

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.06.11

基于 EFDC 模型的尾水回用于城市景观 水体优化计算

章双双^{1,2}, 潘 杨^{1,2}, 李一平³, 卢绪川⁴, 徐 垚^{1,2}, 王 晨^{1,2}, 施国健^{1,2}

(1. 苏州科技大学环境生物技术研究所江苏省环境科学与工程重点实验室, 江苏 苏州 215009;
2. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
4. 南京国环科技股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:以昆山市内蓬朗污水处理厂深度处理后的尾水回用于城市景观水体夏驾河为例,以环境流体动力学模型(environmental fluid dynamic code, EFDC)构建的夏驾河三维非稳态水量模型为基础,考虑经济、社会、环境等多方面的效益,构建目标函数,研究6种设计情景下尾水回用的综合效益,确定污水处理厂尾水回用的最佳运行方案。结果表明,从经济、社会、环境效益最大化的角度出发,昆山市夏驾河尾水回用最优方案为:出水口选为距太仓塘4.5 km处,排水方向为吴淞江,回用流量为3.4万m³/d。尾水回用于景观水体可以有效改善水体交换,蓬朗污水处理厂尾水入河位置及回用量流量直接影响夏驾河换水周期以及夏驾河水质的好坏。

关键词:尾水回用;EFDC模型;水动力;富营养化;最优方案

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)06-0074-05

Optimization calculation of tail water reused in urban landscape water based on EFDC model

ZHANG Shuangshuang^{1,2}, PAN Yang^{1,2}, LI Yiping³, LU Xuchuan⁴, XU Yao^{1,2},
WANG Chen^{1,2}, SHI Guojian^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Environment Biotechnology Research Institute, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Nanjing Guohuan Science and Technology Co., Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract: As the problem of water resources shortage and water pollution was intensifying day by day, it is of great significance to maintain river ecological flow and to ensure that the water quality does not deteriorate because of stagnation by reusing deeply disposed tail water of sewage plant as landscape water. How to plan the reuse of water and the location of the outlet to achieve economic, social, environmental and other benefits has become a problem worthy of study. This paper took Penglang sewage treatment plant of Kunshan City as an example, the deeply processed tail water was reused as landscape water in Xiajia river. Based on the three-dimensional unsteady water quantity model of Xiajia River constructed with environmental fluid dynamics model (EFDC), and considering the benefits in economic, social, environmental and other aspects, the comprehensive benefits of tail water reuse under

基金项目:国家自然科学基金(51579071,51379061,50938005);江苏省特色优势学科二期立项项目;江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目

作者简介:章双双(1992—),女,硕士研究生,研究方向为水污染控制和水环境数学模拟。E-mail:912706124@qq.com

通信作者:潘杨,教授。E-mail:panyang@mail.usts.edu.cn

6 design scenarios were studied to determine the optimal operation scheme of the sewage plant. The results show that the when the water outlet is chosen to be 4.5 km from Taicang Tang river with the drainage direction to the Wusong River and back flow is 34 000 m³/d, it is the best scheme that finally can be used to reuse the tail water of Xiajia River in Kunshan City, judging from the point of maximum economic, social and environmental benefits. In a word, the application of tail water to landscape water can effectively improve water exchange, the position of tail water flowing into the river from Penglang sewage treatment plant and back flow amount can directly affect the water exchange cycle and water quality of Xiajia River.

