

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.027

高度城镇化地区河网水系生态调控方案

王 鹏^{1,2}, 华祖林^{1,2}, 褚克坚^{1,2}, 董越洋¹

(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. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:为探究长三角高度城镇化地区河网水系生态调控方案,以秦淮河流域下游地区水系为例,采用生态功能设定法,计算了各河段生态水位和生态流量。通过构建一维水量水质模型,在枯水年非汛期水量调控及截污措施协同驱动下,对水位、流量及污染物浓度的时空分布特征进行多情景数值模拟,并对生态水量保障率及水质改善效果进行评估。结果表明,水位调控措施对水质改善作用非常有限,无法保障河道生态基流需求;引水措施的调控效果较为明显,但水质改善率增幅随引水流量增加而下降;截污措施的水质改善效果优于水量调控方案,但存在显著的空间异质性,且无法提高生态基流保障率;将截污措施与引水措施结合,是满足城市水系生态水量及水质要求的最佳选择。

关键词:高度城镇化;生态需水量;生态水位;多目标调控;水量水质模型;秦淮河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0205-08

Ecological regulation scheme of river network and water system in highly urbanized areas//WANG Peng^{1,2}, HUA Zulin^{1,2}, CHU Kejian^{1,2}, DONG Yueyang¹ (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the ecological regulation scheme of river network and water system in highly urbanized areas of the Yangtze River Delta, taking the water system in the lower reaches of Qinhuai River Basin as an example, the ecological water level and ecological flow of each reach were calculated by using the ecological function setting method. By constructing a one-dimensional water quantity and quality model, driven by the coordinated control of water quantity and pollution interception measures in non-flood season of dry years, the temporal and spatial distribution characteristics of water level, flow and pollutant concentration were simulated, and the ecological water quantity guarantee rate and water quality improvement effect were evaluated. The results show that the water level regulation measures have very limited effect on water quality improvement, and cannot guarantee the demand of river ecological base flow. The regulation effect of diversion measures is obvious, but the increase of water quality improvement rate decreases with the increase of diversion flow. The water quality improvement effect of pollution interception measures is better than that of water regulation scheme, but there is significant spatial heterogeneity and cannot improve the guarantee rate of ecological base flow. Combining pollution interception measures with water diversion measures is the best choice to meet the requirements of ecological water quantity and water quality of urban water system.

Key words: high urbanization; ecological water demand; ecological water level; multi-objective regulation; water quantity and quality model; Qinhuai River Basin

河流作为水生生态系统的重要组成部分,其流量和水位应能满足和维持河流基本结构形态、栖息

地、鱼类通道、水生生物生长、景观娱乐与河道外取水、水热、水沙与水盐平衡等多方面的基本需求。

基金项目:国家自然科学基金联合基金(U2040209);国家自然科学基金重点项目(51739002);中央高校基本科研业务费专项(B210204001);江苏省高校优秀科技创新团队(水环境模拟与生态修复)

作者简介:王鹏(1979—),男,副教授,博士,主要从事污染物迁移归趋与水环境模拟研究。E-mail: hhwp@hhu.edu.cn

通信作者:华祖林(1965—),男,教授,博士,主要从事水环境模拟与生态修复研究。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

美国渔业保护协会在研究鱼类产量与河流流量定量关系研究中,最早提出了河流最小环境流量的概念。随后学者们从生态系统的不同角度,探讨和细化了生态流量的内涵,提出了各种相关概念,如 low flow、reserved water、environment water、environment flow、instream flow 等。目前生态水量计算方法大致可分为水文学法、水力学法、生境模拟法^[1]和生态功能设定法^[2]4类。水文学法是依据水文指标对长序列历史流量数据进行设定,通常取平均流量的百分比推求河流生态需水量,主要包括 Tennant 法^[3]、7Q₁₀法^[4]、NGPRP 法^[5]以及变异范围法^[6]等;水力学法是基于水力学原理,应用河流几个断面的水力参数实测数据(水深、宽度、流速、湿周等)分析流量与生物生境指示因子的关系,从而确定生态环境需水量,主要包括湿周法^[7]、R2CROSS 法^[8]和生态水力半径法^[9]等;生境模拟法将河流流量的变化与特定物种栖息地选择趋向相结合,逐一确定某流量系列下各情景可利用的栖息地面积,绘制栖息地面积与河流流量的关系曲线,根据最大栖息地面积确定适宜的河流流量,主要包括河流内流量增量法^[10]等;生态功能设定法将河流生态需水划分为几个部分,分别计算各部分生态需水,然后按照一定的原则进行整合^[2]。

