

秦淮区北部水系引补水方案模拟

陈晓静,李昆朋,李萍,赵振

(南京市水利规划设计院股份有限公司,江苏南京 210000)

摘要:为获取南京市秦淮区北部片区新建净水站的建设规模和补水线路,采用 MIKE11 的 HD、AD 模块耦合建立秦淮区北部片区河网一维水质模型,以氨氮和悬浮物作为研究对象,对不同补水规模和补水线路下的片区水质变化情况进行模拟。结果表明,从水质改善效果和经济角度分析,18 万 t/d 建设规模和出水管接至外秦淮河副支的方案组合较为适宜。

关键词:城市建成区;一维水质模型;引补水;补水规模;补水路线

中图分类号:TV212 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)02-0006-05

Simulation study on water diversion scheme in northern river network of Qinhuai District//CHEN Xiaojing, LI kunpeng, LI Ping, ZHAO Zhen(*Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China*)

Abstract: In order to analyze the scale and water supplement route of a new water purification station in the northern area of Nanjing Qinhuai District, a one-dimensional water quality model of river network was established by coupling HD and AD modules in MIKE11. Ammonia nitrogen and suspended solids were selected as the research objects and the variation of water quality under different water supplement scales and water supplement routes was simulated. The result shows that the scale of 180 000 t/d for the new water purification station and connection of the outlet pipe to the sub branch of the Qinhuai River is appropriate.

Key words: urban built-up areas; one-dimensional water quality model; water diversion and supply; water supplement scale; water supplement route

在设施密集、管网水系复杂的城市建成区,采用雨污分流、排水达标等工程措施提升河道水质往往存在较大的难度,建设周期长^[1]。在这种情况下,根据一定地域内各水体的环境容量特点,采用水系连通、引流补水的措施增强河道的水体流动特性,进而提升水质、改善水环境被实践证明是经济合理、效果明显的辅助措施之一^[2]。2005 年完成的南京市外秦淮河综合整治项目的内容之一,就是通过六闸(站)联动为秦淮河干流和外秦淮河进行引流补水,极大地改善了河道水质和滨水环境。南京市政府又于 2016 年批复了《南京城区水系连通及引流补水方案(2016—2020 年)》,作为全市水质达标和提升的指导性文件之一。

目前,针对河流水动力水质模拟的研究已发展得较为成熟,朝朝锋等^[3]通过建立外秦淮河一维河网水动力和水质模型,为南京市外秦淮河环境整治调水调度运行提供参考依据;殷洪等^[4]通过模型模拟调水和抽水等调控措施的效果,分析不同的调控方案与水质改善效果的响应关系,为水环境优化方

案筛选提供决策支持;管仪庆等^[5]利用 MIKE11 软件,建立了河网一维水动力和水质耦合模型,为平原河网地区水环境保护和水资源管理提供依据;许兴武等^[6]为了探究不同水闸调度方案对秦淮河水质改善的效果,进行了洪水期、丰水期调度、枯水期调度和降雨初期雨水污染调度等典型时段调水试验;陈昂^[7]通过综合分析国内外环境流量研究成果,提出了强化环境流量分阶段实施的非水文指标耦合,加强适应性管理方式下的环境流量评估和实践,以保障适应性管理框架下的生态完整性。

随着南京市工业化和城市化步伐的加快,内秦淮河的水环境质量逐渐恶化^[8]。南京市秦淮区北部片区是南京市区的核心城区之一,片区内城市设施密布,人口密集,水系众多,河道管网复杂,国家 5A 级旅游景区南京夫子庙地处其中^[9]。片区内的河道经过多轮整治,水质已有一定改善,但由于地下管网改造难以彻底,部分河道两岸仍有污水下河,导致多条河道氨氮含量高于地表水 V 类水标准,尤以水网末端的内秦淮河南段及中段最为严重。

根据相关规划,拟在片区内部新建净水站引外秦淮河水向片区补水,以改善引流补水规模不足、片区河道水质较差的现状。如何在现有工程基础上,更为科学地确定新建净水站的建设规模和补水线路,是本文的研究重点。

