

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.013

赵正文, 冯民权, 程刚, 等. 城市人工湖动态换水水位对流速分布影响[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 88-95. (ZHAO Zhengwen, FENG Minquan, CHENG Gang, et al. Influences of water level on flow velocity distribution during dynamic water exchange in urban artificial lake[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 88-95. (in Chinese))

## 城市人工湖动态换水水位对流速分布影响

赵正文<sup>1</sup>, 冯民权<sup>1</sup>, 程 刚<sup>1,2</sup>, 唐 洋<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安市水利规划勘测设计院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 水位和流速是人工湖维持生态的关键因子,为探究人工湖水位对流速分布的影响,基于二维水动力模型对雁鸣湖流场进行数值模拟,研究单因素水位对流速影响和实测换水水位对流速时空分布的影响。结果显示:水位是水动力影响因素之一,低水位时的湖泊流速大于高水位时期,水位变化时的平均流速介于高低水位流速之间,水位对环流影响较小。在实测换水期间,高水位时水位分布无明显差异,水深自上游至下游逐级递增;低水位时水位分布出现差异,河滩裸露,水深分布差异较大;水位变化时,湖泊上游至下游水位呈梯度变化,水深随水位变化;流速时空分布验证了单因素水位对流速的影响,并表明不同水位对流速大小及分布影响有所差异。雁鸣湖水位和流速的模拟结果表明,人工湖水位变化能改善湖泊水动力,可为人工湖水情管理提供科学参考。

**关 键 词:** 人工湖; 数值模拟; 水位; 流速

**中图分类号:** X524; X143

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2018)04-0088-08

城市人工湖是城市公众休闲娱乐、亲近自然的场所,具有调节小气候、净化水质、维持生物多样性等生态功能。城市人工湖具有水浅、流动性差、底泥污染严重,以及接纳混杂污水的特点,导致水质受到污染,水体富营养化严重。湖泊水动力过程对湖泊中物质、能量的输移扩散起着决定性作用,是研究泥沙、水质和生态等的基础<sup>[1-2]</sup>,其水动力与湖体本身的形态、吞吐流、风场和水位等物理参数有关<sup>[3]</sup>,其中湖泊水位是影响湖泊水文过程和生态环境的主要因素<sup>[4]</sup>。

人工调控性湖泊主要是对入湖流量的调控,自然要素只能对入湖流量产生影响。对于功能性湖泊,如灌溉、防洪、供水和净化水质等,入湖流量是最终影响水位及其变差范围和时空变化特征的决定性因子<sup>[5]</sup>。目前,国内外学者通过建立二维、三维浅水动力学模型<sup>[6-8]</sup>,研究湖泊水动力过程的特征及形成机制,较多关注风场、吞吐流和湖底地形等要素对湖泊水动力的影响<sup>[9-12]</sup>,常常忽略水位的变化。

水位是湖泊贮水量变化的度量,对于湖泊生态系统而言,存在一个适宜的水位<sup>[13]</sup>。研究者主要针对湖泊水位变动对水生植被影响方面取得了一定进展,包含对天然大型湖泊水位变动的范围<sup>[14-15]</sup>、发生时间等其他规律的研究<sup>[16-18]</sup>,但未涉及对水动力影响的研究。天然湖泊水位一般在年内随季节变化,而人工湖水位则受人为调控。由于人工湖受人为调控的水位变化特别明显,水位调控是湖泊生态恢复与管理的重要技术<sup>[7]</sup>,因此研究水位对人工湖泊水动力的影响很有必要。

**收稿日期:** 2017-09-08

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51679191); 陕西省水利厅科技计划项目(2016slkj-13); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS102)

**作者简介:** 赵正文(1992—),男,甘肃临洮人,硕士研究生,主要从事水环境模拟与污染控制。

E-mail: zhaozw0723@163.com 通信作者: 冯民权(E-mail: mqfeng@xaut.edu.cn)

## 1 研究方法和方案设计

### 1.1 水动力模型原理

由于人工湖水平尺度远大于垂直尺度,采用二维水动力模型。模型基于不可压缩和雷诺值平均分布的 N-S 方程,并服从于 Boussinesq 假定和静水压力的假定<sup>[19]</sup>。二维浅水方程为:

$$\partial \varphi / \partial t + \partial p / \partial x + \partial q / \partial y = S \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega q - \tau_s V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a = S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega p - \tau_s V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a = S_y \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为高程(m);  $p, q$  分别为沿  $x$  和  $y$  方向的单宽流量( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $V_x, V_y$  分别为沿  $x, y$  方向的风速( $\text{m/s}$ );  $h$  为水深(m);  $C$  为 Chezy 阻力系数( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ );  $g$  为重力加速度( $\text{m/s}^2$ );  $\tau_s$  为风摩擦系数;  $\Omega$  为科氏力系数,受纬度影响( $1/\text{s}$ );  $p_a$  为大气压强(Pa);  $\rho_w$  为水密度( $\text{kg/m}^3$ );  $S, S_x, S_y$  分别为源质量的动量和沿  $x, y$  方向的动量分量( $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ );  $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  为不同方向的有效剪切应力;  $x, y$  为空间坐标(m);  $t$  为时间(s)。