长三角地区作为我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一,城镇化水平发展迅猛,城市河流占比快速提高。与天然河流相比,城市河流水文过程及污染物迁移路径受到人类活动的强烈干扰,需要从其特点与实际出发,确定河流生态需水目标,进而计算生态需水量。首先,城市河流集合了大量人工要素,呈现出非天然的空间面貌,如垂直化岸际、直线化水道、桥梁等。并且为了强化防洪、景观等功能,通常建有闸门、泵站,受水利工程调控影响,水力交换互通能力显著退化。因此,维持城市河道连通性、流动性及其廊道通道功能,是其最基本的河流完整性需求。其次,城市河流基本没有珍稀、濒危水生生物种群分布,浮游生物、水生植物与鱼类等游泳动物均为常见广谱品种,底栖生物通常以中度耐污到高度耐污能力种群为主,生物多样性相对较差。鱼类和岸滩大型水生植物栖息地维护是城市河流水生生境功能的集中体现。再次,在维持水生生物生境、物质和能量通道、自净和屏障等生态功能的基础上,需要综合考虑城市河流的景观、休闲娱乐、文化等生态功能。这类功能始于人们对河流的景观美学感受,尤为注重视觉感知和嗅觉体验,这要求城市河流保持一定的水面面积、水深和水质条件。最后,城市河流沿岸人类活动呈现密集化和

多样化特征,社会服务功能已成为当前城市河流功能的主体属性,除了防洪、航运与景观娱乐等功能外,城市河流还承担向沿岸水系补水、提升区域水体流动性的任务。然而,城市化引发的水文过程改变及水资源高度开发利用,可能导致非汛期城市河道水位和流量无法满足生态水量需求,如何在防洪、供水调度实践的基础上,优化非汛期水利工程调控模式,构建城市河网水系综合调度体系,成为保障城市河流生态需水量,提高水体自净能力,改善河道生态环境质量的重要举措。目前,围绕引水调控改善水体水质和生态环境状况,开展了大量的工程实践^[11-13]及数值模拟^[14-16]研究。现场监测及模型预测结果均表明,通过科学调度水利工程,实现水体联动循环及有序流动,可有效改善区域水环境质量,提高河湖生态水量保障程度,发挥显著的经济效益与环境效益^[17-18]。然而,现有研究多关注水利工程调控的水质改善效果,缺少对生态水位及生态流量保障程度的分析和探讨;同时,大多数预测情景方案仅针对水量调控措施或截污措施,没有考虑两者共同作用对生态水量保障及水质改善的协同驱动效应。

本研究以长三角高度城镇化地区——南京市秦淮河流域下游地区水系为例,采用生态功能设定法^[2],从河流连通性、水生生物生境、景观娱乐、供水、水质功能等方面综合考虑,分别计算各部分生态需水量,汇总得到各河段生态基流和生态水位。在此基础上,通过构建秦淮河流域水系水量水质数学模型,对水利工程及截污措施的调控效果进行多情景模拟,评估水生态及水环境调控目标的满足程度,遴选生态水量保障率和水质改善效果最佳的调控方案,提出适用于城市河道非汛期水文特征的生态及环境调控模式。

1 计算方法

1.1 城市河网水系生态需水量

将城市河流生态需水划分为河流连通性需水、水生生物生境需水、景观娱乐需水、河道供水、环境需水等,分别采用表1所列方法计算各部分生态需水量,最后汇总得到生态流量和生态水位^[19]。

1.2 水量水质数学模型

1.2.1 模型简介

利用基于双对象共享结构的数字流域系统平台构建秦淮河水系水量水质数学模型,该系统平台将模型对象与GIS对象无缝融合,提出了“地理对象-模型要素-方案管理”三层数据架构,能够简化建模流程,提升模型计算和系统运行效率^[20]。目前,该

表 1 城市河道生态需水量计算方法

Table 1 Calculation method of urban river ecological water demand

生态需水量指标	河流生态功能	计算方法	说明
生态流量	河流连通性需水	变异范围法	统计多年月均流量,计算流量变异范围法阈值的上下限,估算逐月河流生态流量
	水生生物生境需水	类比法	取维持河流连通性流速、鱼类适宜流速、藻类抑制流速的最大值
	河流供水需水	综合法	取蒸发量、下渗量、河道外社会经济用水三者之和
	环境需水	断面水质达标法	采用一维稳态水质模型计算环境需水基流量
	综合	生态功能设定法	取河道连通性需水、水生生物生境需水与环境需水的最大值,然后叠加河流供水需水量
生态水位	河道完整性	形态分析法	建立河道断面水位与水面宽度的关系,识别水面宽度出现急速退化的水位
	水生生境	生物适宜水深法	岸滩水生植物与鱼类栖息地适宜水深的最大值
	景观	露滩率控制法	根据断面露滩率阈值,推算相应水位
	综合	生态功能设定法	维持河道完整性、水生生物生境和景观的生态水位最大值

