

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.022

城市湿地公园生态补水调度方案对比分析

陈黎明^{1,2}, 陈炼钢^{1,2}, 李褪来^{1,2}, 陆昊^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029;

2. 南京水利科学研究院水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:为充分利用湿地的净化功能,以某城市湿地公园为例,构建了二维水动力模型并引入水龄计算模块,取网格尺寸3~5 m,对湖区进行了精细化概化,并对不同工程分布方案下湖区水动力状况及水体交换特性的计算结果进行了对比分析。结果表明:方案2和方案3中湖区水体流动性及水动力状况空间分布相对较优,仅在中部湖区和多塘净化3区的中部局部水域存在滞水区;为进一步改善这些局部区域的水动力状况,建议在水体相对滞缓的水域布设推流曝气设备,加强水体流动和水体交换能力。通过数学模型计算,结合其他因素可确定具体的调度方案,为湖区水系连通及生态补水提供决策支撑。

关键词:城市湿地公园;二维水动力模型;水龄;水系连通;生态补水调度

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0162-06

Comparative analysis of operation schemes for ecological water supply in urban wetland park // CHEN Liming^{1,2}, CHEN Lian'gang^{1,2}, LI Tilai^{1,2}, LU Hao^{1,2} (1. *Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: In order to make full use of the purification function of wetland, with an urban wetland park used as an example, a two-dimensional hydrodynamic model was constructed, and a water age calculation module was introduced. With the grid size ranged from 3 m to 5 m, the lake area was finely generalized, and the hydrodynamic status and water exchange characteristics of the lake area were calculated and analyzed with the model. Comprehensive comparison of calculation results of different engineering schemes shows that the fluidity and spatial distribution of hydrodynamic condition are relatively better in the lake area in scheme 2 and scheme 3, and there are stagnant water areas only in the central lake area and the central part of the third multi-pond purification area. To further improve local hydrodynamic conditions, it is suggested that the push flow aeration equipment should be arranged in relatively stagnant water areas to improve the fluidity and water exchange capacity. With the model, specific scheduling schemes can be formulated in combination with other factors, so as to provide decision support for the river and lake system connection and ecological water supply.

Key words: urban wetland park; two-dimensional hydrodynamic model; water age; water system connection; ecological water supply scheduling

湿地是具有水陆相兼性和过渡性的一种独特生态系统^[1],具有旅游休闲、固碳释氧、净化水质、水土保持等作用^[2-3]。据统计,中国湿地面积占陆地总面积的5.6%,提供了96%的淡水资源^[2]。城市湿地是城市的特殊组成部分,能够改善城市的生态环境状况、涵养城市水资源、维持区域内水平衡、调节城市气候、降解部分污染物并保持湿地内部的生

物多样性。城市湿地内部水系复杂,水系连通性较差时易出现滞水区。在城市的无序扩张中,城市湿地在点源、面源、内源复合污染影响下,面临着面积减少、水质恶化、生态退化等复杂问题^[4-5],亟待通过有效方式加以保护。

许多城市湿地公园的正常维持离不开生态补水。张树军等^[6]将生态补水定义为通过采取工程

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200304);南京水利科学研究院重点基金(Y521009)

作者简介:陈黎明(1983—),男,高级工程师,硕士,主要从事水资源、水环境与水生态规划研究。E-mail: lmchen@nhri.cn

或非工程措施,向因最小生态需水量无法满足而受损的生态系统调水,补充其生态系统用水量,遏制生态系统结构的破坏和功能的丧失,逐渐恢复生态系统原有的、能自我调节的基本功能,或者实现新的生态平衡的活动。通过生态补水措施,可以提高水体的流动性,加大水环境容量,提升水体的自净能力,也有利于恢复生态环境^[7-8]。在城市环境、经济、社会等子系统之间的相互交织与作用下,城市湿地公园的补水模式问题已经成为限制城市湿地公园建设发展的瓶颈^[9-10]。

