

计入综合糙率的湿地建设对抚仙湖流场影响的模拟研究

程浩亮^{1,2}, 杨具瑞²

(1.西南林业大学 土木工程学院, 昆明 650224, 2.昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650000)

摘要:【目的】研究抚仙湖沿湖湿地建设(计入湿地综合糙率)对湖泊水流流场的影响,为水质模拟研究提供基础。【方法】在生态水槽试验中,分别研究了3种不同高度水草在3种流量下的水力特性,得到植物水流综合糙率与植物高度的关系。以此为基础,建立了计入湿地综合糙率的抚仙湖二维水动力模型,模拟计算了抚仙湖水体(方案1)、拓展水域后水体(方案2)及在拓展水域内建设湿地后总水体(方案3)的水流流场,分析了拓展水域及建设湿地对抚仙湖流场的影响。【结果】拓展水域对抚仙湖的整体流场影响较小,然而拓展水域改变了局部边界条件,使局部区域的流速增加,如北岸区域平均流速增大52.65%,原抚仙湖水体的平均流速仅增加2.10%。湿地建设对流场的影响主要体现在湿地区域,而对抚仙湖的整体流场影响较小,如南岸湿地区域平均流速比方案2减小了68.20%,原水体的平均流速仅减小了4.11%。【结论】计入湿地综合糙率的沿湖湿地建设对抚仙湖原水体流场影响较小,可为下一步水质模拟研究提供理论基础。

关键词: 抚仙湖; 湿地; 综合糙率; 水动力模型; 流场

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021596

OSID:



程浩亮, 杨具瑞. 计入综合糙率的湿地建设对抚仙湖流场影响的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 125-130.

CHENG Haoliang, YANG Jurui. Simulating the Impact of Wetland Construction on Flow Velocity in the Lake Fuxian with the Comprehensive Roughness Considered[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 125-130.

0 引言

【研究意义】随着城市扩大,人口增多,生活污水、工业废水超标排放及农业面源污染,湖泊水环境问题日益严峻^[1]。湖泊水污染治理方法较多,如截污、建设湿地、补水、调蓄等,其中,沿湖湿地不仅美化环境,且具有较好的脱氮除磷效果,近年来得到了广泛应用^[2-3]。沿湖湿地建设改变水体边界条件,增大水流阻力,改变了湖泊水流流场,流场的改变也将引起湖泊生态环境的变化。

【研究进展】针对湖泊水环境污染,国内外学者进行了大量的水动力水质模拟研究。Baracchini等^[4]开发了一个自动校准参数的三维水动力模型,为湖泊的监测管理提供理论指导。杨中华等^[5]采用二维浅水水动力水质模型,研究了丰水年及枯水年湖区水动力与水质条件变化。Hu等^[6]建立了实时水动力模拟系统,用于大型河湖的水动力参数的实时监测计算。此外,有研究^[7-9]先后运用模型模拟分析了湖泊的水动力及水环境承载力。抚仙湖为我国淡水蓄水量最大的高原湖泊,其水质保护具有重要意义,有学者通过^[10-11]二维及三维模型模拟了抚仙湖的水动力及水质情况。

以上文献所建水动力模型均模拟了现状湖泊的水流流场,但没有加入湿地综合糙率这一参数,无法模拟沿湖湿地建设后的湖泊水流流场。而研究沿湖湿地对湖泊水流流场的影响,需先研究植物水流的水力特性。Naceed等^[12]采用三维湍流模型研究了水槽内非连续植被垂向分层的水流结构。李晗攻等^[13]通过实验及模拟的方法研究了植物明渠的水流结构,分析了不同的植物密度、流量条件下流速、紊动强度以及涡量强度的分布特点。Chen等^[14]提出了一种大挠度柔性植被的水流-植被耦合模型,讨论了植被抗弯刚度等参数对模型的影响。Kim等^[15]建立的三维模型讨论了水槽中刚性植被对水沙特性的影响。上述文献深入研究了植物水流的水力特性,但仅限于实验室模拟研究,并未应用于湖泊湿地中,而计入综合糙率的湿地建设对湖泊水流流场影响的研究鲜有报道。

