

鄱阳湖枯水水位及流速时空分布模拟^{*1}

齐凌艳 1, 2, 黄佳聪 1, 高俊峰 1*, 郭玉银 3

(1. 中国科学院流域地理学重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏
南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 江西省鄱阳湖水文局, 江西 九江 332800)

【摘要】: 大型通江湖泊鄱阳湖水文节律独特, 水位和流速是其生态系统功能维持的关键因子。为探究其水位和流速时空特征, 基于 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 模型, 利用五河及湖口水文数据、气象数据及湖底高程作为输入条件, 模拟出鄱阳湖的枯水水文统计年 (2010-07-01~2011-06-30) 水位和流速时空变化过程。模拟结果表明: (1) 星子等 4 个站点拟合程度较好 ($r^2 > 0.85$), 达到了复杂湖库水动力模拟的精度。(2) 高水位期, 湖区水位空间分布无明显差异, 水深直接受湖底高程影响, 自上游至下游呈逐级递增; 低水位期, 鄱阳湖水位在空间上出现明显差异, 湖区外缘水位至入江水道逐级递减, 水深分布空间差异不大, 仅入江水道处水深明显高于其他水域。(3) 流速也包括一系列时空变化特征, 如高水位时期流速小于低水位时期; 除大水面时期外, 深水道流速大于主湖区; 高水位时期上游流速略高于下游, 但其他月份, 北部入江水道流速均大于南部湖区等。(4) 流速与水位关系密切, 且不同水位对应流速大小及分布有所差异。鄱阳湖枯水水位和流速模拟分析可为大型湖库枯水水情管理提供科学参考和辅助决策支持。

【关键词】: 鄱阳湖; 水位; 流速; 时空分布; EFDC

【中图分类号】: K292 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2017) 04 - 0572 - 13

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201704010

鄱阳湖是中国第一大淡水湖, 也是长江中下游仅存的两个通江大湖之一。鄱阳湖水位涨落受流域气候、湖盆地形、长江及五河来水的多重影响, 拥有独特的“高水成湖、低水似河”的水文节律^[1, 2]。特殊水情塑造了鄱阳湖开放型的湿地生态系统^[3],

¹收稿日期: 2016-09-14; 修回日期: 2016-12-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB417006) [The National Basic Research Program of China (2012CB417006)]; 江西省水利厅重大水利科技项目 (KT201406) [The Major Water Resources Science and Technology Program of the Jiangxi Water Resources Department (KT201406)]

作者简介: 齐凌艳 (1988~), 女, 博士研究生, 主要从事湖泊流域水环境过程模拟研究. E-mail: qily1107@126.com

***通讯作者** E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn

为水生植被、洄游鱼类、越冬候鸟等提供重要生存栖息环境，在整个长江水系乃至国际生态网络中发挥着巨大作用。但随着全球气候变化、上游水利工程建设以及人为活动干扰加剧等，鄱阳湖近年枯水水位呈明显下降趋势^[4]，出现枯水期提前，枯水期水位下降，枯水时间持续延长及春夏连旱、伏秋连旱等一系列问题。鄱阳湖枯水水位和流速变化对其水质、湿地植物分布格局^[5]、渔业资源^[6]、候鸟栖息环境^[7,8]等均产生不同程度的影响。因此研究鄱阳湖枯水水位和流速变化过程及特征变得尤为重要。在围绕鄱阳湖水情变化研究中，水位时间节律研究占多数。闵騫等^[9~11]研究了鄱阳湖近 50 年来的水位变化规律和枯水原因，欧阳长林等^[12]也对鄱阳湖水位演变趋势及周期性展开研究。还有很多学者先后对鄱阳湖水位时间变化规律开展了不同程度的研究分析^[4,13,14]。同时还有研究着眼于水位与浮游生物^[15,16]、湿地植被^[5]、鱼类资源^[6]、候鸟栖息地^[7,8]之间的响应关系。但就目前而言，针对鄱阳湖枯水水位和流速空间分布特征以及水位-流速变化关系研究较少，因此本文主要分析了鄱阳湖在枯水水文统计年内水位和流速的动态时空分布特征以及进一步探究了水位和流速之间的响应关系，以期对鄱阳湖枯水水资源管理提供科学决策支持。

数值模型模拟是定量研究湖泊、河流、水库等生态系统的水动力、水质变化、生物类群演替等机理过程的重要手段^[17,18]。EFDC 已成熟应用于鄱阳湖^[4,13,19]、太湖^[20]、滇池^[21,22]、异龙湖^[23]、程海^[24]、深圳水库^[25]、长潭水库^[26]等水体。MIKE-SHE 也是应用较广的水动力模型之一，研究案例包括 Trichonis 湖水动力过程^[27]、Florida Everglades 的暴雨径流影响以及营养盐时空分布^[28,29]，Faroe-Shetland 的深水流动力过程^[30]，鄱阳湖水力停留时间及点源污染物扩散等过程^[31,32]。Yao 等^[33]基于 WASP(Water Quality Analysis Simulation Program)模型模拟潮白河和太浦河的水动力水质模拟等。Delft3D 应用于钱塘江河口^[34]以及杭州湾^[35]的水动力过程模拟。还有赖锡军等^[14,36]基于二维浅水方程和对流扩散方程组等构建鄱阳湖、洞庭湖二维水动力和水质耦合模拟模型，以及黄佳聪等^[37]自主开发的二维湖泊水动力模型应用于太湖等水体水动力过程模拟。相较其他模型，EFDC 和 MIKE-SHE 模型在国内应用较多且适用于大型浅水湖泊，其中 EFDC 在鄱阳湖多次应用，模块主要参数被反复校正，为模拟提供有力参考。同时综合考虑现有实测数据条件、模拟指标以及方便与自写模块结合等因素，本研究最终选用 EFDC 模型进行鄱阳湖水动力模拟。

综上所述，本研究基于 EFDC 模型构建鄱阳湖水动力模型，选择枯水水文统计年(2010-07-01~2011-06-30)作为模拟时段，动态模拟鄱阳湖的枯水水文统计年内极端水位时空变化过程，分析该年内鄱阳湖水位、流速的时空分布特征，并进一步探究水位和流速之间变化响应关系。

1 研究区概况

鄱阳湖(N28° 24′ ~29° 46′ ,E115° 49′ ~116° 46′)位于江西省北部、长江中游南岸。全湖呈辐射状，最大长度 173km，东西平均宽度 16.9km，最宽处约 74km，入江水道最窄处的屏峰卡口宽约 2.8km，湖岸线总长约 1200km。湖面以松门山为界，分为南北两部分，南部宽广，为主湖区，北部狭长，为湖水入长江水道区。湖盆自东向西、由南向北倾斜，高程由 12m 降至湖口约 1m。鄱阳湖湖底平坦，平均水深 5.1m，最低处在蛤蟆石附近，高程为 -10m。鄱阳湖承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河等五河及博阳河、漳田河等小支流来水，经调蓄后由湖口注入长江，平均换水周期为 20.9d。根据 1960~2008 年流域五河流量资料统计得出，赣江流域入湖径流占年入湖总量 62%，抚河流域约占 11%，信江流域约占 16%，饶河流域和修水流域分别约占 8%和 3%^[38]。鄱阳湖是吞吐型、过水型、季节性淡水湖泊，水位涨落受五河及长江来水的双重影响，呈“高水湖相，低水河相”特征。湖口站历年实测最高水位 22.59m(1998 年 7 月 31 日)，相应湖面面积 4070km²；历年实测最低水位 5.9m(1963 年 2 月 6 日)，相应湖面面积 146km²。鄱阳湖日平均吞吐水量达 4 亿 m³，形成最主要的湖流形态——吞吐流，在吞吐流中根据流势、流向及江湖关系可分为重力型、倒灌型和顶托型湖流；鄱阳湖水域宽阔，为江西省大风区域，有利于形成风成流；此外，在特定条件下，局部水域有时出现密度流和异重流。鄱阳湖属中亚热带湿润季风气候区，多年平均气温 16.5℃~17.8℃，雨量丰沛，湖区多年平均年降水量 1542mm，降水时空分布不均，具有明显季节性和地域性。汛期 4~9 月降水量占年总降水量的 69.4%。湖区多年平均年水面蒸发量为 1050~1300mm，并以湖区为中心，向四周递减^[39,40](图 1)。

