

调水对改善浅水型湖泊水体的置换率研究

华祖林^{1 2}, 顾 莉¹, 刘晓东²

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以郑州龙湖为研究对象, 采用任意无结构网格拟合多连通水域, 贴合不规则湖岸边界与湖内岛屿的外形, 建立了沿水深平均二维水流和交换率数学模型。以寻求湖泊最佳的流态分布和实现水体的高效置换为目标, 进行了多种调水方案水体置换率计算, 实现了方案的最优化。该研究对城市浅水型湖泊采用调水改善湖泊水环境的类似研究具有一定的借鉴意义。

关键词: 浅水湖泊; 调水; 置换率; 数学模型

中图分类号: TV882.9; TV68 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2009)01-0009-05

Improving water exchange rate of shallow lakes through water diversion works

HUA Zu-lin^{1, 2}, GU Li¹, LIU Xiao-dong²

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development of Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Appropriate water diversion is one of the most effective methods of improving water environmental quality in lakes, especially urban lakes. Due to landscaping, urban lakes tend to be quite irregular in configuration and usually have many islands. They also generally have the common characteristic of shallow lakes: their horizontal scale is much larger than the vertical scale. A two-dimensional depth-averaged flow and water exchange rate model was established for Longhu Lake in Zhengzhou City. The unstructured mesh of this model makes it fit for irregular boundaries and islands. Regarding the optimal flow pattern of the lake and the highest water exchange rate as an objective function, the method was optimized through calculation of water exchange rates under various water diversion schemes. This research can be applied to the modeling of other urban shallow lakes during water diversion.

Key words: shallow lake; water diversion; water exchange rate; numerical model

目前我国湖泊水污染形势十分严峻^[1-2], 在城市中间或城市周围经济发达地区, 众多湖泊的水环境问题更为突出^[3]。当前随着人们对城市湖泊构作“景观—亲水—生态—文化”理念的日益关注, 对城市湖泊水体环境质量的改善显得比以往任何时候都更为突出与迫切。

城市湖泊无论是天然的还是人工的, 由于考虑到景观文化功能, 湖泊水面几何形态大多怪异, 湖内

岛礁众多, 岸边界凹凸曲折极不规则, 同时城市湖泊水体面积相对于天然大型湖泊要小, 具有浅水型湖泊的特点, 属宽浅型水域, 湖区水流流动缓慢, 特别在枯水季节, 水量小, 纳污能力弱。目前在对城市湖泊水环境治理的实际操作过程中, 采用强化污染治理的办法(如工业点源治理、生活废水收集、湖区底泥清淤等)很难根本性消除所有污染源, 而且湖泊面源污染治理难度大; 生态治理方法周期长、投资大、

基金项目: 国家自然科学基金(50679019; 50009001); 国家“973”计划资助项目(2008CB418202); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAA01A24); 江苏省社会发展科技计划资助项目(BS2006095); 江苏“908”专项资助项目(JS-908-02-06)

作者简介: 华祖林(1965—), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境方面的研究。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

有造成二次污染可能性的弱点,因此根据城市型湖泊水体较小、易垂向混合等特点,采用适度调水仍是目前改善湖泊水环境的有效和现实的方式之一^[4-5]。南京玄武湖^[6]和杭州西湖^[7]都采用了引调清水进行稀释和冲刷,取得了一定成效,在一定程度上缓解了湖区水质恶化的问题。

本文以郑州东部新区龙湖这一浅水型湖泊为研究对象,采用任意无结构网格贴合龙湖多连通水域及曲折的湖岸边界,建立了沿水深平均二维水流输运数学模型,针对不同的工况情况,分析计算龙湖湖区流场、水位、流量的时空变化规律,以寻求相对最佳的流态分布和实现水体的高效置换为目标,进行了不同调水方案的水体置换率研究,为湖区水质改善和水环境保护提供了科学的决策依据。