【切入点】本文将设计的抚仙湖沿湖湿地水体与原抚仙湖水体结合,研究沿湖湿地建设对抚仙湖流场的影响。通过植有模拟植物的生态水槽实验拟合了植物高度与综合糙率的关系,建立了含湿地综合糙率的抚仙湖二维水动力模型。【拟解决的关键问题】模拟计算原抚仙湖水体、拓展水域后水体及拓展水域内建设湿地后总水体的流场,分析拓展水域及湿地建设对抚仙湖流场的影响,为下一步水质模拟研究提供理论前提。

收稿日期: 2021-12-03

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2022J0516); 云南省科技计划农业联合青年项目2017FG001(-101); 国家自然科学基金项目(51569010)
作者简介: 程浩亮(1986-),男,河北邯郸人。讲师,博士研究生,主要从事水动力研究。E-mail: chenghaoliang678@163.com

1 模型方程

考虑湿地综合糙率的二维风生流体力模型如下：

连续方程：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} + s = 0, \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + fv - \frac{g}{c'^2} \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{H} u - \frac{g}{c'^2} \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{H} u + \frac{\tau_{xx}}{\rho H} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fu - \frac{g}{c'^2} \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{H} v - \frac{g}{c'^2} \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{H} v + \frac{\tau_{yy}}{\rho H} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

式中： ζ 为从水平面算起的计算点的高度(m)； H 为水深(m)； u 、 v 分别为 x 、 y 方向平均速度分量(m/s)； s 为水量源汇项，即蒸发、降雨、汇入及排出水体总量($\text{m}^3/(\text{s m}^2)$)； g 为重力加速度(m/s^2)； f 为科氏力系数； $c' = \frac{1}{n} H^{1/2}$ 为谢才系数($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)，式中 n 为湖底糙率； $c'' = \frac{1}{n^*} H^{1/2}$ 为湿地谢才系数($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)，式中 n^* 为湿地综合糙率； τ_{xx} 、 τ_{yy} 分别为水面 x 、 y 方向风应力(N/m^2)； ε 为水平方向涡动黏性系数(m^2/s)。

初始条件：

$$\zeta(x, y, 0) = \zeta^0(x, y)$$

$$u(x, y, 0) = u^0(x, y)$$

$$v(x, y, 0) = v^0(x, y)$$

边界条件：

陆地边界滑移条件： $v n = 0$ (沿岸滑移)

取水口 $v n \times h = Q^0_{\text{取}}$ ；排水口 $v n \times h = -Q^0_{\text{排}}$

在水边界上，根据实测资料进行率定：

$$Q_i = Q_i^0 \quad (\text{进水边界}), \quad (4)$$

式中： v 为流速(m/s)； h 为水深(m)； n 为单位法向量； $Q^0_{\text{取}}$ 和 $Q^0_{\text{排}}$ 为单宽流量(m^2/s)； Q_i 为进水边界点流量(m^3/s)； Q_i^0 为进水边界点初始流量(m^3/s)。

2 参数确定

2.1 湖底糙率

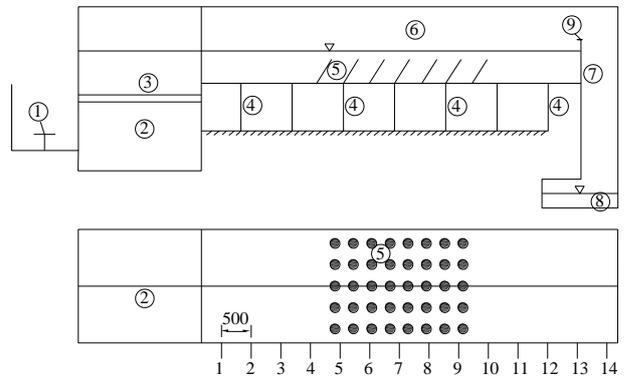
通常计算中，将湖底糙率定为常量，因而数值计算与试验监测在部分区域存在一定差异性。为了提高计算的精确性和稳定性，本文将湖底糙率^[16]进行自动调整：

