

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0059

周文琦,俞芳琴,韩璐遥,等.生态补水对城南河水质水量改善效果研究[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):151-157,191. ZHOU W Q, YU F Q, HAN L Y, et al. Study on the effect of ecological water supplement on water quality and quantity in Chengnan River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 151-157, 191. (in Chinese)

## 生态补水对城南河水质水量改善效果研究

周文琦<sup>1</sup>, 俞芳琴<sup>2</sup>, 韩璐遥<sup>3</sup>, 刘俊<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 南京市浦口区水务局, 南京 211800 ;  
3. 徐州市规划设计院, 江苏 徐州 221018)

**摘要:**为改善城市河道枯水期流量小、水位低、水动力不足、水质污染严重等情况,以南京市城南河为例,进行枯水期生态补水方案效果研究。通过综合考虑枯水期上下游及干支流水质状况,同时结合补水水量及补水方式(包括间断补水和持续补水)的差异性设置补水方案。论文建立了研究区域 MIKE11 水量水质耦合模型,模拟分析不同补水方案下污染物 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 削减率及流速分布变化,进而得出不同生态补水方案效果。结果表明:随着补水水量的增长,污染物浓度削减率的增幅先快后慢;间断补水方案优于持续补水方案;生态补水对污染物浓度的削减效果显著,对于水质较好和曲折连绵的河段的改善不明显;生态补水对流速分布的改善效果明显,但受到河道内建筑物的影响,需要综合考虑确定补水点。

**关键词:**城市河道;城南河;生态补水方案;MIKE11

中图分类号:TV85;X171.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Study on the effect of ecological water supplement on water quality and quantity in Chengnan River

ZHOU Wenqi<sup>1</sup>, YU Fangqin<sup>2</sup>, HAN Luyao<sup>3</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Pukou District Water Bureau, Nanjing 211800, China; 3. Xuzhou Planning and Design Institute, Xuzhou 221018, China)

**Abstract:** In order to improve the low discharge, low water level, insufficient hydrodynamic force and serious water pollution in urban rivers during the dry season, the effect of ecological water supplement schemes in the Chengnan River of Nanjing City was studied. By comprehensively considering the water quality conditions of the upstream and downstream, and the tributaries in the dry season, the water supplement scheme was set up according to the difference of water supplement quantity and mode (including intermittent water supplement and continuous water supplement). The coupling model of water quantity and quality of MIKE11 was established in the study area. The changes of pollutant COD, NH<sub>3</sub>-N, TP reduction rate and velocity distribution under different water supplement schemes were simulated and analyzed. The effect of different ecological water supplement schemes was obtained. The results showed that with the increase of water supplement, the concentration of pollutants decrease rate was fast and then slow. The intermittent water supplement scheme was better than the continuous water supplement scheme. Ecological water supplement had a significant effect on reducing pollutant concentration, but the improvement of the water quality in the long and tortuous river was not obvious. The effect of ecological water supplement on the improvement of the velocity distribution was obvious, but due to the influence the river structure, careful consideration needed to be made to determine the water supplement point.

收稿日期:2019-06-15 修回日期:2019-10-14 网络出版时间:2019-10-31

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20191031.1212.008.html>

基金项目:国家自然科学基金(41471015)

作者简介:周文琦(1996—),女,江苏南京人,主要从事城市水文方面研究。E-mail:1738694909@qq.com

通信作者:刘俊(1968—),男,安徽当涂人,教授,主要从事城市水文、工程水文方面研究。E-mail:ljhohai@163.com

**Key words:** urban river; Chengnan River; ecological water supplement scheme; MIKE11

城市河道枯水期水量较小,河道水动力、水体复氧和传质能力不足,水环境承载力低<sup>[1-3]</sup>。为维持水生态系统健康,改善水质,对河道进行生态补水至关重要<sup>[4-5]</sup>。目前关于城市生态补水的研究主要针对河道水质情况进行探讨,如胡广早等<sup>[6]</sup>对废黄河徐州区段的水源水质进行分析,缺乏对河道水动力的讨论。生态补水对于补水水量的确定,仅分析水质达标需求和防洪要求,如逢敏等<sup>[7]</sup>以南京市主城区防洪要求为限分析生态补水和控源截污对秦淮河水质的影响,未考虑补水水源的限制和补水对水质的改善效率。生态补水水源和补水点的探讨较为单一,如王雪等<sup>[8]</sup>基于控制断面水质达标的秃尾河流域总量控制,对于城市河道上下游干支流关系没有深入分析。针对上述研究存在的不足,本次研究以南京市城南河为例,运用 MIKE11 模型,综合分析生态补水对河道水质及流速的改善效果,设置不同补水方案,同时考虑不同补水水量及补水方式(包括间断补水和持续补水)对河道水质改善效率,进行生态补水效果研究,在此基础上结合河道上下游、干支流以及拦河建筑物的位置,合理选择补水点。

