

闸泵调度对扬州市主城区 河网水动力水质改善效果的模拟分析

何健¹, 冯胜男¹, 韩幸焯²

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210024)

摘要:以扬州市主城区为研究区构建水动力-水质耦合模型, 设置河网水闸不同的运行方案, 分析不同方案下河道水动力水质改善效果。结果表明: 该模型能够较好模拟扬州市主城区河网的水动力和水质变化, 调整水流路线和泵站引水量可在不同程度上改善主城区河网水动力条件, 但对于河道水质改善效果有限, 部分河道仍需要结合控源截污措施从根本上控制河道氨氮浓度。研究成果可为沿江河网地区水动力水质改善以及河流生态系统健康保护与修复研究提供参考。

关键词:水动力模型; 水质模型; 闸站调度; 扬州市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2022)06-0006-0006

Simulation of the effect of the sluice pumps scheduling on the improvement of hydrodynamic water quality of river network in the main urban area of Yangzhou City

HE Jian¹, FENG Shengnan¹, HAN Xingye²

(1. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The main urban area of Yangzhou City was selected as the study area, a coupled hydrodynamic-water quality model was constructed, and different operation schemes of sluices were set to analyze the improvement effect of river hydrodynamic water quality under different schemes. The results show that the constructed coupled hydrodynamic-water quality model can well simulate the hydrodynamic and water quality changes of study area; adjusting the flow route and the amount of water diverted can improve the hydrodynamic condition of the river network to varying degrees, but improvement effect on river water quality is limited, and the ammonia nitrogen concentration in some river channels should be fundamentally controlled by combining source control and pollution interception measures. The research results can provide reference for the study of hydrodynamic and water quality improvement and health protection and restoration of river ecosystem in the area along the river network.

Key words: hydrodynamic model; water quality model; sluice pumps scheduling; Yangzhou City

收稿日期: 2022-05-07

基金项目: 江苏省水利科技项目(2018001、2018002)

作者简介: 何健(1984—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源相关工作。E-mail: longlivehj@hotmail.com

1 概述

江苏省沿江城市河网受水闸调控和污染排放的影响,河网水动力不足和水质欠佳直接影响生态系统的健康与稳定^[1-3],保障河网生态需水已成为江苏沿江城市生态文明建设面临的巨大挑战,因此,亟需开展闸泵调度对城市河网水动力水质改善效果的研究。然而,目前国内外针对水利工程的生态调度研究多集中在水库的生态调度上,即在水库及其下游生态现状分析的基础上利用水库的调蓄能力,在保证水库原有目标实现的前提下对河道流量进行生态调度^[4]。Wan等^[5]提出了一种具有动态邻域拓扑的改进算法,进行水电站生态运行中河流生态用水需求计算研究,构建了水电站生态用水需求调度模式。于世伟^[6]通过绘制生态运行图,制定运行规则,对满足白洋淀环境需水量的水库生态运行方式进行研究,建立了基于运行图的生态运行模式,在优化模型的基础上,建立了最优生态运行模式。Tian等^[7]根据河口鱼类的生态需求和近年来小浪底水库的实际运作提出了小浪底水库生态调度方案。王学斌等^[8]构建考虑生态的水库多目标优化调度模型,探究水库的生态效益。Steinschneider等^[9]提出了一种大尺度优化调度模型,在大流域水库群多目标调度问题上探讨水库协调管理措施对生态效益的贡献。王海霞^[10]以碧流河水库为研究对象,在构建考虑生态目标的水库引水与供水联合调度模型的基础上,对决策方案进行了优选。水库生态调度研究虽然对城市河网闸泵的生态调度有一定的参考价值,但两者无论是在调度目标还是运行规则方面都有着很大的差别。鉴于扬州市具有其独特的连接邵伯湖、古运河、长江的河网系统,本文选择扬州市为研究区域,运用MIKE11软件建立水动力水质模型,设置不同的主城区河网水闸调度方案,在综合不同方案的水动力、水质改善效果的基础上,确定扬州市主城区河网水动力水质改善效果最佳的闸泵调度方案。