城市湿地生态补水研究主要存在补水量和补水线路设定两方面难点。首先,城市湿地生态补水需要一定的水量以增加水体连通性,让“死水”成为“活水”,从而增强区域水体的净化能力^[11]。但生态补水的水量也不是越多越好,例如南京玄武湖从1997年开始实施生态补水,补水量逐年上升至35万t/d,但近年来水质仍日益恶化^[12];Yang等^[13]也发现由于引水水质的季节性变化,某些季节生态补水水量的增加可能导致水质恶化。其次,补水线路的设计很大程度决定了流场分布与水质的改善效果^[14]。由于湿地生态系统相对脆弱,因此,区域水资源、城市湿地水质、景观等多目标下城市湿地生态补水线路的优化制定成为研究的难点^[15]。

数值模拟是研究生态补水水量和线路的典型方法^[16]。张珮纶等^[17]综合国内实践和研究提出,可利用模型方法建立湿地生态补水方案的方法体系。王志鹏^[18]依托 MIKE21 模型构建了湿地生态补水演进模型,对三江平原挠力河湿地群的湿地补水方案进行了优化设计。Xu等^[19]提出了随机水资源分配优化模型,与现有供水运行方案相比,提出的优化方案能以较低的总成本减少供水量,同时满足了湿地生态系统植物生长的需求。Alafifi等^[20]构建了美国犹他州 Lower Bear 河流域系统优化模型,提出在8—12月通过生态补水增加湿地面积,提高生态环境质量。目前针对城市湿地生态补水整体水量水质研究较多,但在细小尺度层面对补水线路设计的优化研究偏少,对其水动力特征量化方面研究则更少。本文采用水动力模型结合水龄模块对湿地生态补水方案进行模拟,从细小尺度层面上更为直观地表现不同生态补水调度方案的特征,进一步挖掘并发挥湿地公园的景观和水质净化功能,以期与城市的发展之间形成良性互动。

1 研究区概况

某城市湿地公园位于城市功能主轴和绿色景观带上,是未来城市重要的绿色空间,公园定位为接轨

城市发展,呼应生态文明建设号召,打造以自然水韵、浪漫氛围为主的生态郊野公园。湿地公园整体以“生态”为设计理念,融入当地特色文化,达到人与自然和谐相处。根据规划,公园总占地面积约110.9万m²,其中水面面积为23.8万m²。公园的设计和建设注重生态修复,设计在最小干预的条件下,植入丰富的游赏体验、浪漫体验和运动场所,自然水系贯穿全园,全区景色优美,气候宜人。

根据规划方案,湿地公园依托场地自然基底现状,为区域小气候、生物栖息、游赏游憩等多维度需求提供多样的自然生境。根据公园内不同的景观特色,最大化保留原有的大型草木与河道、沟渠,对水资源进行净化处理,打造湖区和多塘2种净化区(图1);拟布设浮动湿地3000m²,布置微生物附着基-生态基1万m²;恢复沉水植物17万m²,挺水植物2.5万m²,浮叶植物1万m²;生物操纵工程拟投放生物量为8000kg的水生生物,充分利用湿地对水质的净化作用,营造可亲水的滨水活力空间,使人们在体验不同景色时,了解不同湿地净化类型的净化原理,寓教于乐。

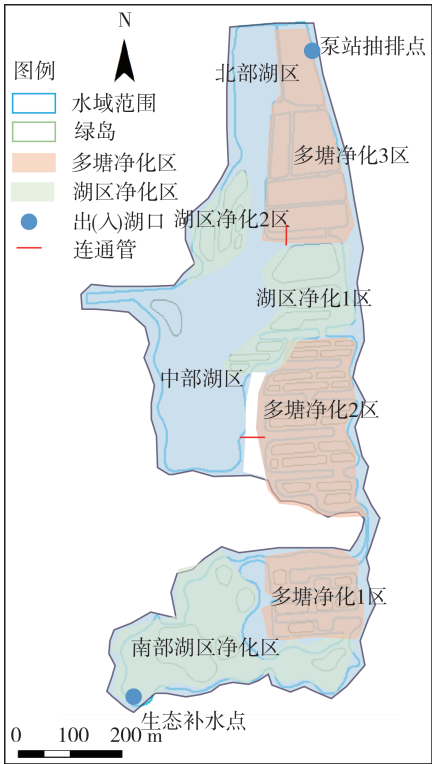


图1 模型范围及分区
Fig.1 Model scope and zoning

湿地公园内湖水系独立,与外部水系分别形成2个系统,受外部条件限制,公园拟从西南角引入外部水源,作为湿地公园主要的生态补水水源(图1)。由于湿地公园内水系连通状况复杂,原有水体连通情况下部分区域易形成死水区,不能有效发挥湿地