## 1 研究区概况

城南河位于南京市浦口区,参考城南河健康评价范围选定研究区,研究区面积为 81.6 km<sup>2</sup>。随着城市建设发展,周边生产、生活污水排入河道,造成研究区水质污染严重、水生态系统结构受损、水生态功能下降等问题。由于枯水期水量不足,河道水动力条件较差,导致河道自净能力受到制约,进一步加剧研究区水质恶化。

## 2 研究区水量水质耦合模型构建

综合研究区水文特征及水环境特性,选取 MIKE11 模型<sup>[9]</sup>,对研究区进行水量水质耦合模拟分析<sup>[10-13]</sup>。通过建立 Ecolab 模块与 HD 模块、AD 模块耦合模型,进行城南河生态补水措施水质改善效果研究。MIKE11 Ecolab 水质模块基于降解反应方程体现污染物之间的相互作用,可模拟大气富氧、有机物降解、与沉积物之间的交换、硝化与反硝化、磷的反应等。

河网概化以骨干河道为基础,共概化河流 8 条,包括干流城南河、支流雨山河、极乐河、护城河、芝麻河、南农河、东方红河及丰字河,对于计算区域内调

蓄作用较小的河道,作为调蓄水面处理。模型概化水工建筑物 1 个,为城南河干流中游处的橡胶坝。

污染源概化分为点源和面源,点源根据排污口的位置直接加入到概化的河网中,根据《浦口区江浦及桥林片区排水专项规划》,江浦片区污水量 25.71 万 m<sup>3</sup>/d。珠江污水处理厂现状设计规模为 8.0 万 m<sup>3</sup>/d,近期规划扩建至 12 万 m<sup>3</sup>/d。处理规模以外的部分以点源形式就近排入城南河及相应支流。面源概化主要借助 Load calculator 模块,根据浦口区统计局提供的 2016 年《人口年报汇总表》《浦口区 2016 年统计年鉴(农业)》得到未接入城市污水管网的城镇生活源、农村生活源、农田面源和畜禽源,按最短路径原则确定污染负荷入河段和负荷量,自动为 MIKE11 模型生成面源边界,并按完全混合模型进行计算。

模型计算的初始条件为枯水期水位,边界条件选择 2011 年枯水期的水位流量数据,极乐河和护城河为定流量边界,为 1 m<sup>3</sup>/s,雨山河、芝麻河、南农河、东方红河、丰字河为定水位边界,为 4.8 m,城南河下游为 2011 年枯水期长江潮位,见图 1。

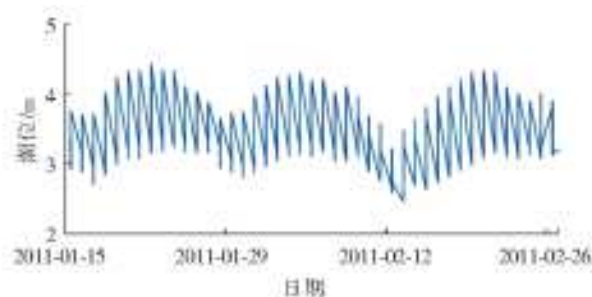


图 1 城南河下游枯水期潮位

Fig. 1 Tidal level in the lower reaches of Chengnan River during low water period

HD 模块水量水动力参数主要是河床糙率,取曼宁系数  $n$  为 0.03。以枯水期实测水质数据进行 Ecolab 模型率定,率定顺序为降解速率、大气复氧、产生和呼吸作用、硝化,其余常数均按照模型参数经验值并参考《Ecolab 水质模块(WQ)参考手册》选取。水质率定结果见表 1,其中误差为各断面污染物计算值与实测值的相对误差,以百分比计,除南农河 TP 和丰字河 TP,均在 12.5% 以内,率定结果显示各监测断面水质基本合理。而南农河和丰字河的 TP 浓度实测值本就偏低,以南农河 TP 为例,实测数据 0.02,即便绝对误差 0.01,相对误差也高达 50%。因此南农河 TP 和丰字河 TP 可考虑绝对误

差,绝对误差分别为 0.07 和 0.02,均小于 0.1,可认为率定结果基本合理。

表 1 各断面污染物计算值与实测值对比

Tab. 1 Comparisons between calculated and measured values of pollutants at different sections