2 研究区概况

扬州市地处江苏省中部,长江北岸,水系主要分布在仪征市、广陵区和邗江区,河道纵横交错,主要河流包括古运河、大运河、仪扬河、沿山河等。扬州主城区内城河均为人工开挖河道,河水主要通过古运河引入大运河河水获得补充,内城河河道狭窄,河床浅,流量小,水体自净能力较差,大多内河

受到严格的水闸控制,内河水系与外水系不连通,客水较少,水流流速缓慢,甚至滞留,局部河段水动力较差,在现状条件下,主城区河流大多处于静止状态。

扬州市有众多水利工程,其中广陵区、邗江区区域内引水主要依靠扬州闸,排水口较多,包括瓜洲闸、太平闸、万福闸等。区内为解决内涝,进行水资源调度,建有众多水闸和泵站,包括仪扬河东闸、平山堂泵站、沿山河西闸等。

3 模型的建立

3.1 模型构建

本文采用MIKE11软件^[11-12]构建水动力-水质模型,水动力模块由Saint-Venant方程组^[13]组成,利用Abbott-Ionescu六点隐式差分格式^[14]离散方程组,水质模块构建采用一维对流扩散方程,并通过时空中心隐式方法离散^[15]。研究区河网概化为33条河道,总河长182.06 km。模型中杨庄河、二道河末端过水断面根据设计底宽和设计边坡采用梯形断面进行概化,其余河道采用实测大断面资料进行处理。

水动力和水质模型的时间步长选取15 s,存储时间步长选取1 d,空间步长选取200 m。目前,扬州主城区河网的水位整体在5 m左右,而主城区西侧沿山河、新城河等水位相对较高。因此设置新城河初始水位5.4 m,沿山河初始水位7.3 m,其余河道初始水位5 m,初始流量设置为0 m³/s。

水动力模块计算过程中各水动力边界与河道的对应关系见表1。污染源的设置参考《扬州市沿江区域重点河湖水质改善提升方案项目报告》,将污染源进行概化,按照实测污染物浓度或处理后的恒定值设置排放量,具体设置见表2。

根据经验,古运河糙率初值设置为0.024,其余河道糙率初值设置为0.030。扩散系数(D)计算式为

$$D = aV^b \quad (1)$$

式中: V 为流速, m/s; a 和 b 为系数,根据经验设置系数 a 和 b 的初值分别为300.0和2.0。

衰减系数初值设置为0.1/d,并采用《地表水环境质量标准》Ⅲ类水质标准作为初始条件,初始氨氮质量浓度取1.0 mg/L。

3.2 模型的率定和验证

3.2.1 水动力模型率定和验证

分别采用2018年和2019年扬州闸下、黄金坝闸下、平山堂闸下和新城河闸下4个代表站的逐日

表1 研究区水动力边界

边界	类型	编号	监测断面名称	河道名称
上边界	实测水位过程	1	扬州闸上	古运河
	恒定流量值	2		龙河
		3		曲江
	恒定水位值	4		七里河
		5		横沟
下边界	实测水位过程	6	泗源沟闸下	仪扬河
		7	瓜洲闸下	古运河
	恒定流量值	8		润扬河
		9		施桥港
	恒定水位值	10		邗江河

表2 研究区水质边界

边界	类型	编号	监测断面名称	河道名称
上边界	实测氨氮浓度	1	扬州闸上	古运河
		2		龙河
		3		曲江
	恒定氨氮浓度	4		七里河
		5		横沟

水位过程,进行水动力模块的率定和验证。率定完成后得到古运河河道糙率为0.023,其余河道糙率为0.028,与正常河道的糙率取值范围相符,率定的各站点月水位均值计算误差在-0.15~0.22 m。水位验证模拟结果见图1,验证期模型计算的月均水位过程与实测过程总体拟合较好,各站点月水位均值计算误差为-0.15~0.29 m,计算误差小于6.76%,结果表明,水动力模型中的参数选取合理,能够较好地模拟水位变化过程。