$$n_k = n_{k-1} \left(1 - \frac{h_c - h_s}{h_s} \right), \quad (5)$$

式中： n_k 为第 k 步时糙率； n_{k-1} 为第 $k-1$ 步时糙率； h_c 为计算水位(m)； h_s 为实测水位(m)。

2.2 湿地综合糙率

水生植物改变水流紊动结构，增加湖底糙率，阻滞水流的流动。湿地研究中通常采用湿地植物综合糙率法来表示其对水流的阻滞作用。建立 7.0 m×0.3 m×0.5 m 的水槽，进行湿地综合糙率试验，如图 1 所示。进水阀及进水池布置在前端，为了稳定水流，在进水池末尾布置消能栅板。在水槽末端安装闸门用于水位调节，经过尾门，水流跌入水箱。试验中，采用三角堰及流量计控制流量。



注 1-进水阀；2-进水池；3-消能栅板；4-水槽支架；5-植物；6-玻璃水槽；7-尾水箱；8-回水通道；9-闸门

图1 生态水槽示意

Fig.1 Ecological water channel

为了真实反映湿地柔性植被对水流的阻力作用，同时考虑阻力与变形相似，试验植物采用绿色塑料柔性水草。并分别选取 2、5 cm 和 9 cm 这 3 种高度的水草，用塑料网格将其固定，见图 2。

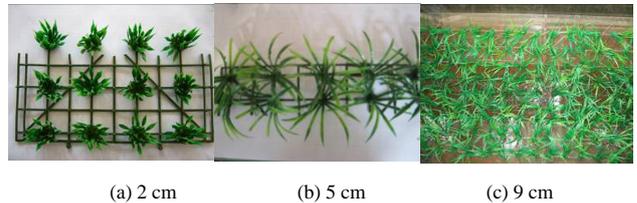


图2 模拟水草

Fig.2 Simulative water plants

水槽共布置 14 个测量断面，首末各 1 个（由于首与带前 1 流态一致，末与带后 4 一致，故不做量测），植物带前布设 3 个，植物带中布设 5 个，植物带后布设 4 个，断面间距 50 cm。按 5.308、8.384、10.265 L/s 流量分别进行 12 组次（含空白组即无植物）的综合糙率试验，试验组次见表 1。

表 1 综合糙率试验组次

Table 1 Comprehensive roughness test group

试验条件	试验组次	流量/(L·s ⁻¹)	水深/cm	断面平均流速/(m·s ⁻¹)	水力半径 R/m	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	
无植草无沙	1	5.308	8.14	0.217	0.053	742.984	0.091	
	2	8.384	10.05	0.278	0.060	949.415	0.130	
	3	10.265	11.08	0.309	0.064	1 056.584	0.152	
草高 2 cm	4	5.308	8.21	0.215	0.053	736.777	0.089	
	5	8.384	10.21	0.273	0.061	934.667	0.125	
	6	10.265	11.18	0.306	0.064	1 047.134	0.149	
柔性有沙试验	7	5.308	8.78	0.201	0.055	688.770	0.075	
	草高 5 cm	8	8.384	10.59	0.263	0.062	901.246	0.114
		9	10.265	11.46	0.299	0.065	1 021.804	0.140
	草高 9 cm	10	5.308	9.84	0.180	0.059	614.668	0.055
		11	8.384	11.52	0.242	0.065	828.163	0.092
		12	10.265	12.61	0.272	0.068	928.755	0.110