Key words: waste water reuse; EFDC code; water power; water eutrophication; optimal scheme

虽然我国景观水体的地位日益提升,但是多数城市景观水体现状不容乐观^[1]。将城市污水经过深度处理回用于城市景观水体是解决水资源缺乏和景观水体水质污染严重的主要措施之一。最早在19世纪30年代,国外就开始将城市污水处理后作为河道、湖泊观赏用水。美国、日本、澳大利亚等发达国家很早就开始了污水再生利用的研究和应用,并已建成多个世界知名的工程。在国内最早将城市污水处理后回用于景观环境的研究始于“七五”国家科技攻关计划。为了缓解缺水形势,我国大力开发非传统水源,推广污水再生利用^[2]。城市景观水体补水量大,对水质的要求相对较低,许多城市将再生水作为景观水体的补充水源,但是应用数学模型方法来模拟城市景观水体获得最优化回用的研究很少。

最近,应用数学模型方法来模拟城市景观水体,以再生水为补充水源的城市景观水体的富营养化控制成为关注的焦点。模型辅助具体河流工程的相关研究已有较多的应用,如唐天均等^[3]利用EFDC (environmental fluid dynamic code)模型对深圳水库建立三维水动力和富营养化定量模拟模型,准确地反映了深圳水库的水动力和水质变化过程。刘建波等^[4]利用EFDC模型研究了疏浚工程对文昌清澜潮汐汊道水交换速率的影响,准确地反映了水体的交换程度。刘岩等^[5]利用EFDC建立模型的示踪和水龄模块计算前海湾的时空分布特点,对改善方案提出了合理的建议。郝文彬等^[6-7]应用EFDC模型对太湖的水动力调控效果和河道型水库的水动力特征和气候条件的响应关系进行研究,均取得了较好的应用效果。再生水回用城市景观水体需要考虑多个方面,目前关于多目标最优回用方案研究尚不多见。本文以昆山市夏驾河为例,综合考虑回用点位置、回用水量 and 河道水体水龄等因素,在调查夏驾河周边水环境的基础上,应用EFDC模型模拟了不同方案下夏驾河水龄时空分布,通过计算最优目标函数,得出了最优回用方案,长期为探讨污水处理厂尾水回用于城市景观河道最优化方案提供参考。

1 研究区概况

昆山市地处江苏省东南端的太湖下游,东经120°48'21"~121°09'04"、北纬31°06'34"~31°32'36",东西宽约33 km,南北长约48 km,全市总面积927.68 km²,其中水域面积占23.1%。目前在昆山市内部分水体水质很差,其水质仅达到GB 3838—83《地面水环境质量标准》的V、IV标准,短时期内在周边寻找合适的水源相对困难,水体的治理迫在眉睫,将污水处理厂的二级出水再度回收利用是一个有效方法。蓬朗污水处理厂位于经济技术开发区蓬朗片区东北角,总体规模32万m³/d,目前已投入使用的为6万m³/d,其尾水处理达标后2万m³/d进开发区工业净水厂回用,4万m³/d达标排入夏驾河。夏驾河南起吴淞江,北经陆家、蓬朗、兵希入娄江,水域通过闸控制隔开,周边河流污染物对运河湖区没有影响。研究区域水系见图1。

2 研究方法

2.1 EFDC 模型简介

EFDC是John Hamrick等^[8]根据多个数学模型集成开发研制的综合模型,被用于模拟水系统一维、二维和三维流场、物质输运(包括温度、盐度和泥沙的输运)、生态过程以及淡水入流等。EFDC模型已经成为美国国家环保署最为推崇的模型之一,并广泛应用于各个大学、政府和环境咨询机构。

实现河流、湖泊等水量水质的水动力模拟和水质富营养化模拟是EFDC模型中两个较为核心的模块,目前EFDC技术在实现河流的水动力模拟已经非常成熟。龚然等^[9]利用EFDC模型成功模拟了景观湖泊一天印湖的水龄变化过程和时空分布;戚文等^[10]利用了EFDC模型建立了天镜湖的三维非稳态水量、水龄、污染物颗粒追踪数学模型,成功模拟了天镜湖水动力优化调控方案,模型实用性较高。本文模型的水动力计算方程参考文献[11],水龄计算方程参见参考文献[12]。

