

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220574

感潮河网区白云湖水系生态环境补水研究

韦秋莹¹, 刘丙军^{1,2}

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275)

摘要: 感潮河网区水系交错、城市发达, 高强度土地利用开发导致城市景观湖泊水环境污染严重, 生态环境功能退化。以典型河网区城市景观湖泊—广州市白云湖为例, 构建二维水力水质耦合模型, 研究其生态环境需水及其补水方案。结果表明, 基于 MIKE21 的二维河网区水力水质耦合模型, 能较好模拟城市景观湖泊水体水质输移规律, 模拟值与实测值相对误差值均小于 0.20, 纳什效率系数均大于 0.75; 运用白云湖闸、泵水利工程联合调度补水, 白云湖及其连通水系生态环境需水量保证率基本达到 100%, TN 及 TP 浓度均达到 IV 类水标准。研究成果可为感潮河网区城市景观湖泊生态环境治理提供参考。

关键词: 河网区; 景观湖泊; 水力水质模型; 生态补水

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0038-04

1 概况

白云湖位于广州市白云区西北部的石井镇, 是广州市最大的人工湖, 分为东、西两湖, 总占地面积为 2.07 km², 其中水面面积为 1.05 km² (图 1)。近年来白云湖流域城市化率明显加快, 建设用地已超出总面积的 70%。土地利用高密度开发, 白云湖周边城市建设迅速, 带来了以工业为主, 并存在少量餐饮及禽畜养殖的污染源, 每年向白云湖流域排入 TN 22.07 t, TP 4.41 t, 导致白云湖流域水体水质长期处于劣 V 类, 主要超标污染物为 TN 和 TP, 水环境功能不断退化, 严重影

响周边人居环境与经济社会可持续发展。白云湖地处典型感潮河网区, 其水利设施主要包括广和泵站、引水渠道和人工湖湖区、进水闸、各河涌分水闸, 其中广和泵站由 4 台设计流量为 8.499 m³/s 的泵组成, 并按照“三用一备”的模式进行调度, 其主要功能是通过 3 台常用泵站以 25 m³/s 流量从珠江西航道取水, 经过 4.7 km 长的引水渠道引入湖内, 在湖区蓄水, 对与其相通的滘心涌、环滘河、海口涌和石井河进行生态补水, 实现河涌综合整治目标。本文拟依托白云湖流域独有的感潮河网区潮流动力条件, 研制该湖体闸泵联合生态补水调度方案, 分析不同生态补水方案对白云湖及其连通水系生态环境和水质改善满足程度, 以期有感潮河网区城市景观湖泊水生态环境治理方案优化提供理论方法。

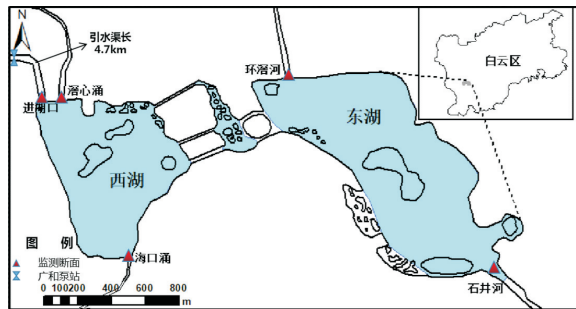


图 1 白云湖流域地理位置及水系

Fig. 1 Location and water system of Baiyun Lake Basin

2 研究方法

2.1 生态环境需水量

根据胡东起等^[1]对生态环境需水概念的辨析, 结合生态功能、水质规划要求并考虑基础数据, 按照研究区的生态功能及规划目标将生态环境需水量划分为生态需水量和环境需水量两部

收稿日期: 2022-03-24, 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金联合基金重点项目(2019B1515120052); 国家自然科学基金项目(52179029, 51879289)

作者简介: 韦秋莹(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源水生态, E-mail: weiqy7@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 刘丙军(1976-), 男, 博士、教授, 研究方向为水资源系统分析, E-mail: liubj@mail.sysu.edu.cn