断面	COD 浓度			NH <sub>3</sub> -N 浓度			TP 浓度		
	实测值/ (mg · L <sup>-1</sup> )	计算值/ (mg · L <sup>-1</sup> )	误差/ %	实测值/ (mg · L <sup>-1</sup> )	计算值/ (mg · L <sup>-1</sup> )	误差/ %	实测值/ (mg · L <sup>-1</sup> )	计算值/ (mg · L <sup>-1</sup> )	误差/ %
城南河	19.2	21.56	12.29	1.75	1.65	-5.71	0.14	0.14	0
芝麻河	35	34.49	-1.46	12.10	12.12	0.17	0.81	0.87	7.41
南农河	37.52	36.56	-2.56	3.65	4.03	10.41	0.02	0.09	350
东方红河	52.8	52.89	0.17	15.09	15.15	0.40	1.13	1.13	0
丰字河	32.4	30.85	-4.78	3.93	3.79	-3.56	0.05	0.07	40

### 3 生态补水方案设定

#### 3.1 补水水源选取

生态补水水源主要包括再生水<sup>[14-16]</sup>、雨水和江湖水库原水。由于水质较差,再生水的利用受到限制<sup>[17]</sup>;雨水补水存在水量不稳定、初雨污染<sup>[18]</sup>影响水质的问题。利用江湖水库的原水与河道水体补水均具有输水口径大、输水距离远、持续时间长、原水水质要求高的特点<sup>[19]</sup>,但也要考虑水库库容限制<sup>[20]</sup>、河湖枯水期水位、河道防洪冲淤的要求。

城南河主要补水水源为象山水库及浦口水厂原水。由于象山水库兴利库容不适合枯水期长期补水,因此补水水源选取浦口水厂原水。水厂原水即长江水,水量充足,水质稳定在 III 类水及以上,在近期 70%控源截污和水系连通的基础上进行水厂原水补水效果研究。

由于干流中游橡胶坝的阻隔,在上游补水对下游的改善效果有限,考虑本次模拟的监测断面,补水点设置在橡胶坝下游,支流与干流交汇口的上游,在补水点和水厂之间布设补水管。

#### 3.2 补水方案设定

水厂原水补水周期设置为 7 d。补水方案为间断补水和持续补水两种,间断补水方案为每天前 8 h 补水,后 16 h 停止补水,持续 7 d;持续补水方案即为 24 h 不间断补水,持续 7 d。从水厂现有供水规模 15 万 m<sup>3</sup>/d,考虑到近期改造后规模可达 25 万 m<sup>3</sup>/d,每天的可生态补水量约 10 万 m<sup>3</sup>。因此,设置了补水方案共 4 种,对照组为没有生态补水的近期 70%控源截污和水系连通的基础工况,见表 2。

### 4 生态补水效果分析

生态补水对城南河水质改善的效果主要从污染

表 2 水厂原水(长江水)补水方案

Tab. 2 Water replenishment plan for the raw water of the water plant (Yangtze River water)

补水类型	方案	补水时长/h	补水量 Q/(万 m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )
间断补水	1	8	5
	2	8	10
	3	8	15
持续补水	4	24	10

物浓度削减率和流速分布角度分析,污染物浓度削减率评价指标包含 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP,均为与现状实测值(表 2)对比所得;流速分布能够表征水体流动性,也是体现水质状况的重要方面,流动性好的水体自净能力强,水环境容量高<sup>[21-24]</sup>。

#### 4.1 方案效果比较

对照组以及各方案污染物浓度和污染物浓度削减率见表 3。生态补水对于总体水质类别分布的提升效果不大,污染物削减率随着每天补水水量的增加而提高,方案 3 污染物浓度削减率最高。

表 4 中支流南农河 TP 的污染物浓度削减率为负值,该方案污染物浓度值高于现状实测值。可以发现,由于该河道的 TP 实测值很低(表 1),一方面很小的计算数值变化会引起较大的削减率变化,而率定时南农河 TP 偏高,计算模拟的结果偏高,易出现负值的情况;另一方面,TP 浓度较低的南农河,在水系连通的基础条件下会受到整体水质影响,污染物浓度不降反增,城南河的 NH<sub>3</sub>-N 也表现出水系连通后受整体水质影响污染物浓度不易下降的情况。

为了比选方案,首先将生态补水方案的 8 h 补水方案 1 至方案 3 进行对比,方案 1 至方案 3 的差别在于每日的补水水量依次增大,从每天 5 万 m<sup>3</sup>、10 万 m<sup>3</sup> 到每天 15 万 m<sup>3</sup>。将各组分 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 的浓度削减率相较于前一个方案的增长画成柱状图,并且为了更清晰地展示变化情况,分别作出代

表 3 水厂补水方案各污染物浓度和污染物浓度削减率

Tab. 3 Pollutant concentration and reduction rate of water supplementary scheme in waterworks