由试验可得7断面水流流态最为接近恒定均匀流, 比较稳定。选取该断面进行数据分析, 得出综合糙率与植物高度关系如图3。

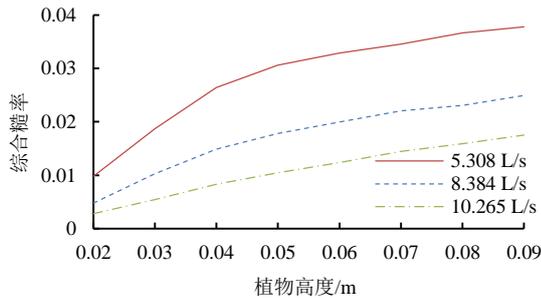


图3 综合糙率与植物高度关系曲线

Fig.3 Relationship curve between comprehensive roughness and plant height

根据试验结果, 得出湿地植物综合糙率与植物高度的函数关系如式(6)。

$$n^* = 0.0316 \ln(h) + 0.0315. \quad (6)$$

综合糙率 n^* 与植物高度 h 的相关性如图4所示, 相关系数 0.973, 决定系数 0.947 说明二者相关性显著。

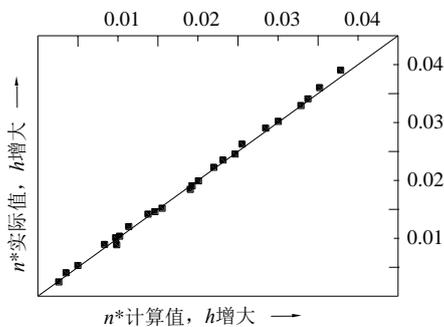


图4 综合糙率计算值与实际值的比较

Fig.4 Comparison between calculated value and actual value of roughness n^*

2.3 风应力

二维湖泊水动力模型中, 风应力为关键参数之一。

因此, 数值模拟中通常选用有代表性的平水期(1月)、枯水期(4月)及丰水期(8月)各月平均风速, 并考虑到抚仙湖周围山体对风力的阻挡作用进行模拟计算。这3种情况下典型月的风场模型^[17]如下:

$$1月: \begin{cases} v_x = 0.93 \times 10^{-4} x + 0.47 \times 10^{-5} y \\ v_y = 2.0 + 0.17 \times 10^{-4} x - 0.4 \times 10^{-4} y \end{cases}, \quad (7)$$

$$4月: \begin{cases} v_x = 1.09 \times 10^{-4} x + 0.12 \times 10^{-4} y \\ v_y = 2.2 + 0.6 \times 10^{-4} x - 0.37 \times 10^{-4} y \end{cases}, \quad (8)$$

$$8月: \begin{cases} v_x = 0.41 \times 10^{-4} x + 0.15 \times 10^{-4} y \\ v_y = 1.1 + 0.17 \times 10^{-4} x - 9.46 \times 10^{-6} y \end{cases}, \quad (9)$$

式中: v_x 为风速在 x 方向的分量 (m/s); v_y 为风速在 y 方向的分量 (m/s)。

然后据 $\tau_{sx} = \gamma \rho_a v_x^2 \cos \theta$ 和 $\tau_{sy} = \gamma \rho_a v_y^2 \sin \theta$ 可分别计算各月的 x 和 y 方向风应力值, 其中 γ 为无因次风应力拖拽系数, 取值 0.003, ρ_a 为空气密度 (kg/m^3); θ 为风的方向角 ($^\circ$)。

3 模型应用分析与讨论

3.1 模拟方案确定

抚仙湖地处云南滇中盆地, 归澄江市、江川县及华宁县 3 县共管。抚仙湖为南盘江流域西江水系, 水域面积 216.6 km^2 , 长约 31.4 km , 最宽处约 11.8 km , 平均水深 95.2 m , 最大水深 158.9 m ^[18]。较大的入湖河流有 21 条, 出湖河流 2 条, 分别为海口河与出流改道的隔河。为了保证抚仙湖水质, 省市二级出台了抚仙湖生态环保规划, 在沿湖地区建立生态湿地, 其中北岸及南岸湿地面积较大, 东岸及西岸湿地面积较小。为方便后续流场研究, 布置南、北岸湿地影响区(图中阴影区)及 9 个水文监测站点, 由于东、西岸湿地细长, 影响区范围较小, 图上不易标示, 具体见图 5。