分。生态需水量包括蒸发需水量、渗漏需水量、河道基流需水量(湖泊存在需水量),环境需水量主要为研究区的主要污染物稀释后达到规划水质目标的需水量。其中,蒸发需水量、渗漏需水量计算方法较成熟,具体可参考杨志峰等^[2]的计算方法。本文重点介绍河道基流需水量、湖泊存在需水量、稀释自净需水量的计算方法。

(1)河道基流需水量。即为保持河流一定流速和流量所需水量,计算公式为:

$$W_{\text{基}} = A_{\text{河}} V \quad (1)$$

式中, $W_{\text{基}}$ 为河道基流需水量, m^3/a ; $A_{\text{河}}$ 为河道平均断面面积, m^2 ; V 为流速, m/s 。

(2)湖泊存在需水量。即为维持城市湖泊正常存在及发挥生物栖息地及娱乐等正常功能,保持常年湖泊存蓄的需水量,计算公式为:

$$W_{\text{L}} = A_{\text{湖}} H \quad (2)$$

式中, W_{L} 为湖泊存在需水量, m^3 ; $A_{\text{湖}}$ 为河湖水体水面面积, m^2 ; H 为湖泊平均水深, m 。

(3)河湖稀释自净需水量。稀释自净需水量一般与河湖的基本水量、水质污染现状及污染物随进、出河湖的动态水流的排入、排出量有关。对于河流,即为最小环境流量;对于湖泊、水库,即为受污染水体的最小交换水量。

其中河流稀释自净需水量的计算公式为:

$$Q = C_i Q_i / C_{oi} \quad (3)$$

式中, Q 为河流稀释自净需水量, m^3/s ; C_i 为实测河流第 i 种污染物浓度, mg/L ; Q_i 为 90% 保证率最枯月平均流量或近 10 年最枯月平均流量, m^3/s ; C_{oi} 为目标水质标准的第 i 种污染物浓度, mg/L 。

C_i / C_{oi} 为污染指数,计算 Q 时,取污染指数最高的污染物进行计算。河流稀释自净需水量应选河道基流需水量 $W_{\text{基}}$ 和河流稀释自净需水量 Q 之间较大者。

湖泊水质达标需水量的计算公式为:

$$W_{\text{Lk}} = C_i W_{\text{L}} / C_{oi} \quad (4)$$

式中, W_{Lk} 为湖泊稀释自净需水量, m^3 。

若湖泊水质达标需水量 $W_{\text{Lk}} > W_{\text{L}}$,表明湖泊需换水,湖泊稀释自净需水量计算公式为:

$$T_{\text{t}} = W_{\text{Lk}} / W_{\text{L}} \quad (5)$$

$$W_{\text{湖}} = A_1 H T_{\text{t}} \quad (6)$$

式中, T_{t} 为换水次数; $W_{\text{湖}}$ 为湖泊稀释自净需水量, m^3 ; A_1 为河湖水体水面面积, m^2 。

2.2 生态补水效果分析方法

(1)基本原理与方法。为分析闸、泵等水利工程生态补水的水质改善效果,选用 MIKE21 Flow

Model 模型中的 HD 模块(水动力学模块)和 Transport 模块(对流扩散模块)模拟生态补水效果。HD 模块模拟由各种作用力而产生的水位及水流变化,在水动力学 HD 模块的基础上加上 Transport 模块,模拟对流扩散作用下水体中污染物的运移扩散过程,对于会发生降解的非保守物质可通过设定降解系数来模拟,具体原理及计算公式见文献^[3]。

(2)计算网格创建。经三角形非结构化网格处理后,白云湖及其连通水系网格划分允许最小角度为 26° ,网格节点数为 19 216 个,网格单元数为 30 259 个。将地形水深数据插值到划分好的网格模型中,保证每一个都有地形水深数据,生成的最终输入模型作为网格文件的三维立体图,见图 2。