河道断面	组分	对照组		方案 1		方案 2		方案 3		方案 4	
		浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	削减率/ %	浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	削减率/ %	浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	削减率/ %	浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	削减率/ %	浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	削减率/ %
城南河	COD	7.81	59.31	7.70	59.91	6.87	64.22	6.57	65.76	7.57	60.55
	NH <sub>3</sub> -N	1.77	-1.35	1.78	-1.86	1.75	-0.17	1.70	2.81	1.67	4.54
	TP	0.13	7.73	0.13	8.18	0.12	11.25	0.12	13.19	0.12	13.23
芝麻河	COD	18.23	47.91	18.94	45.89	17.52	49.94	17.10	51.14	18.12	48.23
	NH <sub>3</sub> -N	1.25	89.70	1.30	89.27	1.20	90.05	1.17	90.36	1.26	89.58
	TP	0.23	72.21	0.22	72.29	0.22	72.72	0.22	72.81	0.22	72.93
南农河	COD	17.80	52.56	18.07	51.84	15.96	57.47	15.26	59.34	18.16	51.61
	NH <sub>3</sub> -N	1.68	53.97	1.68	54.08	1.62	55.62	1.57	56.99	1.65	54.87
	TP	0.03	-33.73	0.03	-33.21	0.03	-30.67	0.03	-28.05	0.02	-24.05
东方红河	COD	21.54	59.21	21.08	60.07	19.18	63.67	18.62	64.73	20.73	60.73
	NH <sub>3</sub> -N	2.15	85.78	2.10	86.11	1.85	87.74	1.80	88.07	1.98	86.87
	TP	0.46	59.34	0.44	60.69	0.42	62.83	0.40	64.60	0.44	61.49
丰字河	COD	21.84	32.59	22.51	30.51	20.12	37.90	18.98	41.42	21.02	35.12
	NH <sub>3</sub> -N	1.67	57.51	1.78	54.76	1.60	59.29	1.57	60.05	1.62	58.78
	TP	0.01	71.81	0.01	71.94	0.01	72.24	0.01	72.78	0.01	72.93

表 4 方案 2 和方案 4 不同组分削减率对比

Tab. 4 Comparison of reduction rates of different components in scheme 2 and scheme 4

组分	河段	方案 2 削减率/%	方案 4 削减率/%	削减率 差值/%
COD	城南河	64.22	60.55	3.67
	东方红河	63.67	60.73	2.94
	丰字河	37.90	35.12	2.78
	南农河	57.47	51.61	5.86
	芝麻河	49.94	48.23	1.71
NH <sub>3</sub> -N	城南河	-0.17	4.54	-4.71
	东方红河	87.74	86.87	0.87
	丰字河	59.29	58.78	0.51
	南农河	55.62	54.87	0.75
	芝麻河	90.05	89.58	0.47
TP	城南河	11.25	13.23	-1.98
	东方红河	62.83	61.49	1.34
	丰字河	72.24	72.93	-0.69
	南农河	-30.67	-24.05	-6.62
	芝麻河	72.72	72.93	-0.21

表性河道的污染物浓度削减率随补水量增长的趋势线,选择 2 阶多项式,可以得到图 2。

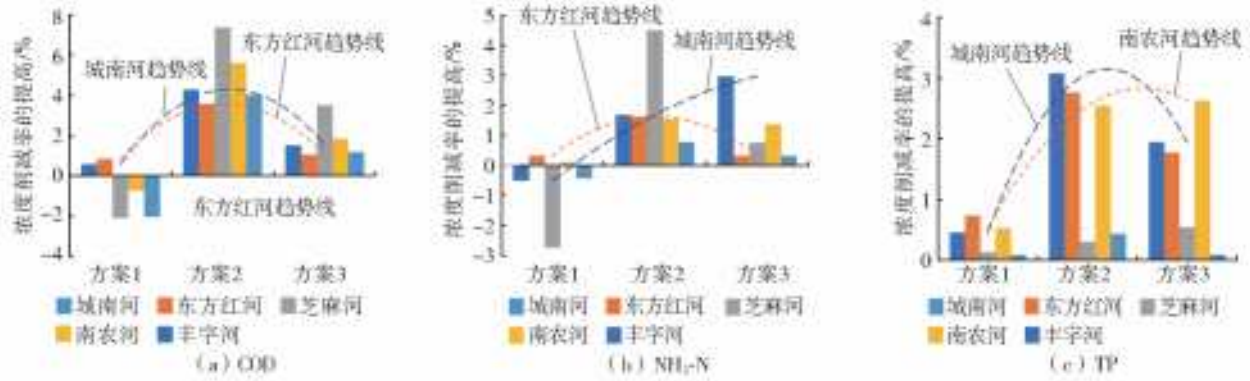
图 2(a)分别选取了干流城南河和支流代表东方红河在不同补水方案下 COD 浓度削减率的提高情况作趋势线,随着补水量的均匀增长,无论是干流还是支流,从补水 5 万 m<sup>3</sup> 到 10 万 m<sup>3</sup> COD 削减率