针对人工湖数值计算面临复杂几何地形和不规则边界的问题,建立非结构化三角形网格下的二维水动力模型,将任意三角形作为计算单元,采用单元中心的有限体积法求解,有 Ros's 近似黎曼法求解单元界面的对流流动,使用二阶 TVD 格式的限制器函数避免数值震荡。

### 1.2 研究区域

雁鸣湖地处干旱半干旱地带,湖泊供水由泾河提供,四季供水量变化明显,其中雁鸣湖 5 号属于小型浅水湖泊,面积不大,形状不规则,东西宽 300 m(为  $x$  方向),南北长 1 200 m(为  $y$  方向,以西安 80 为基准坐标),位于泾河旁边,属于河道型湖泊,目前湖泊污染较严重。泾河多年平均最小流量  $0.286 \text{ m}^3/\text{s}$ ,水流瞬时流量  $0.235 \sim 0.450 \text{ m}^3/\text{s}$ ,满足泾河补给雁鸣湖设计流量  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$  要求。雁鸣湖正常蓄水位 434.5 m,最低水位 433 m,水深 1.5~2.0 m。采用非结构三角形网格对湖泊区域进行划分,其中网格数 8 084 个,节点数 3 421 个,地形采用加权反离法插值到每个网格节点。非结构网格能对复杂几何地形提供最优程度的拟合。为了更好地拟合边界处的地形变化,对湖岸边界附近进行网格加密和光滑处理,如图 1 所示。流速测点布置见图 2。

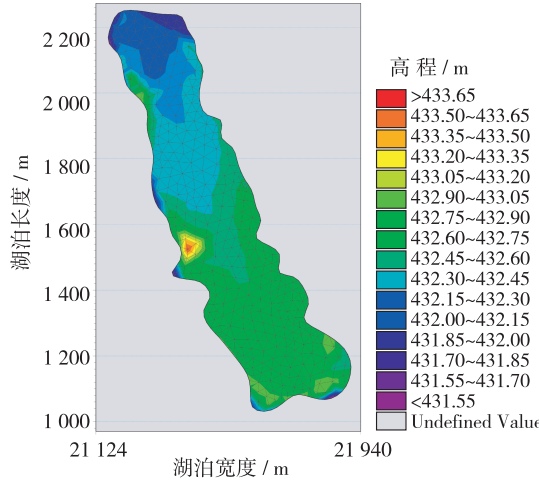


图 1 湖泊网格划分和地形  
Fig. 1 Model grids and bathymetry  
of lake

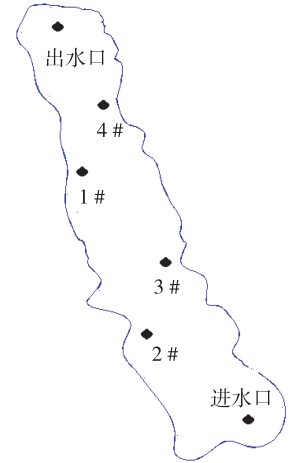


图 2 流速测点分布  
Fig. 2 Velocity measurement  
points

### 1.3 时间步长

时间步长的设定是模型稳定运行的关键,必须保证 CFL 数小于 1,对于笛卡尔坐标系下的浅水方程式为:

$$CFL = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (4)$$

式中: $h$  为水深(m); $u$  和  $v$  分别为  $x$  和  $y$  方向流速分量(m/s); $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>); $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为  $x$  和  $y$  方向特征长度, $\Delta x$  和  $\Delta y$  近似于三角形网格的最小边长,以三角形网格中心为水深和流速的取值点; $\Delta t$  为时间间距。

### 1.4 边界条件

湖泊的边界条件分别为闭合边界、开边界和干湿边界。闭合边界指所有正交于边界流动变量为 0 的边界,对应于湖泊的陆地边界。开边界指有随时间变化的量的边界,对于湖泊为进出水口的流量过程和水位过程。干湿边界处理动边界问题,避免强浅水效应,对计算区域内水位变化过程,当退水水深小于 0.005 m 时,令该网格点为“干点”,不参与水动力计算;当水深大于 0.005 m 但小于 0.05 m 时,该网格点仅参与水流连续方程的计算;当水深大于 0.1 m 时,令该网格点为“湿点”,参与水流连续方程和动量方程的计算。对于雁鸣湖水位变化的动边界,采用“干湿判别法”处理计算。