作为生态缓冲区的水质净化功能。因此,在湿地公园规划建设中,有必要掌握湖区小尺度以及精细化尺度下的水动力状况及水体交换特性,为工程设计及生态补水调度方案的比选和优化提供决策支撑,从而合理规划湿地公园的水系连通方案及生态补水路线。

2 湖区水动力模型构建

本文应用二维非恒定流浅水方程组,采用有限体积法对方程组进行数值求解,模拟计算湖区水动力状况。为更好地分析湖区水体交换特性,进一步引入水龄计算模块分析水体的交换能力。

2.1 模型原理

二维浅水方程和对流-扩散方程的守恒形式为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(s_{0x} - s_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + gh^2/2)}{\partial y} = gh(s_{0y} - s_{fy}) \quad (3)$$

式中: h 为水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上平均流速分量; t 为时间; g 为重力加速度; s_{0x} 、 s_{fx} 分别为 x 方向上的水底底坡、摩阻坡度; s_{0y} 、 s_{fy} 分别为 y 方向上的水底底坡、摩阻坡度。

水体交换时间可用水龄来表征,即边界水体完全交换至各水体单元的时间(以天计),因此基于可溶性物质平均水龄 CART (constituent-oriented age and residence time theory) 理论,在数学模型中,利用输运方程计算保守物质相对浓度和加权水龄积。考虑示踪物仅从一个河流边界进入,不考虑其他源、汇项,保守物质相对浓度和加权水龄积分别用如下方程计算:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left[\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} \right] - K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \left[\frac{\partial(u\alpha)}{\partial x} + \frac{\partial(v\alpha)}{\partial y} \right] - K \left(\frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \alpha}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (5)$$

式中: C 为保守物质相对浓度; α 为加权水龄积; K 为扩散系数。

平均水龄 a 可以表示为

$$a = \alpha / C \quad (6)$$

2.2 模型概化

采用三角形网格对计算区域中水域范围进行划分。水域范围内,沟渠及绿岛众多(图1),特别是多塘净化1区和2区之间,渠系弯曲复杂,绿岛密布,部分沟渠总宽约5 m,其中多塘净化1区和2区之间的连接渠道最窄处仅3 m左右,因此需对多塘净化

区局部网格进行加密,取其网格单元尺寸约为3 m,略小于湖区,保证其过水通道。总体上水域范围内网格单元尺寸为3~5 m,共计9 254个节点,15 264个网格单元(图2)。

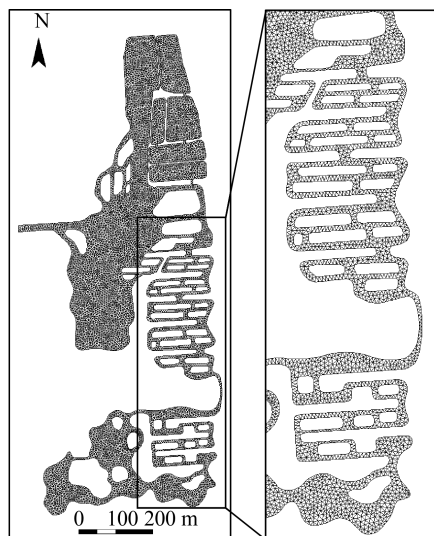


图2 网格概化

Fig.2 Grid generalization

采用设计水下地形资料对模型进行概化。由于水域范围内渠系复杂且网格单元尺寸较小,在提取湖区水下地形等高线的基础上,为避免地形概化时水域附近陆域高程对邻近水域水下地形的影响,采用网格单元内所有高程点的平均值作为网格单元的地形值,尽可能使每个网格单元的水下地形与设计等高线保持一致,概化后的网格单元地形可充分反映沟渠的槽蓄量以及过流能力。总体上水下地形比较平坦,地形高程基本为-2.0~2.0 m,除湖区和部分塘底高程略低于0 m外,其余区域水下地形高程基本为1.0~2.0 m(图3)。