快速提高,从补水 10 万 m<sup>3</sup> 到 15 万 m<sup>3</sup> COD 削减率的缓慢提高。对于方案 1 补水 5 万 m<sup>3</sup> 出现部分河道的 COD 削减率负增长情况,考虑是补水量不足稀释作用不足,且对支流流入干流产生阻碍,导致部分水动力不足的河道对 COD 的削减率较方案 1 有所下降。

图 2(b)分别选取了干流城南河和支流代表东方红河在不同补水方案下 NH<sub>3</sub>-N 浓度削减率的提高情况作趋势线,随着补水量的均匀增长,补水 5 万 m<sup>3</sup> 到 15 万 m<sup>3</sup> 干流的 NH<sub>3</sub>-N 削减率呈线性提高;支流从补水 5 万 m<sup>3</sup> 到 10 万 m<sup>3</sup> NH<sub>3</sub>-N 削减率快速提高,从补水 10 万 m<sup>3</sup> 到 15 万 m<sup>3</sup> NH<sub>3</sub>-N 削减率缓慢提高。对于方案 1 补水 5 万 m<sup>3</sup> 出现部分河道的 NH<sub>3</sub>-N 削减率负增长情况,同 COD 情况类似,在此不做赘述。

图 2(c)分别选取了干流城南河和支流代表南农河在不同补水方案下 TP 浓度削减率的提高情况作趋势线,随着补水量的均匀增长,城南河、东方红河、芝麻河的增长情况相似,都是从补水 5 万 m<sup>3</sup> 到 10 万 m<sup>3</sup> TP 削减率快速提高,从补水 10 万 m<sup>3</sup> 到 15 万 m<sup>3</sup> TP 削减率缓慢提高;而南农河、丰字河都是从补水 5 万 m<sup>3</sup> 到 15 万 m<sup>3</sup> 干流的 TP 削减率稳步提高,但补水 10 万 m<sup>3</sup> 和 15 万 m<sup>3</sup> 的削减率增长差别并不大。

综上,由表 3 可以看出方案 3 污染物浓度削减

图2 间断补水方案 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 削减率的提高情况Fig. 2 Increase of COD, NH<sub>3</sub>-N, TP reduction rate of intermittent water supply scheme

率最高;由图2可以看出方案2单位补水量带来的污染物削减效果最大。尽管随着补水量的增加污染物浓度削减率也在提高,但本着生态和经济的原则,补水量并不是越大越好,因此在8 h补水的方案1至方案3中选择单位补水量带来的污染物浓度削减效果最大的方案2。

在每天补水10万 m<sup>3</sup>时,分析间断补水方案2和持续补水方案4的优劣,即8 h补水和24 h补水对于污染物浓度的削减效果,计算方案2和方案4之间的削减率差值,见表4。可以发现COD的削减率方案2高于方案4, NH<sub>3</sub>-N的削减率除南农河以外方案2均高于方案4, TP的削减率则呈现出除东方红河以外方案2均低于方案4的情况。可以发现间断补水方案对于COD和NH<sub>3</sub>-N的削减效果好,持续补水方案对于TP的削减效果好,由于城南河枯水期的主要超标污染物为NH<sub>3</sub>-N和COD,因此在每日补水总量相同的情况下,选择间断补水方案效果更好,即某一时间段内输入较大的水量再间隔一段时间不补水效果比较好,最终选择的水厂原水补水方式为每天补水8 h,日补水量10万 m<sup>3</sup>。

#### 4.2 最终方案效果分析

最终生态补水方案的推荐方案为方案2。将方案2和对照组污染物的削减率对比可得表5。生态补水对COD的改善效果除了芝麻河仅为2.03%,其余河道均为4%以上;对于NH<sub>3</sub>-N的改善情况,除了芝麻河仅为0.35%,其余河道均为1%以上;对TP的改善效果,除了芝麻河仅为0.51%,丰字河仅为0.43%,其余河道均在3%以上。可以发现,由于丰字河TP在基础工况下已得到较大改善,因此生态补水方案并不会给其带来明显的削减效果。芝麻河各组分削减率的提升都明显低于其他河道,是因为芝麻河相对于其他支流来说长度更长,河道更曲折,在干流城南河上的补水对于芝麻河的改善效果不如其他支流和干流城南河。

表5 方案2和对照组不同组分削减率对比

Tab. 5 Comparison of reduction rates of different components in scheme 2 and control group

组分	河段	方案2 削减率/%	对照组 削减率/%	削减率 差值/%
COD	城南河	64.22	59.31	4.91
	芝麻河	49.94	47.91	2.03
	南农河	57.47	52.56	4.91
	东方红河	63.67	59.21	4.46
	丰字河	37.90	32.59	5.31
NH <sub>3</sub> -N	城南河	-0.17	-1.35	1.18
	芝麻河	90.05	89.70	0.35
	南农河	55.62	53.97	1.65
	东方红河	87.74	85.78	1.96
	丰字河	59.29	57.51	1.78
TP	城南河	11.25	7.73	3.52
	芝麻河	72.72	72.21	0.51
	南农河	-30.67	-33.73	3.06
	东方红河	62.83	59.34	3.49
	丰字河	72.24	71.81	0.43