平台已成功应用于太湖流域、淮河流域、里下河地区等多个复杂河网水系的水文过程演变、实时洪水预报、水环境治理方案优化、突发水污染预警等研究领域。

系统模型库由流域水文模型、污染负荷模型、水动力模型和水质模型组成,可用于模拟河网水流运动及污染物输移时空变化特征^[20]。水文模型分为山丘区水文模型和平原区水文模型,其中山丘区产汇流模拟采用三层蒸发的三水源新安江模型,平原区水文模型将研究区下垫面分为水面、水田、旱地和城镇 4 种土地利用类型,水田产流量按田间水量平衡原理确定,旱地产流计算采用三水源新安江模型,城镇建设用地进一步分为透水层、具有填注的不透水层和不具有填注的不透水层 3 类。污染负荷模型由产生模块和处理模块构成,其中产生模块估算各种污染源的产生量,包括 4 种计算模式,分别是 PROD、UNPS、DNPS 和 PNPS,处理模块计算污染源经过各种污染治理措施处理后,进入水体的污染负荷。基于圣维南方程组构建河网水动力模型,采用四点线性隐式差分格式进行数值离散,三级联解法求解。一维河网水质模型采用基于非充分掺混假定的有限体积法求解。

1.2.2 研究区概况

秦淮河是长江下游右岸支流。古称龙藏浦,汉代起称淮水,唐以后改称秦淮。秦淮河有南北两源,南源溧水河发源于南京市溧水区东庐山,北源句容河发源于句容市宝华山南麓,两河在南京市江宁区方山埭西北村汇合成秦淮河干流,绕过方山向西北至外郭城城门、上坊门从东水关流入南京城,由东向西横贯南京主城,南部从西水关流出,注入长江。秦淮河流域涉及南京、镇江两市及所辖溧水、句容两县(区),流域总面积 2 684 km²,其中南京境内 1 761 km²(占 66%),镇江句容境内 923 km²(占

34%)。流域地势东南高、西北低,上游句容河与溧水河发源于丘陵山区,为山丘型河道,下游大部分地区地势较低。

研究区位于秦淮河流域下游地区,包括前埠村水文站下游的秦淮河干流沿线地区,为秦淮河干流、外秦淮河和秦淮新河组成的树状河网水系。根据流域地形高程,确定研究区范围共计 531.2 km²,研究区的水利控制枢纽主要包括位于秦淮新河入江口的秦淮新河枢纽、外秦淮河武定门枢纽和下游入江口三汊河口闸,水系可分为秦淮河干流前埠村至河定桥段、秦淮河干流河定桥至武定门枢纽段、外秦淮河(武定门枢纽至三汊河口闸)、秦淮新河(河定桥至秦淮新河枢纽)4 个河段,为了描述方便,分别命名为 A 段、B 段、C 段、D 段(图 1)。研究区内设有前埠村水文站及东山、三汊河闸、秦淮新河闸 3 座水位站,水质监测站点包括洋桥、天元路桥、铁心桥、七桥瓮、石城桥、节制闸、三汊河口(图 1)。

采用研究区水系矢量图和实测大断面资料,对河流走向及断面尺寸进行概化,概化河道长度 51.42 km,断面 253 个,水利枢纽 3 座,过闸流量根据上下游水位采用水力学方法模拟。根据产汇流特征,将研究区进一步划分为 1 个平原区及 4 个山丘区,其中平原区面积 380.5 km²,山丘区面积 150.7 km²。将沿线主要支流和排涝泵站概化为排污口,结合流域污染源分布情况,共概化污水处理厂排污口 6 个,其他排污口 32 个。

1.2.3 模型率定与验证

选取东电站作为水动力模型率定与验证站点,选取天元路桥、铁心桥、七桥瓮、石城桥作为水质率定与验证站点。以前埠村水文站流量过程及洋桥站水质浓度过程作为上游水量及水质边界条件,以三汊河闸、秦淮新河闸水位过程及节制闸、三汊河口水质浓度过程作为下游水量及水质边界条件,分别采



图1 研究范围及水系分布

Fig.1 Research scope and water system distribution

用2017年5—7月及8—9月的水量水质同步监测资料,对河网水动力模型及水质模型进行率定和验证。采用纳什效率系数 N_{SE} 及百分比误差 P_B 表征水位实测值与模拟值之间的偏差程度。 N_{SE} 的范围为 $(-\infty, 1]$, 1 代表观测和模拟流量的完美匹配, P_B 的最佳值为 0。如果 $N_{SE} > 0.50$, 且 $|P_B| < 25\%$, 一般认为模拟结果是令人满意的。东电站水位率定及验证结果见图 2。

结果表明,2017 年 5—7 月东电站水位预测结果的 N_{SE} 为 0.976, P_B 为 0.363%, 总体率定效果较好,误差主要出现在 6 月 8—9 日强降雨条件下的峰值水位,由于采用日降水量作为输入条件,无法反映降雨强度的逐时变化过程,因此,峰值水位的模拟效果相对较差。8—9 月验证结果的 N_{SE} 和 P_B 分别为 0.982 和 0.209%, 略好于 5—7 月。