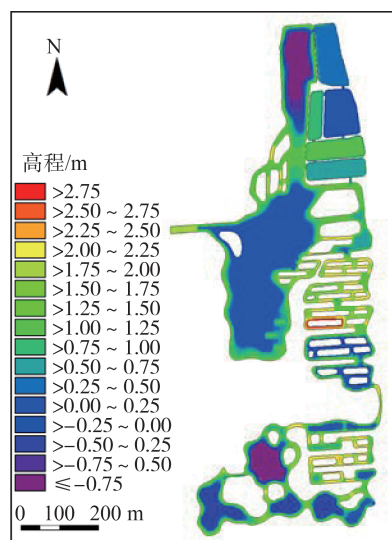


图3 水下地形概化

Fig.3 Underwater topography

2.3 边界条件及主要参数

2.3.1 边界条件

a. 初始条件。湖区水体水位按常水位控制,设定为 2.3 m;保守物质相对浓度和加权水龄积初始值均设为 0。

b. 水动力边界条件。湖区的生态补水拟从西南角的南部湖区补水点引入,补水量为日均 7 万 t;出湖为北部泵站抽排,抽排能力与入湖水量保持一致。具体位置分布见图 1。

c. 水体交换能力计算边界条件。假定补水中某保守物质相对浓度为 1,加权水龄积为 0;其余开边界保守物质相对浓度和加权水龄积均设为 0。

2.3.2 主要参数

为了反映水边线的变化,采用富裕水深法根据水位变化不断修正水边线。在计算中判断每个单元的水深,当单元水深大于富裕水深时,将单元开放,作为计算水域,反之,将单元关闭,置流速为 0。模型中干湿单元的判别标准为:水深小于 0.005 m 为完全干单元,水深大于 0.01 m 则为完全湿单元。紊动黏滞系数通过 Smagorinsky 方程求解获得。

糙率不仅与河床底部的粗糙程度、河道形态、河道弯曲程度及水位高低有关,还受到河道内植被的生长状况、河槽冲淤、河道内的涉水建筑物等因素的影响。天然情况下,考虑河床组成、床面特征与平面形态、水流形态及岸壁特性等影响因素,对于顺直、无沙滩、无潭的河床,糙率取值一般为 0.025 ~ 0.033;对于无沙滩、无潭、多石多草的河床,糙率取值一般为 0.030 ~ 0.040;对于弯曲、稍许淤滩和潭坑、有草石的河床,糙率取值一般为 0.035 ~ 0.050。考虑到湿地内均为人工规划渠道,形态较为规整,且湖区、湖区净化区、多塘净化区等区域水生植被分布不一,其中,湖区内以浮叶植物和浮动湿地为主,湖区净化区近岸以挺水植物为主,多塘净化区以沉水植物为主,参考天然糙率取值范围,各区域糙率取值分别为 0.025、0.030、0.035,具体分布见图 4。

3 方案对比分析

3.1 计算方案

为满足湿地公园湖区行洪排水要求,湿地公园用水、戏水、水上游乐功能性要求以及区域水生态系统持续发展的要求,设计不同的工程分布方案及措施:方案 1 主要是为了在现状方案的基础上,尽可能充分利用多塘净化 3 区对湖区水体的净化作用,该方案中,在湖区净化 1 区与多塘净化 3 区之间布设连通管,生态补水量达 7 万 t/d,外排能力与生态补水量保持一致;方案 2 主要是为了尽可能利用中部

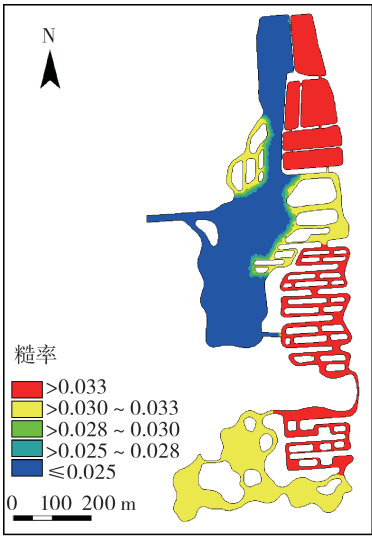


图 4 糙率分布

Fig. 4 Roughness distribution

湖区的水体调蓄能力,加强湖区的水体交换,该方案中,在多塘净化 2 区与中部湖区之间增设连通管;方案 3 则是把方案 1 和 2 统筹考虑,保持湖区水位不变。对比分析 3 种方案下湖区的水动力状况,以期优化湖区的水动力条件,提升整个湖区的水体交换能力。连通管具体位置分布见图 1。