对照组和方案2研究区的流速分布见图3。对照组城南河橡胶坝上游河段流速普遍大于0.05 m/s。由于水库的存在,城南河橡胶坝上游河段的流速较大,另外极乐河上多处滚水坝使得极乐河流速分布不均匀,呈现一段一段的流速分布。由于城南河中游有橡胶坝阻隔,上游的水无法很好地补充到下游断面改善支流水质和流速,因此水厂原水补水的补水点选择橡胶坝下游比较合理。

生态补水最终方案2,城南河橡胶坝下游河段流速达0.05 m/s以上,下游四条支流流速有70%以上河段大于0.02 m/s,有30%以上河段大于0.05 m/s。相较于对照组,水厂原水补水有效增大了城南河橡胶坝下游以及下游四条支流的流速,但是上游支流雨山河的流速仍未有改善。生态补水对下游支流末端的流速改善情况不佳。

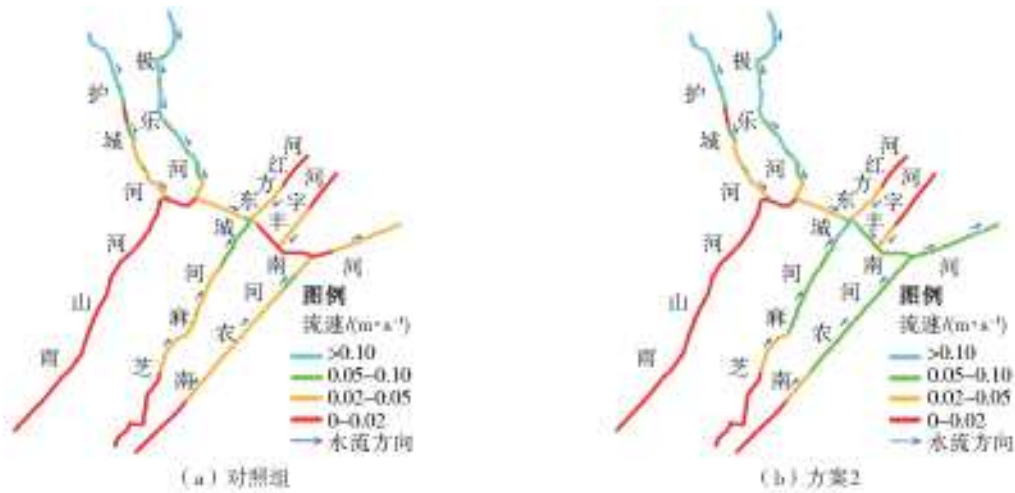


图 3 对照组和方案 2 流速分布

Fig. 3 Velocity distribution map of control group and scheme 2

## 5 结论与展望

城市地区枯水期河道水量小、水动力不足、水体自净能力低,以城南河为例,生态补水布局考虑到上下游和干支流;补水点考虑河道内建筑物,选择在橡胶坝下游进行补水。运用 MIKE11 建立水量水质耦合模型,水质评价选择 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP,主要研究成果如下。

(1) 补水方案不仅考虑了补水水量还考虑了补水方式,包括间断补水和连续补水,经模型计算和结果分析发现:随着补水量的增长,污染物浓度削减率的提高先快后慢,补水量为 10 万  $\text{m}^3$  时,单位补水量的水质提升效果最大。在日补水量相同的条件下,间断补水方案优于持续补水方案,即某一时间段内输入较大的水量再间隔一段时间不补水效果较好。

(2) 对河道进行生态补水可以提高水体流动性、改善水质。生态补水对污染物浓度的削减效果显著,对于水质较好和曲折连绵的河段的水质提升效果有限;生态补水对河道流速分布的改善明显,对于河道末端的流速改善效果有限。

有关城市河道生态补水的研究还可以在补水点方面进行延伸拓展,对最佳补水点精确位置的选择可以综合考虑整体补水效果和泵站管道建设,考虑在支流进行补水的情况。

### 参考文献(References):

[1] LU M, ZHOU J. An explorative study on landscape design of urban river channels based on ecological restoration [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 790: 429-432. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/amr. 790. 429.