表2 水质指标质量浓度率定和验证误差分析

Table 2 Error analysis of calibration and validation results of water quality index quality concentrations

水质监测点	率定结果相对误差/%				验证结果相对误差/%			
	COD	NH ₃ -N	TP	DO	COD	NH ₃ -N	TP	DO
天元路桥	15.73	20.58	6.62	21.82		28.50		29.30
铁心桥	23.87	33.58	4.94	17.32	39.69	23.36	24.46	5.94
七桥瓮	22.61	9.94	19.17	26.87	15.81	16.22	2.39	7.74
石城桥	17.51	42.27	12.47	19.61				
平均	19.93	26.59	10.80	21.40	27.75	22.69	13.42	14.32

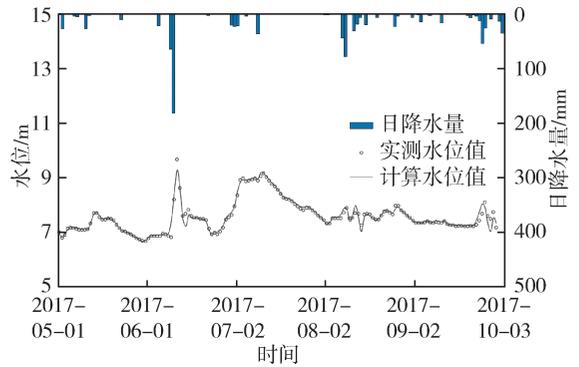


图2 东电站水位率定和验证结果

Fig.2 Calibration and validation results of water levels of Dongshan gauging station

由于水质监测数据的数量较少,采用实测值与预测值的相对误差均值衡量水质模型预测精度。水质指标浓度率定和验证结果见表 2,可见,2017 年 5—7 月 COD、氨氮、TP 和 DO 质量浓度预测值的相对误差均值分别为 19.93%、26.59%、10.80% 和 21.40%,率定效果相对较好的水质指标为 TP、COD 和 DO,其中 TP 和 COD 相对误差均值小于 20%。验证效果较好的水质指标是 TP 和 DO,相对误差均值小于 15%。

1.2.4 调控效果评价指标

a. 生态基流保障率。生态流量保障程度的定义大致分为 2 种:第一种为实际径流量与生态流量的比值;第二种以实际流量大于生态流量的历时占序列总历时的比值。本研究采用第二种方法计算生态基流保障率,公式为

$$I_{eq} = \frac{\sum_{k=1}^N S(q_{sk} - q_{ek})}{N} \times 100\% \quad (1)$$

其中 $S(q_{sk} - q_{ek}) = \begin{cases} 1 & q_{sk} - q_{ek} \geq 0 \\ 0 & q_{sk} - q_{ek} < 0 \end{cases}$

式中: I_{eq} 为生态基流保障率,% ; N 为统计天数; q_{sk} 和 q_{ek} 分别为第 k 天流量预测值和生态流量, m^3/s 。

b. 生态水位保障率。与生态基流保障率类似,生态水位保障率定义为实际水位大于生态水位的历时占序列总历时的比值。公式为

$$Z_{eq} = \frac{\sum_{k=1}^N S(Z_{sk} - Z_{ek})}{N} \times 100\% \quad (2)$$

$$其中 \quad S(Z_{sk} - Z_{ek}) = \begin{cases} 1 & Z_{sk} - Z_{ek} \geq 0 \\ 0 & Z_{sk} - Z_{ek} < 0 \end{cases}$$

式中: Z_{eq} 为生态水位保障率,%; Z_{sk} 和 Z_{ek} 分别为第 k 天水位预测值和生态水位,m。

c. 水质改善率。水体水质改善率计算公式为

$$I_{wq} = \frac{\rho_b - \rho_a}{\rho_b} \times 100\% \quad (3)$$

式中: I_{wq} 为水体水质改善率,%; ρ_a 为工程调度后某水质指标质量浓度,mg/L; ρ_b 为工程调度前某水质指标质量浓度,mg/L。为了衡量区域水质平均改善状况,采用各项水质指标改善程度的平均值表征水质平均改善率。

d. 水质达标率。水质达标率定义为水质指标浓度不超出河流水功能区水质指标标准值的历时与时间序列总长度的比值,计算公式为

$$I_{wqr} = \frac{\sum_{k=1}^N S(\rho_{sk} - \rho_{pk})}{N} \times 100\% \quad (4)$$

$$其中 \quad S(\rho_{sk} - \rho_{pk}) = \begin{cases} 1 & \rho_{sk} - \rho_{pk} \geq 0 \\ 0 & \rho_{sk} - \rho_{pk} < 0 \end{cases}$$

式中: I_{wqr} 为水质达标率,%; ρ_{sk} 和 ρ_{pk} 分别为第 k 天某项水质指标质量浓度的标准值和预测值,mg/L。水质总体达标率取各项水质指标达标率的最小值。

