

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221769

基于 MIKE21 的异龙湖水动力优化与水质改善研究

马铁梅, 付俊峰, 孙 英

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 湖泊由于长期处于封闭或半封闭状态, 水动力条件差, 极易发生富营养化。为此, 综合考虑降雨对异龙湖湖泊 TN 浓度的时空分布影响, 构建了 MIKE21 水动力—对流扩散模型, 模拟了不同入水口启闭情况和不同流量引水方案下的水动力条件, 基于湖泊流场的流速分布探究了 TN 浓度的改善情况。结果表明, 增设引水口和增大引水流量均能有效提升湖泊水动力条件与湖区水质, 城河单独引水的整体效果比城河和龙港河共同引水的整体效果好; 在城河单独引水的方案下将引水量增大 1 倍, 湖泊整体流速提升了 44.04%, TN 浓度下降 52.78%, 水动力优化与水质改善效果最好, 但单位补水量的水质改善效率有所降低。研究结果可为类似在建及规划项目提供建设思路。

关键词: 水体置换; MIKE21 软件; 对流扩散; 水质改善; 异龙湖

中图分类号: X524; [TV11]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0054-05

1 概况

异龙湖(102°30'E~102°38'E, 23°39'N~23°32'N)位于云南省红河州石屏县境内, 地处南盘江一级支流泸江的源头。异龙湖现流域集水面积为 360.4 km², 年均天然径流量 6 083×10⁴ m³, 平均水深 2.9 m。正常蓄水位为 1 414.2 m, 对应水量约为 1.16×10⁸ m³。异龙湖流域属亚热带季风气候, 立体气候特点突出, 5~10 月湿润多雨, 降水量占全年降水量的 79%。常年主导风向为东南风, 平均风速约 1.7 m/s。近年来, 由于湖周经济的快速发展和不合理的开发利用, 导致异龙湖现状水质由原来的Ⅲ类水为主变到Ⅳ类或劣Ⅴ类为主^[1], 成为云南省九大高原湖泊中污染最严重的湖泊之一。加之异龙湖结构本身呈半封闭状态, 自然状态下水动力条件较差, 湖水多年平均蒸发量均大于降雨量, 湖泊水位下降明显, 湖泊水体得不到完全置换而呈现出重度富营养状态, 存在湖泊沼泽化加剧、湖泊水环境容量不足等环境问题, 使湖泊水体由草型水体转变为藻型水体。目前对湖泊水环境污染治理的研究方法主要包括物理试验法和数值模拟法两类^[2], 其中数值模拟方法摆脱了现场测量的繁琐工作和物理模型的成本

约束, 以精确重构湖泊水体流场的突出优势成为了最为广泛的研究方法。常用的湖泊水质模型有 MIKE、EFDC、QUAL2E、WASP 等^[3], 其中 MIKE 模型因适用广泛、计算精确而广泛应用在各项水环境污染研究中。路洪涛等^[4]基于数值模拟方法构建了西安市长乐湖二维水动力模型, 分析了多种人工水循环措施下的流场。AHN J 等^[5]利用 MIKE 3 FM 和 ECO Lab 模型分析了韩国松岛新城的一条城市运河的水流特性和污染物运移规律。曾庆慧等^[6]通过构建白洋淀二维水动力模型, 分析了多水源补给情况和短期较大流量的补水方式对白洋淀整体水动力条件的影响。PALIWAL R 等^[7]用 MIKE21 水动力—水质模型, 分析了在潮汐作用下工业废水负荷对胡格里河口水质的影响。徐丹等^[8]利用 MIKE21 建立了大庆市龙凤湿地的二维水动力—水质模型, 探究了不同措施对污染物的削减效果。以往研究中的水动力—水质模型中很少考虑污染物初始浓度的空间分布情况及水质模拟期间的面源污染和污染物的降解等因素, 通常侧重于对污染物情况和工程措施的定性研究, 而对采取的人工措施与水质改善之间关系的系统分析研究较少。本文利用 MIKE21 软件, 综合考虑典型湖泊云南省红河州异龙湖污染物初始浓度的分布和降雨蒸发等因

收稿日期: 2022-08-25, 修回日期: 2022-09-23

作者简介: 马铁梅(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: 2298230068@qq.com

通讯作者: 付俊峰(1978-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为计算流体力学, E-mail: 2631524@qq.com