- [2] 郑菲,程寒飞,杨运. 城市河道内生态需水分析及多水源生态补水——以深圳市为例[J]. *水利发展研究*, 2018, 18(10): 27-31. (ZHENG F, CHENG H F, YANG Y. Analysis of ecological water demand in urban rivers and ecological water replenishment with multiple water sources; a case study of Shenzhen [J]. *Water Resources Development Research*, 2018, 18(10): 27-31. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2018. 10. 007.
- [3] 梁丽珍. 城市河道生态治理及环境修复研究[J]. *环境与发展*, 2017, 29(5): 56-57. (LIANG L Z. Study on ecological regulation and environmental restoration of urban river [J]. *Environment and Development*, 2017, 29(5): 56-57. (in Chinese)) DOI: 10. 16647/j. cnki. cn15-1369/X. 2017. 05. 036.
- [4] 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. (ZHANG S J, ZHAO F, LUO T L, 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)) DOI: 10. 13278/j. cnki. jjuese. 2008. 05. 005.
- [5] 李玮,褚俊英,秦大庸,等. 基于补水配置情景的河流水质及环境容量研究——以汾河干流为例[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2012, 10(1): 9-16. (LI W, ZHU J Y, QIN D Y, et al. The simulation of water quality and water environment capacity of Fen river based on the scenarios of ecological water supplement [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research*, 2012, 10(1): 9-16. (in Chinese)) DOI: 10. 13244/j. cnki. jiwahr. 2012. 01. 004.
- [6] 胡广早,刘元胜. 废黄河徐州市区段生态补水回顾与展望[J]. *江苏环境科技*, 2006, 19(S2): 102-103. (HU G

- Z, LIU Y S. Review and prospect of ecological water compensation in Xuzhou urban section of past way of Yellow River[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2006, 19 (S2): 102-103. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-4829. 2006. z2. 039.
- [7] 逢敏, 逢勇, 宋为威, 等. 控源截污和生态补水对秦淮河水质的影响[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2018, 21(1): 73-78. (PANG M, PANG Y, SONG W W, et al. Effects of source control, pollution interception and ecological recharge on water quality of Qinhuai River [J]. *Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition)*, 2018, 21(1): 73-78. (in Chinese) DOI: 10. 19411/j. 1007-824x. 2018. 01. 016.
- [8] 王雪, 逢勇, 谢蓉蓉, 等. 基于控制断面水质达标的秃尾河流域总量控制[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(1): 123-130. (WANG X, PANG Y, XIE R R, et al. Total amount control of water quality standard at the control section in Tuwei River basin [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(1): 123-130. (in Chinese) DOI: 10. 11936/bjtxb2014040028.
- [9] DHI (Danish Hydraulic Institute), MIKE 11; a modeling system for rivers and channels-reference manual[R]. Copenhagen, B Denmark; DHI, 2012.
- [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 L Y, NIE Q Y, ZHOU Q, et al. Study of water quantity and water quality model of Bailianjing region based on MIKE 11 [J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(8): 21-24. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2011. 08. 007.
- [11] DOULGERIS C, GEORGIOU P, PAPADIMOS D, et al. Ecosystem approach to water resources management using the MIKE 11 modeling system in the Strymonas River and Lake Kerkini [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 94(1): 132-143. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2011. 06. 023.
- [12] 钱海平, 张海平, 于敏, 等. 平原感潮河网水环境模型研究[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(3): 61-65. (QIAN H P, ZHANG H P, YU M, et al. Water environment model for plain tidal river network [J]. *China Water and Wastewater*, 2013, 29(3): 61-65. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-4602. 2013. 03. 016.
- [13] 吴天蛟, 杨汉波, 李哲, 等. 基于 MIKE11 的三峡库区洪水演进模拟[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(2): 51-57. (WU T J, YANG H B, LI Z, et al. Modeling of flood routing for Three Gorges reservoir area based on MIKE11 [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(2): 51-57. (in Chinese) DOI: 10. 11660/slfdxb. 20140208.
- [14] 孟庆义, 吴晓辉, 赵立新, 等. 再生水回用于北京景观水体引起的水质变化及其改善措施[J]. *水资源保护*, 2011, 27(1): 51-54. (MENG Q Y, WU X H, ZHAO L X, et al. Water quality variations and improvement measures of reclaimed water reuse in scenic water in Beijing [J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(1): 51-54. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2011. 01. 012.
- [15] WEN Y, WANG Y H, LIU L. Countermeasures research and consideration on reclaimed water reuse in residential district [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 438-439: 1290-1293. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/amm. 438-439. 1290.
- [16] BURNS D. Sustainable water ecosystems management in Europe [J]. *Nextor Workshop Queenstown Maryland*, 2012, 45(21): 45-52.
- [17] 谭琴. 城市河道生态修复效果评价与改善措施研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (TAN Q. Ecological restoration effect assessment and improvement methods for the urban river [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese) DOI: CNKI:CDMD:2. 1018. 897769.
- [18] 张显忠. 合肥市老城区初期雨水污染调蓄工程方案[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(24): 10-13. (ZHANG X Z. Storage scheme for initial rainwater control in old urban area of Hefei City [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(24): 10-13. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-4602. 2012. 24. 003.
- [19] 王健, 黄东海, 梁侠津. 河道补水与城市原水系统集成设计[J]. *给水排水*, 2018, 44(6): 106-110. (WANG J, HUANG D H, LIANG X J. Integrated design of river recharge and urban raw water system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(6): 106-110. (in Chinese) DOI: 10. 13789/j. cnki. wwe1964. 2018. 0177.
- [20] 王嘉航, 杨启涛, 王萌, 等. 十三陵水库水资源状况分析及生态补水展望[J]. *中国水利*, 2018(7): 27-29, 7. (WANG J H, YANG Q T, WANG M, et al. Evaluation of water resources conditions in Ming Tombs reservoir and ecological recharge prospects [J]. *China Water Resources*, 2018(7): 27-29, 7. (in Chinese) DOI: CNKI:SUN:SLZG. 0. 2018-07-015.
- [21] 彭喜花, 于鹤鹏. 城市河道水体修复技术研究综述[J]. *环境保护与循环经济*, 2011, 31(2): 55-58. (PENG X H, YU H P. Summary of research on urban river water restoration technology [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2011, 31(2): 55-58. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-1021. 2011. 02. 018.