### 1.5 模型验证

该模型水位、流量和流场等水动力指标参数已在 2007—2009 年进行了全面率定和验证<sup>[20]</sup>,表明模型具有关键过程模拟的优势和能力。此处对 2016 年 10 月至 2017 年 9 月的水动力过程进行进一步验证,选择湖区 1#和 3#及出水口(见图 2)实测水深变化过程进行验证(图 3),同时计算误差指标:平均相对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、决定系数( $r^2$ )、纳什效率系数(NSE),误差指标分别为:0.034 4~0.854 0,0.068 4~0.854 2,0.913 2~0.954 4,0.933 8~0.975 9。对比曲线趋势和误差指标统计可以看出,模型模拟精度较好,能真实反映雁鸣湖水动力变化过程。水位较高时,整体模拟效果好于低水位,这是因为较高水位时湖泊湖面较大,流场稳定,低水位时受湖泊地形影响,流场受到一定程度阻滞作用,从而模拟误差较大。

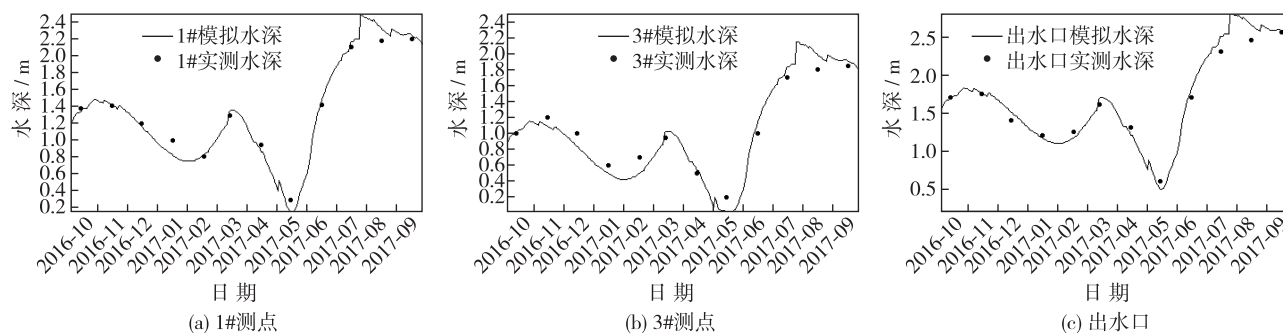


图 3 模型验证

Fig. 3 Model validation

### 1.6 水位变化及模拟方案

根据雁鸣湖调控换水调研结果,每年 3 月为湖泊正常水位,4 月湖泊放水,且无引水补给,水位下降明显,5 月在低水位下,开放进出口闸门,引入浐河水源对湖底沉积物进行冲刷,6 月进行引水补给,达到正常水位。湖泊的进出流均为缓流,主要影响附近局部水域的流速变化<sup>[3]</sup>,对湖泊整体流速的影响可忽略不计。设计模拟方案见表 1。

表 1 模拟方案  
Tab. 1 Model simulation schemes

| 方案 | 对应现状     | 水位            | 流量(0.2 m <sup>3</sup> /s) | 风速和风向                          |
|----|----------|---------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1  | 3 月份正常水位 | 正常水位(434.5 m) | 有进有出                      | 常年主导风<br>(东北风)、<br>平均风速(2 m/s) |
| 2  | 4 月份水位降低 | 正常水位到低水位过程    | 无进有出                      |                                |
| 3  | 5 月份低水位  | 低水位(433 m)    | 有进有出                      |                                |
| 4  | 6 月份水位升高 | 低水位到正常水位过程    | 有进无出                      |                                |

注:水位高程基面为国家高程基准。

模拟方案主要考虑单因素水位对湖泊流速的影响,其中湖泊进出流量为 0.2 m<sup>3</sup>/s,风向为恒定常年主导风、风速为年平均风速,不考虑降雨和蒸发。作为对比增加实测换水工况模拟,分析水位和流速时空分布的影响,实测工况中水文和气象数据在 2017-03-01—2017-06-30 实测得到,水文数据包括实测湖泊进出口流量(m<sup>3</sup>/s)和监测点水位数据(m);气象数据来自国家气象中心西安站(ID:57131),气象数据包括降雨(mm)、蒸发(mm)、温度(℃)、风速(m/s)和风向。湖泊模拟的地形数据由西安市水利规划勘测设计院提供。