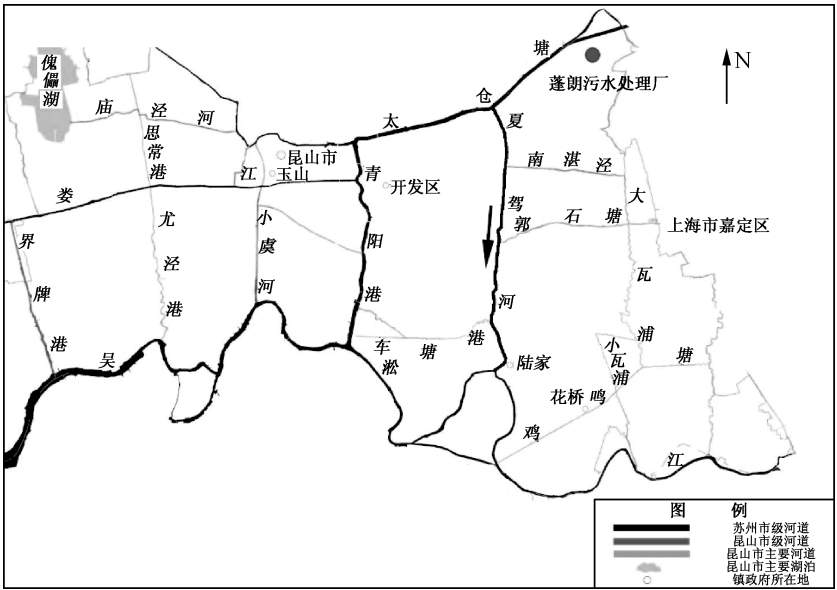


图1 研究区域水系图

2.2 网格生成

根据研究区域夏驾河的实际地形图,提取出夏驾河岸线和地形坐标,水动力模型沿河流方向全程长 13.7 km,在研究区域共概化出 9 242 个网格单元(图 2)。由于夏驾河景观水体的水深较浅(其水深远小于河宽),可忽略垂向变化,故概化为二维平面网格。通过 EFDC 自身的网格生成程序,设置边界控制点,生成研究区域的计算网格。研究区域为狭长形河流,于是将整条河分为上、中、下游 3 个区域进行研究,在分析时主要考虑调水分别对 3 个区域的影响。

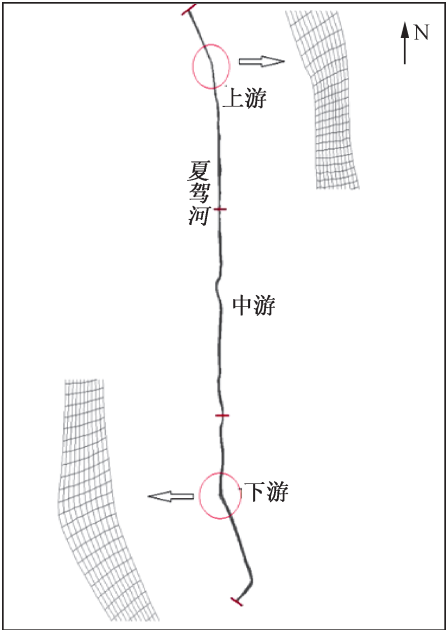


图2 研究区域网格及各代表区域网格

2.3 模型参数的选取

表 1 为夏驾河水动力模型参数取值,EFDC 具

有很好的通用性,数值计算能力强,尤其水动力模块的模拟精度已达到相当高的水平。多数情况下,EFDC 模型中的许多参数不需要修改。譬如 Mellor-Yamada 紊流模型中湍封闭参数在各个模型中基本是相同的。模型参数的选取中,在动边界干湿水深的设定时,选择 0.1 m 作为干湿网格的临界水深。即当某网格水深大于 0.1 m 时,当作湿网格处理,进行正常的模拟计算;当水深小于 0.1 m 时,此网格变为干网格,不参与计算。夏驾河水动力模型参数取值见表 1。