3.2.2 水质模型率定和验证

选取三湾、党校桥、大虹桥和大东门桥4个水质代表站的监测数据用于率定、验证水质模块,本文采用氨氮作为主要研究对象。采用2018年1—12月的逐月氨氮质量浓度过程进行水质模块的率定,率定后得到的系数a和b取值分别为300.0和2.0,衰减系数为0.11/d。不同站点的验证成果见图2。

计算可得水质模型验证成果相对误差分别为:大虹桥120.43%、大东门桥68.63%、三湾-22.94%、党校桥342.14%。由水质模块的率定和验证成果可知,水质模型计算结果满足精度要求,能够较好地模拟控制断面污染物浓度变化情况。

4 效果分析

4.1 水闸运行方案设置

目前,研究区域内分布有黄金坝闸站、高桥闸、便宜门闸、安墩闸、新城河闸和江阳路节制闸等10座规模不等的闸站。设置方案0为主城区水闸白天的现状运行方案。设置方案1模拟主城区河网“东引南排”水流路线对于河网水动力和水质的改善效果。在现状调度方案的基础上,便宜门闸、高桥闸以及黄金坝水闸全部开启引水,使古运河河水分为3路连续向西流动进入内部河道,一路通过黄金坝流经邗沟并进入瘦西湖、保障河湖区,另一路经漕河高桥闸进入二道河,其余流量通过护城河流经小秦淮河、二道河并最终回到古运河,整体上形成“东引南排”的水流路线。另外,考虑到新城河河道水位偏高等因素,因此关闭与之连接的念泗河闸以及引潮河泵站,减少新城河受污染水体对河网其余河道水质的冲击。

黄金坝闸站和平山堂泵站是主城区河网的关键水利工程,其调度运行方式直接影响着邗沟-保障湖-瘦西湖-沿山河水体流动和污染物迁移。在不改变方案1“东引南排”水流路线的前提下,调整黄金坝闸站和平山堂泵站的引水量,设置方案1至方案5,分析不同引水流量对于主城区河道水动力、水质的影响。各调控方案中闸门的调度方式如下。

方案0:黄金坝闸站 $9\text{ m}^3/\text{s}$,平山堂泵站 $5\text{ m}^3/\text{s}$,引潮河活水泵站 $0.4\text{ m}^3/\text{s}$,便宜门闸关闭,高桥闸关闭,念泗闸全开,钞关闸、安墩闸、新城河闸、江阳路节制闸全开;方案1:黄金坝闸站 $9\text{ m}^3/\text{s}$,平山堂泵站 $5\text{ m}^3/\text{s}$,引潮河活水泵站关闭,便宜门闸全开,高桥闸全开,念泗闸关闭,钞关闸、安墩闸、新城河闸、江阳路节制闸全开;方案2:黄金坝闸站 $4.5\text{ m}^3/\text{s}$,平山堂泵站 $5\text{ m}^3/\text{s}$,引潮河活水泵站关闭,便宜门闸全开,高桥闸全开,念泗闸关闭,钞关闸、安墩闸、新城河闸、江阳路节制闸全开;方案3:黄金坝闸站 $4.5\text{ m}^3/\text{s}$,平山堂泵站 $2.5\text{ m}^3/\text{s}$,引潮河活水泵站关闭,便宜门闸全开,高桥闸全开,念泗闸关闭,钞关闸、安墩闸、新城河闸、江阳路节制闸全开;方案4:黄金坝闸站 $9\text{ m}^3/\text{s}$,平山堂泵站 $7.5\text{ m}^3/\text{s}$,引潮河活水泵站关闭,便宜门闸全开,高桥闸全开,念泗闸关闭,钞关闸、安墩闸、新城河闸、江阳路节制闸全开;方案5:黄金坝闸站 $9\text{ m}^3/\text{s}$,平山堂泵站 $2.5\text{ m}^3/\text{s}$,引潮河活水泵站关闭,便宜门闸全开,高桥闸全开,念泗闸关闭,钞关闸、安墩闸、新城河闸、江阳路节制闸全开。

