 为边界拟合正交曲线坐标系下 x 及 y 方向的速度分量平均值, H 为总的水深, \bar{Q}_H 为水的源和汇,包括降水、蒸散发等。第二步当 $n+1$ 时有:

$$(m_x m_y \zeta)^{n+1} - (m_x m_y \zeta)^* = \theta \bar{Q}_G^{n+1/2} \quad (2)$$

将以上两式结合在一起,得到这两个时间步的方程:

$$\begin{aligned} (m_x m_y \zeta)^{n+1} - (m_x m_y \zeta)^n + \frac{\theta}{2} \partial_x (m_y H \bar{u})^{n+1} + \\ \frac{\theta}{2} \partial_x (m_y H \bar{u})^n + \frac{\theta}{2} \partial_y (m_x H \bar{v})^{n+1} + \\ \frac{\theta}{2} \partial_y (m_x H \bar{v})^n = \theta \bar{Q}_H^{n+1/2} + \theta \bar{Q}_G^{n+1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

由此,水的深度可以表示为:

$$H^{n+1} = \zeta^{n+1} - \eta^{n+1} \quad (4)$$

在判定网格的干-湿时,其过程如下:

(1)首先,根据式(1)初步确定水平方向运动边界内部网格的水表高程,然后,每个网格的中心水深与 H_{day} (最小干深)进行比较,若网格中心水深大于 H_{day} ,这个网格即被定义为湿网格;

(2)若该网格的中心水深小于 H_{day} ,且小于前一时间步的水深,同时该网格的 4 个流面是被水所包围,即该网格仍被定义为干网格。

(3)如果该网格的中心水深小于 H_{day} ,但大于前一时间步的水深,检查每个网格面的流向,看其是否有出流的网格流面,如果有,则对(1)式再次进行迭代求解,并进行相类似的检查和判断,直到每个网格的干-湿状态都稳定下来。

这里, H_{day} (最小干深)是用户提供的用于判断干湿的最小水深。在模拟过程中,如果出现负水深,模拟将终止。

有了运动边界的干湿处理和判断方法,水动力

模拟系统可以对 4 种水动力形态结构之间的运动边界问题进行有效的处理。

4 基于 MapWinGIS 的 2 维边界拟合正交曲线格网的生成

由于天然湖、库、河弯曲而不规则的复杂边界，如果在直角坐标系下对空间进行离散化形成剖分格网会大大增加格网数量，加大模型的计算量。同时在直角坐标系下格网走向与流向有较大的差距，使边界的模拟精度受到影响。鄱阳湖不仅边界复杂，而且还由于高动态水位造成的草洲、漫滩干湿运动边界问题。要解决这个问题不仅需要在浅水运动方程有特殊的考虑，而且还需要在剖分格网坐标系中进行相应的匹配。由于鄱阳湖水动力模拟系统的水动力模块主要以 VIMS(Virginia Institute of Marine Science) 的 3 维水动力富营养化模型 HEM-3D (Hydrodynamic-Eutrophication Model) 为基础，因而采用了边界拟合正交曲线 σ 坐标系，其主要优点是用曲线坐标逼近复杂边界在边界模拟上具有较高的精度^[14-15]。HEM-3D 模型包括水动力、水质、泥沙和富营养化等模块，可以模拟水系统 1 维、2 维或 3 维流场、盐、粘性与非粘性介质输移和富营养化等问题，目前，在国内外有大量的应用^[9]。

边界拟合正交曲线网格生成主要利用 MapWinGIS 的多边形生成方法来实现，MapWinGIS 是一个开源的 GIS 控件，基于 COM 思想编写(团队的开发人员主要来自美国爱荷华大学)。其主要功能包括^[16]：(1)直接打开、编辑和保存 GIS 主要的栅格数据及矢量数据，如 Image、Grid、Shapfile、TIN 和 DBF 格式的文件；(2)在地图中对图形进行浏览、标注，支持矢量数据的符号化，栅格/矢量数据的透明显示；(3)在地图中对矢量数据进行空间数据查询；(4)动态地在图层上标绘空间数据；(5)存取地图中的相关数据；(6)对不同的格式进行转换，例如，从 TIN 到 GIRD 等。MapWinGIS ActiveX 的二次开发，可以在 C#、VB、Delphi 等语言环境下进行。MapWinGIS 的这些特征比较适合鄱阳湖水动力模拟系统的功能需求。