表 1 夏驾河水动力模型参数取值

参数	单位	取值
河底粗糙度	m	0.02
时间步长	s	1.0
水平动能或物质扩散系数	m ² /s	1.0
无量纲水平扩散系数		0.2
运动黏性系数背景值	m ² /s	0.001
分子扩散系数背景值	m ² /s	10 ⁻⁹
最小动能黏性系数	m ² /s	10 ⁻⁴
最小黏性系数	m ² /s	10 ⁻⁸
风遮挡系数		1.0

2.4 方案设计

考虑到夏驾河分别用闸控制与北边的太仓塘和南边的吴淞江的水体交换,故根据闸门的开启情况制定了两种方案:开太仓塘口闸和开吴淞江口闸。依据闸门开启情况,参考蓬朗污水处理厂的位置以及铺设管线的费用设计 4 种入河排污口位置:距太仓塘 2 km 处、4.5 km 处、7 km 处、10.5 km 处;吴淞江为最终接纳水体时,增设了距太仓塘 1 km 处(铺设管线最短处)的方案。不同方案下经济成本 M 与流量 Q 的函数关系见表 2。

表 2 不同方案下经济成本与流量的函数关系			
排放去向	方案	尾水入河位置	经济成本与流量的函数关系
太仓塘	1	距太仓塘 2 km 处	$M_1 = 0.126Q + 30$
	2	距太仓塘 4.5 km 处	$M_2 = 0.126Q + 40$
	3	距太仓塘 7 km 处	$M_3 = 0.126Q + 54$
	4	距太仓塘 10.5 km 处	$M_4 = 0.126Q + 67.5$
吴淞江	5	距太仓塘 1 km 处	$M_5 = 0.126Q + 30$
	6	距太仓塘 4.5 km 处	$M_6 = 0.126Q + 40$

2.5 最优化目标函数的建立

在尾水回用的过程中,回用流量越大,河道平均水龄越小,富营养化风险越低,但经济成本越高。为了降低河道的平均水龄,并在回用过程中降低经济成本,采用最优化目标函数以获得最佳的运行方案。最优化目标函数为^[12]

$$\min y(Q_i) = \frac{A_w - \overline{A_w}}{S_{A_w}} + \frac{M + \overline{M}}{S_M}$$

式中: $y(Q_i)$ 为目标函数,当 $y(Q_i)$ 达到最低值时,水龄和经济成本都达到相对较小值; A_w 为河道水体平均水龄,d; M 为工程投资成本,万元; $\overline{A_w}$ 、 $\overline{M}$ 分别为水龄的平均值、工程投资平均成本; S_{A_w} 、 S_M 分别为水龄和工程投资成本的方差。 $\frac{A_w - \overline{A_w}}{S_{A_w}}$ 和 $\frac{M - \overline{M}}{S_M}$ 为标准化无量纲目标值,平均值为 0,方差为 1,标准化无量纲目标值越小,则意味着水龄越小,所需要的经济成本也就越小。

3 结果与分析

根据图 3 中不同方案下夏驾河的水龄情况,用 Excel 对流量与水龄和调水成本建立函数关系。

3.1 尾水回用流量及入河位置对夏驾河水龄的影响

表 3 为不同方案下水龄与流量的函数关系。图 4 为排放去向为太仓塘和吴淞江的水龄与流量的函数图。

通过表 3 可以看出,拟合方程中 R^2 均大于 0.9,这表明回归分析是可靠的;且 $P < 0.05$,表明回归分

表 3 不同方案下水龄与流量函数的关系

排放去向	方案	尾水入河位置	水龄与流量的函数关系	R^2	P
太仓塘	1	距太仓塘 2 km 处	$A_{w1} = -1.5Q^2 + 9.1Q + 30.3$	0.92	<0.05
	2	距太仓塘 4.5 km 处	$A_{w2} = 0.675Q^2 - 5.165Q + 42.625$	0.99	<0.05
	3	距太仓塘 7 km 处	$A_{w3} = 2.2Q^2 - 15.96Q + 53$	0.99	<0.05
	4	距太仓塘 10.5 km 处	$A_{w4} = 1.775Q^2 - 16.985Q + 52.725$	0.99	<0.05
吴淞江	5	距太仓塘 1 km 处	$A_{w5} = 0.275Q^2 - 4.285Q + 35.575$	0.99	<0.05
	6	距太仓塘 4.5 km 处	$A_{w6} = 1.975Q^2 - 17.425Q + 53.075$	1	<0.05