1 现状水系及引补水情况

秦淮区北部片区水系以内秦淮河为轴线,由外秦淮河七里街段、外秦淮河副支和内秦淮河东段、中段、南段等多条河道组成;涉及的外围河道(湖)包括外秦淮河、玄武湖、月牙湖、东西玉带河、明御河和清溪河等(图1和图2)。



图1 河道水网现状

2 河网模型构建

2.1 水动力模型

河网水动力模拟的基本目的是提供河道各个断面、各个时刻的水位、流量等水文要素信息,并模拟水库调度、蓄滞洪区运用、溃口等对河道水文条件的影响^[10]。

MIKE11 的 HD 水动力计算模型是基于垂向积分的物质和动量守恒方程组,即采用一维非恒定流 Saint-Venant 方程组来模拟河流或河口的水流状态^[11]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1}$$

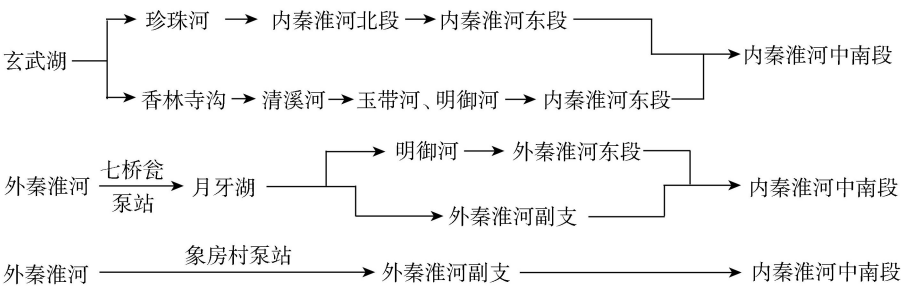


图2 现状补水线路

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |Q|}{AR^{(4/3)}} = 0 \tag{2}$$

式中: x 、 t 分别为计算点空间和时间坐标; A 为过水断面面积; Q 为过流流量; q 为旁侧入流流量; α 为动量修正系数; h 为水位; R 为水力半径; g 为重力加速度; n 为糙率。

河道水动力模型基于河道测量断面构建,并对河道内的各类设施进行数字化模拟,力求反映出河道的真实水力条件。

2.2 水质模型

水质模型是一种根据物质守恒原理利用数学语言描述水体中水质变量迁移转化的数学模型,目前已被广泛应用于评价来自各种点源和非点源污染物负荷的影响^[12]。

本文水质模型主要考虑污染因子的对流扩散作用,采用 MIKE11 的 AD 模块进行建模模拟。AD 模块可以模拟保守物质物理运动,也可以通过设定恒定的衰减常数模拟非保守物质物理运动之外的化学变化过程^[13]。对流扩散方程(式(3))采用空间中心差分的隐式差分格式。

$$\frac{\partial A_s \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q \rho}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(A_s D \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = -A_s K \rho + \rho_2 q \tag{3}$$

式中: ρ 为物质质量浓度; D 为纵向分散系数; A_s 为横断面面积; K 为线性衰减系数; ρ_2 为源/汇质量浓度。

2.3 水质目标

内秦淮河中段和南段位于片区水系下游,地处夫子庙景区的核心地段,现状由于溶解氧不足,已达轻度黑臭级别。本文水质模拟方案主要以内秦淮河南段和中段末端水质作为目标参数,要求 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) \leq 2.0 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{SS}) \leq 15.0 \text{ mg/L}$,以在各补水工况下河流达到水质目标的时间作为方案评判的标准;片区内及周边其他相关河道作为输水通道,水质指标的改善作为参考目标。

2.4 相关条件和参数

水动力学模型需要确定的边界条件为上边界点的流量和下边界点的水位,初始条件主要为河道的初

始水位^[14]。建模主要考虑枯水期片区生态补水效果,因此河道初始水位和下边界水位确定为河道常水位,即 6.5 m,上边界点的流量按前文补水流量确定。

区域污染以点源污染为主,主要来源于月牙湖、外秦淮河副支、内秦淮河南段和中段沿线的合流生活污水。根据 2017 年调查结果,河道沿线共有排口 65 个;经 2018 年治理后,按片区污染治理目标污水收集率 90% 考虑,片区内污水下河量为 1.24 万 t/d, NH₃-N 入河量为 186 kg/d。