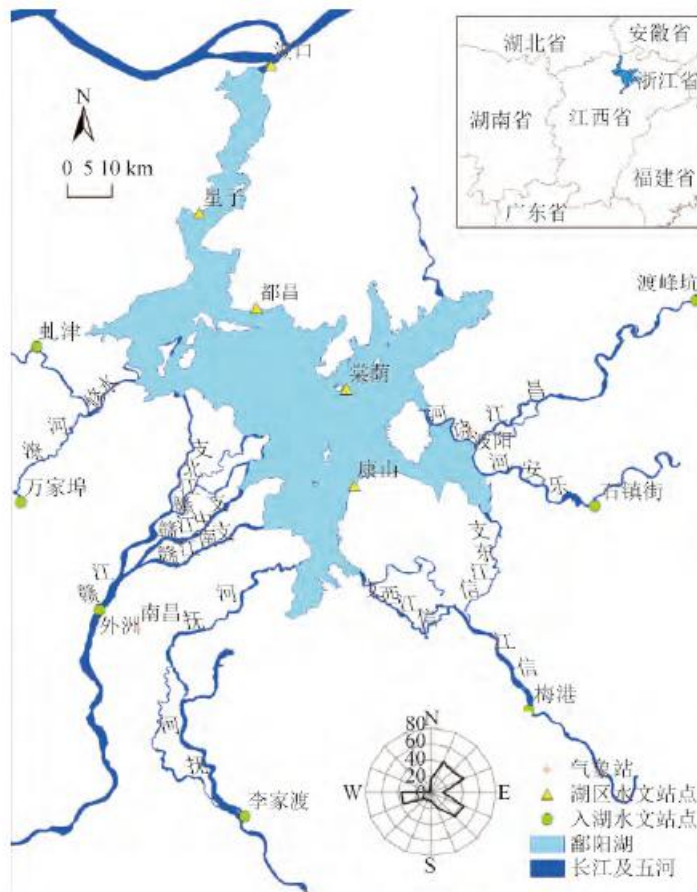


图1 鄱阳湖地理位置及水文、气象站点分布

Fig.1 Locations of Lake Poyang and Its Hydrological and Meteorological Stations

2 数据与方法

2.1 枯水统计方法

一般将每年4月至次年3月作为一个水文年。这种划分方法较适用于鄱阳湖洪水统计分析，而不适用于枯水统计分析^[41, 42]。为方便鄱阳湖枯水水情的统计分析，且鄱阳湖的主要早期为7~10月^[43]，因此将7月至次年6月划分为枯水水文统计分析年^[11]。本研究选取2010-07-01至2011-06-30作为研究时段，分析该枯水水文年内鄱阳湖的水位和流速变化特征。

都昌水文站位于鄱阳湖中部，为鄱阳湖流域代表水文站，其水位可反映整个湖区水位变化情况。依据闵骞等^[11]提出的鄱阳湖枯水划分标准(表1)，统计了2010-07-01至2011-06-30水文统计年内的水位变化情况。水位波动范围为8.16~20.05m，枯水位12.8m初现时间为10月29日(12.76m)，与近60年(1952~2010年)的都昌水文数据分析结果相比，出现时间提前约5d(11月4日)。中度枯水11.8m出现时间11月4日(11.88m)，比1952~2010年的平均中度枯水出现时间提前约17d(11月21日)。都昌水文站该年内枯水初现时间为10月29日，2011年6月10日结束(12.98m)，持续226d。而1952~2010年平均枯水期时长为144d，枯水期有所延长。该统计年内最低水位为8.16m(12月11日)，低于近60年最低水位平均值9.61m(图2)。上述水位统计结果符合鄱阳湖枯水期的三大变化趋势，即枯水位下降、枯水期提前及枯水期延长^[11, 44]，说明基于该时段探究鄱阳湖枯水水位和流速的合理性和科学性。

表 1 鄱阳湖枯水划分^[1]

Tab.1 Grade of Water Level During Dry Season in Lake Poyang

枯水程度	水位(H)	枯水影响
一般枯水	11.8 m<H≤12.8 m	湖区部分排灌站取水困难
中度枯水	10.8 m<H≤11.8 m	湖区大部分排灌站取水困难, 部分区域航运受阻
较重枯水	9.8 m<H≤10.8 m	湖区绝大多数排灌站取水困难, 湖边少数自来水厂取水困难, 部分区域航运严重受阻
严重枯水	8.8 m<H≤9.8 m	湖区排灌站几乎无法取水, 部分自来水厂取水困难, 多数区域航运严重受阻
极度枯水	H≤8.8 m	湖边多数自来水厂取水困难, 绝大多数区域航运严重受阻

*注: 表内水位高程基面为冻结基面(1952~2010年的平均水位13.81 m), 减去1.86 m为1985年高程基准(G85高程).本研究中采用的冻结基面+0.133 m=吴淞基面, 因此两水位相差0.04 m, 文中忽略不计.

2.2 模型数据

为获取鄱阳湖在 2010-07-01 至 2011-06-30 枯水统计年内水位和流速的时空变化过程,需基于 EFDC 构建鄱阳湖水动力模型, 所需输入数据包括水文、气象以及地形数据(表 2)。

表 2 鄱阳湖水动力模型输入数据

Tab.2 Data Used in Hydrodynamic Modelling

数据类型	数据来源	空间分辨率	时间分辨率	指标
水文	江西省鄱阳湖水文局	五河七口水文站点(图1) 湖区水文站点(图1)	每日2010-07-01至2011-06-30	流量 水位
气象	中国气象科学数据共享服务网	波阳站、南昌站(图1)	每日2010-07-01至2011-06-30	大气压、干球温度、相对湿度、太阳辐射、风速、风向、降雨
	江西省鄱阳湖水文局	星子站(图1)		降雨、蒸发
湖底地形	江西省水利厅	5 m	2010	湖底高程

*注: (1)水文数据包括五河七口的日流量(m^3/s), 水文站点名称及分布见图1和表3; 还包括位于湖区内的湖口、星子、都昌、棠荫、康山的水位数据(m)。其中赣江外洲站流量按照赣江西支:赣江中支:赣江南支=3:4:3的流量比分别从三个入湖口流入湖区。(2)气象数据分别来自国家气象中心的波阳站(站点编号: 58519)、南昌站(站点编号: 58606)以及鄱阳湖区星子站。星子站位于湖区中下部, 其降雨和蒸发量接近整个湖区的气象条件。同时模型输入气象数据还包括国家气象站每日的气象指标: 大气压(hPa)、日平均气温($^{\circ}\text{C}$)、相对湿度(%)、太阳短波辐射强度(W/m^2)、云量(%)、风速(m/s)、风向。其中, 云量覆盖数据暂无法获得, 且该数据对湖泊水动力过程影响极小, 故统一作50%计。此外, 波阳和南昌站的降雨数据主要用于下文的区间流计算。(3)地形数据由江西省水利厅提供, 为2010年鄱阳湖湖区湖底高程(m), 空间分辨率为5 m, 后经重采样至250 m作为模拟输入条件之一。

因水文站点和实际入湖口存在一定距离, 基于水量平衡考虑, 需估算区间流流量。区间流流量(m^3/s)=(流域面积-集水面积)(km^2) $\times 106 (\text{m}^2/\text{km}^2)$ $\times$ 径流系数 $\times$ 降雨量(mm) $\times 10^{-3} (\text{m}/\text{mm})/(24 \times 3600) (\text{s})$ 。降雨量来源于距离站点最近的气象站点数据(表3), 最后估算的区间流约占总入流量的10%。

表 3 区间流计算参数

Tab.3 Parameters of Interval Runoff

河流	站点	集水面积(km^2)	径流系数 ^[45]	降雨量来源(图1)
赣江	外洲	80 948	0.530	南昌站
抚河	李家渡	15 811	0.471	南昌站
信江	梅港	15 535	0.612	波阳站
乐安河	石镇街	8 367	0.634	波阳站
昌江	渡峰坑	5 013	0.634	波阳站
修水	虬津	9 914	0.564	南昌站
潦河	万家埠	3 548	0.621	南昌站

利用上述数据初始化模型输入文件和设定模型边界，其中边界条件包括气象边界条件和水动力边界条件。气象边界条件设为模拟时段内每日的气象数据(表 2)；水动力边界条件由上、下边界组成，上边界为入湖河流每日流量，下边界为湖口站每日水位。