1 数学模型的建立

龙湖位于郑州市东部规划新区,是日本黑川纪章大师设计的人工性湖泊,俯看外形似一条“龙”,故得名“龙湖”(图1)。龙湖外形凹凸交错极不规则,湖中心有岛屿,岛屿上建有商务中心(CBD),湖周围按亲水、生态和景观要求设计而成,湖面形态极不规则,湖湾众多。其南北长约6.3 km,东西向约6 km,湖面面积约6.0 km²,湖面高程85.5 m,平均水深2.5 m,蓄水量为1500万 m³。

龙湖属于较为典型的城市浅水型湖泊,湖区为宽浅型水域,水底坡度较缓,水流在垂直方向上的变化相对于平面其他两个方向要小得多,故可以采用沿水深积分平均二维浅水方程进行模拟^[8]。

由于湖区凹凸交错的多连通和复杂不规则边

界,笛卡儿直角网格和曲线网格都难以准确贴合该类边界,必须采用任意无结构网格才能准确拟合,为此本文采用无结构四边形网格布置,并建立基于无结构网格的二维水流水质数学模型^[9-10]。

1.1 控制方程

二维水流及物质输运方程组的守恒形式可表达为

∂q/∂t + ∂f(q)/∂x + ∂g(q)/∂y = b(q) (1)

其中

q = [h, hu, hv, hC]^T

f(q) = [hu, hu² + gh²/2, huv, huC]^T

g(q) = [hv, huv, hv² + gh²/2, hvC]^T

b(q) = [b₁, b₂, b₃, b₄]^T

b₁ = 0 b₂ = gh(S_{0x} - S_{fx})

b₃ = gh(S_{0y} - S_{fy}) b₄ = ∇ · (D_i∇(hC))

式中: *x*、*y*、*t* 分别为空间及时间坐标系; *h* 为水深; *u*、*v* 分别为 *x* 和 *y* 向沿水深积分平均流速分量; *C* 为沿深平均浓度; *q* 为守恒物理量; *f*(*q*) 为 *x* 向通量; *g*(*q*) 为 *y* 向通量; *b*(*q*) 为源项; *g* 为重力加速度; *S*_{0x}、*S*_{fx} 分别为 *x* 向的水底底坡和摩阻坡度; *S*_{0y}、*S*_{fy} 分别为 *y* 向的水底底坡和摩阻坡度; *D_i* 为水平不同方向上的混合系数; ∇ · ∇ 为 Laplace 算子。

1.2 边界条件

a. 入流边界

对于入流边界 Γ₀, 须给定水位或流量随时间的变化值:

ξ(x, y, t)|Γ₀ = ξ_i(t)

或

q(x, y, t)|Γ₀ = q_{il}(t)

b. 出流边界

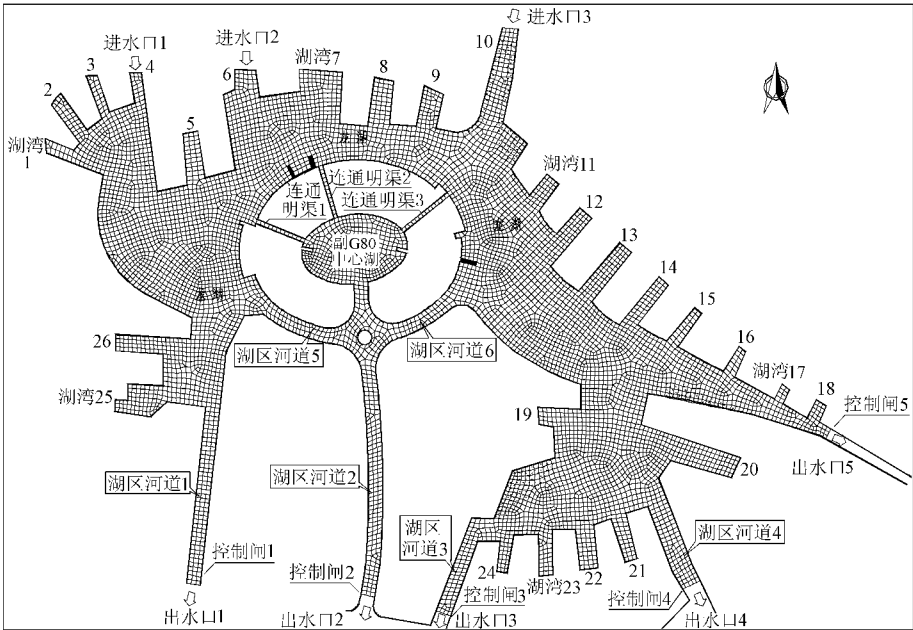


图1 龙湖湖区无结构网格布置

采用自由出流边界,即:

$$\xi(x,y,t)|_{\Gamma}=\xi_{i\Delta}(t)$$

$$\frac{\partial u}{\partial s}=\frac{\partial v}{\partial s}=\frac{\partial \xi}{\partial s}=\frac{\partial C}{\partial s}=0 \quad (s \text{ 为流线方向})$$

c. 固壁边界

采用不可入条件即可滑移条件,即:

$$v_n=0 \quad (n \text{ 为岸边界法线方向})$$

1.3 基本方程的有限体积法离散

对于任意单元 Ω ,其边界为 $\partial\Omega$,通过式(1)并利用散度定理可得到有限体积法的基本方程:

$$\iint_{\Omega} q_i d\omega = - \int_{\partial\Omega} F(q) \cdot n dL + \iint_{\Omega} b(q) d\omega \quad (2)$$

式中: n 为单元边界 $\partial\Omega$ 的外法向单位向量; $d\omega$ 和 dL 为面积分和线积分微元; $F(q) \cdot n$ 为法向数值通量, $F(q)=[f(q),g(q)]^T$ 。

采用一阶精度离散,且 f 和 g 具有的旋转不变性,得到式(2)的等价公式:

$$A \frac{\Delta q}{\Delta t} = - \sum_{j=1}^m T(\Phi)^{-1} f(\bar{q}) L_j + b^*(q) \quad (3)$$
$$b^*(q) = (A \cdot b_1, A \cdot b_2, A \cdot b_3)$$

式中: $T(\Phi)$ 为坐标轴旋转角度 Φ 的变换矩阵; m 为单元边总数(对于四边形网格 $m=4$); L_j 为单元边 j 的长度; A 为单元面积。

在单元每一边两侧的 q 值不同,本文采用 Godunov 型通量差分裂(FDS)格式近似求解局部一维黎曼问题算法向通量 $f(\bar{q})$ 。

2 模型计算条件

2.1 湖区计算网格划分

龙湖及运河水系南北向 6.3 km,东西向 6 km,湖区水域开阔,运河水道狭窄,且湖周存在 26 个湖湾,边界形态怪异,给网格构作带来了困难。若采用传统的矩形网格,边界将被概化成锯齿形;另外即使采用曲线网格也难以做到准确拟合。本模型采用无结构的任意四边形网格,成功地解决了这一难题,较好地贴合了该湖泊的特定边界,提高了计算精度和计算效率。网格尺度变幅不大,变幅范围为 10 m × 18 m ~ 40 m × 40 m。模型共布置网格单元 6 820 个,节点数为 7 698 个,如图 1 所示。

2.2 调水流量及进出口布置

根据龙湖周围河道和引水水源的实际情况,规划调水时龙湖湖区北侧有 3 个进水口(编号自西向东为进水口 1,进水口 2,进水口 3),调水总的流量为 16.5 m³/s。湖区南侧有 5 个出水出口,均建有控制闸门(闸 1 闸 2 闸 3 闸 4 闸 5)其中,第 1~4 个出水口与下游水系东风渠运河相通,第 5 个出水口与魏河相连。

2.3 计算边界条件与初始条件

计算中进水口按流量边界控制,第 1~4 个出水口按水位边界控制,第 5 个出水口(魏河)以流量控制。对龙湖其余 23 个死水湾,同时抽引地下水冲释死水区水体。

初始水位取龙湖控制水位 85.5 m,初始流速取为 0,模拟时间约 5 h 后计算趋于稳定,初始条件的影响趋于消失。

2.4 模型参数选择

曼宁糙率系数 n 根据湖区不同水深在计算中调整修正,取值在 0.026 ~ 0.035 之间,柯氏力系数 f 取 7.37×10^{-5} ,纵向、横向混合系数均取为 $1.0hU^*$,其中 h 为水深, U^* 为摩阻流速。