素,建立了异龙湖水动力—对流扩散模型,旨在通过不同引水方案的模拟,确定有利于异龙湖水动力提升和水质改善效果最佳的引水方案。

2 异龙湖水动力—对流扩散模型构建

2.1 模型控制方程

水动力模型的二维非恒定浅水方程组为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中, h 为总水深; t 为时间; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向上的流速分量; S 为源项; η 为水位; ρ_0 为参考水密度; P_a 为大气压强; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为风在 x 、 y 方向上对水面的切应力; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为在 x 、 y 方向上的底床摩擦力; ρ 为水密度; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力张量分量; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为水平黏滞应力项; (u_s, v_s) 为源项水流流速。

对流扩散模型基于二维对流扩散方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (hC) + \frac{\partial}{\partial x} (uhC) + \frac{\partial}{\partial y} (vhC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + FhC + Q_s \quad (4)$$

式中, C 为平均浓度; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速; D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向上的扩散系数; F 为线性衰减系数; Q_s 为源汇污染物量。

2.2 模型网格划分及参数设置

结合异龙湖水下地形图资料,以 2020 年平均水位 1 412.66 m 作为水位基准面,利用 CAD 提取湖底高程点并生成陆地和水深数据文件。网格划分采用非结构三角形网格,对湿地区域及出入水口区域进行局部加密,共划分为 4 782 个网格单元,2 589 个网格节点,计算网格见图 1(a),地形文件见图 1(b)。

模型 CFL 数、干湿边界的水深系数和涡黏系数均采用模型推荐值。模拟时间从 2021 年 1 月

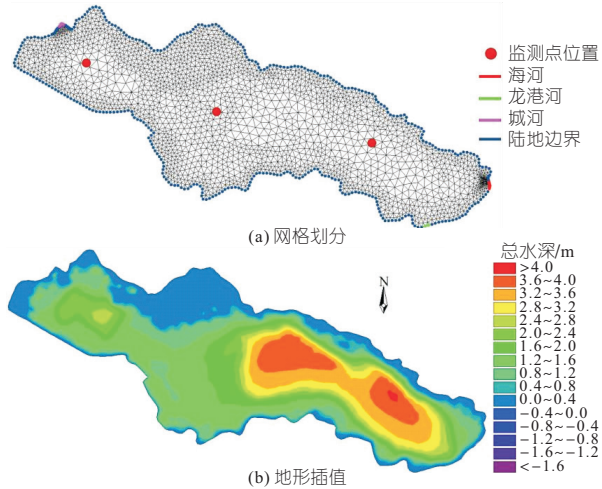


图 1 网格划分及地形插值

Fig. 1 Mesh generation and terrain interpolation

1 日 0:00 开始,持续时间为 243 d,共计 87 480 个时间步长。逐日风场、日降雨量、日蒸发量数据均来自石屏气象站,为避免模型震荡,软启动时间均设置为 3 600 s。模型风场见图 2。由图 2 可看出,风向以东南风为主。降雨蒸发量时间序列见图 3。

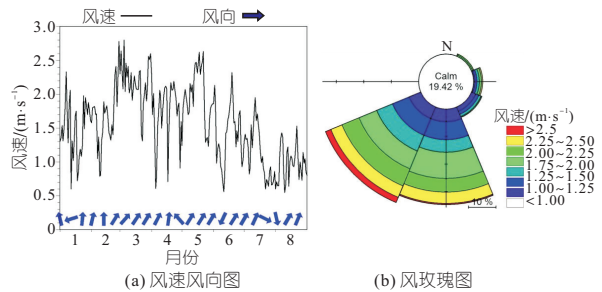


图 2 模型风场

Fig. 2 Wind field of the model

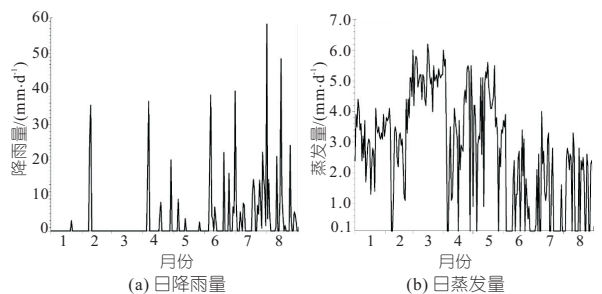


图 3 日降雨量和蒸发量

Fig. 3 Daily rainfall and evaporation

模型以 2021 年 1 月 1 日的水位 -0.09 m (1 412.57 m) 作为初始水位,初始流速 $u = 0$ m/s, $v = 0$ m/s。由于异龙湖水位下降及原出水河道海河河床抬高,达不到出流条件,故在湖泊没有进行引水的情况下均设置为陆地边界,湖泊水体流动主要靠风场驱动。模型初始浓度场分布结果见图 4。