边界拟合正交曲线网格实现的基本思路 and 过程分 2 步：第一步，生成边界拟合正交曲线格网的交点坐标，其方法为：(1)以鄱阳湖的遥感影像为背

景，沿着水流方向的双边岸线手工绘制贝赛尔(Bezier)曲线，形成纵向方向的主控边界曲线，再进行手工加密处理；(2)在与水流正交方向上手工绘制准正交的贝赛尔曲线(横向)，并适当进行加密；(3)求取纵横控制断面曲线的交点坐标，作为控制点坐标；(4)由控制点坐标建立分段 3 次 Hermite 插值函数，利用该插值函数，可以生成一条既通过网格控制点，又垂直于网格控制断面的纵向网格控制曲线^[18]；(5)利用纵向网格线和横向网格线生成 2 维边界拟合正交曲线网格。第二步，有了格网坐标以后，利用 MapWinGIS 的多边形生成方法，生成边界拟合正交格网图层，在该格网图层中，每个正交格网为一个多边形，每个格网的模拟结果作为该格网的属性进行存储。图 3 和图 4 分别表示了 PL-HMS 系统生成的低水位河相型 2 维边界拟合正交曲线格网和 4 种概化模式格网的空间范围和对比。

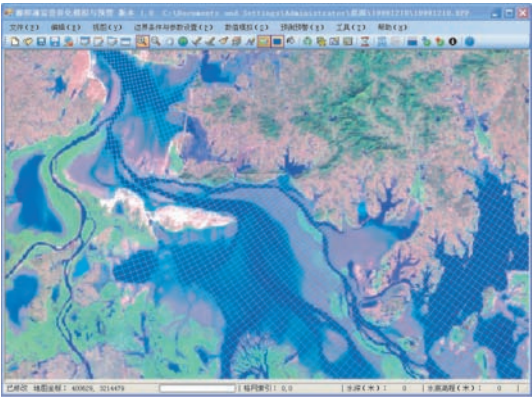


图 3 系统生成的低水位河相型 2 维边界拟合正交曲线格网

Fig. 3 The boundary-fitted orthogonal curvilinear

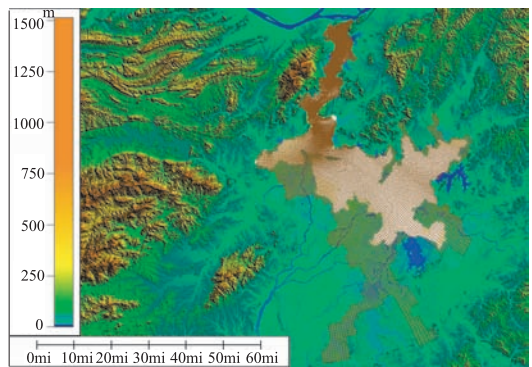


图 4 4 种概化模式格网空间范围和对比

Fig. 4 The grids of four generalized patterns of Poyang Lake grid generated by PLHMS

5 鄱阳湖水动力模拟系统的设计编程与应用

鄱阳湖水动力模拟系统由数据前后处理与交互模块和水动力模拟模块构成。其中模拟模块是系统的核心模块,采用了 HEM-3D,并结合鄱阳湖水动力模拟的需要,做了适当的修改,该模块主要完成水动力模拟;数据前后处理与交互模块主要完成水动力形态结构模式的选择与构建、背景信息的初始化(如模拟格网、地形、水深等)、模拟的控制参数的确定、初始条件、边界条件的输入和模拟结果的可视化等内容(见图 5)。