模拟计算共分为 3 种方案，方案 1 为原抚仙湖水体（图 5 绿色线范围），方案 2 为拓展水域后总水体（图 5 红色线范围，其中拓展的水域即绿色与红色线之间区域，拓展的水域主要由东、南、西、北 4 个区域组成），方案 3 为在拓展水域内建设生态湿地后总水体。采用刘晓波^[10]抚仙湖流速模拟中的水下地形图及生态环保规划中的生态湿地建设图，进行模拟网格的划分。网格模型划分为 2 种情况，网格模型 1 是原抚仙湖水体（针对方案 1 计算），网格模型 2 是拓宽水域后的水体（针对方案 2、方案 3 计算）。其中网格模型 1 划分为 3 262 个节点，5 840 个直角三角形单元网格；网格模型 2 划分为 3 564 个节点，6 458 个直角三角形单元网格。最大网格尺寸为 1/2×300 m×300 m，最小网格尺寸为 1/2×150 m×150 m，见图 6。计算时，湿地区域节点适用式（2）及式（3），非湿地区域节点不计式（2）中的 $\frac{g}{c^2} \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{H} u$ 项及式（3）

中的 $\frac{g}{c^2} \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{H} v$ 项。

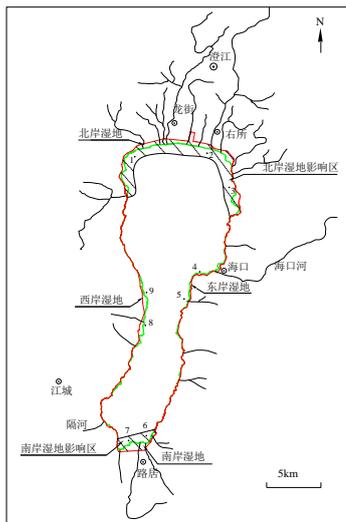


图 5 抚仙湖湿地布局

Fig.5 Layout of the wetlands of Lake Fuxian

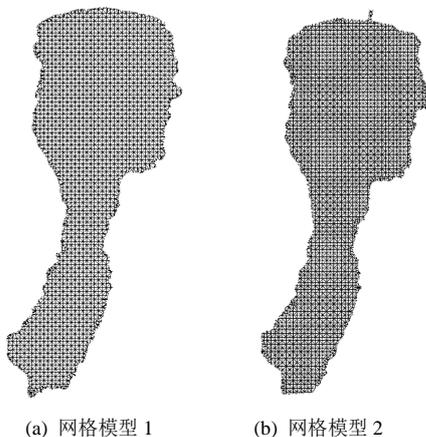


图 6 网格模型

Fig.6 Grid model

模拟计算时间为 2020 年 8 月。选取 2020 年 8 月 1 日观测到的水面高度 1 723.25 m 为初始高程，2 个速度矢量按水动力学常规初始化为 0.0 m/s。由于入湖河流断面较窄，远小于最小网格边长，为方便计算，将各河流入湖口简化为网格模型的一个边界点。21 条入湖河流的进水边界流量均采用 2020 年 8 月 1 日的实测数据，风应力取丰水期 8 月的式（9）计算。时间步长 $t=20$ s。

3.2 流场模拟结果与讨论

方程采取分步杂交的计算方法，前半分步采用改型特征线法，后半分步采用集中质量有限元法求解^[16]。将 9 个水文监测站点 2020 年 8 月 1 日的流速实测值与方案 1 模拟计算值列于表 2，选用平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）为指标进行误差分析，可得 MAE 为 0.079 cm/s，RMSE 为 0.130 cm/s，故模型计算精确度较高。3 个方案的模拟计算结果见图 7 及表 3。方案 1 的流场结果与刘晓波等^[10]、Zhao^[11]等抚仙湖计算结果基本一致，刘晓波抚仙湖的平均流速为 2.90 cm/s，本文方案 1 的平均流速为 2.86 cm/s。以上可见，本文所建模型可行，计算准确性较高。

表 2 监测点的方案 1 流速计算值与实测值对比表

Table 2 Comparison between measured and calculated values of monitoring points in scheme 1