2.3 模型率定和验证

以 2021 年 1~8 月的实测水位与 TN 浓度率

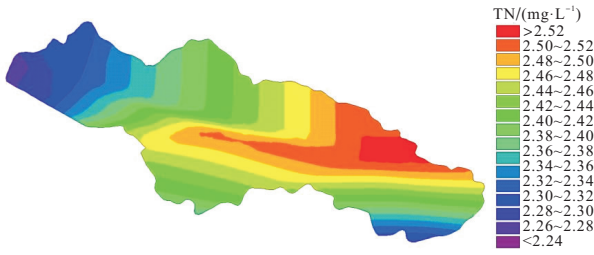


图 4 异龙湖 2021 年 1 月 TN 初始浓度分布
Fig. 4 The initial distribution of TN in Yilong Lake in January 2021

定模型参数,根据率定的结果得到异龙湖糙率为 0.025~0.047;扩散系数比例因子为 1;综合衰减系数为 0.000 4~0.003 5 d^{-1} 。通过计算水位平均绝对误差(M_{MAE})和平均相对误差(M_{MRE})来对模型进行验证^[9],水位及 TN 浓度验证结果见图 5。水位的平均绝对误差为 0.069 m,平均相对误差为 0.005%;TN 浓度平均绝对误差为 0.03 mg/L,平均相对误差为 1.0%。由验证曲线图和误差计算结果可知,模型模拟精度较好,可应用于后续的引水方案的模拟。

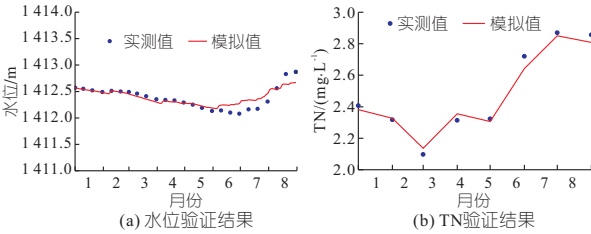


图 5 水位、TN 验证结果

Fig. 5 Validation results of water level and TN

3 引水方案及结果分析

3.1 引水方案设计

异龙湖西岸的城河和东南岸的龙港河是主要的入湖水量来源^[10],分别占总入湖量的 58%和 10%,因此本文模拟选择城河、龙港河两条河道作为入湖河道,出湖河道为海河。假设引水水质已达到 I 类水标准,即 $TN=0.2 \text{ mg/L}$ 。根据外流域已建工程每年向异龙湖补水 $5\ 574.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的水量可换算入湖流量为 $1.77 \text{ m}^3/\text{s}$,为方便计算与分配,设计入湖流量取 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。参考郭宇嘉等^[11]的引水方案设计,考虑不同入水口启闭情况的影响,同时考虑入湖流量增大至 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的影响,设置 3 个引水方案见表 1。进水口及出水口位置见图 1(a)。

3.2 水动力模拟结果分析

根据模型计算结果,分析不同引水方案下的湖泊流场情况,为避免降水扰动湖区流场,选择模型计算稳定后且无降水的 2021 年 6 月 20 日分析湖泊的流场及流速分布情况。

表 1 不同方案引水量

Tab. 1 Water supply of different schemes m^3/s

方案	城河	龙港河	海河
1	2.0	0.0	-2.0
2	1.5	0.5	-2.0
3	4.0	0.0	-4.0

图 6 为不同方案流场分布。由图 6 可知,在无引水和 3 种引水方案下湖中区域均形成了两个较大的回流区,靠西部的呈顺时针方向,靠东部的呈逆时针方向,湖泊流场的总体形态改变不大,说明风场仍是影响异龙湖流场的主要因素。