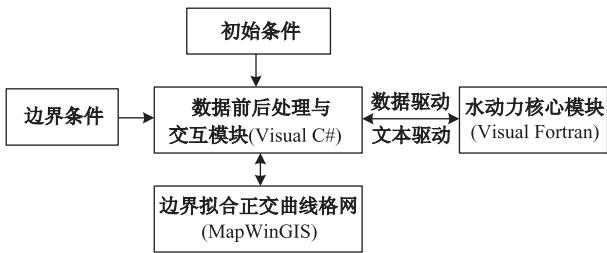


图 5 鄱阳湖水动力模拟系统的集成框架
Fig. 5 The integrated framework of PLHMS

在鄱阳湖水动力模拟系统中,运动边界复合处理模式的实现分别由上述两个模块完成。数据前后处理与交互模块提供 4 种水动力形态结构模式的初始化,包括每种水动力形态结构模式的边界拟合正交曲线格网产生和每个格网水底高程、初始水深等模拟的基本边界条件的生成。采用何种水动力形态结构模式来进行水动力的模拟,主要依据鄱阳湖的实际水位来确定。4 种水动力形态结构模式的概化和实现是解决鄱阳湖特殊运动边界问题的关键。而水动力模拟模块完成不同水动力形态结构模式下的干-湿判断方法的实现,其实质就是通过判断每个格网的干-湿状态,来确定湖岸线的位置,解决常规的运动边界问题。

5.1 鄱阳湖水动力模拟系统的编程

5.1.1 编程环境和运行环境

考虑到数值计算的问题,模拟模块的开发环境是在 Visual Studio 2005 平台上开发,由 intel Visual Fortran Compiler V11.1.06 专业版编译而成。

而数据前后处理与交互模块是在 Visual Studio 2005 平台上采用 C# 语言开发,并集成了 Open GIS 控件 MapWinGIS V4.8,以便在数据前后处理

和模拟结果可视化过程中实现视窗操作和 GIS 功能。

鄱阳湖水动力模拟系统的两个模块均在 Visual Studio 2005 平台上开发,因此,支持 32 位和 64 位的 Windows 的操作系统,在 WinXP、Windows Vista 和 Windows 7 可以运行。

5.1.2 系统的主要类及功能

在鄱阳湖水动力模拟系统的两个模块中,模拟模块是系统的核心模块,而数据前后处理与交互模块是模拟模块的辅助模块,为了完成数据前后处理与用户交互的功能,采用面向对象的设计方法,以“类”来封装不同的对象,构造了项目及界面、正交格网、数据处理、水动力结构和可视化等 5 个类,以完成系统的设计功能。

(1) 项目及界面类:主要处理鄱阳湖水动力模拟系统的项目初始化(如新建项目、打开项目等)、项目与界面状态的记录、模拟基本控制参数的记录、水温过程及气象过程模拟的激活等内容,主要有 8 个成员变量和 10 个方法构成。

(2) 正交格网类:主要完成读取创建的格网数据,并转化成模拟系统下 Shapefile 格式的格网数据文件,同时在模拟结果产生后,将模拟结果转化为每个格网单元的属性,以便在模拟结果可视化时,能根据格网的属性值,制作专题图。该类主要有 5 个成员变量和 5 个方法构成。

(3) 数据处理类:主要完成模拟所需的边界条件数据的处理,包括初始水深、湖底高程、入流和出流流量及水温数据、气象站气象观测数据、模拟参数等的输入、气象观测数据的空间离散化和权重值的计算、数据与单位转换、界面控制、模拟结果的可视化预处理等功能,该类主要有 6 个成员变量和 20 个方法构成。

(4) 水动力结构类:主要完成水动力模拟过程中所需参数、入湖口名称、入湖口数量、入湖口坐标、每个入湖口的格网数量及名称、入湖口格网单元流量权重值、水动力模拟的初始水位、最小湿(或干)深度等变量的记录与处理等功能,该类主要有 5 个成员变量和 22 个方法构成。

(5) 可视化类:主要完成水动力模拟结果的可视化过程中所涉及的有关可视化参数的记录和處理、图例的生成和色彩方案的设置与保存、干-湿网格的显示模式等功能,该类主要有 6 个成员变量和 7 个方法构成。