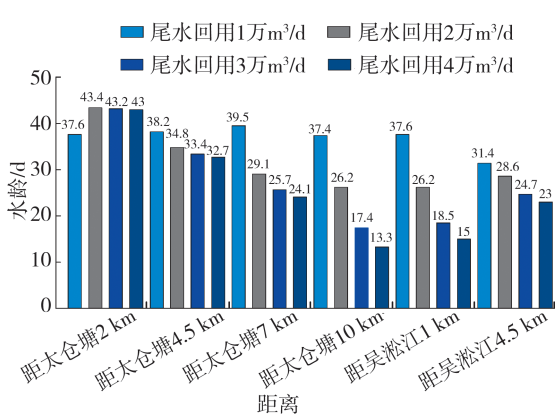
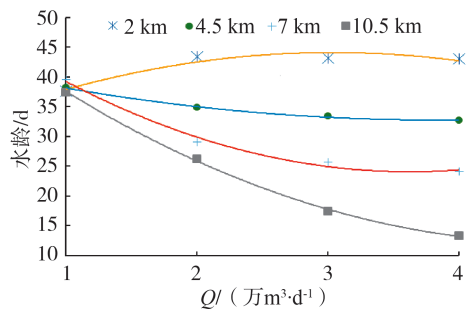


图 3 基于 EFDC 计算出不同方案下夏驾河水龄分布情况分析具有显著相关性。由图 4 可以看出:当排放去向为太仓塘,尾水回用的位置为 2 km 时,水龄随着回用流量的增加呈现出逐渐增大的趋势,但是当尾水入河的位置大于 4.5 km 时,水龄随着回用流量的增加呈现逐渐降低的趋势,且尾水入河的位置为 10.5 km 时,水龄降低的趋势更为明显。当排放去向为吴淞江时,水龄随着回用流量的增加呈现逐渐降低的趋势,且尾水入河的位置为 1 km 时,水龄的下降趋势更为明显。由此可知,随着尾水回用的流量的增加,对夏驾河的水龄改善有较好的效果,但是在排放去向为太仓塘,尾水入河位置为距太仓塘 2 km 处时,水龄随着流量的增加基本无明显变化;尾水回用的位置越靠近河道尾部,对夏驾河水龄的改善越好。结果表明:随着回用流量的增加,水龄的改善率也逐渐提高;尾水入河位置越靠近河道尾部,夏驾河的整体水龄逐渐降低,尾水入河位置与水龄显著相关。

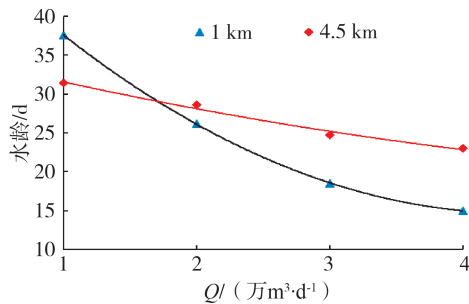
3.2 尾水回用流量与入河位置对调水经济的影响

调水经济成本 M 随着回用流量和污水厂距回用点的距离的增加而增加。一般情况下,管线铺设需 500 万元/km。调水的能源成本约 40 元/万 m^3 ^[11]。由图 5 可知,6 种不同情形下的最佳回用流量分别为 1 万 m^3 /d、2.4 万 m^3 /d、2.4 万 m^3 /d、2.5 万 m^3 /d、1 万 m^3 /d 和 3.4 万 m^3 /d,此时的最优化目标值分别为-2.55、-0.35、-0.4、-0.21、-0.44 和-2.01。