3.2 不同方案结果对比分析

表 1 和表 2 分别给出了 4 种方案下湖区流速分布和水体交换时间的对比结果。整体上各方案湖区流速都相对较小,基本都小于 0.05 m/s;从空间分布上来看,流速大于 0.01 m/s 的水域主要集中在出(入)湖口处、南部、中部和北部 3 个多塘净化区以及湖区净化 1 区,流速大于 0.05 m/s 的区域主要集

表 1 各方案流速分布对比结果

Table 1 Comparison results of velocity distribution of each scheme

流速/(m·s ⁻¹)	面积占比/%			
	现状	方案 1	方案 2	方案 3
≤0.005	62.68	63.57	62.62	63.40
(0.005, 0.01]	13.69	13.03	19.53	19.31
(0.01, 0.05]	19.20	19.00	16.38	15.84
>0.05	4.42	4.41	1.46	1.45

表 2 各方案水体交换时间对比结果

Table 2 Comparison results of water exchange time of each scheme

水体交换时间/d	面积占比/%			
	现状	方案 1	方案 2	方案 3
≤1	12.15	12.05	11.98	11.87
(1, 3]	34.07	33.99	31.18	31.20
(3, 7]	32.91	33.06	49.08	51.47
(7, 14]	7.74	7.81	7.38	5.08
>14	13.13	13.09	0.38	0.38

中于上述几个区域的河道连接处。流速空间分布与水深以及水域范围呈一定的相关性,其中,湖区的流速总体偏小,而各多塘净化区水深较浅处河道流速明显大于水深较深处河道流速,总体上流速分布基本合理。

方案1较现状方案主要在原有连通基础上加强了湖区净化1区与多塘净化3区之间的连通性,其流速分布(图5(b))和水体交换时间(图6(b))与现状方案(图5(a)和6(a))相比,仅在多塘净化3区局部区域有所改变,其余变化不大。

方案2则加强了多塘净化2区与中部湖区之间的连通性,使湖区流速分布更加均匀(图5(c)),流速 $>0.01\sim0.05\text{ m/s}$ 的水域面积在总水域面积中的占比与现状方案和方案1相比,从约19%降低至约

16%;流速 $>0.005\sim0.01\text{ m/s}$ 的水域面积占比与现状方案和方案1相比,从约13%上升至约19%。方案2水体交换时间 $>3\sim7\text{ d}$ 的水域面积占比与现状方案和方案1相比,从约33%上升至约49%;水体交换时间为14 d以上的水域面积占比与现状方案和方案1相比,从约13%降低至约0.38%(图6(c))。方案2改善的主要区域为中部滞水区,但由于受引水总量一定的影响,部分引水量进入了中部湖区,多塘净化3区水体交换时间则较之前略有延长。

方案3(图5(d))结合了方案1和方案2的设计,整体改善效果与方案2类似,同样明显改善了现状方案和方案1中部湖区滞水区的水动力条件,同时由于方案3加强了湖区净化1区与多塘净化3区之间的连通性,进一步提升了多塘净化3区水体交