图 6 表示了集成的鄱阳湖水动力模拟系统的可视化界面,其中,图 6(a)和图 6(b)分别表示了系

统显示的鄱阳湖水底高程数据(模拟的边界条件之一)和模拟的初始水深(模拟的初始条件之一)。

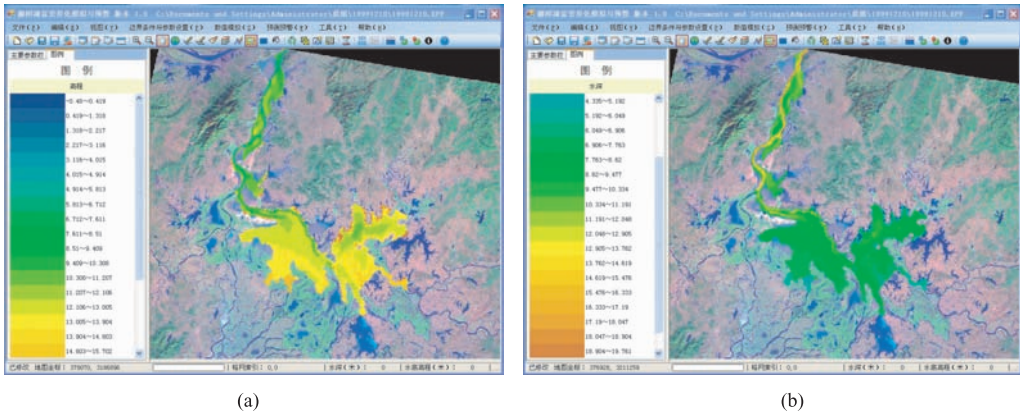


图 6 鄱阳湖水动力模拟系统的可视化界面
(a)湖泊水底高程 (b)模拟的初始水深

Fig. 6 The visualization interface of PLHMS

(a)The visualization of initial condition: lake bed elevation; (b)The visualization of simulated result: water depth

5.2 系统的模拟应用与分析

利用集成的鄱阳湖水动力模拟系统对 1999 年 12 月 6 - 14 日的鄱阳湖水动力进行了模拟,采用低水位河相型水动力形态结构模式。模拟经过调试后用(采用 1999 年 12 月 1 - 6 日的实际监测数据完成模型的调试),当模拟的时间步长为 6 秒、格网为干的最小水深为 0.08m,格网为湿的最大水深为 0.12m、维持格网为干的时间步长为 26 秒时,模型和模拟结果趋于稳定。鄱阳湖水底地形数据采用 1:2.5 万的 DEM,模拟的其他输入为低水位河相型 4 个人湖口流量数据和湖口流量数据。

7(c)分别表示了模拟的鄱阳湖的流速(标量)、水位和流速(矢量),图 8 表示的是图 7(c)的局部。模拟结果表现在:(1)模拟出的鄱阳湖湖面边界与实际边界非常吻合(见图 2(d)的 1999 年 12 月 10 日卫星影像),并且由于采用了低水位河相型模式来进行模拟,大大缩短了使模拟趋于稳定的时间;(2)由于采用了复合模式的运动边界处理技术,模拟结果的边界与初始边界是不同的,图 6(b)是模拟的初始水深,它的边界是初始边界,实际上也是正交格网的范围(见图 7(c)),属于初始边界,这一点从图 7(b)和图 7(c)中都能看出来,其中,灰色边界是初始边界。