2.5 模型守恒性分析

根据数学模型模拟计算的一般要求,针对建立的数学模型,必须利用现场实测数据,进行模型的参数率定和计算值与实测值的验证。由于龙湖水系属于规划方案,数学模型的参数率定和直接验证缺乏必要的基础数据,数学模型中该环节无法进行,为此本文通过模型计算成果对模型的守恒性进行验证。根据水量平衡原理,在不考虑水体的蒸发和下渗时,入流流量应等于出流流量。水流达到稳定状态时入流与出流流量的比较如表 1 所示,可见本次研究所采用的数学模型由于基于有限体积法离散,具有很好的守恒性。

表 1 模型入流流量与出流流量对比统计结果

入流流量/ (m³·s⁻¹)	出流流量/ (m³·s⁻¹)	绝对误差	相对 误差/%	守恒率/%
16.5	16.533	0.033	0.2	99.8

3 龙湖水体调水运行方案研究及水体置换率优化计算

3.1 调水运行方案设计

为达到最佳的引水效果,并且考虑到调水成本,不可能长期引水。因此龙湖水体调水运行方案具体优化目标主要有 2 个:①在一段时间内连续引水情况下,水体总置换率最大;②实现龙湖水体有效循环流动(水体的流速及其分布),湖区置换率分布合理,尽量减少滞水区面积。

根据龙湖的实际情况,调水方案应主要考虑调水时进水口位置、进水口引水水量分配比例,共设置 5 个工况,如表 2 所示。各工况设计进水口总的引水流量为 16.5 m³/s,并考虑了龙湖 23 个湖湾的地下水抽注水量(总量为 2 000 t/d),引水方式为连续引水,连续引水时间为 12 d。

表 2 龙湖引调水设计工况

工 况	位 置			水量分配/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)			说 明
	进口 1	进口 2	进口 3	进口 1	进口 2	进口 3	
1	湖湾 4	湖湾 6	湖湾 10	4.5	8.5	3.5	调水方案对进 水口位置比较
2	湖湾 4	湖湾 7	湖湾 10	4.5	8.5	3.5	
3	湖湾 4	湖湾 6	湖湾 10	8.5	4.5	3.5	调水方案对 进水口水量 分配比较
4	湖湾 4	湖湾 6	湖湾 10	3.5	4.5	8.5	
5	湖湾 4	湖湾 6	湖湾 10	5.5	5.5	5.5	

3.2 龙湖水体运行方案优化计算结果分析

3.2.1 进水口位置优化

龙湖湖区主要进水口共有 3 个 ,进水口 3 位置固定 ,进水口 1 对湖区流态影响相对较小 ,故仅对进水口 2 位置利用工况 1 和工况 2 进行比较。

3.2.1.1 流场对比分析

模型计算表明 ,在设计引水条件下 ,经过 6 h 后 ,龙湖湖区流场基本趋于稳定。工况 1 和工况 2 的计算稳定流场如图 2 所示。对比图 2(a)(b)可知 2 种工况下流态均以进水口位置为起点形成主流 ,进水口位置不同主流位置也随之变化 ,远离进水口的区域流态相差不大。2 种工况滞水区面积统计见表 3 ,表 3 中的滞水区定义为流速小于某一值的