2 结果与讨论

水位变化是湖泊流场影响因素之一,特别是人工湖泊水位变化明显,对于湖泊的影响更加显著,根据模拟方案和实测换水工况探讨水位对人工湖水动力的影响。

2.1 模拟结果分析

图 4 为模拟结果,分别给出了高低水位流速稳定时的流速分布与水位升高和降低过程中的湖泊平均流速分布。当湖泊处于不同水位时,湖泊的流速差别较大,低水位湖泊流速大于高水位,但环流分布形态影响较少。正常蓄水位时,湖泊边界凹区域和环流过渡区形成死水区;低水位时,由于湖底地形作用在湖底低洼处形成高速流域,并且在进出口区域由于水位顶托作用的减弱也形成高速流域,因而湖泊整体流速增大。在湖泊水位升高或降低过程中,湖泊的平均流速分布相近,高流速分布区域相近,相对水位升高或降低,流速在进水口和出水口差别较大(因为湖泊水位变化主要由进出水口流量不同引起,所以导致湖泊流速的差异)。

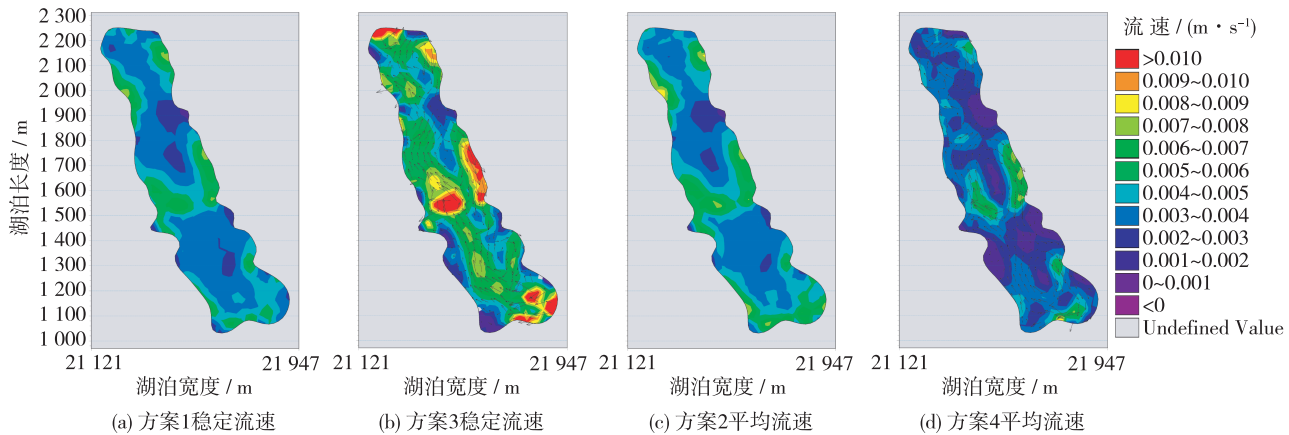


图 4 不同方案的流速分布  
Fig. 4 Distribution of flow velocities under different schemes

为了说明水位对湖泊流速的影响,取了湖中不同位置的月平均流速值(图 5)来说明水位的影响程度,其中 1#和 3#是环流点位置,2#和 4#是无环流点位置。由图 5 可见,湖泊不同位置点的流速存在差异,同一位置点不同水位下的流速也存在差异。在正常水位下湖泊的流速最小,在低水位下流速最大,水位变化下平均流

速介于两者之间,说明低水位有利于湖泊流场,但是作为城市人工湖泊,水位太低,不能满足生态环境的需求,达不到生态景观的水位要求,所以湖泊不可以长时间低水位运行。

## 2.2 换水期间水位和流速分析

### 2.2.1 水位时空差异 基于雁鸣湖水动力模型输出的

水位和水深时空分布如图 6 所示。3 月份整个湖泊保持较高水位,空间差异不明显,湖面近似水平,湖泊高水位使水面相应增大,湖泊水位对补水的顶托作用,致使湖水水面较平,水深空间分布直接受湖底地形的影响,自上游至下游呈逐级递增趋势,出水口的水深最深,局部区域水深接近 2 m,湖泊中心到边界水深由深到浅。4 月份湖泊水位出现明显的水位梯度,水位自上游逐级降低,水域范围有收缩态势,水深变化明显。5 月湖泊水位达到最低,河滩裸露,水位变化梯度达到最大,水位差约 1 m。因水位不断下降直至湖水归槽,部分湖流近似河流特性,水位因湖底坡降作用而变化,上游大部分区域水深极小,呈现裸露状态;部分区域形成独立的水域。6 月份水位出现梯度变化,水深增大,水域范围呈扩大态势,水位达到正常水位。总体来说,湖泊在 3 月和 5 月时水位分布相对稳定,部分差异由湖底地形造成;在 4 月和 6 月湖泊水位分布从上游至下游呈梯度变化,且湖泊长宽比较大,属狭长型湖泊,因而湖面比降较大。