2.3 模型构建

2.3.1 模型原理

EFDC 为开源的地表水建模系统，最初由美国弗吉尼亚海洋科学研究所和威廉玛丽学院海洋科学学院 JohnM. Hamrick 等开发，并获得美国国家环境保护署 (USEPA) 支持并推荐。EFDC 耦合流体力学、盐度/温度模拟、粒子示踪、有毒物质扩散、水质/沉积柱诊断功能模块，可实现河流、湖泊、水库、湿地系统、河口和海洋等水体的一维至三维水动力、泥沙淤积与水质等模拟^[13, 46, 47]。目前已应用于全世界超过 100 个水体，为水环境评价及管理提供科学决策支持。EFDC 模型动力学方程式基于三维不可压缩、变密度紊流边界层方程组，为便于处理由于密度差而引起的浮升力项，采用 Boussinesq 假设。在水平方向上采用曲线正交坐标变换以及在垂直方向上采用 σ 坐标变换，模型的动态方程和连续性方程可参看文献^[48, 49]。

2.3.2 模型构建

鄱阳湖水动力过程模拟时长为 2010-01-01~2011-07-30，为期 546d，其中考虑到水动力模型需要预热期进行自适应调整，以及数据条件、运行时间成本等，将 2010-01-01~2010-06-30 作为模型参数率定校正期及模型预热期，而 2010-07-01~2011-06-30 作为模型验证期，可有效提高研究时段的模拟精度。鄱阳湖湖底地形复杂，高程变率大，因此需要较高空间分辨率网格来精细模拟鄱阳湖水流在格网间的运动状态以及湖水归槽、上涨的过程。同时考虑鄱阳湖水域面积大，网格数目过多会导致运行时间过长，降低模型稳定性。因此综合考虑研究采用格网分辨率为 $250 \times 250\text{m}$ 的正方形网格离散鄱阳湖计算区域，水平网格总数为 45637，I 方向网格列数为 369，J 方向的网格行数为 506。鄱阳湖水流交换频繁掺混均匀，且以吞吐流为主，其水平尺度远大于垂向尺度，水动力参数在水平方向要大于其在垂直方向上的变化^[4, 50]，因此不予分层，KC 设为 1。鄱阳湖在年内水位变幅极大，大部分区域干湿交替频繁，在干湿边界的处理上采用动边界处理方式，露滩处理采用“干湿判别法”，即计算网格的干湿交替界面上的水量和动量守恒，开启干/湿模拟，ISDRY 设为 1，网格干湿转换参数 HDRY 和 HWET 分别为 0.05、0.1m。紊流模型采用 Smagorinsky 公式，空间离散方法为二阶精度的有限差分法 FDM(Finite Difference Method)，时间离散方法为外模半隐式三时间层格式，内模隐格式。模型为保证自身稳定性且最大限度提高运算速度前提下，采用动态步长进行计算，涨水期和丰水位时期步长较长，低枯水位以及快速退水期步长较短，运行步长范围在 10~100s。鄱阳湖水位变幅巨大，低水位时洲滩出露，不同湿地类型对湖流产生不同的阻滞效果。因此本研究利用不同的湖底粗糙系数来表征不同湿地类型的阻尼作用。湿地植被糙率为 0.033，泥、沙滩地糙率为 0.029，永久水域糙率为 0.020^[32]。最终水位模拟结果的可视化基于 i Lake 湖泊模拟平台的二维可视化组件完成^[51]。

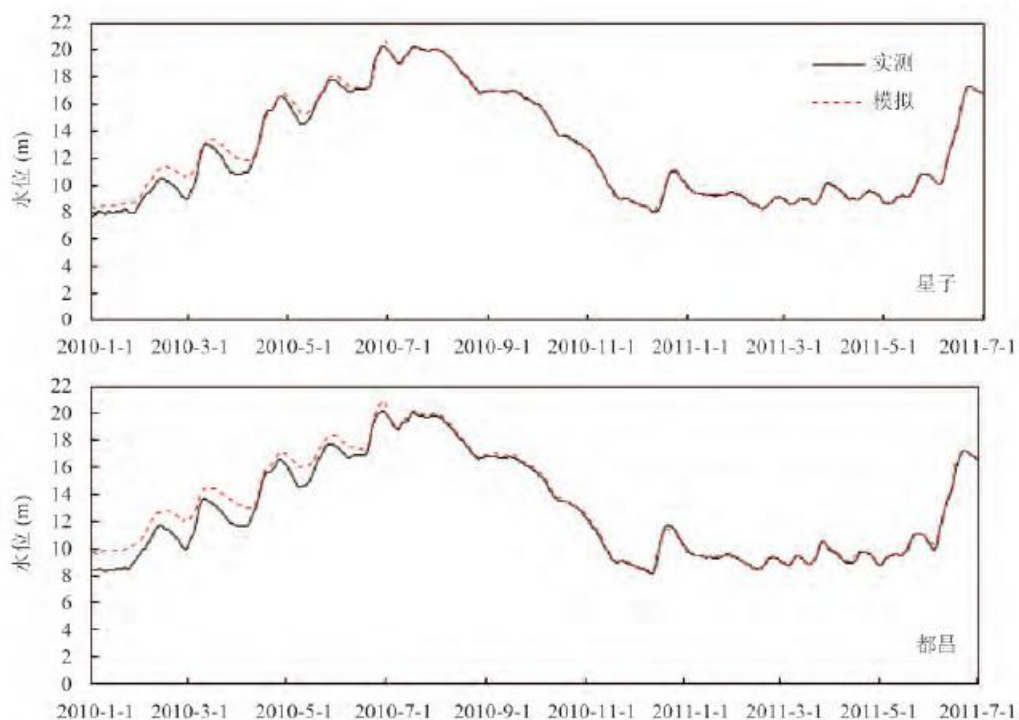
3 结果与分析

3.1 模型验证

3.1.1 水位验证

考虑数据获取条件以及均匀分布原则，模型水位验证选取星子、都昌、棠荫、康山 4 个站点的实测和模拟水位进行对比。图 3 为模型参数率定后模拟的 2010-01-01~2011-06-30 各验证站点的水位对比图，同时计算误差指标： MAE 、 $RMSE$ 、 $i2$ 、 MRE (表 4)。误差指标分布范围分别为：0.065~0.932，0.085~0.941，0.856~0.997，0.005~0.076。由对比曲线和误差统计可以看出，模型模拟精度较好，说明模拟结果可反映鄱阳湖实际水动力过程。此外水位较高时，模拟效果优于较低水位，这是由于丰

水时期鄱阳湖为大湖面，流场稳定，而水位低时，由于鄱阳湖地形复杂，多数鄱阳湖网格由“湿”转“干”，水流运动受到一定程度阻滞作用，加大低水位时模拟难度。同时鄱阳湖局部地形较为复杂，研究表明湖湾形状、湖泊岸线复杂程度是产生湖泊水位不确定性的重要原因^[52]。星子、都昌、棠荫站误差极小，拟合效果较优，而康山站误差相对较大，其主要由于康山站点附近湖底地形比其它站点复杂，高程变率大^[13]，而统一分辨率的模型网格很难反映实际地形。虽然研究已经分湖区设置不同湖底糙率，但很难将糙率精细到网格尺度，康山站点附近均一化的糙率可能会水流快速流出，使得该点水位比实际值低。