模拟结果见图 7 和图 8。图 7(a)、图 7(b)和图

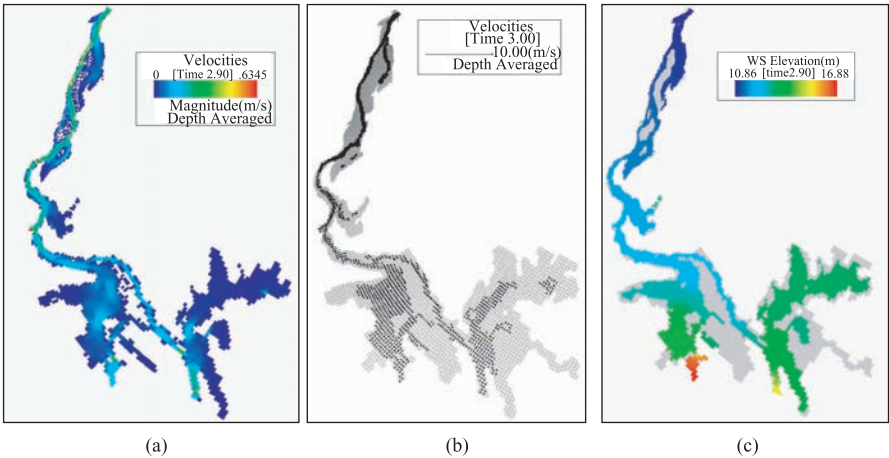


图 7 模拟的鄱阳湖流场和水位
(a)流场(标量) (b)流场(矢量) (c)水位

Fig. 7 Simulated current and water level of Poyang Lake

(a) Current (scalar);(b) Current (vector);(c) water level

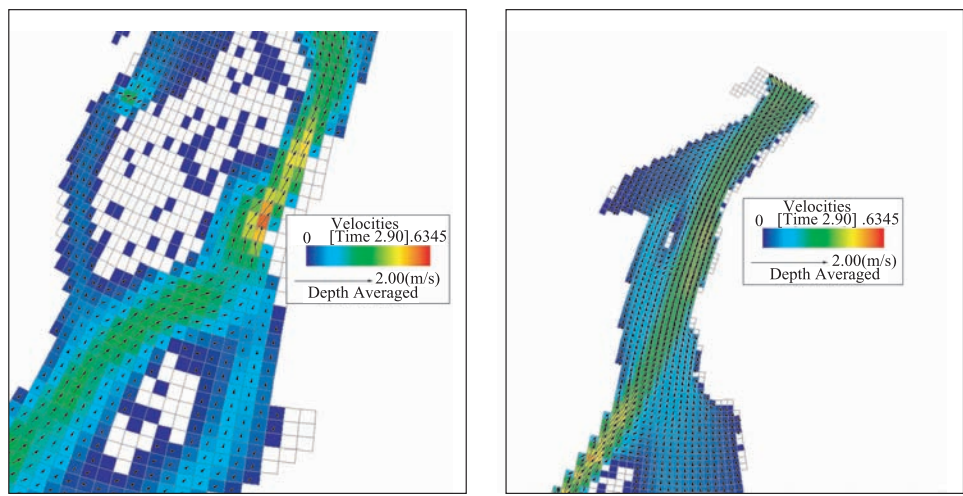


图 8 模拟的流场(矢量)局部
Fig. 8 Simulated partial current (vector)

为了进一步对模拟的误差进行分析,表 1 给出了 1999 年 12 月 6 - 14 日的鄱阳湖不同水文站的水位实测数据和模拟的水位数据。从表 1 可以看出,实测水位与模拟水位的误差分布在一 0.38~0.74m。

表 1 鄱阳湖 1999 年 12 月 14 日不同水位站的
实测水位与模拟的水位及误差(吴淞高程)
Tab. 1 The measured and simulated water level(Wusong
reference) in main hydro-stations in Dec. 14 1999

站名	水位(m)		
	实际水位	模拟水位	误差
都昌	10. 41	11. 13	−0. 42
湖口	9. 65	10. 13	−0. 48
康山	13. 14	12. 40	0. 74
星子	9. 91	10. 29	−0. 38
鄱阳	13. 67	13. 23	0. 44
龙口	13. 38	12. 98	0. 40
荣荫	11. 91	11. 56	0. 35

6 结语

本文针对鄱阳湖水位高动态变化的特征,分析了水动力模拟的湖泊形态结构特征,概化了 4 种水动力形态结构模式,并结合计算流体力学领域中现有的干-湿网格法运动边界处理技术,形成了浅水湖泊复杂边界高动态水位条件下复合模式的运动边界处理方法;在 MapWinGIS 开发控件基础上,实现了不同模式的边界拟合正交曲线格网的生成与模拟结果的可视化;系统采用面向对象的 Visual

Studio C# 和 Visual Fortran 编程语言,以松散耦合方式将数据前后处理与交互模块与水动力模拟的核心模块进行了集成。从模拟结果来看,系统由于采用了复合模式的运动边界处理技术,使模拟结果与实际情况有很好的一致性,并有效缩短了模拟时间。由于受论文篇幅的限制,本文没有给出模拟过程中的一些必要步骤和具体的模拟数据,包括模型的率定、结果可靠性分析及模拟结果对比等。本系统的实现为以水动力模拟为基础的水环境模拟提供了一定意义上的理论、方法及可操作的计算机程序。

参考文献:

[1] 张昊, 张代钧. 复杂水环境模拟研究与发展趋势[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(4): 24 - 28.