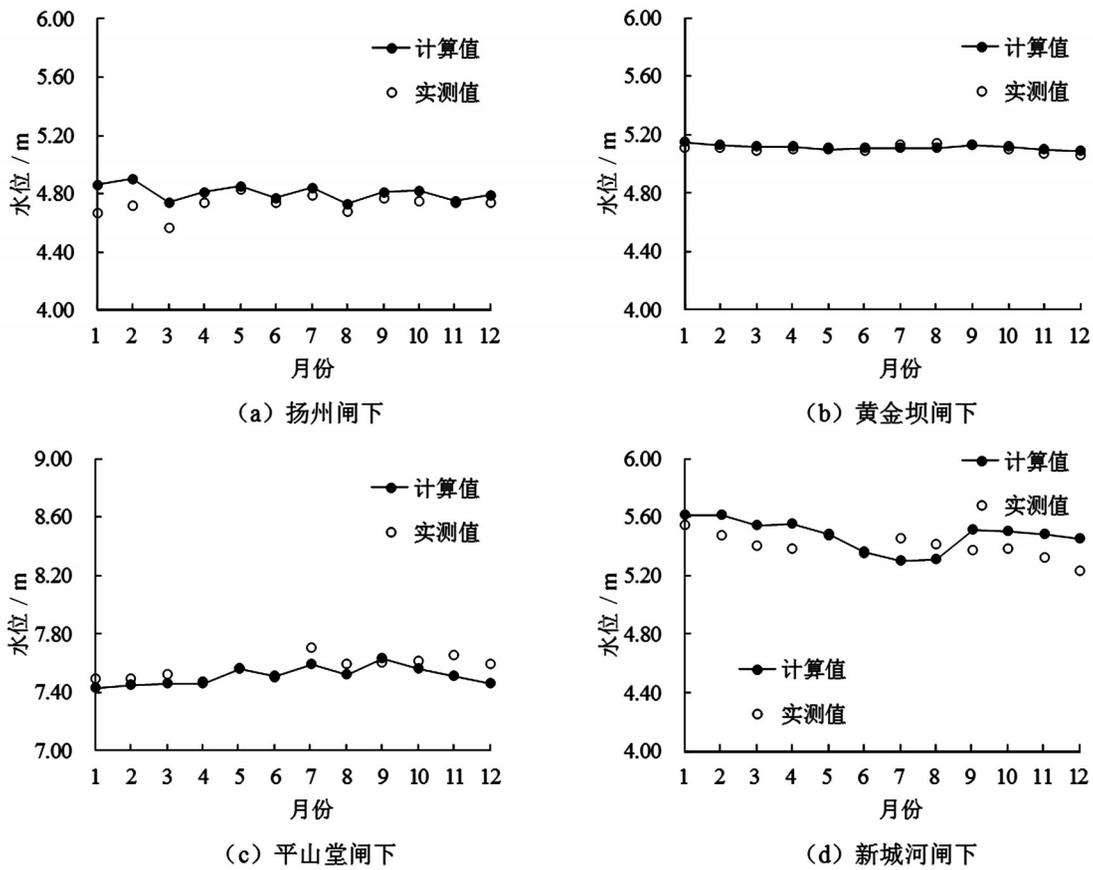


图1 水动力模块断面水位验证

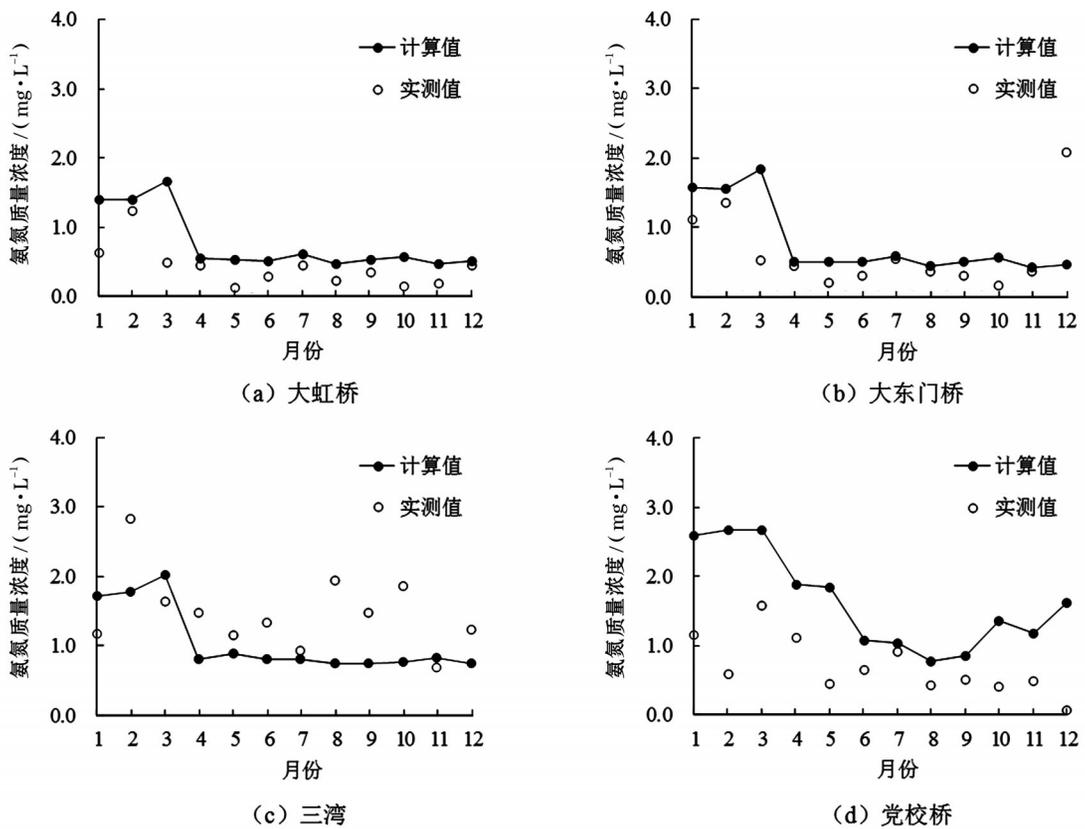


图2 水质模块氨氮浓度验证模拟过程

4.2 河网水动力改善效果分析

扬州市主城区河道整体流速不大,水体流动缓慢,因此对于最优调度方案的选取应当提高河道流速为标准。选取研究区2019年2月为典型月进行河网水动力改善效果分析。现状调度方式下,邗沟受黄金坝闸站引水影响,流速达0.23 m/s,二道河、沿山河、新城河、蒿草河流速超过0.25 m/s。受高桥闸和便宜门闸关闭的影响,漕河、护城河和小秦淮河流速为0,瘦西湖和保障河流速不足0.1 m/s。

引潮河泵站关闭后,杨庄河流速减小至0。方案1,护城河出现倒流,流速为-0.16 m/s,新城河流速增约为0.05 m/s。方案2,黄金坝闸站引水量减小,漕河流速增大0.15 m/s,护城河流速增大0.1 m/s,邗沟、二道河流速分别减小0.10 m/s和0.07 m/s,其余河道流速变化不明显。方案3,沿山河、邗沟流速分别减小0.18 m/s、0.10 m/s,漕河流速增大0.1 m/s,其余河道流速变化不明显。方案4,漕河流速增大0.1m/s,新城河、沿山河流速均增大0.05 m/s,其余河道流速变化不明显。方案5,沿山河和漕河流速分别增大0.18 m/s和0.11 m/s,护城河出现倒流,流速为-0.15 m/s,其余河道流速变化不明显。