注: R^2 越接近 1,表明方案越可靠; $P < 0.05$,表明具有显著相关性。

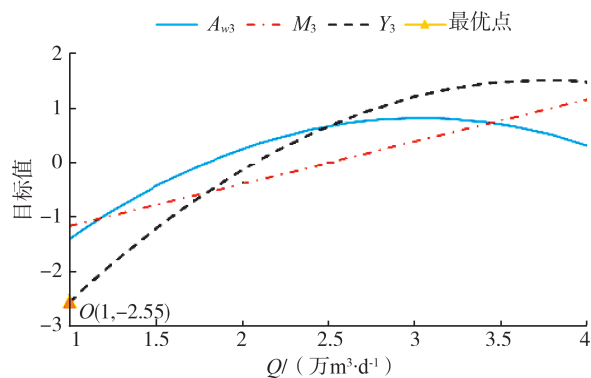


(a) 排放去向为太仓塘

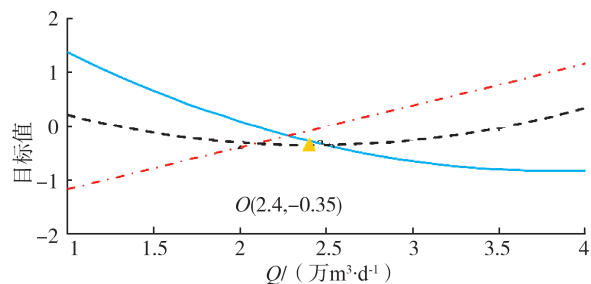


(b) 排放去向为吴淞江

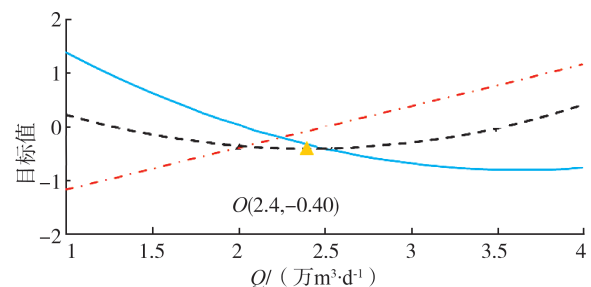
图4 排放去向为太仓塘、吴淞江的水龄流量函数



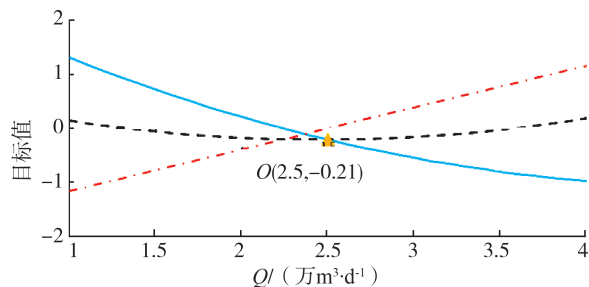
(a) 距太仓塘 2 km, 向太仓塘排水



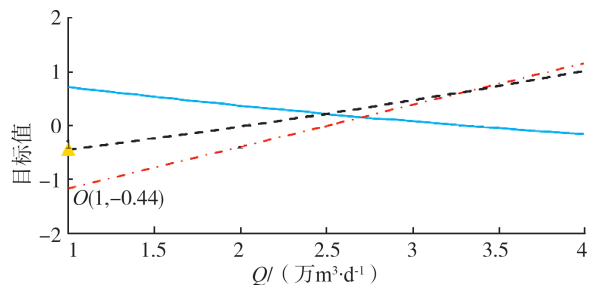
(b) 距太仓塘 4.5 km, 向太仓塘排水



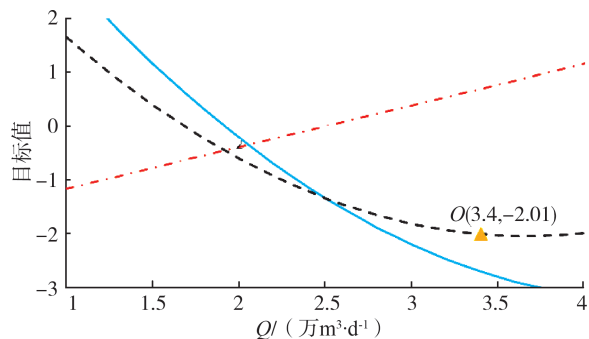
(c) 距太仓塘 7 km, 向太仓塘排水



(d) 距太仓塘 10.5 km, 向太仓塘排水



(e) 距太仓塘 1 km, 向吴淞江排水



(f) 距太仓塘 4.5 km, 向吴淞江排水

图5 排放去向为太仓塘和吴淞江的成本与流量的目标函数分布

通过对比以上 6 种回用方案的最优值可知,出水口选为距太仓塘 2 km 处,排水方向为太仓塘,回用流量为 1 万 m^3/d 时,最优函数的目标值最低为 -2.55。出水口选为距太仓塘 4.5 km 处,排水方向为吴淞江,回用流量为 3.4 万 m^3/d 时,最优函数目标值次之,为 -2.01。通过比较可知,虽然第一种方案投入少但是河道水体整体改善程度不高,第二种方案更优,因此选择第 2 种方案作为最优方案。最佳回用方案为出水口选为距太仓塘 4.5 km 处,排水方向为吴淞江,回用流量为 3.4 万 m^3/d 时,夏驾河全湖的平均水龄为 16.66 d,经济成本为 40.43 万元。

4 结 论

a. 采用 EFDC 模型模拟了不同方案下夏驾河水龄时空分布,根据回用流量、回用位置及经济成本与换水周期的关系构建目标函数,探讨出蓬朗污水处理厂尾水回用于夏驾河景观河道的最优化方案,为尾水回用工程的优化建设提供了一种新的思路。

(下转第 91 页)

干扰物 17 β -雌二醇[J]. 环境科学,2007,28(1):120-125. (LI Qingsong,GAO Naiyun,MA Xiaoyan,et al. Photocatalytic endocrine disruptor 17 β -estradiol(E2) in drinking water by nanotitanium suspended system [J]. Environmental Science, 2007,28(1):120-125. (in Chinese))