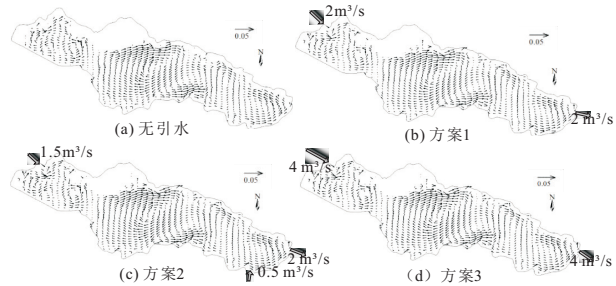


图 6 不同方案流场分布

Fig. 6 Flow field distribution of different schemes

图 7 为不同方案流速分布。由图 7 可知,不补水时异龙湖的湖泊流场主要受地形和风场的影响,整体水动力条件不佳,湖区平均流速仅 0.007 m/s 。在引水情况下,3 种引水方案下的水动力条件均有所改善,说明受到了风场和引水流量的共同作用的影响。从流速分布情况看,进口及出口区域水动力条件较好,流速增加相对明显,3 种方案的最大流速分别可达 0.164 、 0.141 、 0.301 m/s 。岸边及湿地受风场和引水流量共同作用的影响较小,水流流速较缓慢。

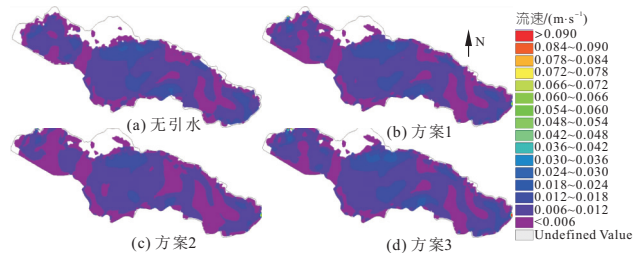


图 7 不同方案流速分布

Fig. 7 Velocity distribution of different schemes

表 2 为不同引水方案下出入水口和全域平均流速。由表 2 可知,与无引水时相比,3 种方案下湖区的整体水动力条件均有所改善,湖区平均流

表 2 不同引水方案下出入水口和全域平均流速

Tab. 2 The average velocity of inlet and outlet and the whole area under different diversion schemes m/s

方案	入水口 1	入水口 2	出水口	全域
1	0.034		0.049	0.009
2	0.028	0.012	0.046	0.009
3	0.071		0.083	0.011

速分别从 0.007 m/s 提高到 0.009、0.009、0.011 m/s。在相同引水流量下，方案 1、2 的总体平均流速分别增加了 26.66%、25.13%。采用城河和龙港河同时补水的方案，由于引水量较小且较分散，对湖泊流场扰动不大，整体改善效果略差于城河单独补水的方案。在方案 1 的基础上，方案 3 增大 1 倍引水流量后，平均流速增加 13.72%，与无引水时相比增加了 44.04%。说明增加引水量能够增强湖区水动力条件，促进水体流动，有利于湖泊水环境的改善。

3.3 水质模拟结果分析

根据《云南省地表水水环境功能区划》中规定异龙湖水环境功能类别为国家地表水Ⅲ类水质水体^[11,12]，为检测置换效果，以异龙湖湖东、湖中、湖西 3 个常规国控监测点的 TN 浓度为依据，当监测点水质均达标时（总氮 ≤ 1.0 mg/L），水体置换目标达成，监测点位置见图 1(a)。

图 8 为不同引水方案下 TN 平均浓度。由图 8(a) 可看出，与初始浓度相比，3 种方案下的 TN 浓度均有不同程度的降低。由于湖泊内 TN 浓度受降雨影响较大，在雨水较多的 4、6、7、8 月，TN 浓度变化规律相似，整体呈上升趋势，地表径流随降雨量的增多而增多，污染物也随径流一同汇入异龙湖。由图 8(b) 可看出，湖西的 TN 浓度有明显下降，湖中和湖东水质稍有好转但效果一般，这是因为入口处附近的湖西区域水体首先得到交换，在保障入湖水质的前提下，该区域的水质改善效果最明显。在相同引水流量下，方案 1 对湖西和湖中的 TN 浓度改善效果优于方案 2，对湖东的改善效果则差于方案 2，这是因为在方案 2 中新增的入水口龙港河位于湖东，对湖东入口处附近区域水质改善效果较为明显。