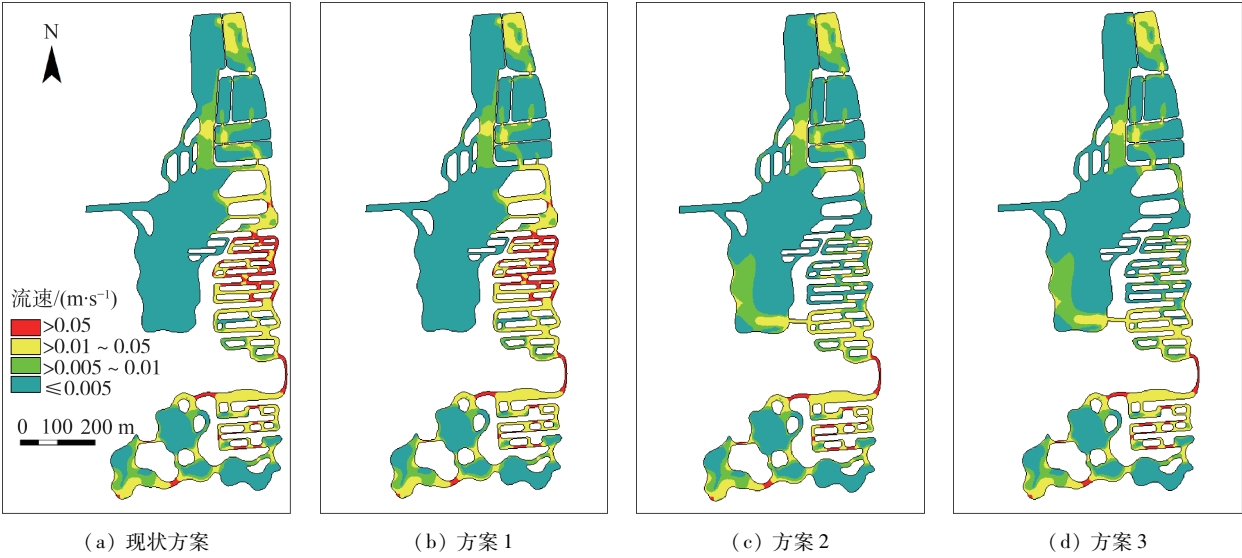


图5 不同方案下流速分布
Fig.5 Velocity distributions of different schemes

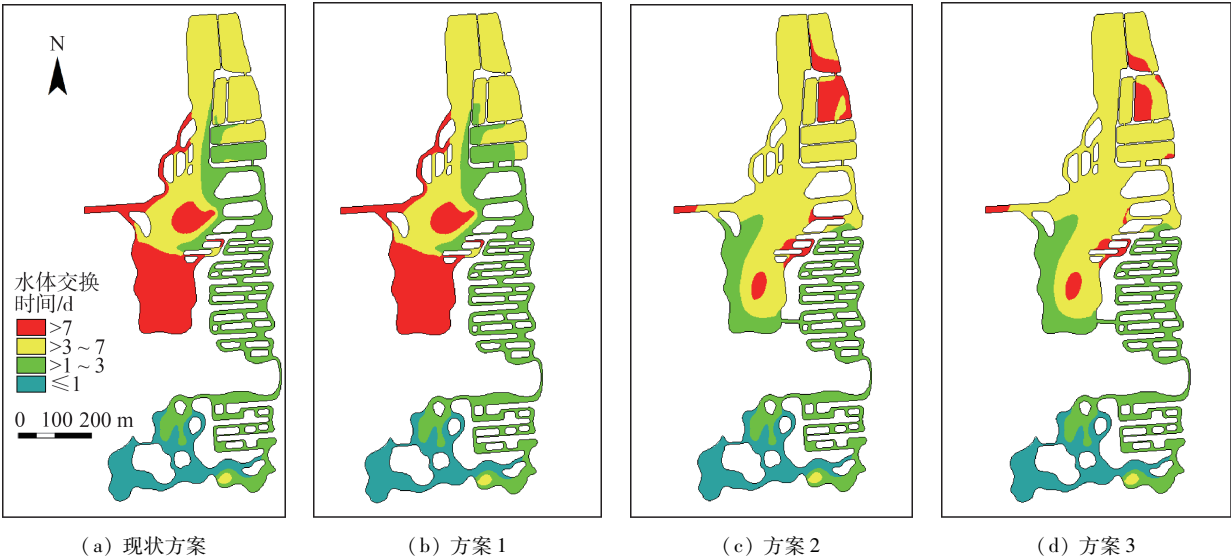


图6 不同方案下水体交换时间
Fig.6 Water exchange time of different schemes

换能力(图6(d))。总体上,方案3和方案2水体交换时间在7d以内的水域面积占比在92%以上,基本上1周内可以将整个湖区水体置换1次。

4 结 语

本文通过二维水动力模型并引入水龄计算模块,模拟计算了不同方案下湿地公园内部湖区水动力状况及水体交换特性,综合对比现状和3个不同方案的计算结果表明,方案2和方案3的水动力状况相当,仅在中部湖区和多塘净化3区中部局部水域存在滞水区,明显优于现状方案和方案1;方案3较方案2在一定程度上提升了多塘净化3区水体交换能力,但仍存在局部滞水区。为进一步改善这些区域的水动力状况,建议在水体相对滞缓的水域布设推流曝气设备,加强其水体流动和水体交换能力。因此,针对城市湿地公园这类小尺度水域范围,通过数学模型计算,能够从精细化尺度层面上更为直观地掌握其湖区的水动力状况及水体交换特性,最终结合其他因素确定具体的调度方案,为其湖区水系连通及生态补水提供决策支撑。