[10] 程玉红,周婷,何璇,等. 纳米锐钛矿 TiO₂及负载金催化剂的制备与催化性能[J]. 材料导报 B,2012,26(7):25-28. (CHENG Yuhong, ZHOU Ting, HE Xuan, et al. Preparation and catalytic performance of nano-anatase titania and supported gold catalysts[J]. Materials Review B,2012,26(7):25-285. (in Chinese))

[11] ALHAKIMI G,STUDNICKI L H,AL G M. Photocatalytic destruction of potassium hydrogen phthalate using TiO₂ and sunlight [J]. Photochemical Photobiology A,2003,

154(2/3):219-228.

[12] 花朵,施春红,袁蓉芳,等. 金属掺杂对纳米管 TiO₂光催化性能的影响[J]. 功能材料,2013,21(44):3163-3167. (HUA Duo,SHI Chunhong,YUAN Rongfang,et al. Effect of metal ion-doping on photo catalytic activity of TiO₂ nanotubes[J]. Journal of Functional Materials,2013,21(44):3163-3167. (in Chinese))

[13] 彭峰,任艳群. TiO₂-SnO₂ 复合纳米膜的制备及其光催化降解甲苯的活性[J]. 催化学报,2003,24(4):243-247. (PENG Feng, REN Yanqun. Preparation of nano-TiO₂-SnO₂ composite film and its photocatalytic activity for toluene degradation [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2003,24(4):243-247. (in Chinese))

(收稿日期:2016-11-28 编辑:王 芳)

(上接第 78 页)