(下转第 191 页)

- 2015,34 (3):26-27. (in Chinese))
- [16] 唐献富. 沁河倒虹吸预应力混凝土结构分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008(4):34-35, 57. (TANG X F. Structural analysis of inverted siphon prestressed concrete in Qinhe River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008 (4):34-35, 57. (in Chinese))
- [17] 张晓雷, 朱玉祥, 孙东坡. 洪河倒虹吸交叉工程河段二维水沙数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(4):431-435. (ZHANG X L, ZHU Y X, SUN D P. Two-dimensional numerical simulation of water and sediment in the Honghe inverted siphon crossing project[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45 (4): 431-435. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; WSDD. 0. 2012-04-007.
- [18] 邵建国. 大体积混凝土施工技术分析和裂缝预防措施[J]. 安徽建筑, 2015, 22(3):69-70. (SHAO J G. Construction technology analysis of mass concrete and crack prevention measures[J]. Anhui Architecture, 2015, 22 (3): 69-70. (in Chinese)) DOI: 10. 16330/j. cnki. 1007-7359. 2015. 03. 031.
- [19] 苑晓明. 大型倒虹吸技术在施工中的应用及缺陷处理分析[J]. 交通标准化, 2008(14):33-36. (YUAN X M. Application of large inverted siphon technology in construction and defect treatment analysis[J]. Communications Standardization, 2008 (14): 33-36. (in Chinese)) DOI: 10. 3869/j. issn. 1002-4786. 2008. 12. 003.
- [20] FORRESTER W J. Industrial dynamics[J]. Journal of the Operational Research Society, 1997, 48(10): 1037-1041. DOI: 10. 1057/palgrave. jors. 2600946.
- [21] 王其藩. 系统动力学理论与方法的新进展[J]. 系统工程理论方法应用, 1995(2):6-12. (WANG Q F. New progress of system dynamics theory and method[J]. Application of system engineering theory and method, 1995(2):6-12. (in Chinese))
- [22] 钟永光, 钱颖, 于庆东, 等. 系统动力学在国内外的发展历程与未来发展方向[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2006(4):101-104, 0. (ZHONG Y G, QIAN Y, YU Q D, et al. The development course and future development direction of system dynamics at home and abroad[J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2006(4): 101-104, 0. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-6871. 2006. 04. 030.
- [23] 唐伟, 雷星晖, 李玲玲. 系统动力学在战略风险评价及控制中的适用性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(4):645-649. (TANG W, LEI X H, LI L L. Applicability of system dynamics in strategic risk assessment and control[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40 (4): 645-649. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-374x. 2012. 04. 025.

(上接第 157 页)

- [22] WHALEN P J, TOTH L A, KOEBEL J W, et al. Kissimmee river restoration: A case study[J]. Water science & technology, 2002, 45 (11): 55-62. DOI: 10. 1016/S0043-1354(01)00232-9.
- [23] 陈栋, 梁敏, 仇春光, 等. 基于水质模拟分析的生态补水方案研究[J]. 人民长江, 2018, 41 (S1): 34-37. (CHEN D, LIANG M, QIU C G, et al. Study on ecological water supply scheme based on water quality simulation analysis[J]. Yangtze River, 2018, 41 (S1): 34-37. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. S1. 008.
- [24] 过杰, 郭琦, 何文浩. 城市景观水生态修复方法研究进展与发展趋势[J]. 水资源开发与管理, 2017(3):42-44, 79. (GUO J, GUO Q, HE W H. Research progress and development trend of urban landscape water ecological restoration method [J]. Water Resources Development and Management, 2017(3): 42-44, 79. (in Chinese)) DOI: 10. 16616/j. cnki. 10-1326/TV. 2017. 03. 013.