综合各方案对主要河道流速的改善效果可见,通过开启高桥闸和便宜门闸可一定程度上改善漕河和护城河水动力条件(方案2、方案3和方案4),改变黄金坝闸站和平山堂泵站的引水量对于瘦西湖和保障河的水动力条件改善不明显,但对于邗沟、沿山河、漕河和护城河流速影响较大。对比各方案下主要河道流速的变化情况,以水动力改善为目标的调控方案应选择方案4。

4.3 河网水质改善效果分析

选取研究区2019年2月为典型月进行河网水质改善效果分析。利用扬州市主城区河网的水动力-水质耦合模型对不同水闸调度方案进行模拟,现状调度方式下,除二道河、新城河、杨庄河、蒿草河部分河段外,其余河道氨氮质量浓度能够达标。

方案1,引潮河泵站关闭后,杨庄河氨氮质量浓度降低0.90 mg/L,其余河道氨氮质量浓度变化不明显。方案2,邗沟氨氮质量浓度升高0.55 mg/L,漕河、护城河和杨庄河氨氮质量浓度分别降低0.46 mg/L、0.54 mg/L和0.93 mg/L,其余河道氨氮质量浓度变化不明显。方案3,邗沟河和新城河氨氮质量浓度分别升高0.55 mg/L和0.63 mg/L,漕河、护城河、杨庄河氨氮质量浓度分别降低0.45 mg/L、0.13 mg/L和0.80 mg/L,其余河道氨氮质量浓度变化不明显。方案

4,杨庄河氨氮质量浓度降低1.02 mg/L,护城河、漕河、新城河、沿山河氨氮质量浓度有小幅度降低,其余河道氨氮质量浓度变化不明显。方案5,杨庄河、护城河氨氮质量浓度分别降低0.99 mg/L和0.15 mg/L,新城河氨氮质量浓度升高0.45 mg/L。

综合各方案对主要河道氨氮质量浓度的改善效果可见,改变水流方式可使杨庄河、漕河、护城河氨氮质量浓度有不同程度的降低,减小黄金坝闸站和平山堂泵站会使得邗沟、新城河等河道氨氮质量浓度升高。对比不同方案主要河道氨氮质量浓度的改善效果,最终确定方案4为最优方案。

5 结 语

本文构建了扬州市主城区水动力-水质耦合模型,并基于2018年和2019年实测月均水位资料和水质资料对所建模型进行率定和验证。选取研究区2019年2月为典型月,使用构建的水动力-水质耦合模型模拟分析不同调控方案对研究区河网的水动力和水质改善效果,为扬州市主城区河网水动力水质改善提供科学依据。

(1)构建的水动力-水质耦合模型的模拟结果合理可靠,模拟效果较好,能够用于扬州市主城区河网的水动力和水质模拟。

(2)通过调整水流路线和泵站引水量可使主城区河网水动力有不同程度的改善,但对于河道水质改善效果有限,部分河道仍需要结合控源截污措施从根本上控制河道氨氮质量浓度。

(3)当扬州闸引水83 m³/s,黄金坝闸站引水9 m³/s,平山堂泵站引水7.5 m³/s,关闭念泗闸和引潮河活水泵站,其余闸门保持开启,此时总体水动力水质改善效果最佳。

参考文献:

- [1] 高丽莎,高程程,汪涛. 基于精细化河网水动力模型的长宁区除涝能力评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 62-67.
- [2] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 329-334.
- [3] 朱晓琳,李一平,许益新,等. 时间尺度对平原感潮河网水动力水质模拟精度的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 67-75.
- [4] 高志强. 耦合水文过程及鱼类需求的丰满水库生态调度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
- [5] WANLIANG W, LI L, XINLI X, et al. Research on hydro-