2 结果与分析

2.1 生态水量计算结果

研究区水系各河段生态流量和生态水位^[19]的计算结果见表3和表4。

2.2 调控方案

2.2.1 备选方案集

根据生态水量计算成果,综合考虑不同截污方案、调控水位及引水流量的差异,拟定了21组备选生态调控方案,利用经过率验证的水量水质模型对各方案的调控效果进行预测和评估。通过对研究区水系结构及水流流向分析,秦淮新河引水对A段水质改善及生态水量提升效果非常有限,因此,引水方案考虑秦淮新河泵引及上游引水两种途径,具体生态调控方案及引水流量见表5。

2.2.2 计算条件

统计东山雨量站1952—2017年的年降水量,采用P-III型曲线对其进行频率分析,得到该站降水频率90%的年降水量为758.4mm,与之对应的枯水典型年为1995年(777.9mm)。因此,将典型年非汛

表3 研究区水系各河段生态流量

Table 3 Ecological flows of each reaches of water system in study area

月份	生态流量/(m ³ ·s ⁻¹)			
	A段	B段	C段	D段
1	17.8	26.5	21.8	26.9
2	14.4	25.3	21.9	17.2
3	16.6	25.5	24.5	16.1
4	22.5	25.3	22.5	16.9
5	20.8	25.8	26.5	19.1
6	32.0	25.5	22.6	26.9
7	36.8	41.8	42.4	26.0
8	17.8	39.8	40.4	19.1
9	15.1	26.1	22.3	25.7
10	14.2	25.5	22.4	18.1
11	15.0	25.3	21.9	18.1
12	13.2	25.8	21.3	17.9

表4 研究区水系各河段生态水位

Table 4 Ecological water levels of each reaches of water system in study area

河道生态功能	生态水位/m			
	A段	B段	C段	D段
连通性	3.2	4.3	4.1	3.7
水生生境	5.5	5.1	4.6	5.3
景观娱乐	6.8	6.7	6.3	6.7
综合	6.8	6.7	6.3	6.7

表5 生态调控方案集

Table 5 Ecological control scheme set

方案编号	截污方案	水位调控方案		引水方案	
		东电站水位/m	秦淮新河泵引流量/(m ³ ·s ⁻¹)	上游引水条件	
D01		7.5	0		
D02		7.5	10		
D03		7.5	30		
D04	现状污染源	7.5	50		不从上游引水
D05		7.2	50		
D06		7.0	50		
D07		6.8	50		
D08		6.8	0		
D09	2020年污水	6.8	10		
D10	接管率达到	6.8	20		不从上游引水
D11	95%	6.8	30		
D12		6.8	50		
D13		6.8	0		
D14	2030年污水	6.8	10		
D15	接管率达到	6.8	20		不从上游引水
D16	98%	6.8	30		
D17		6.8	50		
T01		6.8	0		按A段生态基流量从上游引水
T02		6.8	10		
T03	现状污染源	6.8	20		
T04		6.8	30		

期(1—4月及10—12月)的日降水量作为调控方案计算的雨情条件。根据2017年污染源调查结果,结

合用水量及污水排放量分析,计算得到研究区 2017 年污水接管率为 77.8%。按照南京地区治污规划和污水排放标准,设定污水接管率提高至 95% 和 98% 的情景。对于水量边界条件,通过统计 1997—2017 年前埭村月平均流量过程,采用 P-Ⅲ型曲线对非汛期各月的平均流量进行频率分析,将 90% 保证率的月均流量值作为秦淮河干流的边界条件。对于上游引水方案(T01 ~ T04),按 A 段生态基流流量作为秦淮河干流流量边界。根据秦淮新河水利枢纽泵站规模,将多种泵引流量作为秦淮新河流量边界条件,下游边界条件采用三汊河闸控制水位。根据秦淮河干流和秦淮新河的水环境功能区划,分别以 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类和Ⅱ类水质标准作为情景模拟的水质边界条件。

2.3 调控效果评估

将各调控方案的水位预测结果与生态水位计算结果进行对比,统计得到各河段生态水位保障率。受秦淮河水系景观控制水位限制,最低调控水位为 6.8 m,即无论秦淮新河是否引水,均能满足生态水位需求。因此,重点讨论水位调控、引水流量、污水接管率对生态流量及河网水质的影响。各项评估指标均采用流量及水质指标质量浓度预测结果的日均值统计得到。

2.3.1 水位调控方案

图 3(a)为 D04 ~ D07 方案的生态基流保障率,可见,无论怎样改变东电站控制水位,均无法使 A 段流量满足生态基流需要。此时,秦淮新河泵引流量为 $50 \text{ m}^3/\text{s}$,B 段、C 段、D 段均能满足其生态基流阈值。取 COD、氨氮、总磷、溶解氧 4 项水质指标改善率的平均值,以 D01 方案作为参比方案,计算在秦淮新河泵引流量为 $50 \text{ m}^3/\text{s}$,东电站的不同控制水位条件下,D04 ~ D07 方案各河段的平均水质改善率,见图 3(b)。