各河(湖)的初始水质采用 2017 年 8 月的实测数据,氨氮指标见表 1。

表 1 研究区域各水体氨氮质量浓度情况

条件类型	水体类型	水体名称	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
边界条件	外部水源	外秦淮河夏季	1.03
		外秦淮河冬季	1.39
		玄武湖	2.00
		月牙湖	0.37
初始条件	内部河网	外秦淮河副支	2.44
		内秦淮河东段	1.76
边界条件	外部水源	运粮河夏季	2.06
		运粮河冬季	2.67
初始条件	河网末端	内秦淮河中段	3.07
		内秦淮河南段	2.71
		外秦淮河七里街	1.77

污染物模拟因子: NH₃-N、SS; 污染物衰减系数: 根据中国环境规划院在《全国地表水水环境容量核定技术复核要点》(2004 年) 提出的衰减系数参考值^[15], 对于一般河流 NH₃-N 降解系数一般为 0.05 ~ 0.15 d⁻¹, 本文主要考虑河道补水效果, 不考虑污染物自身衰减, 衰减系数取 0; 污染物分散系数: 参考相关论文及实际工程经验^[16], 规模较大河流取值 5 ~ 20 m²/s, 小河流取值 1 ~ 5 m²/s, 本次取值为 1 ~ 5 m²/s。河道糙率使用南京地区河道经验值 0.025。

片区现状有 4 个补水节点, 分别从玄武湖和外秦淮河向片区补水。主要补水节点为武庙闸、太平门闸、象房村引水泵站和七桥瓮引水泵站(月牙湖), 总计补水流量为 6.5 m³/s(表 2)。本次模型计算中维持现状补水工况。

表 2 研究区域补水节点情况

条件类型	补水节点	补水流量/ (m ³ · s ⁻¹)	补水来源	补水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
点源入流	月牙湖(北部)	1.0	七桥瓮引水泵站	2.06 (冬季 2.67)
	月牙湖(中部)	1.0		
	象房村泵站	2.0	外秦淮河	1.03 (冬季 1.39)
	太平门闸 (珍珠河)	1.0	玄武湖	2.0
	武庙闸 (香林寺沟)	1.5	玄武湖	2.0

3 补水方案

3.1 方案概述

根据《南京城区水系连通及引流补水方案(2016—2020 年)》, 拟在清水塘东侧新建净水站, 抽引外秦淮河水经净化后补充至本片区, 提高水质保障水平。处理工艺主要为自循环高密度悬浮污泥滤沉技术+板框式污泥脱水, 主要用于去除来水中的 SS。由于外秦淮河水水质不甚稳定, 从偏于安全的角度考虑, 净水站进水中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 1.0 mg/L(冬季 1.39 mg/L), $\rho(\text{SS})$ 为 30 mg/L; 出水中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 1.0 mg/L(冬季 1.39 mg/L), $\rho(\text{SS})$ 为 10 mg/L。

净水站的补水规模有 3 个比选方案, 分别为 12 万 t/d、18 万 t/d、24 万 t/d。净水站的输水线路有 2 个比选方案(图 3)。方案 1: 净水站出水管直接接至外秦淮河副支, 在出水管开三通延伸至外秦淮河东侧高水高排涵, 净水通过外秦淮河副支流入内秦淮河南段, 兼顾月牙湖补水, 全长约 100 m。方案 2: 净水站出水管沿长乐东路→龙蟠中路→红旗桥→武定门城墙→白鹭洲公园, 通过白鹭洲公园流入内秦淮河南段, 全长约 1450 m。