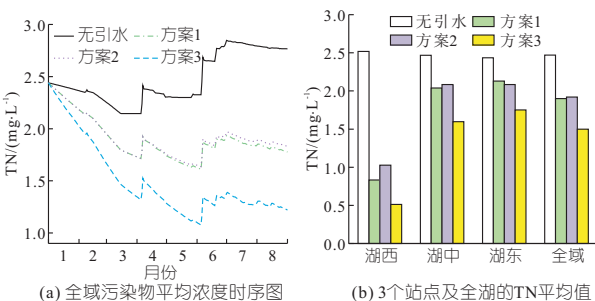


图 8 不同引水方案下 TN 平均浓度

Fig. 8 Average TN concentration under different water diversion schemes

表 3 为 243 d 时不同方案下监测点及全域 TN 浓度。由表 3 可知，3 种方案下的 TN 浓度改善率均为湖西 > 湖中 > 湖东。相同引水流量下，方案 1、2 的全湖改善率分别为 32.87%、

表 3 243 d 时不同方案下监测点及全域 TN 浓度
Tab. 3 Monitoring point concentration and lake-wide TN concentrations of different programs on day 243

方案	湖西		湖中		湖东		全域	
	TN 浓度	改善率/%	TN 浓度	改善率/%	TN 浓度	改善率/%	TN 浓度	改善率/%
1	0.62	78.91	1.90	31.16	2.03	25.37	1.45	32.87
2	0.79	73.13	2.01	27.17	2.01	26.10	1.48	31.48
3	0.36	87.76	1.29	53.26	1.43	47.43	1.02	52.78

注：TN 浓度单位为 mg/L。

31.48%；在引水量增大 1 倍后，流速也随之增大，TN 浓度的改善率从 32.87% 上升到了 52.78%。总体来看，只有湖西监测点的 TN 浓度在 3 种引水方案下均能达到Ⅲ类水标准，因此仅通过引水工程在一定时间内仍不能达到地表水Ⅲ类水质要求，还需加强入湖污染物的综合治理，截污、治污与引清调水多管齐下。

总体上，在引水 8 个月后，3 个引水方案下的Ⅲ类水面积占比分别为 33.77%、27.50%、41.11%。与无引水情况下相比，方案 1、2 补水的改善效果均比较明显；方案 3 在方案 1 的基础上将引水量增加 1 倍后，水质改善效率提高约 20%，水体水质达标率仅提高 7.34%，单位补水量的水质改善效率有所降低。在相同引水流量下，方案 2 的水质达标率和 TN 浓度改善率均低于方案 1，且方案 2 中出口断面平均浓度与方案 1 相比下降了 9.49%，考虑是由于龙港河离海河太近，导致部分清水不能充分与被置换水体混合便从出口排出。

图 9 为 243 d 时不同方案下湖内 TN 浓度分布。由图 9 可看出，在 3 种引水方案下，水质情况从入口到出口逐渐得到净化，最终异龙湖内 TN 较为聚集的地方均为湿地区域及岸边。考虑地形因素，由于异龙湖自身边界结构复杂和湿地植物的阻水作用，导致在水体置换过程中存在缓流甚至滞水的局部区域，使得污染物容易聚集。

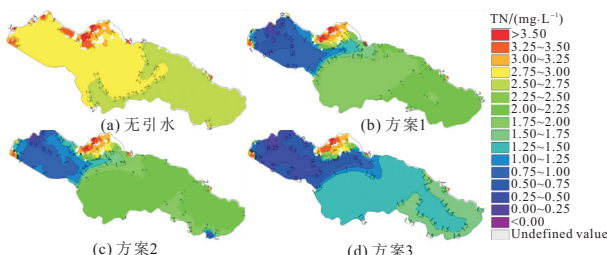


图 9 243 d 时不同方案下湖内 TN 浓度分布

Fig. 9 Distribution of TN concentration in the lake under different schemes on day 243

4 结论

a. 增设引水口和增加引水流量均能提升湖

泊水动力条件与湖区水质,但改善幅度与引水口的位置和引水流量等因素有关。

b. 以总氮为分析指标,方案 3(城河入流 4 m³/s,海河出流 4 m³/s)的水动力条件与 TN 浓度的总体改善效果最好。相比于无引水条件下湖泊的整体流速提升了 44.04%;异龙湖湖东、湖中、湖西 3 个监测点的 TN 浓度分别降低了 87.76%、53.26%、47.43%,全湖总体 TN 浓度降低了 52.78%。

c. 异龙湖北部的湿地区域受风场和引水流量影响较小,水体交换率低,水动力条件较差,TN 浓度较高,因此还需综合其他辅助措施来改善湖区水动力条件进而达到改善水质的目的。

参考文献:

[1] 杜佳姚,李立雄,年正,等. 异龙湖水生植物残体资源化利用研究[J]. 环境科学导刊,2018,37(增刊1):22-25.