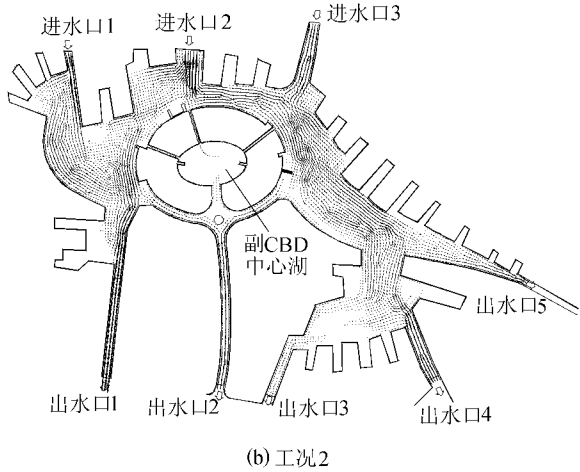
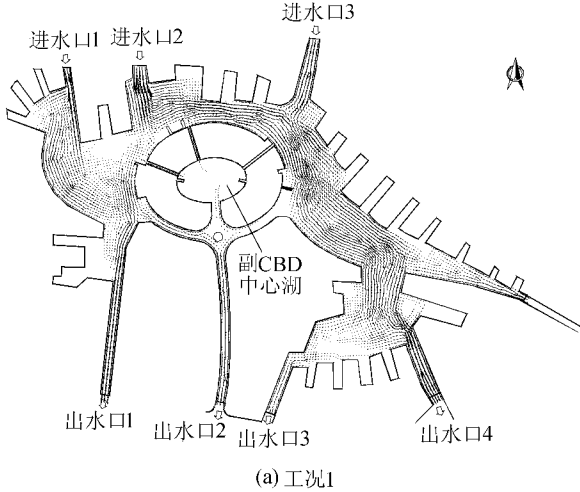


图 2 龙湖湖区计算流场分布图

水域 ,取流速值分别小于 0.000 5 m/s 和 0.001 m/s。从表 3 中可见 ,流速值小于 0.000 5 m/s 时 2 个工况的滞水区面积相差无几 ,但流速值小于 0.001 m/s 的滞水区面积工况 2 要大于工况 1。

表 3 龙湖湖区滞水区面积统计结果

工 况	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流速 $\leq 0.000 5 \text{ m/s}$		流速 $\leq 0.001 \text{ m/s}$	
		滞水区 面积/ km^2	百分 比/%	滞水区 面积/ km^2	百分 比/%
1	0.005 64	1.124 2	17.9	1.392 7	22.2
2	0.005 21	1.117 2	17.8	1.461 0	23.3

3.2.1.2 水体置换率对比分析

湖区内某点处的置换率是指该点处新水量占总水量的比例 ,其大小反映了水体的置换程度 ,图 3 是工况 1 分别引水 2 d 后和 5 d 后的水体置换率分布。由图 3 可见 ,置换率分布形态以进水口位置为中心 ,弧状向外推进。水体总置换率是指湖泊全部水体中新水体积占水体总体积的比例 ,其大小综合反映了水体的平均置换程度 ,对工况 1、工况 2 引水后的总置换率进行了比较 ,统计结果见表 4。

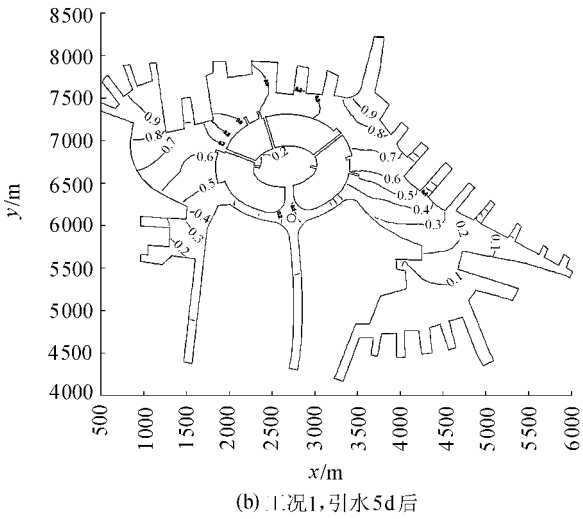
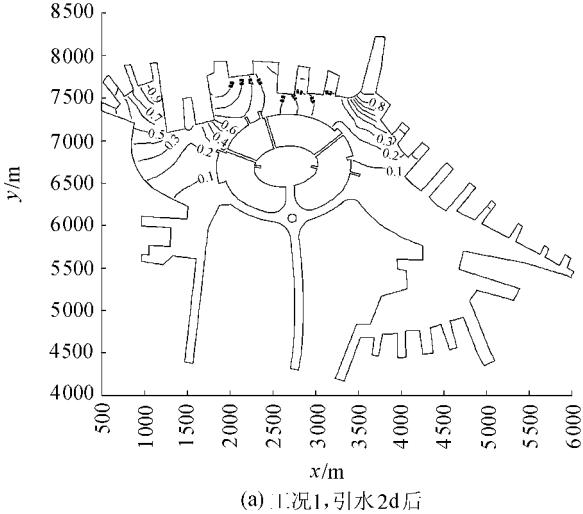