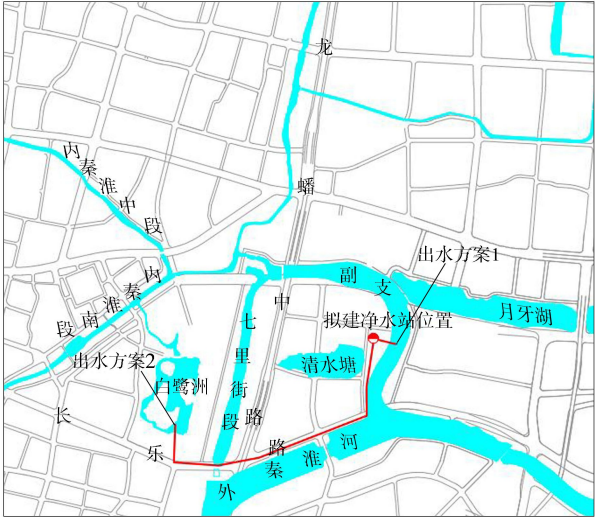


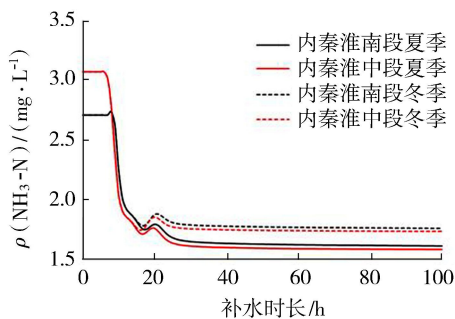
图 3 拟建净水站位置和出水线路方案

3.2 净水站补水规模比选

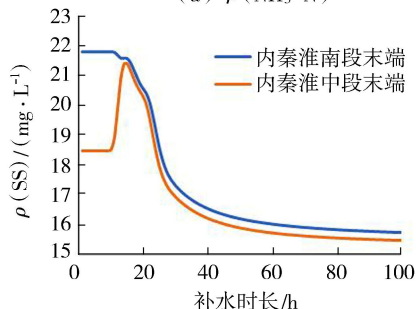
根据前文所述边界条件、参数和净水站补水规模比选方案, 出水方案采用方案 1, 模拟时长为 100 h, 模型计算的水质结果见图 4 ~ 6。

3.2.1 补水规模 1(12 万 t/d)

根据模型模拟结果, 在净水站补水规模为 12 万 t/d 的情况下, 河道水质 91 h 后趋于稳定; 此时, 内秦淮南段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 1.60 mg/L(冬季 1.75 mg/L), $\rho(\text{SS})$ 为 15.78 mg/L; 内秦淮中段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 1.58 mg/L(冬季 1.73 mg/L), $\rho(\text{SS})$ 为 15.53 mg/L。

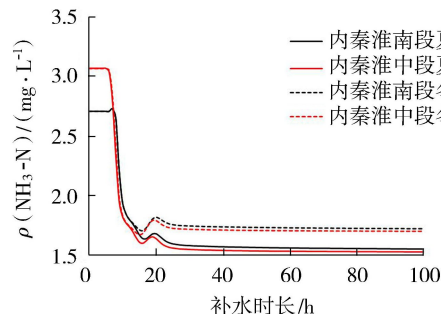


(a) $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$

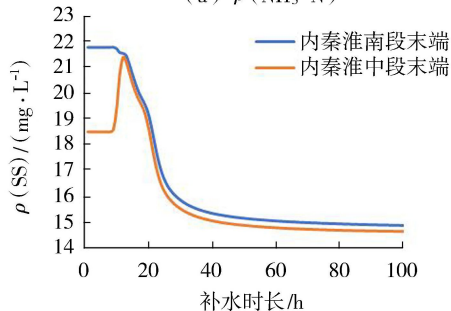


(b) $\rho(\text{SS})$

图4 12万 t/d 补水规模下 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{SS})$ 变化



(a) $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$



(b) $\rho(\text{SS})$

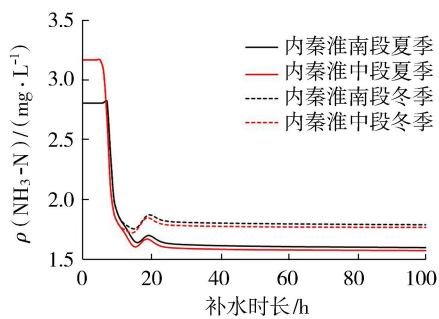
图5 18万 t/d 补水规模 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{SS})$ 变化

3.2.2 补水规模2(18万 t/d)