参考文献:

[1] 严思睿,刘强,孙涛,等. 湿地生态水文过程及其模拟研究进展[J]. 湿地科学, 2021, 19(1): 98-105. (YAN Sirui, LIU Qiang, SUN Tao, et al. Research progress in wetland ecohydrological processes and their simulation [J]. Wetland Science, 2021, 19(1): 98-105. (in Chinese))

[2] 王璨,钱新,高海龙,等. 太湖地区贡湖生态修复区生态系统服务价值评估[J]. 湿地科学, 2017, 15(2): 263-268. (WANG Can, QIAN Xin, GAO Hailong, et al. Assessment of ecosystem services value of Gonghu ecological restoration area in Taihu Lake area [J]. Wetland Science, 2017, 15(2): 263-268. (in Chinese))

[3] 王沛芳,娄明月,钱进,等. 农田退水净污湿地对污染物的净化效果及机理分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 1-10. (WANG Peifang, LOU Mingyue, QIAN Jin, et al. Analysis of purification effect and mechanism of pollutant by the farmland drainage wetland [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 1-10. (in Chinese))

[4] 戴天杰,魏攀龙,潘杨,等. 苏州市景观水体表观污染类型识别及特征指标筛选[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 141-147. (DAI Tianjie, WEI Panlong, PAN Yang, et al. Identification of apparent pollution types and screening of characteristic indexes of landscape water body in Suzhou City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 141-147. (in Chinese))

[5] 魏思琴. 基于生态修复的城市湿地公园景观设计研究:

以安徽潜山雪湖城市湿地公园设计为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.

[6] 张树军,赵峰,罗陶露,等. 生态补水综合效益评价指标体系建立[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(5): 813-819. (ZHAN Shujun, ZHAO Feng, LUO Taolu, et al. Establishment of comprehensive benefit assessment indicator system on artificial recharge for ecological restoration [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(5): 813-819. (in Chinese))

[7] 邢梦雅,陈星,周镔,等. 基于生态补水的水环境改善效果评价体系[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 64-66. (XING Mengya, CHEN Xing, ZHOU E, et al. Study on evaluation system of improvement of water environment based on ecological water supplement [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 64-66. (in Chinese))

[8] 薛联青,廖淑敏,刘远洪,等. 基于地下水动态模拟的生态输水累积效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 322-328. (XUE Lianqing, LIAO Shumin, LIU Yuanhong, et al. Cumulative effects of ecological water conveyance based on groundwater dynamic simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 322-328. (in Chinese))

[9] 张翔,廖辰旻,韦芳良,等. 城市水系统关联模型研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 14-19. (ZHANG Xiang, LIAO Chenyang, WEI Fangliang, et al. Research on the nexus model of urban water system [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 14-19. (in Chinese))

[10] 张丽,朱晓东,陈洁,等. 城市湿地公园的生态补水模式及其净化效果与生态效益[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2699-2705. (ZHANG Li, ZHU Xiaodong, CHEN Jie, et al. A new type water supplement mode of urban wetland park and its effects in purification and ecology [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12): 2699-2705. (in Chinese))

[11] 朱琪,易维良,张华. 城市湿地公园水系保护与利用的规划方法探讨: 以永州市东部新城湿地公园为例[C]//持续发展 理性规划: 2017 中国城市规划年会论文集(08 城市生态规划). 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 462-467.

[12] 逢敏,宋为威,钱程. 引调水改善玄武湖水质的水量优化方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 133-139. (PANG Min, SONG Weiwei, QIAN Cheng. Water quantity optimization method for improving water quality of Xuanwu Lake by water diversion [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 133-139. (in Chinese))

[13] YANG Yanqing, ZHANG Jianyun, YAN Wenming, et al. Impact assessment of water diversion project on urban aquatic ecological environment [J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107496.