[2] 程伟平,张洪. 基于 EFDC 模型的滇池外海流场及温度变化研究[J]. 科技通报,2018,34(6):54-58.

[3] 齐于顺,刘仁志,张启月,等. 长江干流铜陵段突发性水污染情景模拟分析[J]. 环境工程技术学报,2022,12(2):607-614.

[4] 路洪涛,路洪波,刘金光. 基于 MIKE21 的城市湖泊人工水循环流场数值模拟[J]. 环保科技,2013,19

(2):44-48.

[5] AHN J, NA Y, PARK S W. Assessment of water quality in an artificial urban canal: A case study of Songdo City in South Korea [J]. Korean society of environmental engineers, 2019. DOI:10.4491/eer.2018.286.

[6] 曾庆慧,胡鹏,赵翠平,等. 多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响[J]. 生态学报,2020,40(20):7153-7164.

[7] PALIWAL R, PATRA R R. Applicability of MIKE 21 to assess temporal and spatial variation in water quality of an estuary under the impact of effluent from an industrial estate[J]. Water ence & technology, 2011, 63(9):1932-1943.

[8] 徐丹,付湘,谢亨旺,等. 间歇式引水冲污对城市湖泊水质改善的研究[J]. 中国农村水利水电,2019(3):24-27.

[9] 赵正文. 城市人工湖水动力特性与水质变化规律研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.

[10] 刘薇. 异龙湖水质时空变化研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.

[11] 郭宇嘉,王颖,孙佳乐,等. 不同进口启闭情况对流场及浓度场的影响研究[C] //中国水利学会 2018 学术年会论文集第二分册,2018:189-197.

[12] 张锐,谢海涛,段学新,等. 异龙湖及主要入湖河流(含湿地)水质监测与评价[J]. 环境科学导刊,2022,41(1):85-86.

Study on Hydrodynamic Optimization and Water Quality Improvement of Yilong Lake Based on MIKE21

MA Tie-mei, FU Jun-feng, SUN Ying

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Lakes are highly susceptible to eutrophication due to their long-term closed or semi-closed status and poor hydrodynamic conditions. This paper constructed a hydrodynamic-convective diffusion model with MIKE21 software by considering the influence of rainfall on the spatial and temporal distribution of TN concentration in the Yilong Lake. The model simulated the hydrodynamic conditions under different inlet opening and closing conditions and different flow diversion schemes. The improvement of TN concentration based on the flow velocity distribution of the lake flow field was discussed. The results show that the hydrodynamic conditions and the water quality of the lake can be effectively improved by setting up water diversion inlets and increasing water diversion flow. The overall effect of diverting water from the Chenghe alone is better than diverting water from the Chenghe and Longgang River together. Under the scheme of separate diversion from the Chenghe, when the water diversion flow was double, the overall flow rate of the lake was increased by 44.04% and the TN concentration decreased by 52.78%, with the best effect of hydrodynamic optimization and water quality improvement, but the efficiency of water quality improvement per unit of water recharge is reduced. This research could provide some references for similar projects.

Key words: water body renewal; MIKE 21 software; convective diffusion; water quality improvement; Yilong Lake

(上接第 3 页)

Application of Ridge Estimation Method of Rainfall Error Based Differential Response in Flood Forecasting of Jianyang Basin

YANG Shan-shan¹, CHENG Rui², YAN Wen-zhu¹, ZHANG Qian³

(1. Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing 100053, China; 2. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China; 3. China Water Resource Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: To improve the accuracy of areal mean rainfall data and solve the problems of instability of least square estimation in runoff error correction based on dynamic system response curve, ridge estimation of rainfall error based on differential response was introduced based on least square ridge estimation. The calculation of the Xin'anjiang model was generalized a system. The method was applied in flood forecast error correction in Jianyang basin with 37 historical floods chosen as test samples. The results indicate that the ridge estimation of rainfall error based on differential response has obvious correction effects in Jianyang basin, which can improve the accuracy and stability of flood forecasting.

Key words: error correction; rainfall error; ridge estimation; Xin'anjiang model