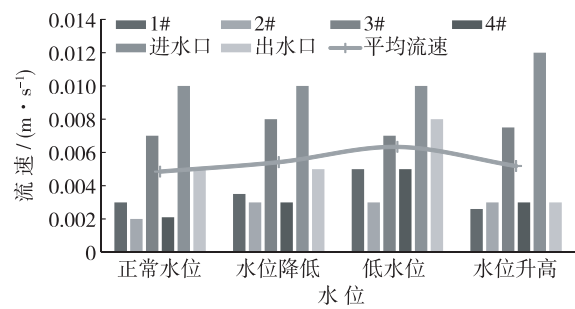


图 5 湖泊不同位置的月均流速

Fig. 5 Monthly average velocities of different points in Yanming Lake

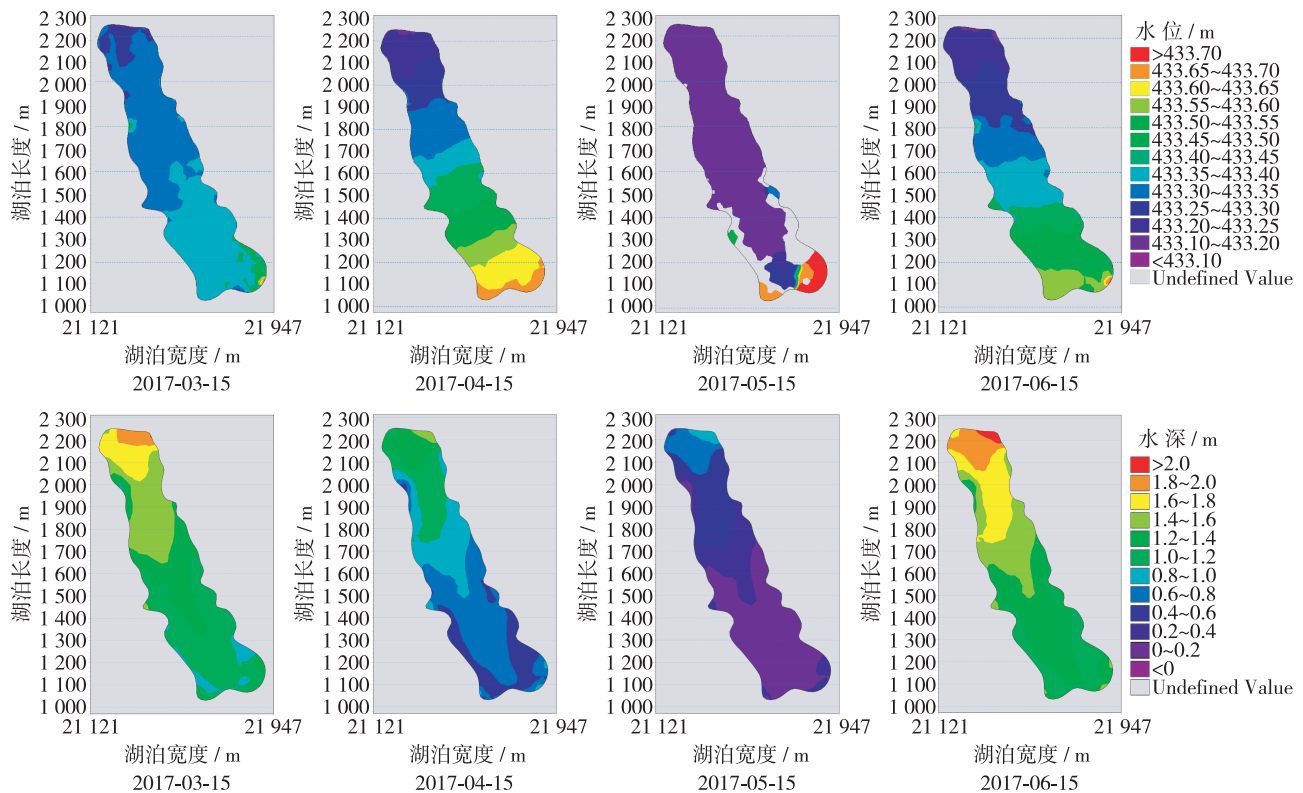


图 6 湖泊水位、水深时空分布

Fig. 6 Temporal and spatial variation of water level and depth in Yanming Lake

**2.2.2 流速时空差异** 湖泊流速受地形、吞吐流、风场、水位等因素影响。根据实测换水水位的变化过程和实测风场及吞吐流,分析模拟结果(如图 7)可得:3 月湖泊水位较高,湖泊流速较小( $0.002 \text{ m/s}$  左右),高水