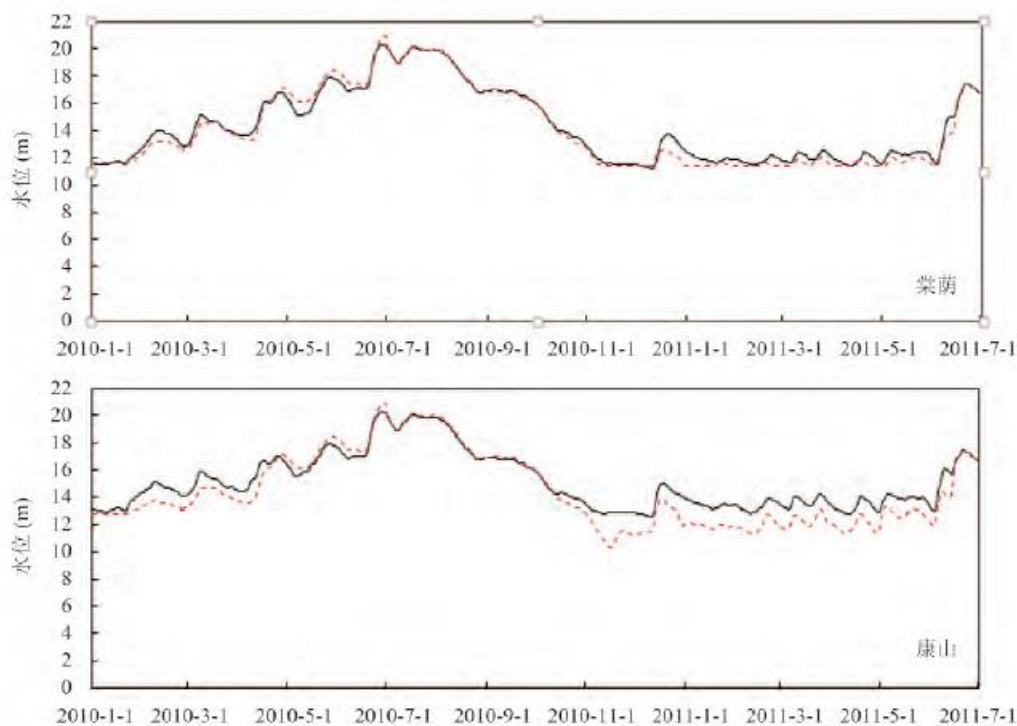


图 3 星子、都昌、棠荫、康山站逐日水位实测值与模拟值对比

Fig.3 Contrast of Observed and Simulated Daily Water Levels at Xingzi, Duchang, Tangyin and Kangshan Station

表 4 水位误差指标

Tab.4 Indicators to Evaluate Model Fits of Water Level

误差指标	描述	单位	公式	范围	星子	都昌	棠荫	康山
MAE	平均绝对误差	m	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n C_i - \hat{C}_i }{n}$	$[0, +\infty)$	0.065	0.127	0.276	0.932
$RMSE$	均方根误差	m	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \hat{C}_i)^2}{n}}$	$[0, +\infty)$	0.085	0.164	0.414	0.941
r^2	决定系数		$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{C}_i - \bar{\hat{C}})(C_i - \bar{C})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{C}_i - \bar{\hat{C}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}} \right)^2$	$[0.0, 1.0]$	0.995	0.997	0.970	0.856
MRE	平均相对误差	%	$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \left \frac{C_i - \hat{C}_i}{\bar{\hat{C}}} \right }{n}$	$[0, +\infty)$	0.005	0.010	0.022	0.076

*注: C_i 和 $\hat{C}_i$ 分别是鄱阳湖在第*i*天水位的模拟值和观测值; $\bar{C}$ 和 $\bar{\hat{C}}$ 分别是鄱阳湖在第*i*天水位的模拟平均值和观测平均值($\bar{C} = \sum_{i=1}^n C_i$, $\bar{\hat{C}} = \sum_{i=1}^n \hat{C}_i$); n 是模拟值和观测值均有效的天数.

3.1.2 流速验证

根据鄱阳湖基础地理测量总体安排,江西省水文局组织实施鄱阳湖湖流监测。在 2010-10-09~12 日进行第一次湖流流速与流向监测。对比湖口、星子、都昌、棠荫和康山站模拟流速以及实测结果来验证模拟精度。其中当水深 $\leq 5\text{m}$ 时,采用二点法(0.2,

0.6)测定流速流向；当水深>5m时，采用三点法(0.2，0.6，0.8)测定流速。误差指标计算结果如表5所示，结果表明模拟流速大小与实测流速接近。同时利用 Tec Plot Focus2013 将5个站点的实测流向与模拟流场图进行叠加对比(图4)，模拟流场的流向与实测流向基本一致。由此可以看出鄱阳湖水动力模型模拟的流速和流向可以较好地反映实际流场特征。

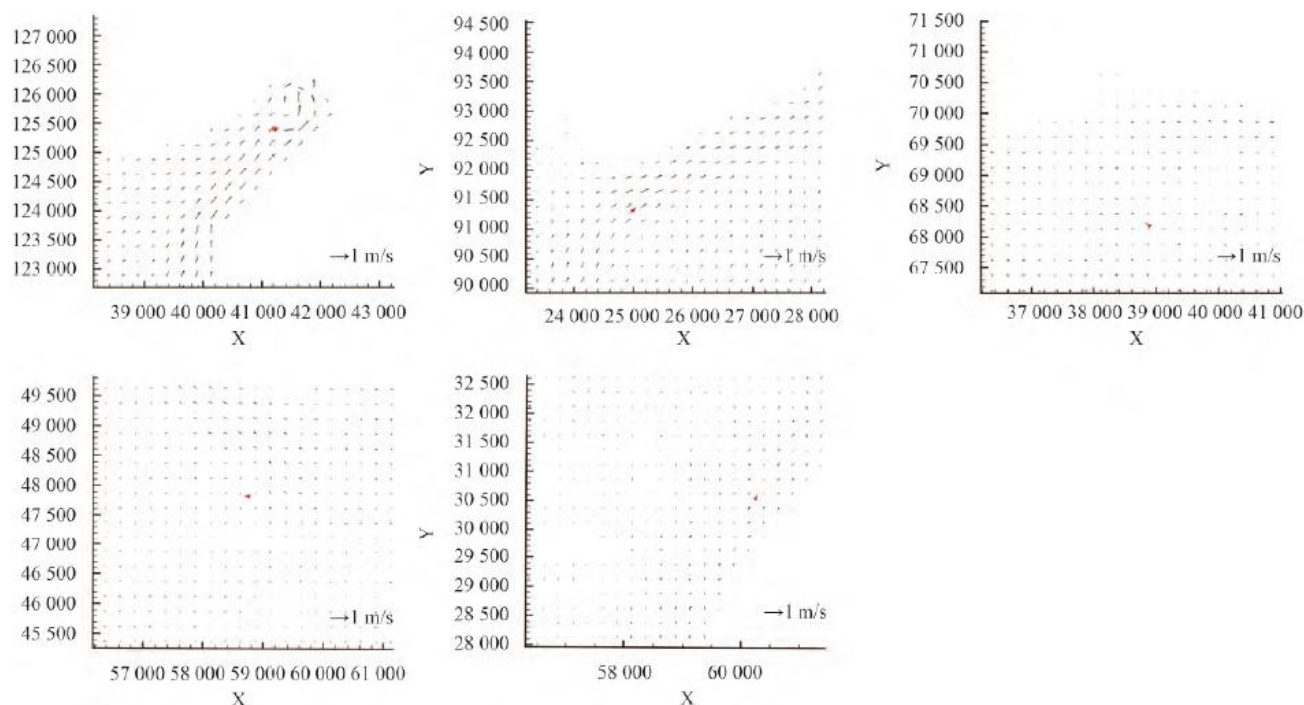


图4 鄱阳湖流向分布验证

Fig.4 Verification of Flow Direction in Lake Poyang

3.2 枯水水位和流速分析

3.2.1 水位时空差异

基于 EFDC 构建的鄱阳湖水动力模型输出水位和水深结果如图5所示。2010年7月~10月以及次年6月，整个湖泊保持较高水位，湖面近似水平，空间差异不明显，仅在湖泊边缘出现局部的露滩区域(图5a)。此时高水位使水面相应增大，加之受长江的顶托作用，致使湖水水面较平。通过5个站点水位的单因素方差分析可知，该时段内各站点水位无显著差异(表6)。由于水位无明显空间差异，水深空间分布直接受湖底高程影响，自上游至下游呈逐级递增趋势，尤其在入江水道区水深最深，局部水域超过20m(图5b)。水深由深到浅大致顺序为东西水道、松门山以南洼地、东部湖汉群、碟形湖、其他水域。