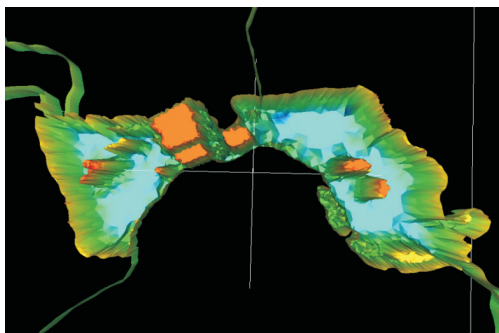


图 2 计算网格三维立体图

Fig. 2 3D diagram of computational grid

(3)初始条件及边界条件设置。水动力水质模型边界,涉及 1 个人水口与 4 个出水口等 5 处边界条件、白云湖湖体初始运行水位条件、水质初始浓度。根据同步实时实测数据进行设置,选取白云湖平均水位 2.58 m 作为运行的初始水位,初始流速设为 0 m/s;以入水口入湖流量 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为上游边界条件,涪心涌、环涪河、海口涌、石井河出口处初始水位分别设置为 6.00、5.50、4.30、3.58 m;确定研究区 TN、TP 初始平均浓度分别为 4.4、0.12 mg/L。

(4)模型率定验证。选择平均绝对误差 M_{MAE} 和纳什效率系数 N_{NSE} 验证模型的率定结果^[4]。通过优化,最终确定底床糙率曼宁系数值为 $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$,TN 和 TP 扩散系数均为 $1 \text{ m}^2/\text{s}$,TN、TP 降解系数分别为 0.05、0.06/d。观测点水位、TN 浓度和 TP 浓度模拟值与实测值对比结果表明,三个指标绝对误差值均小于 0.20,纳什效率系数均大于 0.75。可见,该水动力水质模型模拟效果非常好,能较好地反映白云湖的水质状况。

3 结果分析

3.1 生态环境需水量计算

白云湖流域受季风影响,季节之间的降水极不均匀,主要集中在汛期 4~9 月,降水量约占全年的 82.1%,在枯水期 10 月~次年 3 月,维持湖泊正常功能及改善水质的水量不足,因此重点计算枯水期白云湖生态环境需水量。根据胡开明等^[5]对景观湖泊换水周期的研究,确定白云湖更换水体时间为一周,选取枯水期 2020 年 10 月 1~7 日为计算时段,通过分项计算白云湖及其连通水系的水面蒸发需水量、渗漏需水量、河道基流量或湖泊存在需水量及稀释自净需水量得出一周的生态环境需水总量。根据白云湖实测资料可知,白云湖水体水面面积为 1.06 km²,多年平均景观水深为 1.85 m,得出一周湖泊存在需水量为 296.80 × 10⁴ m³。根据白云湖总氮目标为 1.5 mg/L,各水系总氮目标为 2.0 mg/L,野外监测所得白云湖及其水系实际总氮浓度,结合式(3)~(6)计算得到稀释自净需水量,并与湖泊存在需水量或河道基流需水量对比,根据最大值法确定白云湖及其水系生态环境需水量,计算结果见表 1。

表 1 生态环境需水量计算结果

Tab.1 Calculation results of eco-environmental water demand

名称	蒸发需水量	渗漏需水量	河道基流需水量(湖泊存在需水量)	稀释自净需水量	生态环境需水量
					10 ⁴ m ³
白云湖	2.09	0.61	296.80	444.49	447.19
滔心涌	0.05	0.02	166.92	108.82	166.99
环滔河	0.11	0.03	169.34	96.77	169.49
海口涌	0.28	0.08	278.21	84.67	278.57
石井河	0.83	0.24	423.36	294.84	424.43