- b.** 入河排污口位置建议尽量设在河道底部,以提高河道水体的交换能力。
- c.** 尾水回用的流量越大,平均水龄相应的就越小,随之的经济成本就越高。

参考文献:

[1] 邢梦雅,徐慧,茹彪,等. 基于空间分析的城镇水系生态景观规划方法[J]. 水资源保护,2016,32(2):92-95. (XING Mengya, XU Hui, RU Biao, et al. Ecological landscape planning method for urban river system based on spatial analysis[J]. Water Resources Protection,2016,32(2):92-95. (in Chinese))

[2] 曹淑敏,陈莹. 我国非常规水源开发利用现状及存在问题[J]. 水利经济,2015,33(4):47-49. (CAO Shumin,et al. Utilization status and problems of non-conventional water resources in China [J]. Journal of Economic of Water Resource,2015,33(4):47-49. (in Chinese))

[3] 唐天均,杨晟,尹魁浩,等. 基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟[J]. 湖泊科学,2014,26(3):393-400. (TANG Tianjun, YANG Sheng, YIN Kuihao, et al. Simulation of eutrophication in Shenzhen reservoir based on EFDC model[J]. Journal of Lake Sciences,2014,26(3):393-400. (in Chinese))

[4] 刘建波,余扬晖,刘洁,等. 基于 EFDC 模型研究文昌清澜潮汐汊道人类活动对水交换速率的影响[J]. 热带海洋学报,2014,33(3):24-32. (LIU Jianbo, YU Yanghui, LIU Jie, et al. The impact of human activities on water exchange in the Qinglan tidal inlet system based on the EFDC model [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2014,33(3):24-32. (in Chinese))

[5] 刘岩,赵智杰. 前海湾填海区的水龄特征及改善措施模拟[J]. 环境科学与技术,2015,38(2):162-168. (LIU Yan,ZHAO Zhijie. Simulation of water age characteristics and improving measures in the sea filling region of Qianhai Bay [J]. Environmental Science & Technology,2015,38(2):162-168. (in Chinese))

[6] 郝文彬,唐春燕,滑磊. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(2):129-133. (HAO Wenbin,TANG Chunyan, HUA Lei. Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(2):129-133. (in Chinese))

[7] 李一平,滑磊,王沛芳,等. 河道型水库水动力特征与气候条件的响应关系[J]. 湖泊科学,2013,25(3):317-323. (LI Yiping, HUA Lei, WANG Peifang, et al. Responses of hydrodynamical characteristics to climate conditions in a channel-type reservoir [J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(3):317-323. (in Chinese))

[8] HAMRICK J M, WU T S. Computational design and optimization of the EFDC/HEM3D surface water hydrodynamic and eutrophication models[C]//Next generation environmental models and computational methods. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics,1997:143-161.

[9] 龚然,徐进,徐力刚,等. 基于 EFDC 城市景观湖泊水动力模拟研究[J]. 环境工程,2015,33(4):58-62. (GONG Ran,XU Jin,XU Ligang,et al. Study on hydrodynamics in urban landscape lake based on EFDC [J]. Environmental Engineering,2015,33(4):58-62. (in Chinese))

[10] 戚文,李一平,王莹,等. 基于 EFDC 模型的天镜湖水动力优化调控方案研究[J]. 水电能源科学,2015,33(4):58-62. (QI Wen, LI Yiping, WANG Ying, et al. Control and optimization scheme of Tianjing Lake hydrodynamics based on EFDC Mode [J]. Water Resources and Power,2015,33(4):58-62. (in Chinese))

[11] LI Y,TANG C,WANG C,et al. Improved Yangtze River diversions;are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu,China? [J]. Ecological Engineering,2013,51(1):104-116.

[12] DELLHEZ E J M, CAMPIN J M, HIRST A C, et al. Toward a general theory of the age in ocean modelling [J]. Ocean Modelling,1999,1(1):17-27.

(收稿日期:2017-04-19 编辑:徐 娟)