位使湖泊呈现典型湖相;4月湖泊水位下降,湖泊流速加快( $0.005\text{ m/s}$ 左右),并且湖泊受降雨和风场的影响较大;5月湖泊水位达到最低,湖泊流场为河相流场,由于湖泊地形的影响因素增加,其动力结构更复杂,流速达到最大( $0.007\text{ m/s}$ 左右);6月湖泊水位上升,流速减小( $0.003\text{ m/s}$ 左右)。水位变化过程中湖泊形成的相对高流速区的位置基本不变,环流作用区域和进水口区域平均流速相对较高,水位变化过程的平均流速相对大于正常水位的湖泊流速,水位的升高或降低过程实际是湖泊流场的湖相和河相相互转化过程。

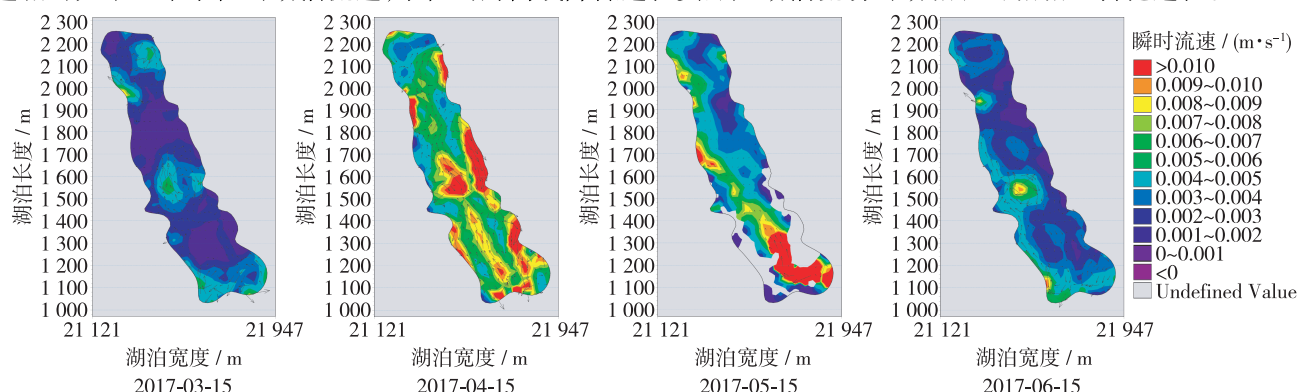


图7 雁鸣湖流场分布

Fig. 7 Spatial variation of flow field in Yanming Lake

各采样点在连续水位变化下,流速变化见图8。由图可见,相对正常水位下(3月)各测点整体流速最小;低水位(5月)时流速最大;其次是水位变化下(4月和6月)的流速。分析实测资料可知,湖泊水动力是多因素综合作用的结果,不同因素作用随时间变化造成流速随时间变化,不同位置多因素综合作用导致湖泊流速的差异。在低水位情况下各点流速相近,变化不明显;3#点流速较大,且流速变化明显,究其原因是3#处于环流作用处;实际情况下,变化风场的作用导致流速的瞬时增大,例如6月初湖泊流速突然增大,其他各点流速变化趋势相近。

### 2.3 讨论

针对雁鸣湖单因素水位和换水期间水位变化对流场进行模拟,结果表明水位对湖泊水动力有一定影响。随着湖泊水位降低,水体体积、质量减少,需要的外界驱动力减弱,因而在相同的驱动力下湖区流速有所增加<sup>[21]</sup>。对补水水位升高而言,水面升高产生顶托作用随接触面积增大而增大;而在风力保持不变的前提下,顶托作用使得补水驱动力无法满足水体运动需要,因而整个湖区的流速便会降低<sup>[11]</sup>。另外,环流形成方式随着水位变化而变化,在正常水位下主要由风作用形成湖流,但水位较低时湖底地形和吞吐流作用增强共同形成与风向相同的补偿流,从而使湖流形式复杂,环流之间相互作用使得流速增加。水位不是单独对水动力产生影响,而是多种湖泊驱动力共同作用的结果,不同水位通过外界驱动力对湖泊水动力产生影响,因此湖泊保持一定水位有利于湖泊水动力的改善。