由图 3 可见,各河段水质改善率均随调控水位的降低略有上升,但是上升幅度较小,说明通过改变控制水位,可以略微提高河道水质改善率。这主要是因为降低控制水位,可以适当增加武定门枢纽的开闸时间,提高河网水体流动性,提升河道稀释扩散能力及水体自净能力。但是在不改变调水流量的前提下,水位调控措施对水质的改善效果非常有限。

2.3.2 引水调控方案

图 4 为现状污染源条件下,不同引水方案的生态基流保障率和水质改善率。由图 4(a)可见,对于 B 段、C 段、D 段,生态基流保障率均随秦淮新河及上游引水量的增加而增大。当泵引流量增加到 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,C 段的生态基流保障率已接近 100%,泵

引流量进一步增加到 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,B 段和 D 段生态基流保障率接近 100%。此外,所有秦淮新河泵引方案均无法满足 A 段生态基流,必须配合上游引水方案(T01 ~ T04)。

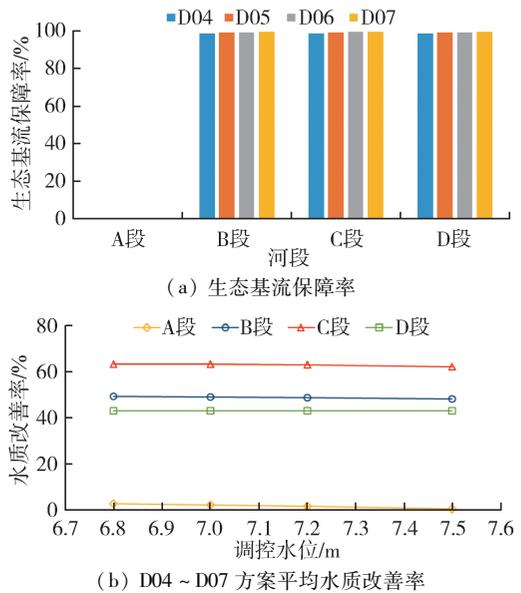


图 3 不同水位调控方案的生态基流保障率和水质改善率
Fig. 3 Ecological flow guarantee rates and water quality improvement rates of different water level control schemes

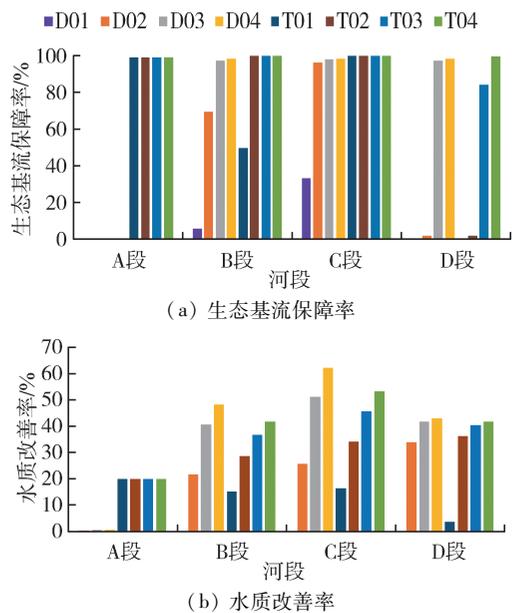


图 4 不同引水调控方案的生态基流保障率和水质改善率
Fig. 4 Ecological flow guarantee rates and water quality improvement rates of different water transfer schemes

由图 4(b)可见,在现状污染源条件下,与 D01 方案相比,各河段水质随引水流量增加均有不同程度的改善,平均水质改善率介于 0.3% ~ 62.2%。其中 C 段改善最为明显,平均水质改善率为 16.29% ~ 62.2%,说明调水引流措施对水质改善具有明显效果,但水质改善率增幅随泵引流量加大呈下降趋势。此外,秦淮新河调水措施对 A 段水质几

乎没有改善效果,必须配合上游引水或截污措施,才能使 A 段水质得到改善。

2.3.3 截污方案

截污方案无法提高生态基流保障率,因此仅分析对水质改善率和水质达标率的影响。以 D01 方案作为对照方案,计算不同截污条件下,D03、D11、D16 方案的平均水质改善率及水质达标率,见图 5。此时,秦淮新河泵引流量为 $30 \text{ m}^3/\text{s}$,除 A 段外,其他河段流量可以满足生态基流需求。