[2] 刘永, 郭怀成, 范英英, 等. 湖泊生态系统动力学模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1169 - 1175.

[3] 万金保, 李媛媛. 湖泊水质模型研究进展[J]. 长江流域资源与环境. 2007, 16(6): 806 - 809.

[4] 赖锡军, 姜加虎, 黄群. 洞庭湖地区水系水动力耦合数值模型[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(1): 74 - 80.

[5] Ji Z G, Hu G D, Shen J, *et al.* Three-dimensional Modeling of Hydrodynamic Processes in the St. Lucie Estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 73(1 - 2): 188 - 200.

[6] Cerco C F. Phytoplankton Kinetics in the Chesapeake Bay Eutrophication Model[J]. Water Quality and Ecosystem Modeling, 2001, 1(4): 5 - 49.

[7] 储贇. Delft3D 在天文潮与风暴潮耦合数值模拟中的应用[J], 海洋预报, 2004, 21(3): 29 - 36.

[8] 栗苏文, 李红艳, 夏建新. 基于 Delft3D 模型的大鹏湾水

- 环境容量分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 91 - 95.
- [9] 谢锐, 吴德安, 严以新, 等. EFDC 模型在长江口及相邻海域三维水流模拟中的开发应用[J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(2): 165 - 174.
- [10] 齐珺, 杨志峰, 熊明, 等. 长江水系武汉段水动力过程三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 22(2): 213 - 219.
- [11] Jin K R, Hamrick J H, Tisdale T. Application of Three-Dimensional Hydrodynamic Model for Lake Okeechobee[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(3): 758 - 771.
- [12] 《鄱阳湖研究》编委会. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [13] Ji Z, Morton M, Hamrick M J. Wetling and Drying Simulation of Estuarine Processes [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 3(4): 683 - 700.
- [14] 董耀华. 河势贴体河道平面二维正交网格生成方法的研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(4): 14 - 17.
- [15] 黄炳彬, 方红卫, 刘斌. 复杂边界水流数学模型的斜对角笛卡尔方法[J]. 水动力学研究与进展, 2003, A18(6): 679 - 685.
- [16] 刘春, 卢群, 吴杭彬. 基于开源 GIS 的交通分析软件设计[J]. 软件导刊, 2009, 8(1): 167 - 169.

Research and Development of Poyang Lake Hydrodynamic Modeling System Based on Integrated Mode of Moving Boundary

LAI Geying^{1,2}, PAN Reixin², HUANG Xiaohong³

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Nanchang 330022, China

2. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

3. Jian weather bureau of Jiangxi Province, Jian 343000, China)

Abstract: Based on analysis of morphological structure and hydrological characteristics of Poyang Lake, four generalized patterns of the morphological structure and hydrological characteristics were presented for hydrodynamic numerical simulation to solve these problems of moving boundary resulted from two changes of the number and positions of estuaries due to high amplitudes of water level changes of Poyang Lake, which are lacustrine facies pattern in high water level, water-rising pattern in medium water level, water-falling pattern in medium water level, and fluvial facies pattern in low water level. The internal moving boundary problem of each morphological structure and hydrological characteristics pattern was settled by using the existing dry-wet grid method on computational fluid dynamics. Thereby, an integrated method to deal with complicated moving boundary due to high amplitudes of water level changes was presented for shallow lakes. In order to develop Poyang Lake hydrodynamic modeling system, an algorithm based on the open-source component of MapWinGIS for the boundary fitted orthogonal curvilinear grid of each morphological structure and hydrological characteristics pattern was developed for the needs of hydrodynamic simulation and results visualization. Two main modules of Poyang Lake hydrodynamic modeling system, the module of data pro-post processing and data interaction and the module of hydrodynamic numerical simulation were integrated in the form of loose coupling using the programming platforms of Visual C# and Visual Fortran. In order to verify the simulation effect and precision, an experimental simulation for Poyang Lake with gauged data in December 6 - 14, 1999 was carried out using developed Poyang Lake hydrodynamic modeling system. The simulated results show that not only the simulation time is obviously shorted but also the simulated effects, which include lake water boundary, water level, depth and current, are better because of the use of integrated moving boundary method.

Key words: Poyang Lake; hydrodynamic modeling; integrated mode moving boundary; development; MapWinGIS