- power station optimal scheduling considering ecological water demand[C]. 2013.
- [6] 于世伟. 考虑白洋淀生态需水的水库生态调度研究[D]. 北京:北京师范大学,2010.
- [7] TIAN S, YI Z, WANG Y, et al. Study on Ecological Scheduling of the Xiaolangdi Reservoir Based on the Ecological Needs of Estuarine Fishes[J]. MATEC Web of Conferences, 2018(246):1-5.
- [8] 王学斌, 畅建霞, 孟雪姣, 等. 基于改进NSGA-II的黄河下游水库多目标调度研究[J]. 水利学报, 2017, 48(2): 135-145.
- [9] STEINSCHNEIDER S, BERNSTEIN A, PALMER R, et al. Reservoir management optimization for basin-wide ecological restoration in the Connecticut River[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 40(9): 1-10.
- [10] 王海霞. 考虑生态目标的水库引水与供水联合调度研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [11] DHI D. Mike-11: a modelling system for rivers and channels, reference manual[J]. DHI-Water and Development, Horsholm, Denmark, 2003.
- [12] 徐海波, 苏飞, 王士武. 余姚市河网平枯水期水质模拟研究[J]. 浙江水利科技, 2008(1):27-34.
- [13] 白玉川, 万艳春, 黄本胜, 等. 河网非恒定流数值模拟的研究进展[J]. 水利学报, 2000(12):43-47.
- [14] ABBOTT M B, MINNS A W. Computational hydraulics [M]. Routledge, 2017.
- [15] 郭天恩, 孙西欢. 国内外水质数学模型的研究与发展[J]. 西北水资源与水工程, 1994(3):9-12.

(上接第5页)

连接螺栓。每层护岸构件安装完毕后及时回填框体内填料,在最高水位线以下,框体内回填块石或卵石,块石或卵石的尺寸不应小于框体表面开孔处的最小尺寸,防止水流冲刷流失。在水位线以上,镂空的框体内按设计垫好土工布后再回填种植土。墙背反滤层回填及土工布铺贴应和框体回填同步进行,滤料的规格和质量应满足设计要求。

装配式生态护岸制品上播种植物时,可选用撒播、喷播、栽种等方式,在草根穿透砌块扎入坡体土壤后,视草种特点及气候条件确定是否养护。

6 结语

本文从水生态功能和资源可再生等方面,简要介绍了装配式生态护岸相比于传统护岸所具有的优势,给出了墙式和坡式两种装配式生态护岸形式的特点以及适用范围,并总结了基本生态构件即生态框的不同类型,最后从设计理念和施工工法上对装配式生态护岸和传统护岸的差异性进行了说明。

近年来,由于装配式生态护岸施工速度快、造价合理、生态环保、质量可靠等优点,在工程中的运用越来越广泛。相比传统护岸其空箱式的结构既节约了材料,又实现了生态和景观功能,还符合工厂化、装配化的发展趋势,其推广前景广阔。

参考文献:

- [1] 朱红亮, 沈旭鸿. 工业化装配式技术在河内河航重力式护岸中的应用[J]. 中国水运月刊, 2016, 16(4):252-253.
- [2] 刘轶杰. 护岸工程装配式设计与传统设计的成本比较分析[J]. 建筑经济, 2021, 42(2):90-93.
- [3] 高婷, 尹健, 桑正辉, 等. 绿色生态混凝土研究进展[J]. 商丘师范学院学报, 2017, 33(3):46-50.
- [4] 张东艳, 宗永臣. 高原城镇河道演变与生态护岸措施[J]. 水资源保护, 2021, 37(6):157-161.
- [5] 史云霞. 长江三角洲地区内河航道护岸结构选型研究[D]. 南京:东南大学,2008.
- [6] GB 50286—2013 堤防工程设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2013.