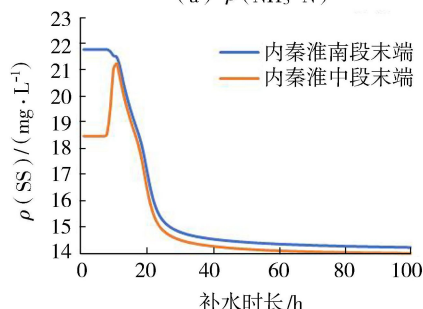
根据模型模拟结果,在净水站补水规模为18万 t/d的情况下,河道水质62 h后趋于稳定;此时,内秦淮南段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为1.53 mg/L(冬季1.71 mg/L), $\rho(\text{SS})$ 为15.04 mg/L;内秦淮中段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为1.52 mg/L(冬季1.70 mg/L), $\rho(\text{SS})$ 为14.78 mg/L。

3.2.3 补水规模3(24万 t/d)

根据模型模拟结果,在净水站补水规模为24万 t/d的情况下,河道水质56 h后趋于稳定;此时,内秦淮南段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为1.49 mg/L(冬季1.68 mg/L),



(a) $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$



(b) $\rho(\text{SS})$

图6 24万 t/d 补水规模 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{SS})$ 变化

$\rho(\text{SS})$ 为14.40 mg/L;内秦淮中段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为1.47 mg/L(冬季1.67), $\rho(\text{SS})$ 为14.14 mg/L。

从模型模拟结果对比可以看出,净水站补水规模提升对 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 变化影响不明显,但对 $\rho(\text{SS})$ 变化影响较大。其中12万 t/d 规模下水质稳定时间较长,18万 t/d 与24万 t/d 规模下水质稳定时间区别不大。考虑到18万 t/d 规模下,内秦淮中段与南段末端水质已基本达到目标水质要求,从经济性和占地规模角度上,净水站规模为18万 t/d 较为适宜。

3.3 净水站输水线路比选

在净水站规模18万 t/d的前提下,以夏季水质为例,对输水线路的方案比选结果如下。

3.3.1 方案1

3.2节中已对净水站18万 t/d 规模下水方案1进行了水质模拟,水质模拟结果为河道水质62 h后趋于稳定;此时,内秦淮南段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为1.53 mg/L, $\rho(\text{SS})$ 为15.04 mg/L;内秦淮中段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为1.52 mg/L, $\rho(\text{SS})$ 为14.78 mg/L。

3.3.2 方案2

根据模型模拟结果,在净水站补水规模为18万 t/d的情况下,若出水方案采取方案2,河道水质66 h后趋于稳定;此时,内秦淮南段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为1.11 mg/L, $\rho(\text{SS})$ 为10.08 mg/L;内秦淮中段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为1.75 mg/L, $\rho(\text{SS})$ 为18.27 mg/L。

根据模型模拟结果,相比于方案1、方案2虽能大幅改善内秦淮南段末端水质,但内秦淮中段末端水质改善效果也会受到相应影响,其中中段末端 $\rho(\text{SS})$ 距水质目标相差较远;同时方案2工程量明

显多于方案 1,因此建议拟建净水站出水方案选取方案 1。

需要说明的是,输水方案 1 能够成立的前提之一,白鹭洲公园目前已在研究从外秦淮河七里街段补水措施。

4 结 语

a. 根据模型模拟结果,新建净水站在 18 万 t/d 规模下,内秦淮中段与南段末端水质已基本达到 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) \leq 2.0 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{SS}) \leq 15.0 \text{ mg/L}$ 的要求,河道水质 62 h 后趋于稳定,内秦淮南段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 1.53 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{SS}) = 15.04 \text{ mg/L}$;内秦淮中段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 1.52 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{SS}) = 14.78 \text{ mg/L}$ 。从经济性和占地规模角度上,净水站规模为 18 万 t/d 较适宜。

b. 净水站出水管接至外秦淮河副支相比于出水管接至白鹭洲公园,内秦淮中段末端 SS 浓度可达标。按 18 万 t/d 规模模拟成果为河道水质经 62 h 后趋于稳定,内秦淮南段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 1.53 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{SS}) = 15.04 \text{ mg/L}$;内秦淮中段末端 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 1.52 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{SS}) = 14.78 \text{ mg/L}$,建议拟建净水站出水接至外秦淮河副支。