3.2 生态补水方案优选

(1)工况设置。白云湖引水渠渠首为广和泵站,设有闸、泵两套引水系统。为充分利用感潮河网区潮流动力条件,设置两种引水方案,分别为无泵引水与闸泵联合引水。无泵引水指仅开引水渠首水闸,当外江水位高于引水渠闸底高程时依靠水位差补水;闸泵联合引水是同时利用广和泵站以 25 m³/s 流量进行闸泵联合调度引水,最大限度满足白云湖生态补水需求,实现生态与经济效益双赢。

(2)生态补水效果分析。湖泊水动力条件和污染物浓度是影响湖泊水质的重要因素,考虑引水水源水质现状为Ⅲ类水体,需分析不同补水方

案对白云湖生态需水量满足度与水体 TN、TP 两项水质指标的提升效应。两种生态补水工况的效果见表 2。由表 2 可知:①无泵工况下,模拟时段中可利用外江内河之间潮位差具体时段见图 3,平均每日能通过闸无泵引水 13 h,流量与水量均较小,一周对白云湖补水水量仅有 12.49 × 10⁴ m³,无法满足生态环境需水量;在闸泵联合调度引水

表 2 不同生态补水工况效果分析

Tab.2 Analysis of ecological water replenishment effect under different conditions

工况	监测断面	生态环境需水量			水质			
		日均流量	周水量 /10 ⁴ m ³	是否满足	TN 浓度	是否达标	TP 浓度	是否达标
无泵入湖断面		0.21	12.49	否	2.54	否	0.08	是
取水滔心涌		0.97	58.74	否	2.46	否	0.07	是
环滔河		0.01	0.88	否	2.37	否	0.07	是
海口涌		0.18	11.11	否	2.41	否	0.07	是
石井河		0.49	29.64	否	2.15	否	0.07	是
闸泵入湖断面		11.30	683.42	是	<1.6	是	<0.06	是
联调滔心涌		2.81	170.20	是	<1.6	是	<0.06	是
环滔河		2.82	170.43	是	<1.6	是	<0.06	是
海口涌		4.73	285.91	是	<1.6	是	<0.06	是
石井河		7.03	424.98	是	<1.6	是	<0.06	是

注:日均流量单位为 m³/s;TN 浓度、TP 浓度单位均为 mg/L。

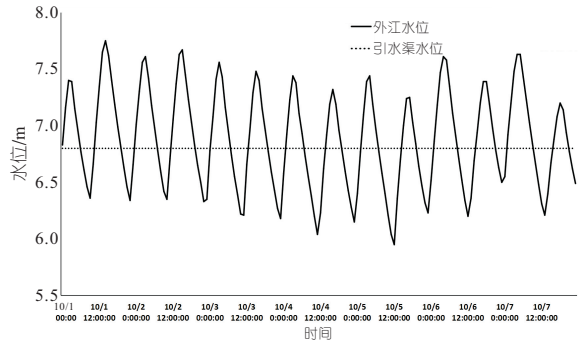


图 3 外江水位与引水渠水位

Fig.3 Water level of outer river and diversion canal

工况中,利用广和泵站以 25 m³/s 流量强迫引水 11 h,各断面水量明显提升,对白云湖一周补水达 683.42 × 10⁴ m³,可满足生态环境需水量。②研究区域 TN、TP 平均原始浓度分别为 4.40、0.12 mg/L, TN 浓度远高于目标水质要求,但 TP 浓度只有湖区未达到水质要求。不同生态补水工况 TN 与 TP 的浓度场分布见图 4,在无泵引水工况中, TN 浓度基本位于 1.8~2.5 mg/L 的浓度范围内,改善程度达到了 50%; TP 浓度基本位于 0.06~0.10 mg/L 的浓度范围内,改善程度约 33%,各监测断面 TN 浓度未达到水质目标。闸泵联合调度方案下, TN 和 TP 浓度均大幅下降, TN 和 TP 浓度分别低于 1.40、0.06 mg/L,各监测断面的 TN 和 TP 浓度均达到水质目标。