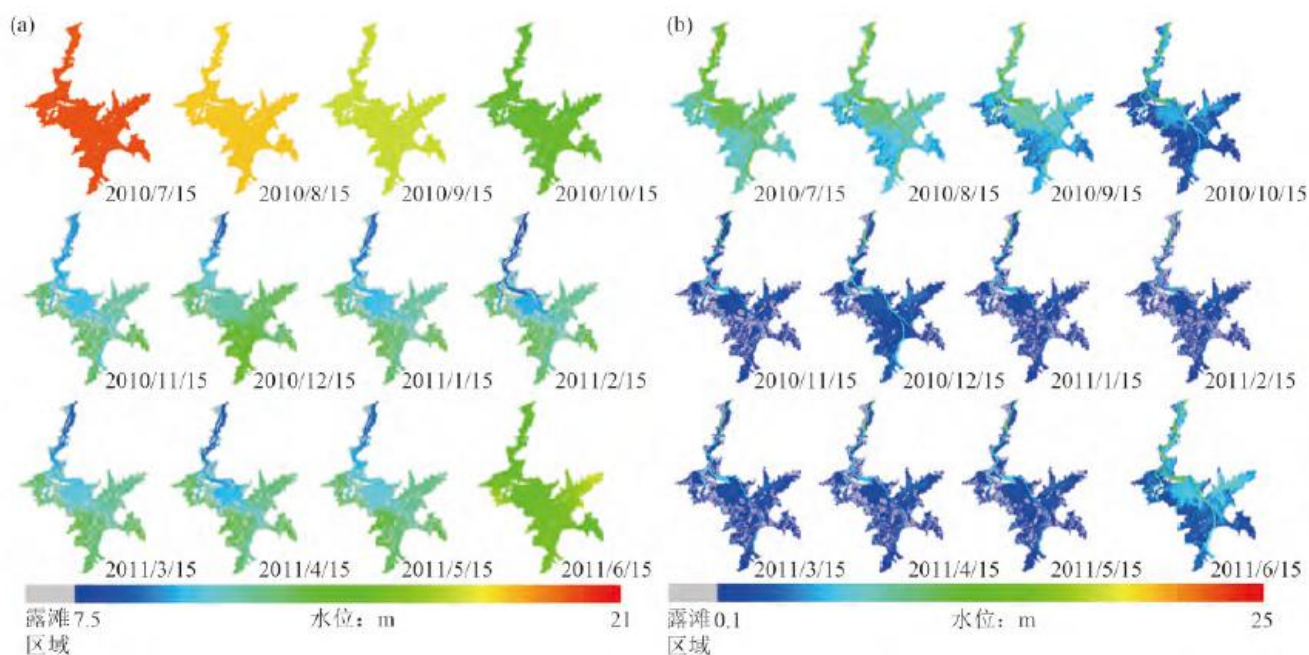


图 5 鄱阳湖水位、水深时空变化

Fig.5 Temporal and Spatial Variation of Water Level and Depth in Lake Poyang

表 6 鄱阳湖5站点模拟水位的差异性分析

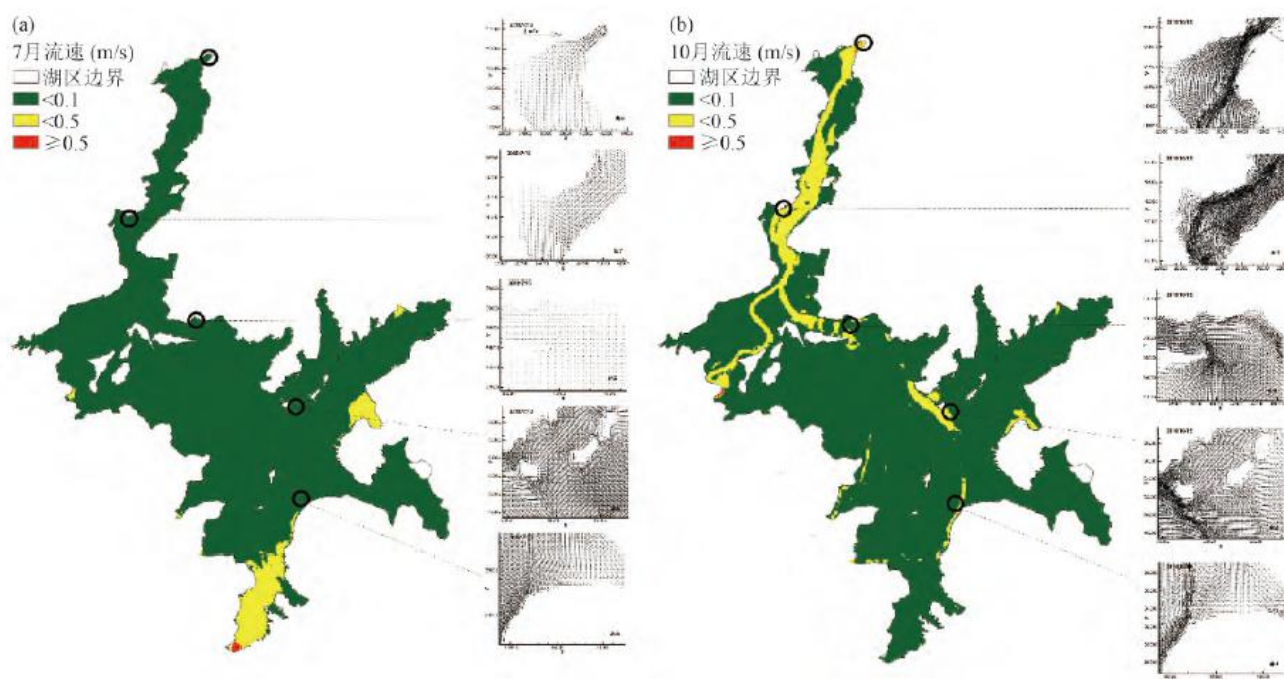
Tab.6 ANOVA Analysis of Simulated Water Level of 5 Stations in Lake Poyang

水文期	月份	湖口	星子	都昌	棠荫	康山	差异性分析p值
枯水期	12月	9.08	9.44	9.81	12.40	13.72	0.000**
	1月	9.15	9.40	9.50	11.91	13.45	0.000**
	2月	8.58	8.81	8.99	11.78	13.30	0.000**
	3月	8.80	9.11	9.38	12.06	13.62	0.000**
涨水期	4月	9.08	9.31	9.36	11.79	13.24	0.000**
	5月	9.31	9.68	9.98	12.27	13.88	0.000**
	6月	14.05	14.33	14.33	15.26	15.94	0.016
丰水期	7月	19.68	19.79	19.58	19.74	19.64	0.295
	8月	18.24	18.31	18.08	18.23	18.14	0.947
	9月	16.66	16.75	16.52	16.70	16.63	0.038
退水期	10月	13.85	14.03	13.89	14.20	14.44	0.051
	11月	9.97	10.10	10.04	11.76	12.93	0.000**

2010年11月~次年5月鄱阳湖在空间上出现明显的水位梯度,即水位空间差异性较大^[53],且水域范围呈明显收缩态势。进入枯水期后,有水区域不断收缩,最终归槽于深水道及其周边。此时鄱阳湖外缘水位至入江水道逐级递减(图5),水位差范围为1.01~6.27m,其中最大水位差出现在12月。因水位不断下降直至湖水归槽,湖流近似河流特性,水位依据主槽的坡降重力作用而变化,使得水位落差加大^[54]。表6的单因素方差分析显示鄱阳湖各站点水位在该时段内均存在显著差异。低水时期只有东西河道、东部湖汉群、碟形湖以及松门山以南低洼地区有少量水分布,大部分区域水深极低(<0.1m),呈现出露滩状态。枯水期除露滩地外,水深分布空间差异不大,仅入江水道处水深明显高于其他有水区域。其中蚌湖、大湖池、沙湖、大汉湖等碟形湖因地形低洼,高程低于周边水域,在低水期与主湖面分离,成为单独水体,水深波动较小。东部湖汉群为相对封闭水域,且呈回流状,使得其低水期水深较浅且较为稳定^[4]。