序号	监测点		方案 1	
	经度	纬度	实测流速/ (cm·s ⁻¹)	模拟流速/ (cm·s ⁻¹)
1	102°51'06"N	24°37'11"E	2.79	2.76
2	102°55'28"N	24°37'27"E	2.95	2.90
3	102°57'04"N	24°35'28"E	2.83	2.81
4	102°55'11"N	24°31'01"E	2.60	2.66
5	102°54'19"N	24°29'33"E	2.71	2.75
6	102°51'50"N	24°22'03"E	3.08	3.45
7	102°50'48"N	24°21'49"E	3.15	3.11
8	102°51'52"N	24°28'01"E	2.68	2.71
9	102°51'57"N	24°30'06"E	2.87	2.80

由图 7 及表 3 可知，方案 2 与方案 1 相比流场整体变化不大，抚仙湖原水体区域内平均流速由 2.86 cm/s 变为 2.92 cm/s，增大了 2.10%。但抚仙湖北岸湿地的建设，改变了多条河流入湖口区域水体边界条件，拓展了水域面积，使北部区域的流场变大，该区域平均流速由 2.83 cm/s 增加至 4.32 cm/s，增大了 52.65%；南岸湿地区域与北岸情况类似，该区域平均流速由 3.11 cm/s 增加至 4.56 cm/s，增大了 46.62%。抚仙湖东岸湿地沿湖岸建设，形状较为狭长，边界条件变化不大，该区域的平均流速由 2.62 cm/s 变为 2.69 cm/s，增大了 2.67%，变化不大；西岸与东岸情况类似，增大了 2.21%。由此可见，拓展水域改变了局部边界条件，使局部区域水流流场变化较大，其他区域水流流场变化较小。

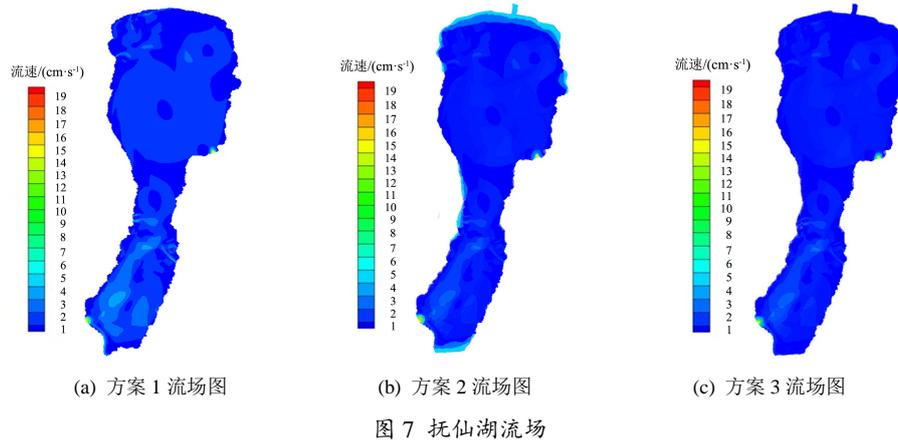


Fig.7 Flow velocity field of Lake Fuxian

表 3 抚仙湖流场模拟结果分析表

Table 3 Calculated flow velocity in different area of Lake Fuxian

区域	方案 1		方案 2		方案 3	
	平均流速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均流速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	比方案 1 增长率/%	平均流速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	比方案 2 减小率/%	
北岸湿地 影响区	2.83	4.32	52.65	1.57	63.66	
东岸湿地	2.62	2.69	2.67	1.31	51.30	
南岸湿地 影响区	3.11	4.56	46.62	1.45	68.20	
西岸湿地	2.71	2.77	2.21	1.34	51.62	
原水体	2.86	2.92	2.10	2.80	4.11	

影响湖流的因素主要有 3 个：风应力、湖盆地形特征和边界条件，其中，风应力是最主要的因素^[10]。抚仙湖的湖流类型为风生环流，流场主要受风应力和边界条件影响。本研究中，抚仙湖南北两岸拓展水域改变了其边界条件，使得该区域流速增加较大，但拓展的水域远小于原抚仙湖水域，故对原水域流速影响较小，说明风应力不变时，小部分区域边界条件改变对整体流场影响微弱。