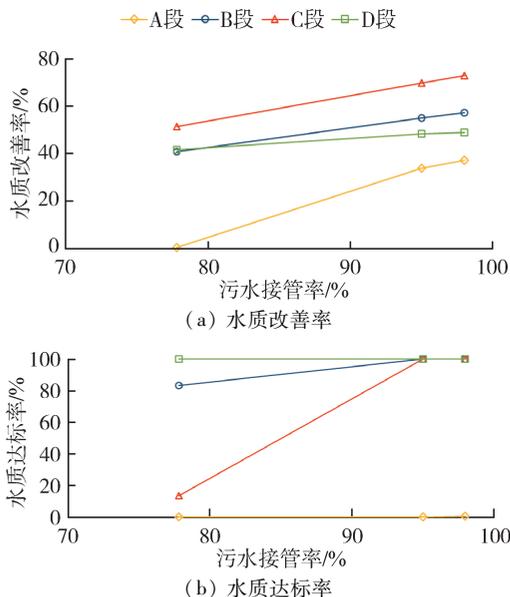


图 5 不同截污方案的水质改善率和水质达标率

Fig.5 Water quality improvement rates and compliance rates of different pollution control schemes

由图 5(a)可见,各河段水质随污水接管率的增加均有不同程度的改善,平均水质改善率介于 $0.4\% \sim 72.9\%$ 。其中,A 段平均水质改善率最低,但是水质改善率增幅最为显著,明显优于水位调控及调水措施,随着污水接管率增加到 98% ,平均水质改善率由 0.4% 提升到 37.2% 。此外,截污措施对不同河道水质改善效果存在明显差异,秦淮新河调水引流对 A 段水质几乎没有改善效果,截污措施对其水质改善率的贡献却非常明显。然而,对于 B 段、C 段、D 段,调水与截污措施的水质改善效果均较为明显,并且,B 段和 C 段水质改善率随接管率提高呈线性上升,说明与调水引流措施相比,截污措施对 B 段和 C 段水质改善影响更加显著。

由图 5(b)可见,C 段水质达标率受截污措施影响最为显著,与 C 段现状污染负荷较高有关。提高污水接管率可以显著提升该河段的水质达标率。单靠补水措施使 C 段水质达标,秦淮新河泵引流量需要达到 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (D04 方案),当接管率提高到 95% ,泵引流量仅需 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (D09 方案),即可使 C 段水质

达标。截污措施虽然对 A 段水质的改善效果较为明显,但对 A 段水质达标率没有贡献,这是因为除了受区间污染源汇入的影响,A 段水质主要受上游来流水质状况控制,如果上游地区污染负荷无法削减,A 段水质达标较为困难。

通过对比各河段月平均流量与生态基流量的关系发现,如果仅实施上游补水措施,需补水 $34 \sim 51 \text{ m}^3/\text{s}$,才能满足流域生态基流需求;若同时考虑上游补水和秦淮新河引水措施,则上游补水 $6 \sim 17 \text{ m}^3/\text{s}$,秦淮新河引水流量达到 $30 \text{ m}^3/\text{s}$,可以满足枯水年非汛期生态基流需求。此外,在现状污染源条件下,秦淮新河引水流量达到 $50 \text{ m}^3/\text{s}$,能够使秦淮新河、外秦淮河、秦淮河下游水质满足相应水功能区要求;当污水接管率提高到 95% ,泵引流量达到 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,即能使上述河道满足水质要求。

3 结论

以长三角秦淮河流域下游地区水系为例,在计算高度人工化城市水系生态需水量的基础上,通过构建水量水质耦合数学模型,对水量调控及截污措施的生态水量保障及水质改善协同驱动效应进行情景模拟,提出适用于高度城镇化地区非汛期水文特征的生态调控模式。结果表明,水位调控措施对水质改善的影响非常有限,在枯水年非汛期条件下无法保障研究区各河段生态基流需求;引水方案的生态基流保障及水质改善效果较为明显,但水质改善率增幅随引水流量增加呈下降趋势;截污措施水质改善效果优于水位调控及引水措施,但存在显著的空间异质性,且无法提高生态基流保障率。综合各方案计算结果,当研究区污水接管率提高到 95% ,秦淮新河引水流量达到 $30 \text{ m}^3/\text{s}$,上游补水 $6 \sim 17 \text{ m}^3/\text{s}$,可在枯水年非汛期同时满足水质要求及生态基流需求。因此,将秦淮新河引水、上游补水措施与区域截污控源措施相结合,是实现秦淮河水系生态基流保障及控制断面水质达标的最佳调控模式。

参考文献:

- [1] 刘悦忆,朱金峰,赵建世. 河流生态流量研究发展历程与前沿[J]. 水力发电学报,2016,35(12):23-34. (LIU Yueyi, ZHU Jinpeng, ZHAO Jianshi. Development history and frontiers of river environmental flow research [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(12): 23-34. (in Chinese))
- [2] 张士锋,刘晓菲,李瑞,等. 永定河北京段生态需水量研究[J]. 水资源研究,2016,5(2):108-119. (ZHANG Shifeng, LIU Xiaofei, LI Rui, et al. Study on environmental flow in Beijing section of Yongding River [J]. Journal of