3.2.2 流速时空差异

流速随地形、水位高低、水势涨退、风力等因素而变化,通过模拟结果分析,其变化特征主要有(1)高水位时期流速小于低水位时期;7月夏季,受太平洋高压控制,降雨充沛,水位从湖口到康山水位维持在 $19.69\pm0.39\text{m}$,高水面使鄱阳湖呈现典型湖相。此时鄱阳湖普遍流速较小($0.03\pm0.08\text{m/s}$) (图 6a)。10月鄱阳湖流速加快($0.11\pm0.06\text{m/s}$),范围为 $0.05\sim0.83\text{m/s}$ (图 6b)。1月处于鄱阳湖枯水期,鄱阳湖流场为河相流场,由于地形的影响因素增加,其动力结构更为复杂。且此时正值冬季,湖区降雨量和五河来水明显减少,且风力增加,湖流以重力流为主,流速加大。全湖水位为 $10.68\pm1.71\text{m}$,流速在 $0.06\sim1.10\text{m/s}$,均值为 $0.14\pm0.09\text{m/s}$ (图 6c)。4月与1月类似,河相流场占主体,随着涨水期水位上升,荣荫、都昌等站率先向湖相流场转换,水域面积有所增加。且由于涨水期水势上升迅速,都昌、荣荫站周边除水道外水域流速增加明显。平均流速为 $0.14\pm0.10\text{m/s}$ (图 6d)。(2)除大水面时期,深水道流速大于主湖区,包括洲滩、湖湾等主湖区的流速一般不超过 0.1m/s (图 6a~d)。(3)高水位时期(7月),上游流速略高于下游,荣荫(0.06m/s)与康山(0.08m/s)站流速大于湖口(0.02m/s)、星子(0.03m/s)、都昌(0.01m/s)站点流速;但其他月份,北部入江水道流速均大于南部湖区 (图 6a~d)。(4)主航道流向主要受重力流制约,湖水沿河道走向由南向北流动;而主湖区受地形、风力等因素影响,流向各异^[39],且东部湖湾处易产生环流((图 6a~b))。



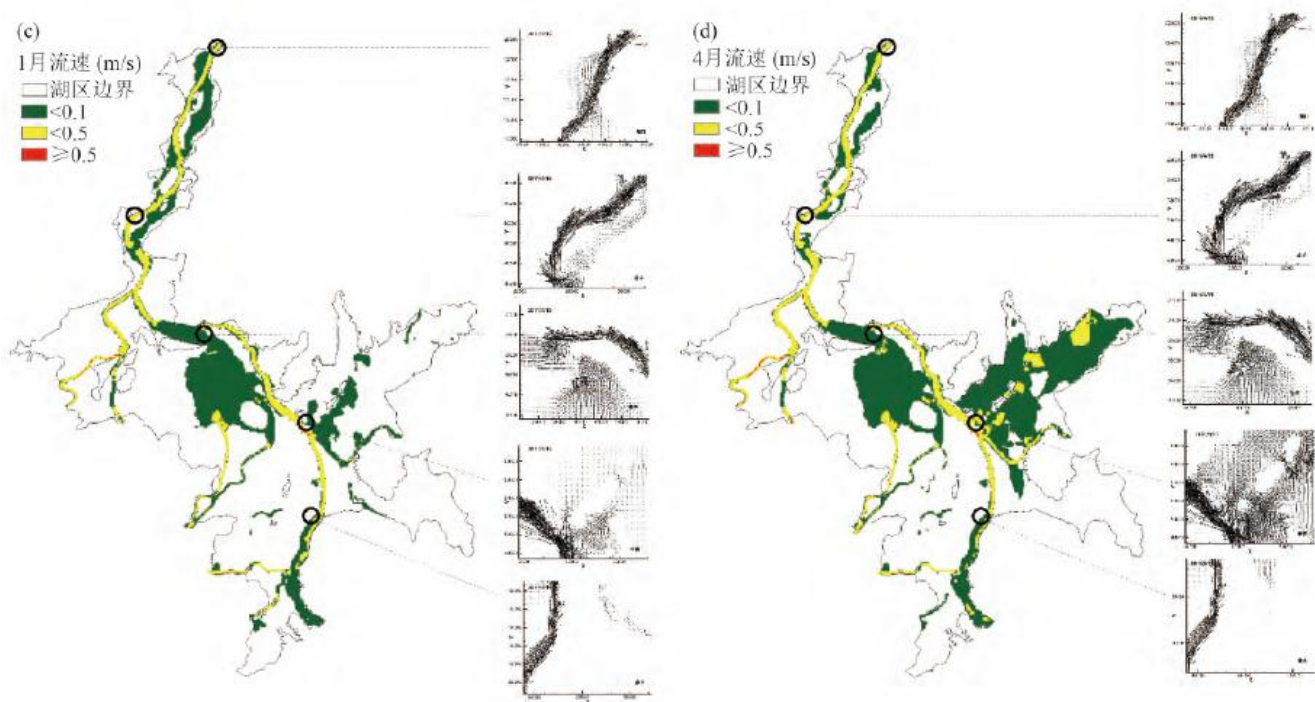


图6 鄱阳湖流场分布

Fig.6 Spatial Variation of Flow Field in Lake Poyang

3.2.3 水位-流速变化分析

为进一步分析水位和流速之间的关系，将湖口、星子、都昌、棠荫4个站点的月均流速与水位进行统计分析，散点图显示流速-水位点可明显分为三组(图7)。水位低于10m时，流速分布较为集中，均值较高为0.432m/s，表明枯水位时湖水归槽，比降增大，流速加快。并且每月各站点之间流速差异不大，均集中出现图中，如11月流速点集中于0.2m/s，而4月流速点集中于0.4m/s，表明此时水道内流速无明显空间差异；水位高于16m时，即高水位的7~9月，流速分布更为集中，且均值低至0.06m/s，此时汛期湖水漫滩，比降减小，流速变缓。7和9月流速点非常紧凑且接近于静水(流速为0m/s)，8月流速稍分散，范围为0.028~0.261m/s；而当水位介于高水与低水之间时，流速变化幅度大且流速点分散，介于0.04~0.99m/s。6和10月为河湖转换期间，快速涨水或退水造成湖流流速不稳。同时同一月份的流速点也较为分散，表明此时流速空间差异较大。这个阶段流速均值高达0.503m/s，下游湖口、星子站均出现流速极大值，而上游棠荫和都昌站流速则不稳定，有低缓流速出现。综上所述，流速与水位关系密切且不同水位对应流速大小及分布有所差异。

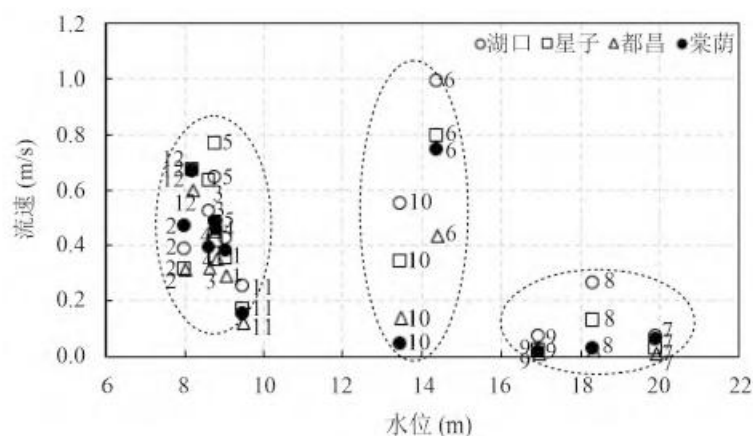


图7 水位-流速变化分析

Fig.7 Statistic Analysis of Water Level and Flow Velocity

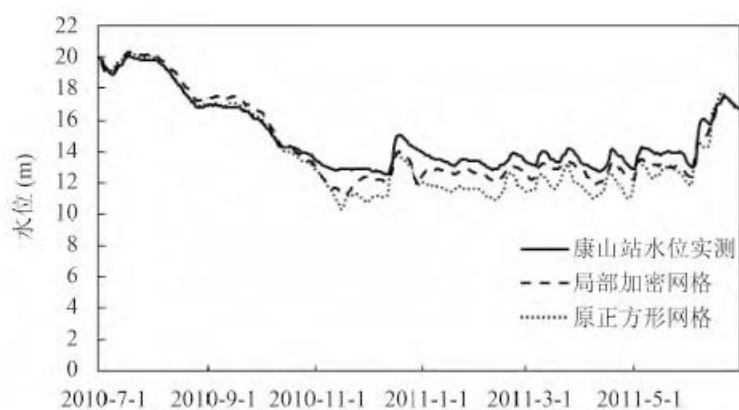


图8 不同网格模拟康山站水位对比

Fig.8 Comparison of Simulated Water Level at Kangshan Station Based on Different Grids

3.3 模拟结果不确定性分析

模型模拟结果能够在一定程度上反映枯水水文统计年内 (2010-07-01~2011-06-30) 鄱阳湖水位和流速时空变化特征, 但尚存在以下不确定性:

(1) 网格及糙率限制了康山站点模拟精度。康山站点附近高程变率大, 均一分辨率的网格很难刻画出该站点附近地形, 同时枯水期洲滩出露, 该站点附近湿生植被生长, 植被对于水流的阻尼作用较难去估计, 仅用糙率不能达到很好的效果, 因此造成康山站点的误差较大。为了测试地形对康山站点水位模拟的影响, 研究局部加密康山站点附近地形, 再次运行模型, 统计模型结果, 如图8所示。对比结果显示精细化地形可以在一定程度提升康山站点的模拟精度, 尤其在低水位时, 但相较于其他站点精度仍然较低, 且高水位时模拟精度受到影响。因此后期应有针对性精细化复杂地形的网格, 掌握网格数和运行时间成本及稳定性之间的平衡, 并进一步优化植被阻尼系数, 提高模拟精度。

(2)气象数据方面。水动力过程受气象条件驱动,降雨、蒸发、风力等条件都会不同程度影响水动力过程,即催生不同的水位和流速分布模式。鄱阳湖水域宽阔,气象条件存在一定空间差异,本研究因数据有限,仅使用星子站单一站点数据代表整个鄱阳湖区的气候,一定程度上影响了模拟精度。后期应采用更全面有效的气象数据驱动水动力模拟,降低模型不确定性。

4 结论

基于 EFDC 构建鄱阳湖水动力模型,模拟鄱阳湖枯水水文统计分析年 2010-07-01~2011-06-30 的动态水动力过程,研究鄱阳湖该年内的水位和流场时空分布特征,并进一步探究水位-流速响应关系,得出以下结论:

(1)2010 年 7~10 月以及次年 6 月为高水位期,湖区水位空间分布无明显差异,水深直接受湖底高程影响,自上游至下游呈逐级递增;2010 年 11 月~次年 5 月低水位期,鄱阳湖水位在空间上出现明显差异,湖区外缘水位至入江水道逐级递减,水深分布空间差异不大,仅入江水道处水深明显高于其他有水区域。

(2)流速变化特征主要有:①高水位时期流速小于低水位时期;②除大水面时期外,深水道流速大于主湖区;③高水位时期上游流速略高于下游,但其他月份,北部入江水道流速均大于南部湖区;④主航道流向主要受重力流制约,湖水沿河道走向由南向北流动;而主湖区受地形、风力等因素影响,流向各异,且东部湖湾处易产生环流。

(3)鄱阳湖流速与水位关系密切,且不同水位对应流速大小及分布有所差异。

致谢:感谢江西省鄱阳湖水文局提供鄱阳湖流量、水位数据及星子站降雨、蒸发气象数据;感谢江西省水利厅提供鄱阳湖湖底高程数据;感谢中国气象科学数据共享服务网提供波阳站和南昌站气象数据。感谢美国 TetraTechInc 公司邹锐博士在模型构建中给予的技术指导。

参考文献:

[1] 郭 华, HU Q, 张 奇. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 609 - 618.

【GUO H, HU Q, ZHANG Q. Changes in hydrological interactions of the Yangtze River and the Poyang Lake in China during 1957 - 2008[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 609 - 618.】

[2] 赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 鄱阳湖生态环境与可持续发展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 318 - 326.

【ZHAO Q G, HUANG G Q, QIAN H Y. Ecological environment and sustainable development of Poyang Lake[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 318 - 326.】

[3] COOPS H, BEKLIOGLU M, CRISMAN T L. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems-workshop conclusions[J]. Hydrobiologia, 2003, 506 - 509(1/3): 23 - 27.

[4] 杜彦良, 周怀东, 彭文启, 等. 近 10 年流域江湖关系变化作用下鄱阳湖水动力及水质特征模拟[J]. 环境科学学报, 2015, 35 (5) :1274 - 1284.

【DU Y L, ZHOU H D, PENG W Q, et al. Modeling the impacts of the change of river-lake relationship on the hydrodynamic and water quality revolution in Poyang Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5): 1274 -

1284.】

[5] 胡振鹏, 葛 刚, 刘成林, 等. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水水位对其影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 597 - 605.

【HU Z P, GE G, LIU C L, et al. Structure of Poyang Lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(6): 597 - 605.】

[6] 张堂林, 李钟杰. 鄱阳湖鱼类资源及渔业利用[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 434 - 444.

【ZHANG T L, LI Z J. Fish resources and fishery utilization of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(4): 434 - 444.】

[7] 刘成林, 谭胤静, 林联盛, 等. 鄱阳湖水位变化对候鸟栖息地的影响[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 129 - 135.

【LIU C L, TAN Y J, LIN L S, et al. The wetland water level process and habitat of migratory birds in Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(1): 129 - 135.】

[8] 徐昌新, 阮禄章, 胡振鹏, 等. 鄱阳湖越冬鸟类种群动态与保护研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3): 407 - 414.

【XU C X, RUAN L Z, HU Z P, et al. The research on winter bird population dynamic and conservation in Poyang Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(3): 407 - 414.】

[9] 闵 骞. 鄱阳湖水位变化规律的研究[J]. 湖泊科学, 1995, 7(3): 281 - 288.

【MIN Q. On the regularities of water level fluctuations in Poyang Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 1995, 7(3): 281 - 288.】

[10] 闵 骞, 汪泽培. 近 40 年鄱阳湖水位变化趋势[J]. 江西水利科技, 1992, 18(4): 360 - 364.

【MIN Q, WANG Z P. The varying tendency of the water level of the Poyang Lake in recent 40 years[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 1992, 18(4): 360 - 364.】

[11] 闵 骞, 占腊生. 1952 - 2011 年鄱阳湖枯水变化分析[J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 675 - 678.

【MIN Q, ZHAN L S. Characteristics of low-water level changes in Lake Poyang during 1952 - 2011[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(5): 675 - 678.】

[12] 欧阳千林, 刘卫林. 近 50 年鄱阳湖水位变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1545 - 1550.

【OUYANG Q L, LIU W L. Variation characteristics of water level in Poyang Lake over 50 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1545 - 1550.】

-
- [13] 赖格英, 王 鹏, 黄小兰, 等. 鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水力影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 128 - 140.
- 【LAI G Y, WANG P, HUANG X L, et al. A simulation research of impacts of the Lake Poyang hydraulic project on hydrology and hydrodynamics[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1): 128 - 140.】
- [14] 赖锡军, 姜加虎, 黄 群, 等. 鄱阳湖二维水动力和水质耦合数值模拟[J]. 湖泊科学, 2011, 23(6): 893 - 902.
- 【LAI X J, JIANG J H, HUANG Q, et al. Two-dimensional numerical simulation of hydrodynamic and pollutant transport for Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(6): 893 - 902.】
- [15] CAI Y J, LU Y J, WU Z S, et al. Community structure and decadal changes in macrozoobenthic assemblages in Lake Poyang, the largest freshwater lake in China[J]. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 2014(414): 09.
- [16] 刘宝贵, 刘 霞, 吴 瑶, 等. 鄱阳湖浮游甲壳动物群落结构特征[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8205 - 8213.
- 【LIU B G, LIU X, WU Y, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of planktonic crustaceans in Lake Poyang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8205 - 8213.】
- [17] HUANG J C, GAO J F, HÖRMANN G, et al. Modeling the effects of environmental variables on short-term spatial changes in phytoplankton biomass in a large shallow lake, Lake Taihu[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(9): 3609 - 3621.
- [18] HUANG J C, GAO J F, ZHANG Y J, et al. Modeling impacts of water transfers on alleviation of phytoplankton aggregation in Lake Taihu[J]. Journal of Hydroinformatics, 2015, 17(1): 149 - 162.
- [19] 唐昌新, 熊 雄, 邬年华, 等. 长江倒灌对鄱阳湖水动力特征影响的数值模拟[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 700 - 710.
- 【TANG C X, XIONG X, WU N H, et al. Simulation of the impact of the reverse flow from Yangtze River on the hydrodynamic process of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4): 700 - 710.】
- [20] LV C, ZHANG F Q, LIU Z Y, et al. Three-dimensional numerical simulation of sediment transport in Lake Tai based on EFDC model[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013, 11(2): 1343 - 1348.
- [21] 邹 锐, 朱 翔, 贺 彬, 等. 基于非线性响应函数和蒙特卡洛模拟的滇池流域污染负荷削减情景分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2312 - 2318.
- 【ZOU R, ZHU X, HE B, et al. Uncertainty based load reduction scenario analysis for Lake Dianchi using nonlinear response function embedded Monte Carlo simulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(10): 2312 - 2318.】
- [22] 刘 永, 阳平坚, 盛 虎, 等. 滇池流域水污染防治规划与富营养化控制战略研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8):

1962 - 1972.