图 3 水体置换率分布

表 4 龙湖湖区水体总置换率统计

引水 时间/d	水体置换率/%		引水 时间/d	水体置换率/%	
	工况 1	工况 2		工况 1	工况 2
1	8.9	8.9	7	58.5	57.3
2	17.7	17.7	8	64.8	63.5
3	26.5	26.5	9	70.3	69.0
4	35.2	35.0	10	75.0	73.8
5	43.5	43.0	11	79.0	78.1
6	51.3	50.5	12	82.4	81.3

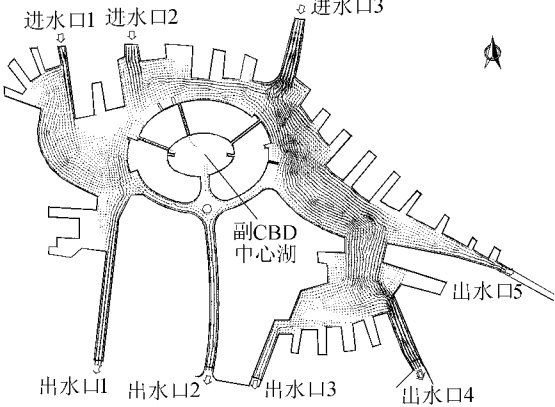
综合对比工况 1、工况 2 下的流场及水体置换率计算结果 ,工况 1 引水条件下滞水区面积要小于工况 2 ,水体置换率平均值也较高 ,故推荐选用工况 1 所对应的进水口位置 ,即 3 个进水口分别布置在湖湾 4、湖湾 6 和湖湾 10。

3.2.2.2 进水口水量分配优化

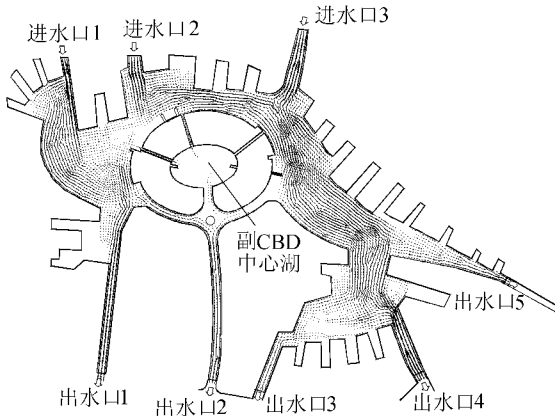
利用表 2 中工况 1、3、4、5 进行不同的水量分配方案的模拟计算 ,分析进水口水量分配变化对水体置换率的影响 ,探求最佳水量分配方案。

3.2.2.1 流场对比分析

分别计算了工况 3、4、5 下的流场分布 ,其中工况 4 和工况 5 的流场见图 4。工况 1、3、4、5 的流态有所不同 ,水量较大的进口形成较大的主流流速 ,从而影响到整个湖区的流场分布。各工况滞水区面积统计见表 5 ,工况 4 的滞水区面积要大于其余工况 ,



(a) 工况4



(b) 工况5

图 4 龙湖湖区计算流场分布

工况 1、3、5 的滞水区面积相差不大。

表 5 龙湖湖区滞水区面积统计

工 况	平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	流速 $\leq 0.001 m/s$		流速 $\leq 0.0005 m/s$	
		滞水区 面积/ km^2	百分 比/%	滞水区 面积/ km^2	百分 比/%
1	0.00564	1.3927	22.2	1.1242	17.9
3	0.00597	1.3750	21.9	1.1241	17.9
4	0.00548	1.4448	23.0	1.1344	18.1
5	0.00569	1.3747	21.9	1.1214	17.9