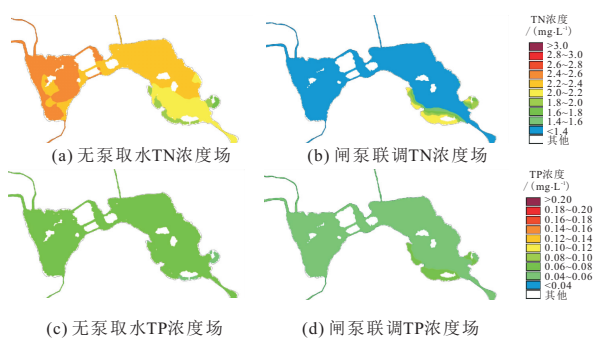


图 4 不同生态补水工况各水质指标浓度分布

Fig. 4 Distribution of water quality indicators under different conditions

4 结论

a. 构建的水动力水质模型能较好地反映白云湖水动力水质状况,后续可用于模拟不同生态补水方案效果。采用平均相对误差和纳什效率系数评价观测点水位、TN 和 TP 浓度模拟值与实测值,得出平均相对误差均小于 0.20,纳什效率系数均大于 0.75。

b. 根据生态环境需水量计算方法,得出在枯水期为保护白云湖及其连通水系——滘心涌、环滘河、海口涌和石井河的生态系统发挥正常生态功能的生态环境一周需水总量分别为 440.65×10^4 、 166.99×10^4 、 169.49×10^4 、 278.57×10^4 、

$424.43 \times 10^4 \text{ m}^3$, 以此提出结合潮动力条件和闸泵调度进行生态补水的方案。

c. 通过水动力水质模型模拟得到无泵引水和闸泵联合调度生态补水方案的水量水质情况。无泵引水仅靠潮位差进行生态补水后,无法满足生态环境需水量,研究区 TN、TP 浓度略有下降,但改善作用有限,TP 可达到目标水质要求,但 TN 达不到目标水质要求;利用闸泵联合调度进行生态补水后,可基本满足生态环境需水量,研究区 TN、TP 浓度降至水质要求标准,水质改善作用显著。

参考文献:

- [1] 胡东起,徐慧. 城市生态环境需水量计算方法与应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 29-34.
- [2] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 许婷. MIKE21 HD 计算原理及应用实例[J]. 港工技术, 2010, 47(5): 1-5.
- [4] 赵正文. 城市人工湖水动力特性与水质变化规律研究——以雁鸣湖为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [5] 胡开明,逢勇,王华,等. 大型浅水湖泊水环境容量计算研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 135-141.

Study on Ecological Water Supplement of Baiyun Lake Water System in Tidal River Network Area

WEI Qiu-ying¹, LIU Bing-jun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Water Resources and Environment Research Center of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The tidal river network area has the characteristics of criss-crossed water systems and developed cities. High intensity land use and development leads to serious hydrological pollution and degradation of ecological environment functions of urban landscape lakes. Taking the typical urban landscape lake in the river network area - Baiyun Lake in Guangzhou as the research object, this paper constructed a two-dimensional hydrodynamic and water quality coupling model to study its eco-environmental water demand and its water supplement schemes. The results show that the two-dimensional hydrodynamic and water quality coupling model in the river network area based on Mike21 can effectively simulate the temporal and spatial evolution law of water quality in urban landscape lakes, and the relative errors between the simulated values and the measured values are less than 0.20, Nash efficiency coefficients are greater than 0.75. By jointly using Baiyun Lake sluice and pump hydraulic engineering to dispatch and replenish water, the assurance rates of eco-environmental water demand of Baiyun Lake and its connected rivers are basically 100%, the contents of TN and TP meet the fourth class water quality. The research results can provide reference for ecological and environmental governance of urban landscape lake of polluted river network.

Key words: river network; landscape lake; hydrodynamic and water quality model; ecological water supplement