方案 3 与方案 2 对比，拓展水域种植湿地植物后，水生植物阻滞了水流，增大了流动阻力。在综合糙率的影响下，抚仙湖北岸湿地区域平均流速由 4.32 cm/s 降至 1.57 cm/s ，减小了 63.66%；东岸湿地区域平均流速由 2.69 cm/s 降至 1.31 cm/s ，减小了 51.30%；南岸湿地区域平均流速由 4.56 cm/s 降至 1.45 cm/s ，减小了 68.20%；西岸湿地区域平均流速由 2.77 cm/s 降至 1.34 cm/s ，减小了 51.62%。然而原水体区域水流平均流速由 2.92 cm/s 变为 2.80 cm/s ，减小了 4.11%。可见湿地建设对抚仙湖流场的影响主要体现在湿地区域，对整个抚仙湖流场影响不大。

建设湿地后，湿地区域节点阻力计算计入湿地综合糙率，故此区域流速明显降低。但原水体区域节点不计湿地综合糙率，只计湖底糙率，又由于湿地区域远小于原水体区域，湿地流速的降低难以影响原水体流速，故原水体区域流速无明显变化。

4 结论

1) 拓展水域改变了抚仙湖局部区域的边界条件，使局局部区域流速明显变大，但对抚仙湖整体流场影响较小。

2) 湿地建设后，在湿地综合糙率影响下，湿地区域流速明显降低，但对原水体区域流速影响较小。

参考文献：

- [1] 高军省. 基于联系数的湖泊富营养化评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 100-103.
GAO Junsheng. Lake eutrophication assessment based on relational number[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 100-103.
- [2] DI LUCA G A, MUFARREGE M M, HADAD H R, et al. Nitrogen and phosphorus removal and Typha domingensis tolerance in a floating treatment wetland[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 233-240.
- [3] GE Z B, WEI D Y, ZHANG J, et al. Natural pyrite to enhance simultaneous long-term nitrogen and phosphorus removal in constructed wetland: Three years of pilot study[J]. Water Research, 2019, 148: 153-161.
- [4] BARACCHINI T, HUMMEL S, VERLAAN M, et al. An automated calibration framework and open source tools for 3D lake hydrodynamic models[J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 134: 104787.
- [5] 杨中华, 朱政涛, 槐文信, 等. 鄱阳湖水利调控对湖区典型丰枯年水动力水质影响研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 156-167.
YANG Zhonghua, ZHU Zhengtao, HUAI Wenxin, et al. Study on the influence of Poyang Lake Hydraulic Project on hydrodynamics and water-quality in wet and dry year[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 156-167.
- [6] HU D C, YAO S M, DUAN C K, et al. Real-time simulation of hydrodynamic and scalar transport in large river-lake systems[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124-531.
- [7] 王俊, 王轶虹, 王强, 等. 退圩还湖后湖泊水动力条件分析: 以蜈蚣湖为例[J]. 中国农村水利水电, 2020(3): 91-97.
WANG Jun, WANG Yihong, WANG Qiang, et al. Research on the hydrodynamic property of lakes after pushing over dikes and restoring to lake: A case study of Wugong lake in Xinghua County[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(3): 91-97.
- [8] 邢贞相, 张丽慧, 纪毅, 等. 基于 EFDC 模型五大连池水质模拟和富营养化评价研究[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(5): 88-98.
XING Zhenxiang, ZHANG Lihui, JI Yi, et al. Study on water quality