3.2.2.2 水体置换率对比分析

工况 1、3、4、5 引水后的总置换率统计结果见表 6。12 d 后水体总置换率从高到低依次为工况 1、工况 5、工况 3、工况 4。

表 6 龙湖湖区水体总置换率统计

引水 时间/d	水体置换率/%			
	工况 1	工况 3	工况 4	工况 5
1	8.9	8.9	8.9	8.9
2	17.7	17.7	17.7	17.7
3	26.5	26.5	26.5	26.5
4	35.2	35.1	34.9	35.2
5	43.5	43.3	42.9	43.4
6	51.3	50.8	50.3	51.0
7	58.5	57.5	57.0	57.9
8	64.8	63.4	63.0	64.1
9	70.3	68.6	68.3	69.5
10	75.0	73.0	72.9	74.1
11	79.0	77.0	76.9	78.1
12	82.4	80.6	80.2	81.4

综合对比工况 1、工况 3、工况 4 和工况 5 下的流场及水体置换率计算结果 ,工况 1 引水条件下水体总置换率最高 ,且滞水区面积要小于工况 4 ,与工况 3、5 相差不大。因此对于龙湖调水方案 ,3 个进水口分别布置在湖湾 4、湖湾 6 和湖湾 10 ,相应水量分配为 $4.5 m^3/s$ 、 $8.5 m^3/s$ 和 $3.5 m^3/s$ 的工况 1 为优。

4 结 论

a. 针对浅水型湖泊的特点 ,以郑州东区龙湖为研究对象 ,采用任意无结构网格贴合形态怪异、岸线不规则、多连通的城市湖泊岸边界 ,建立了沿深平均二维水流和物质输运数学模型 ,针对不同的工况情况 ,分析计算龙湖湖区流场、水位、流量、水体置换率的时空变化规律。

b. 本文以寻求城市型浅水型湖泊相对最佳的流态分布和实现水体的高效置换为目标 ,对龙湖湖区的多种调水运行方案的水流特征进行了模拟分析 ,分别计算了不同调水方案的水体置换率 ,提出有利于实现水体有效循环流动的相对最佳水体运行方案 ,为龙湖湖区水质改善和水环境保护提供了科学的决策依据。该工作对其他同类型城市湖泊的调水方案置换率的研究具有一定的借鉴作用。

(下转第 17 页)

潭水体进行净化实验 ,得出结论 :5 种沉水植物均具有一定能力去除水体中总磷及总溶解态磷。单因素方差分析表明 :金鱼藻在去除总磷与溶解态磷上与伊乐藻、苦草存在显著差异 ($P < 0.1$)。在对总磷的去除效率上 ,金鱼藻与菹草能力明显较伊乐藻和苦草强 ,与文献 [18] 的结论一致。

3 结 论

研究结果表明 :5 种沉水植物均具有一定改善水环境质量的能力。对溶解氧的日均贡献中 ,金鱼藻、菹草、苦草均表现良好 ,马来眼子菜对其贡献最小 ,对总氮的去除上 ,金鱼藻与马来眼子菜能力较强 ,对总磷、总溶解态磷的去除能力上 ,金鱼藻、菹草明显优于其他植物。比较分析发现 :5 种沉水植物在去除总氮与叶绿素 a 的能力上 ,有良好的正相关的线性关系。综合沉水植物去除多个污染因子的能力及对水环境质量改善的贡献 ,金鱼藻较其他沉水植物能力更强 ,可以更高效地修复太湖流域富营养化水体。

参考文献 :

[1] 方云英 , 杨肖娥 . 利用水生植物原位修复污染水体[J]. 应用生态学报 , 2008 , 19 (2) : 407-412.

[2] 宋海亮 , 吕锡武 , 稻森悠平 . 水生植物床预处理富营养化水源水中试研究[J]. 给水排水 , 2004 , 30 (8) : 8-12.

[3] 王国祥 , 濮培民 , 张圣照 , 等 . 人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用[J]. 中国环境科学 , 1998 , 18 (5) : 410-414.