(下转第174页)

- PP-RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(6):479-485. (in Chinese))
- [20] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2):8-14. (in Chinese))
- [21] 武连洲,白涛,哈燕萍,等. 水文序列变异对水库调度运行的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):88-92. (WU Lianzhou, BAI Tao, HA Yanping, et al. Effect of hydrological sequence variation on operation reservoir [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(4):88-92. (in Chinese))
- [22] 袁满,王文圣,叶瀚麟. 有序聚类分析法的改进及其在水文序列突变点识别中的应用[J]. 水文,2017,37(5):8-11. (YUAN Man, WANG Wensheng, YE Binlin. Improvement of sequential clustering method and its application to diagnose jump points of hydrological[J]. Journal of China Hydrology, 2017,37(5):8-11. (in Chinese))
- [23] 姜瑶,徐宗学,王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. 水利学报,2020,51(7):845-857. (JIANG Yao, XU Zongxue, WANG Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (7):845-857. (in Chinese))
- [24] 王赛男,李建鸿,蒲俊兵,等. 气候和人类活动对典型岩溶地下河系统径流年际变化的影响[J]. 自然资源学报,2019,34(4):759-770. (WANG Sainan, LI Jianhong, PU Junbing, et al. Impacts of climate change and human activities on the interannual flow changes in a typical karst subterranean river, South China [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4):759-770. (in Chinese))
- [25] 杜小洲,白涛,马旭,等. 引汉济渭工程调水区水库群调水模式研究[J]. 水利水电技术,2017,48(8):2-7. (DU Xiaozhou, BAI Tao, MA Xu, et al. Study on water transfer mode of reservoir group within water-transferring region for Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8):2-7. (in Chinese))
- [26] 马盼盼,白涛,武连洲,等. 汉江干支流径流丰枯遭遇对跨流域调水的影响[J]. 水利水电技术,2017,48(8):13-17. (MA Panpan, BAI Tao, WU Lianzhou, et al. Influence from wetness-dryness encounter of runoffs from tributaries and main stream of Hanjiang River on interbasin water transfer [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8):13-17. (in Chinese))
- [27] CHANG J, WANG X, LI Y, et al. Hydropower plant operation rules optimization response to climate change [J]. Energy, 2018,160:886-897.
- [28] 杨文杰. 汉江上中游中段鱼类资源现状及保护对策[J]. 水生态学杂志,2002,22(1):40-41. (YANG Wenjie. Current status of fish resources and protection countermeasures in the middle section of the upper Hanjiang River [J]. Journal of Hydroecology, 2002, 22 (1):40-41. (in Chinese))

(收稿日期:2021-07-09 编辑:施业)

(上接第 167 页)

- [14] 陈晓静,李昆朋,李萍,等. 秦淮区北部水系引补水方案模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):6-10. (CHEN Xiaojing, LI kunpeng, LI Ping, et al. Simulation study on water diversion scheme in northern river network of Qinhuai District [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2):6-10. (in Chinese))
- [15] 王文明,宋凤鸣,尹振文,等. 城市湿地景观水体富营养化评价、机理及治理[J]. 环境工程学报,2019,13(12):2898-2906. (WANG Wenming, SONG Fengming, YIN Zhenwen, et al. Evaluation, mechanism and treatment of landscape water eutrophication in city wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13 (12):2898-2906. (in Chinese))
- [16] 吴普特,高学睿,卓拉,等. 过程水文学的方法框架与学科体系探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):1-7. (WU Pute, GAO Xuerui, ZHUO La, et al. Methodological framework and discipline system for process hydrology [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(1):1-7. (in Chinese))
- [17] 张珮纶,王浩,雷晓辉,等. 湿地生态补水研究综述[J]. 人民黄河,2017,39(9):64-69. (ZHANG Peilun, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. A review of ecological water replenishment for wetlands [J]. Yellow River, 2017, 39(9):64-69. (in Chinese))
- [18] 王志鹏. 三江平原挠力河湿地群生态补水研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.
- [19] XU Ye, WANG Yu, LI Sha, et al. Stochastic optimization model for water allocation on a watershed scale considering wetland's ecological water requirement [J]. Ecological Indicators, 2018, 92:330-341.
- [20] ALAFIFI A H, ROSENBERG D E. Systems modeling to improve river, riparian, and wetland habitat quality and area [J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 126:104643.

(收稿日期:2022-03-21 编辑:施业)