- Water Resources Research, 2016, 5 (2): 108-119. (in Chinese))
- [3] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4) :6-10.
- [4] 徐伟,董增川,罗晓丽,等.基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析[J].河海大学学报(自然科学版),2016, 44(5): 454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5) :454-457. (in Chinese))
- [5] 王煌,周买春,李思颖,等.基于水文模拟计算山区小水电站减脱水河段生态需水量的水文学方法及静水域生态补水机制[J].水力发电学报,2015, 34(3) :29-37. (WANG Huang, ZHOU Maichun, LI Siying, et al. Apply hydrological model to evaluation of ecological water demand of dehydration river reaches for small hydropower plants and water supplement [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(3) :29-37. (in Chinese))
- [6] YANG T, ZHANG Q, CHEN Y D, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China [J]. Hydrological Processes, 2008, 22 :3829-3843.
- [7] SHANG Songhao. A multiple criteria decision making approach to estimate minimum environmental flows using wetted perimeter [J]. River Research and Applications, 2008, 24(1) :54-67.
- [8] WEATHERED J D, SILVEY H L, PFANKUCH D J. Program documentation for R2-CROSS-81 [R]. Fort Collins: Watershed Systems Development Group, 1981.
- [9] 高雪山,刘树锋,贾建辉,等.基于生态水力半径法的长江流域生态流量研究[J].水资源与水工程学报,2020, 31(2) :8-12. (GAO Xueshan, LIU Shufeng, JIA Jianhui, et al. Research on ecological instream flow of Wujiang River Basin based on ecological hydraulic radius approach [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(2) :8-12. (in Chinese))
- [10] THEILING C H, NESTLER J M. River stage response to alteration of Upper Mississippi River channels, floodplains, and watersheds [J]. Hydrobiologia, 2010, 640 (1) :17-47.
- [11] 张伊佳,陈星,许钦,等.太湖下游河网区水质变化特征与引水调控效果[J].水资源保护,2020, 36(5) :79-86. (ZHANG Yijia, CHEN Xing, XU Qin, et al. Characteristics of water quality change in the downstream river network area of Taihu Lake and effect of water diversion control [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5) :79-86. (in Chinese))
- [12] 吴时强,范子武,周杰,等.引江济太措施对望虞河西部污染物滞留和转移风险分析[J].中国工程科学,2011, 13(1) :102-108. (WU Shiqiang, FAN Ziwu, ZHOU Jie, et al. Risk analysis of water diversion from Yangtze river to Taihu Lake on retention and transfer of pollutions in west area of Wangyu River [J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(1) :102-108. (in Chinese))
- [13] 杜建,陈晓宏,陈志和,等.珠江三角洲感潮河网区水环境引水调控研究[J].水文,2012, 32(4) :16-21, 96. (DU Jian, CHEN Xiaohong, CHEN Zhihe, et al. Water diversion and control for water environment in tidal network of Pearl River Delta [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(4) :16-21, 96. (in Chinese))
- [14] 陈志和,陈晓宏,杜建,等.河网地区水环境引水调控及其效果预测[J].水资源保护,2012, 28(3) :16-21. (CHEN Zhihe, CHEN Xiaohong, DU Jian, et al. Water diversion and regulation of water environment and effect forecast in river network region [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3) :16-21. (in Chinese))
- [15] 沈尚荣.苏州中心城区河网水动力水质生态模型及联控联调方案研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [16] 刘贵平,唐洪武,雷燕,等.上海世界博览会园区河网水环境调控[J].河海大学学报(自然科学版),2013, 41(3) :204-210. (LIU Guiping, TANG Hongwu, LEI Yan, et al. Water environmental regulation for river network in Shanghai World Expo Park [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(3) :204-210. (in Chinese))
- [17] 杨卫,许明祥,李瑞清,等.面向生态环境的河湖连通引水调控方案研究[J].武汉大学学报(工学版),2020, 53(10) : 861-868. (YANG Wei, XU Mingxiang, LI Ruiqing, et al. Study on the water diversion regulation scheme of interconnected river system network oriented to ecological environment [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(10) :861-868. (in Chinese))
- [18] 秦文浩,胡光亮,朱亮,等.基于成本效益评估的内秦淮河最佳引水流量研究[J].水电能源科学,2015, 33(4) :30-33. (QIN Wenhao, HU Guangliang, ZHU Liang, et al. Optimal diversion discharge of inland qinhuaihe river based on cost-benefit evaluation [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(4) :30-33. (in Chinese))
- [19] 华祖林,董越洋,褚克坚.高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J].水资源保护,2021, 37(1) :140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian, et al. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1) :140-144. (in Chinese))
- [20] WANG Peng, WANG Chuanhai, HUA Zulin, et al. A structurally integrated water environmental modeling system based on dual object structure [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27 (10) : 11079-11092.

(收稿日期:2021-03-23 编辑:王芳)