[4] 李睿华 , 管运涛 , 何苗 , 等 . 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究[J]. 环境科学 , 2006 , 27 (3) : 493-497.

[5] 张荣社 , 李广贺 , 周琪 , 等 . 潜流湿地中植物对脱氮除磷

效果的影响中试研究[J]. 环境科学 , 2005 , 26 (4) : 83-86.

[6] 李文朝 . 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. 中国环境科学 , 1997 , 17 (1) : 53-57.

[7] EWEL J J . Restoration is the ultimate test of ecology theory in restoration ecology[M]. U . K : Cambridge University Press , 1987 : 31-33.

[8] 吴叶玲 . 测定叶绿素方法的改进[J]. 福建分析测试 , 2006 , 15 (2) : 38-39.

[9] 苏胜齐 , 姚维志 . 沉水植物与环境关系评述[J]. 农业环境保护 , 2002 , 21 (6) : 570-573.

[10] 宋福 , 陈艳卿 . 常见沉水植物对草海水体(含底泥)总氮去除速率的研究[J]. 环境科学研究 , 1997 , 10 (4) : 299-303.

[11] 金相灿 . 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2001 : 121.

[12] SCHEFFER M , HOSPER H S , MEIJER M L , et al . Alternative equilibria in shallow lakes[J]. Trends Ecol Enviro , 1993 , 8 : 275-279.

[13] 刘冬燕 . 苏州河叶绿素 a 动态特征及其与环境因子的关联分析[J]. 上海环境科学 , 2003 , 33 (4) : 261-264.

[14] 李泽军 . 从水体叶绿素含量评价于桥水库富营养化程度[J]. 河北水利水电技术 , 2001 (6) : 44-45.

[15] 王超 , 张文明 , 王沛芳 , 等 . 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究[J]. 环境科学 , 2007 , 28 (5) : 975-981.

[16] PHILLIPS G L , EMINSON D , MOSS B . A mechanism to account for macrophyte decline in progressively eutrophicated fresh water[J]. Aqua Bot , 1978 , 4 : 103-126.

[17] 吴振斌 , 邱东茹 , 贺锋 , 等 . 水生植物对富营养水体水质净化作用研究[J]. 武汉植物学研究 , 2001 , 19 (4) : 299-303.

[18] 刘佳 , 刘永立 , 叶庆富 , 等 . 水生植物对水体中氮、磷的吸收与抑藻效应的研究[J]. 核农学报 , 2007 , 21 (4) : 393-396.

(收稿日期 : 2008-07-01 编辑 : 高渭文)

(上接第 13 页)

参考文献 :

[1] 黄文钰 , 吴延根 , 舒金华 . 中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议[J]. 湖泊科学 , 1998 , 10 (3) : 83-89.

[2] 金相灿 . 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2001.

[3] 舒金华 . 我国城市湖泊和环境问题与对策探讨[J]. 湖泊科学 , 1991 , 3 (1) : 61-66.

[4] 杜晓舜 , 王春树 . 上海市引清调水工作研究[J]. 水资源保护 , 2006 , 22 (3) : 92-94.

[5] 黄宣伟 . 太湖调水工程对水环境改善的战略意义[J]. 水资源保护 , 2003 (3) : 37-39.

[6] 张丹宁 . 玄武湖引水工程的环境效益分析[J]. 环境监测管理与技术 , 1995 , 7 (3) : 17-25.

[7] 俞建军 . 引水对西湖水水质改善作用的回顾[J]. 水资源保护 , 1998 (2) : 50-54.

[8] 姜加虎 , 黄群 . 洪泽湖吞吐流二维数值模拟[J]. 湖泊科学 , 1997 , 1 (1) : 9-14.

[9] ZHAO D H , SHEN H W , LAI J S , et al . Rieman solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling [J]. J Hydr Engrg , ASCE , 1996 , 122 (12) : 692-702.

[10] 赵棣华 , 戚晨 , 庚维德 , 等 . 平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型[J]. 水科学进展 , 2000 , 11 (4) : 368-374.

(收稿日期 : 2007-12-03 编辑 : 傅伟群)