- simulation and eutrophication assessment in Wudalianchi based on EFDC model[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(5): 88-98.
- [9] 杨晨, 徐明德, 郭媛. 基于 MIKE21 的汾河水库突发环境事件数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11): 115-121.
YANG Chen, XU Mingde, GUO Yuan. Numerical simulation of pollutant migration in fenhe reservoir following an accident using the MIKE21 Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(11): 115-121.
- [10] 刘晓波, 彭文启, 何国建, 等. 基于水质-污染源响应关系的抚仙湖水环境承载力计算研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26(6): 652-659.
LIU Xiaobo, PENG Wenqi, HE Guojian, et al. Study on environmental carrying capacity of Fuxian Lake based on the response of water quality to pollution load[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(6): 652-659.
- [11] ZHAO L, ZHANG X L, LIU Y, et al. Three-dimensional hydrodynamic and water quality model for TMDL development of Lake Fuxian, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(8): 1 355-1 363.
- [12] NACEED A, USMAN G, GHUFRAN A P, et al. To investigate the flow structure of discontinuous vegetation patches of two vertically different layers in an open channel[J]. Water, 2018, 10(1): 75.
- [13] 李晗玫, 毛劲乔, 龚轶青, 等. 圆柱形植物斑块水动力特性的大涡模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2022, 37(1): 108-114.
LI Hanmei, MAO Jinqiao, GONG Yiqing, et al. Numerical investigation of hydrodynamic properties of cylindrical vegetation patch using large-eddy simulation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37(1): 108-114.
- [14] CHEN H F, ZOU Q P. Eulerian-Lagrangian flow-vegetation interaction model using immersed boundary method and OpenFOAM[J]. Advances in Water Resources, 2019, 126(4): 176-192.
- [15] KIM H S, KIMURA I, PARK M. Numerical simulation of flow and suspended sediment deposition within and around a circular patch of vegetation on a rigid bed[J]. Water Resources Research, 2018, 54(10): 7 231-7 251.
- [16] 杨具瑞, 方铎. 湖泊暴雨径流水质模拟研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(1): 37-41.
YANG Jurui, FANG Duo. Simulation on storm runoff water quality of lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(1): 37-41.
- [17] 中国环境科学研究院. 滇池水源地保护区水质恢复技术研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 225-235.
Chinese Academy of Environmental Sciences. Study on water quality restoration technology of Dianchi water source protection area[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 225-235.
- [18] 郭雯, 黄林培, 王明果, 等. 不同组织碳、氮元素含量和同位素分馏特征研究: 以抚仙湖草鱼、鱈浪白鱼为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 345-355.
GUO Wen, HUANG Linpei, WANG Mingguo, et al. Carbon and nitrogen contents and isotopic fractionation in different tissues of Ctenopharyngodon idellus and Anabarilius grahmi in Fuxian Lake[J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 345-355.

Simulating the Impact of Wetland Construction on Flow Velocity in the Lake Fuxian with the Comprehensive Roughness Considered

CHENG Haoliang^{1,2}, YANG Jurui²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

Abstract: 【Objective】 The influence of wetland construction considering the comprehensive roughness on flow velocity field of Lake Fuxian was studied to provide the premise for water quality simulation. 【Method】 The study was based on numerical simulation by taking the Lake Fuxian as an example. In the ecological water channels, the retarding effect of three types of plants with different heights on water flow was simulated under different flow rates. We considered the comprehensive roughness and calculated the relationship between the comprehensive roughness and plant height, from which we established a two-dimensional hydrodynamic model with the comprehensive roughness of the wetland considered to simulate the flow velocity in the lake. The modelling compared three schemes: existing waterbody, expanded waterbody by removing the breakwater, and whole waterbody after construction of the wetland. The effects of the wetland plants and the expanded waterbody on the flow velocity fields were analysed. 【Result】 Expanding the waterbody changed the boundary conditions of the local water, increasing the magnitude of flow velocity in the local water while having little impact on water velocity in other areas. In the north shore, the averaged flow velocity was increased by 52.65%, while in the original region, the averaged flow velocity was increased only by 2.10%. The wetland impacts flow field mainly in the wetland area, with the average flow velocity in the south shore decreasing by 68.20%, compared with the expanded waterbody. In the original region, the averaged flow velocity was decreased only by 4.11%. 【Conclusion】 The constructed lakeside wetland has little impact on original water flow velocity field in the Lake Fuxian even with the comprehensive roughness considered. The method and results presented in this paper can help to design artificial wetlands.

Key words: Lake Fuxian; wetland; comprehensive roughness; hydrodynamic model; flow velocity field

责任编辑: 赵宇龙