c. 对于城市河道而言,引水补水作为提升河道水质的手段之一,已被证明是经济有效的。在苛刻的建设条件下,如何合理的确定补水规模和补水线路是工程规划设计中需要解决的关键问题。本文采用 MIKE11 的 HD 和 AD 模块耦合建立一维水质模型,通过模拟计算确定合理的拟建净水站规模和输水线路,一方面为实例工程的方案比选提供数据支撑,另一方面对类似工程也有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 陈兴茹. 国内外城市河流治理现状[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (2): 83-88. (CHEN Xingru. Current situation of urban river restoration in China and abroad [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(2): 83-88. (in Chinese))

[2] 徐祖信,罗海林,屠鹤鸣,等. 苏州河调水对水质的改善作用分析[J]. 上海环境科学, 2003, 22(增刊): 43-46. (XU Zuxin, LUO Hailin, TU Heming, et al. Analysis on role of flow augmentation in water quality improvement of Suzhou Creek [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22(Sup): 43-46. (in Chinese))

[3] 童朝锋,岳亮亮,郝嘉凌,等. 南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果[J]. 水资源保护, 2008, 28(6): 49-54. (TONG Chaofeng, YUE Liangliang, HAO Jialing, et al. Water quality simulation and water diversion effect analysis of external Qinhuai River in Nanjing[J]. Water Resources Protection, 2008, 28(6): 49-54. (in Chinese))

[4] 殷洪,钱新,姚红,等. 基于水质模型的河流水环境调控方案效果评估:以太浦河为例[J]. 环境保护科学, 2015, 41 (2): 48-52. (YIN Hong, QIAN Xin, YAO Hong, et al. Effect evaluation of the river water environmental risk prevention and control based on WASP by taking Taipu River as an example[J]. Environmental Protection Science, 2015, 41(2): 48-52. (in Chinese))

[5] 管仪庆,陈玥,张丹蓉,等. 平原河网地区水环境模拟及污染负荷计算[J]. 水资源保护, 2016, 32 (2): 111-118. (GUAN Yiqing, CHEN Yue, ZHANG Danrong, et al. Aquatic environmental simulation and pollutant load calculation in plain river networks[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 111-118. (in Chinese))

[6] 许兴武,沃玉报,胡阳,等. 秦淮河水质改善现场调水试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 492-496. (XU Xingwu, WO Yubao, HU Yang, et al. Field water diversion tests of water quality improvement in Qinhuai River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6): 492-496. (in Chinese))

[7] 陈昂. 环境流量研究的前沿问题与挑战[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 1-6. (CHEN Ang. Frontiers and challenges of environmental flow research[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 1-6. (in Chinese))

[8] 周益娟. 秦淮河流域引水调配模型及应用研究[D]. 南京:河海大学, 2006.

[9] 周志才,张其成,李冰瑶,等. 城区水域保护划界研究:以南京市秦淮区为例[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 79-85. (ZHOU Zhicai, ZHANG Qicheng, LI Bingyao, et al. Study of delimitation of urban water area protection: a case study of Qinhuai District in Nanjing City [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(1): 79-85. (in Chinese))

[10] 黄琳煜,聂秋月,周全,等. 基于 MIKE11 的白莲泾区域水量水质模型研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 21-24. (HUANG Linyu, NIE Qiuyue, ZHOU Quan, et al. Study of water quantity and water quality model of Bailianjing Region based on MIKE11 [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 21-24. (in Chinese))

[11] 刘伟,刘洪超,徐海岩. 基于 MIKE11 模型计算河流水功能区纳污能力方法[J]. 东北水利水电, 2009(8): 69-70. (LIU Wei, LIU Hongchao, XU Haiyan. Calculation method of water environment capacity for water function area based on MIKE11 model[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2009(8): 69-70. (in Chinese))

[12] 孙颖,陈肇河,范晓娜,等. 河流及水库水质模型与通用软件综述[J]. 水资源保护, 2001, 64(2): 7-11. (SUN Ying, CHEN Zaohe, FAN Xiaona, et al. A review of river and reservoir water quality models and general software[J]. Water Resources Protection, 2001, 64(2): 7-11. (in Chinese))

(下转第 22 页)