水位对人工湖生态有重要影响,若水位变化不适当,则会带来负面影响,长期固定的高或低水位使湖泊多样性降低<sup>[18]</sup>。人工湖在满足景观生态蓄水的要求下,增加水位变化既有利于水生态,也有利于湖泊水动力改善。因此,可以通过调节人工湖进出湖的流量使水位变化,从而改善生态和水动力环境。

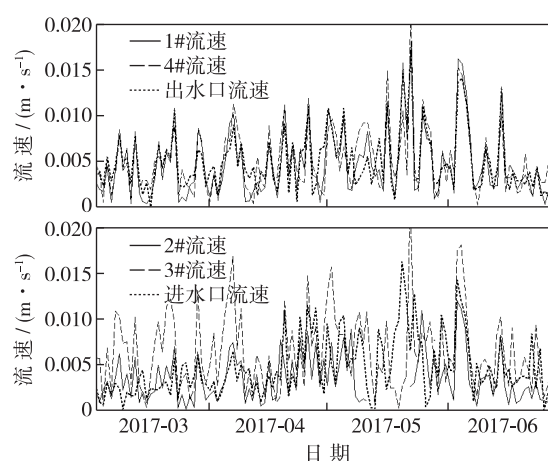


图8 水位变化下日均流速变化

Fig. 8 Changes in daily average velocities during water level fluctuations

### 3 结 语

基于二维水动力模型,模拟雁鸣湖 2017 年 3—6 月期间的水动力变化过程,探究单因素水位对湖泊流场影响,以及换水期间水位和流场的时空分布特征,结论如下:

(1) 水位是湖泊水动力影响因素之一。不同水位及其变化过程情况下,湖泊流速存在差异,低水位时湖泊平均流速大于正常水位时,水位降低和升高过程中湖泊平均流速介于两者之间;随着水位降低,环流的形成越复杂。

(2) 换水期间水位和流速分布存在差异。3 月份湖泊处于较高水位期,湖区水位空间分布差异较小,水深自上游至下游呈逐级递增趋势,湖泊流速最小;4 月和 6 月份水位出现明显差异,水深变化明显,湖泊平均流速大于 3 月份流速;5 月份为低水位期,河滩裸露,水深空间分布差异较大,湖泊流速最大,验证了单因素水位对湖泊流速的影响。

(3) 湖泊不同水位对流速大小及其分布影响有所不同,在保持生态景观水位前提下,人工湖水位变化有利于改善湖泊水动力。

### 参 考 文 献:

- [1] 姚静,张奇,李云良,等. 定常风对鄱阳湖水动力的影响[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 225-236. (YAO Jing, ZHANG Qi, LI Yunliang, et al. The influence of uniform winds on hydrodynamics of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 225-236. (in Chinese))
- [2] 钟小燕,王船海,庾从蓉,等. 流速对太湖河道底泥泥沙、营养盐释放规律影响实验研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 2862-2869. (ZHONG Xiaoyan, WANG Chuanhai, YU Congrong, et al. Characteristics of sediments and nutrient release under different flow velocity[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 2862-2869. (in Chinese))
- [3] 姜恒志,崔雷,石峰,等. 风场、地形和吞吐流对太湖流场影响的研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 165-171. (JIANG Hengzhi, CUI Lei, SHI Feng, et al. Study on influences of wind field, topography and inflow/outflow on flow in Lake Tai[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 165-171. (in Chinese))
- [4] NÖGES A. The effect of extreme water level decrease on hydrochemistry and phytoplankton in a shallow eutrophic lake[J]. Hydrobiologia, 1999, 409: 277-283.
- [5] COOPS H, BEKLIÖGLU 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.
- [6] OPDYKE D. Hydrodynamics and water quality modeling: modeling rivers, lakes, and estuaries[M]. Wiley-Interscience, 2008, 89(39): 366-366.
- [7] AI Congfang, JIN Sheng, LV Biao. A new fully non-hydrostatic 3D free surface flow model for water wave motions[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2011, 66(11): 1354-1370.
- [8] 郑婷婷,徐明德,景胜元,等. 汾河水库水动力及水质数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 105-113. (ZHENG Tingting, XU Mingde, JING Shengyuan, et al. Simulation of hydrodynamics and water quality for Fenhe reservoir[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 105-113. (in Chinese))
- [9] WU Z, HE H, CAI Y, et al. Spatial distribution of chlorophyll a and its relationship with the environment during summer in Lake Poyang: a Yangtze-connected lake[J]. Hydrobiologia, 2014, 732(1): 61-70.
- [10] GAO F, FENG M Q, HAN S X, et al. Numerical simulation research on flow characteristics and influential factors of Wuxing Lake[J]. International Journal of Heat and Technology, 2016, 34(1): 80-88.
- [11] ANDERSON E J, SCHWAB D J. Relationships between wind-driven and hydraulic flow in Lake St. Clair and the St. Clair River Delta[J]. Journal of Great Lakes Research, 2011, 37(1): 147-158.
- [12] RAZMI A M, BARRY D A, BAKHTYAR R, et al. Current variability in a wide and open lacustrine embayment in Lake Geneva (Switzerland)[J]. Journal of Great Lakes Research, 2013, 39(3): 455-465.
- [13] 刘永,郭怀成,周丰,等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3117-3126. (LIU Yong, GUO Huaicheng, ZHOU Feng, et al. Role of water level fluctuation on aquatic vegetation in lakes[J]. Acta

- Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 3117-3126. (in Chinese))
- [14] 齐凌艳, 黄佳聪, 高俊峰, 等. 鄱阳湖枯水水位及流速时空分布模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 572-584. (QI Lingyan, HUANG Jiacong, GAO Junfeng, et al. Temporal and spatial simulation of water level and velocity during low water level statistical year in Lake Poyang[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(4): 572-584. (in Chinese))
- [15] GARCÍA DE EMILIANI M O. Effects of water level fluctuations on phytoplankton in a river-floodplain lake system (Parana River, Argentina)[J]. Hydrobiologia, 1997, 357(1-3): 1-15.
- [16] 姚鑫, 杨桂山, 万荣荣, 等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6): 813-821. (YAO Xin, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(6): 813-821. (in Chinese))
- [17] LENSSEN J P M, MENTING F B J, PUTTEN W H V D, et al. Effects of sediment type and water level on biomass production of wet land plant species[J]. Aquatic Botany, 1999, 64(2): 151-165.
- [18] HEBB A J, MORTSCH L D, DEADMAN P J, et al. Modeling wetland vegetation community response to water-level change at Long Point, Ontario[J]. Journal of Great Lakes Research, 2013, 39(2): 191-200.
- [19] DHI. MIKE 21 Flow model: hydrodynamic module scientific documentation[M]. Denmark: Danish Hydraulic Institute, 2007.
- [20] 路璐. 城市景观湖泊水动力学模拟研究——以西安浐灞雁鸣湖2号湖为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2012. (LU Lu. Urban landscape lake water dynamics study—Xi'an Chanba Yanming 2<sup>nd</sup> Lake for example[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [21] 田泽斌, 王丽婧, 郑丙辉, 等. 城陵矶综合枢纽工程建设对洞庭湖水动力影响模拟研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1883-1890. (TIAN Zebin, WANG Lijing, ZHENG Binghui, et al. Impact simulation of the Chenglingji hydraulic project on hydrodynamics of Dongting Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1883-1890. (in Chinese))

## Influences of water level on flow velocity distribution during dynamic water exchange in urban artificial lake

ZHAO Zhengwen<sup>1</sup>, FENG Minquan<sup>1</sup>, CHENG Gang<sup>1,2</sup>, TANG Yang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Water Conservancy Survey and Design Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The water level and flow velocity are the key factors in maintaining and improving the ecological environment of the artificial lakes. In order to study and analyze the influences of the water level upon the flow velocity distribution, the numerical simulations of the flow field of the Yanming Lake are carried out based on a two-dimensional hydrodynamic model. And the simulations include the influences of a single-factor water level on the flow velocities and the influences of the measured level of exchanged water on the temporal and spatial distribution of the flow velocities during water level fluctuation. The simulated results indicate that the water level is one of the factors influencing hydrodynamics, and the flow velocity in the Yanming Lake is greater than that during high water level and distribution. In addition, as the water level falls and rises, there is a little influence on the circulation. During the water exchange, there is no obvious difference in the water level distribution in the high water level periods; the water depth increases progressively from the upstream to the downstream. In the low water level periods, the water level distribution is different, the flood plain is exposed, and the water depth distribution varies greatly. When the water level changes, the water level from the upstream to the downstream of the Yanming Lake shows a gradient change, and the water depth varies with the water level; and the spatial and temporal distribution of the flow velocities verifies the impacts of the single-factor water level on the flow velocities, and it is also shown that the different water levels have different effects on the flow velocities and the flow velocity distribution. The numerical simulation analysis results show that the water level of the artificial lakes can improve their hydrodynamics, and can provide scientific references for their regime management.

**Key words:** artificial lake; numerical simulation; water level; flow velocity