【LIU Y, YANG P J, SHENG H, et al. Watershed pollution prevention planning and eutrophication control strategy for Lake Dianchi[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(8): 1962 - 1972.】

[23] ZHAO L, LI Y Z, ZOU R, et al. A three-dimensional water quality modeling approach for exploring the eutrophication responses to load reduction scenarios in Lake Yilong (China)[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 177: 13 - 21.

[24] ZOU R, ZHANG X L, LIU Y, et al. Uncertainty-based analysis on water quality response to water diversions for Lake Chenghai: a multiple-pattern inverse modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 514: 1 - 14.

[25] 唐天均, 杨 晟, 尹魁浩, 等. 基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(3): 393 - 400.

【TANG T J, YANG S, YIN K H, et al. Simulation of eutrophication in Shenzhen reservoir based on EFDC model[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(3): 393 - 400.】

[26] 李一平, 王静雨, 滑 磊. 基于 EFDC 模型的河道型水库藻类生长对流域污染负荷削减的响应——以广东长潭水库为例[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 811 - 818.

【LI Y P, WANG J Y, HUA L. Response of algae growth to pollution reduction of drainage basin based on EFDC model for channel reservoirs: a case of Changtan Reservoir, Guangdong Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 811 - 818.】

[27] ZACHARIAS I, DIMITRIOU E, KOUSSOURIS T. Integrated water management scenarios for wetland protection: application in Trichonis Lake[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(2): 177 - 185.

[28] CHEN C F, MESELHE E, WALDON M. Assessment of mineral concentration impacts from pumped stormwater on an Everglades Wetland, Florida, USA-Using a spatially-explicit model[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 452 - 453: 25 - 39.

[29] LONG S A, TACHIEV G I, FENNEMA R, et al. Modeling the impact of restoration efforts on phosphorus loading and transport through Everglades National Park, FL, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 520: 81 - 95.

[30] RULLYANTO A, JÓNASDÓTTIR S H, VISSER A W. Advective loss of overwintering *Calanus finmarchicus* from the Faroe-Shetland Channel[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 98: 76 - 82.

[31] LI Y L, ZHANG Q, YAO J. Investigation of residence and travel times in a large floodplain lake with complex lake-river interactions: Poyang Lake (China)[J]. *Water*, 2015, 7(5): 1991 - 2012.

[32] ZHANG Q, WERNER A D. Hysteretic relationships in inundation dynamics for a large lake-floodplain system[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 160 - 171.

-
- [33] YAO H, QIAN X, YIN H, et al. Regional risk assessment for point source pollution based on a water quality model of the Taipu River, China[J]. Risk Analysis, 2015, 35(2): 265 - 277.
- [34] YU Q, WANG Y W, GAO S, et al. Modeling the formation of a sand bar within a large funnel-shaped, tide-dominated estuary Qiantangjiang Estuary, China[J]. Marine Geology, 2012, 299 - 302:63 - 76.
- [35] XIE D F, WANG Z B, GAO S, et al. Modeling the tidal channel morphodynamics in a macro-tidal embayment, Hangzhou Bay, China[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(15): 1757 - 1767.
- [36] LAI X J, LIANG Q H, JIANG J H, et al. Impoundment effects of the three-gorges-dam on flow regimes in two China's largest freshwater lakes[J]. Water Resources Management, 2014, 28(14): 5111 - 5124.
- [37] HUANG J C, GAO J F, MOOIJ W M, et al. A comparison of three approaches to predict phytoplankton biomass in Gonghu bay of lake Taihu[J]. Journal of Environmental Informatics, 2014, 24(1): 39 - 51.
- [38] 李云良, 张 奇, 李 淼, 等. 基于 BP 神经网络的鄱阳湖水位模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 233 - 240.
- 【LI Y L, ZHANG Q, LI M, et al. Using BP neural networks for water level simulation in Poyang Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(2): 233 - 240.】
- [39] 谭国良, 郭生练, 王 俊, 等. 鄱阳湖生态经济区水文水资源演变规律研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 9 - 11.
- 【TAN G L, GUO S L, WANG J, et al. Hydrology and water resources research evolution in Poyang Lake ecological economic zone[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2013: 9 - 11.】
- [40] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 218 - 220.
- 【WANG S M, DOU H S. Chinese lakes[M]. Beijing: Science Press, 1998: 218 - 220.】
- [41] 闵 骞. 20 世纪 90 年代鄱阳湖洪水特征的分析[J]. 湖泊科学, 2002, 14(4): 323 - 330.
- 【MIN Q. Analysis on the flood characters in 1990s, Poyang Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(4): 323 - 330.】
- [42] 闵 骞, 汪泽培. 鄱阳湖近 600 年洪水规律的分析[J]. 湖泊科学, 1994, 6(4): 375 - 383.
- 【MIN Q, WANG Z P. On the ragularity of flood occurrences in Poyang Lake in the past 600 years[J]. Journal of Lake Sciences, 1994, 6(4): 375 - 383.】
- [43] 闵 骞, 闵 聃. 鄱阳湖区干旱演变特征与水文防旱对策[J]. 水文, 2010, 30(1): 84 - 88.

【MIN Q, MIN D. Drought change characteristics and drought protection countermeasures for Poyanghu Lake Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(1): 84 - 88.】

[44] LAI X J, SHANKMAN D, HUBER C, et al. Sand mining and increasing Poyang Lake's discharge ability: a reassessment of causes for lake decline in China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519:1698 - 1706.

[45] 郭 华, 苏布达, 王艳君, 等. 鄱阳湖流域 1955 - 2002 年径流系数变化趋势及其与气候因子的关系[J]. 湖泊科学, 2007, 19(2): 163 - 169.

【GUO H, SU B D, WANG Y J, et al. Runoff coefficients change and the analysis of the relationship between climate factors and runoff coefficients in Poyang Lake Basin (China): 1955 - 2002[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(2): 163 - 169.】

[46] WANG Y H, JIANG Y Z, LIAO W H, et al. 3-D hydro-environmental simulation of Miyun reservoir, Beijing[J]. Journal of Hydroenvironment Research, 2014, 8(4): 383 - 395.

[47] 龚 然, 徐 进, 徐立刚, 等. 基于 EFDC 城市景观湖泊水动力模拟研究[J]. 环境工程, 2015, 33(4): 58 - 62, 91.

【GONG R, XU J, XU L G, et al. Study on hydrodynamics in urban landscape lake based on EFDC[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(4): 58 - 62, 91.】

[48] HAMRICK J M, MILLS W B. Analysis of water temperatures in Conowingo Pond as influenced by the Peach Bottom atomic power plant thermal discharge[J]. Environmental Science & Policy, 2000, 3(S1): 197 - 209.

[49] QI L Y, HUANG J C, YAN R H, et al. Modeling the effects of the streamflow changes of Xinjiang Basin in future climate scenarios on the hydrodynamic conditions in Lake Poyang, China[J]. Limnology, 2016, doi: 10.1007/s10201-016-0500-0.

[50] 齐亨达, 陆建忠, 陈晓玲, 等. 鄱阳湖水动力模型的遥感验证研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014(6): 18 - 23.

【QI H D, LU J Z, CHEN X L, et al. Study on hydrodynamic model validation by remote sensing in Poyang Lake[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014(6): 18 - 23.】

[51] HUANG J C, GAO J F, XU Y, et al. Towards better environmental software for spatio-temporal ecological models: Lessons from developing an intelligent system supporting phytoplankton prediction in lakes[J]. Ecological Informatics, 2015, 25: 49 - 56.

[52] 李一平, 唐春燕, 余钟波, 等. 大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 271 - 277.

【LI Y P, TANG C Y, YU Z B, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of large shallow lake hydrodynamic models[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 271 - 277.】

[53] 李云良, 张 奇, 姚 静, 等. 鄱阳湖湖泊流域系统水文水动力联合模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 227 - 235.

【LI Y L, ZHANG Q, YAO J, et al. Integrated simulation of hydrological and hydrodynamic processes for Lake Poyang catchment system[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(2): 227 - 235. 】

[54] 徐火生, 喻致亮. 鄱阳湖水位特性分析[J]. 江西水利科技, 1988(4):46 - 54.

【XU H S, YU Z L. The analysis of water level in Lake Poyang[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 1988(4): 46 - 54. 】