

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.12.021

茅洲河流域再生水补水方案研究与实践

赵思远^{1,2}, 唐颖栋^{1,3}, 唐晓斌⁴, 周欣星¹, 遇光禄¹, 郑元格¹,
杨明轩¹, 张凤山¹, 周梅芳¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058; 3. 中国电建水环境治理工程研究中心, 广东 深圳 518102; 4. 深圳市宝安区水务局, 广东 深圳 518036)

摘要: “清水补给”是全面消除城市黑臭水体的重要技术手段之一。以深莞茅洲河流域为研究对象,通过多种方法论证再生水补水水量,综合考虑雨后面源污染等因素开展再生水补水方案优化研究,优化后的再生水补水方案对河道水质与换水频率改善效果显著,且雨后河道水质3 d内即可恢复达标。以茅洲河流域再生水补水工程为例,采取“补水规模论证+泵站管道冗余设计+雨后水质恢复”的技术思路,构建了总补水规模达 $150\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的全流域河道再生水补水时空多点动态调配系统,可为国内外类似城市高密度建成区雨源性河道再生水补水方案提供参考。

关键词: 茅洲河流域; 高密度建成区; 面源污染; 再生水补水; 清水补给; 雨后水质恢复; 时空多点动态调配系统

中图分类号: X321 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2024)12-0128-09

Research and Practice of Reclaimed Water Replenishment in Maozhou River Basin

ZHAO Si-yuan^{1,2}, TANG Ying-dong^{1,3}, TANG Xiao-bin⁴, ZHOU Xin-xing¹,
YU Guang-lu¹, ZHENG Yuan-ge¹, YANG Ming-xuan¹, ZHANG Feng-shan¹,
ZHOU Mei-fang¹

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;
2. College of Environmental & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3. PowerChina Water Environment Treatment Engineering Research Center, Shenzhen 518102, China; 4. Water Authority of Bao'an District, Shenzhen Municipality, Shenzhen 518036, China)

Abstract: “Clear water replenishment” is an important technical means to comprehensively eliminate black and odorous water bodies in cities. Taking the Maozhou River basin in Shenzhen and Dongguan as the research object, the amount of reclaimed water replenishment was demonstrated by multi-methods. Then reclaimed water replenishment scheme was optimized considering the non-point source pollution after rainfall, which had a significant effect on improving the water quality and water exchange frequency of the river channel, and the water quality could be restored to the standard within 3 days after rain. Taking the reclaimed water replenishment project with a total scale of $150\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ in

基金项目: 国家重点研发计划“战略国际科技创新合作”重点专项(SQ2018YFE020049)

通信作者: 唐颖栋 E-mail: tang_yd2@hdec.com

Maozhou River basin as an example and adopting the design idea of “water replenishment scale demonstration+pump station pipeline redundancy design + water quality recovery after rain”, a temporal-spatial multi-point dynamic allocation system in the whole basin was constructed, which could provide reference for similar reclaimed water replenishment to rain-source river in high-density built-up areas at home and abroad.

Key words: Maozhou River basin; high-density built-up area; non-point source pollution; reclaimed water replenishment; clear water replenishment; water quality recovery after rainfall; temporal-spatial multi-point dynamic allocation system

城市水体黑臭成因复杂、影响因素众多,已成为直接影响居民生产生活与城市可持续发展的突出水环境问题。城市黑臭水体整治已经成为各级人民政府改善城市人居环境工作的重要内容。住房和城乡建设部发布的《城市黑臭水体整治工作指南》提出,“清水补给”作为关键技术,可通过补充城市缺水水体水量,改善水体水动力条件,提高流域自净能力。

再生水作为城市重要潜在水资源,已被广泛用于工业用水、景观用水、农业灌溉、地下水补给等^[1]。以污水处理厂尾水作为再生水补给河道在国内外均有许多应用案例。美国作为较早利用再生水进行生态补水的国家,大量再生水被回用作公园景观和城市河道的补水^[2]。1980年初东京便开始利用Tamajyo污水处理厂再生水补给Nobidome河,随后15年间,日本利用再生水补给河道多达150条^[3]。韩国首尔利用汉江水及污水厂再生水补水,保障清溪川一年四季流水不断^[4]。在国内北京^[5]、太原^[6]、宁波^[7]等地也有应用再生水对河道补水改善城市河流污染问题的案例。然而,目前国内外再生水补水规模普遍在百万吨级以下,尚无以流域为单位、百万吨级的大规模水质净化厂再生水应用案例;另外,再生水补水工程一般采用无时空调配模式,在各支流分配流量时采用固定流量形式。

深莞茅洲河曾是珠三角地区乃至全国污染最为严重的河流之一,其河道水体黑臭严重。2016年起,随着水环境综合整治工程的逐级推进,该流域水环境质量得到大幅改善^[8],但是河道水量不足的问题越发明显,水量无法保障致使河道无法构建生态群落,无法形成生态链条,丧失了自净功能。在铁腕治污的同时,开展“寻水溯源”,以提高茅洲河流域水体自净修复能力,消除黑臭水体,保障河道

水质达标。

以深莞茅洲河流域为研究对象,开展再生水补水水量论证及补水方案优化研究,结合茅洲河流域再生水补水设计实践案例,以期为国内类似城市高密度建成区雨源性河道再生水补水方案提供科学依据与实践参考。

1 研究区概况

茅洲河是深圳第一大河,发源于羊台山北麓,地跨深圳、东莞两市,在沙井民主村汇入伶仃洋。茅洲河流域面积388 km²,其中深圳侧占77.5%、东莞侧占22.5%。茅洲河干流全长41.6 km,其中塘下涌—河口的12 km河段为深圳与东莞的界河,界河段右岸为东莞市长安镇,左侧为深圳市宝安区。茅洲河流域多年平均降雨量为1 630 mm,降雨年际变化较大,年内分布极不均匀,超过85%以上的降雨量集中分布于汛期(4月—9月),且多以短时强降雨形式出现。

茅洲河属典型的雨源性河流,上游湖(库)均设有大坝拦截,河道水量无法持续稳定得到保障,旱季生态基流匮乏严重。该流域内人口密度高、工业企业众多,具有高密度建成区的典型特征。近年来,深圳市的管网建设工作趋于完善,基本消除“偷排、漏排”等点源污染现象,污水收集率持续稳步提升,然而,城市地表径流面源污染始终持续威胁河道水环境生态健康。

茅洲河流域内共建有6座污水处理(水质净化)厂,其规模及水质情况如表1所示。

流域内可用于河道补水的再生水规模达到150×10⁴ m³/d,设计出水水质标准均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准Ⅳ类水标准,基本满足深圳经济特区技术规范《再生水、雨水利用水质规范》(SZJG 32—2010)要求。

表 1 茅洲河流域污水处理厂概况

Tab.1 Statistics of sewage treatment plants in Maozhou River basin

地区	污水处理厂名称		规模/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)		出水标准		设计氨氮浓度/(mg·L ⁻¹)				进、出水浓度 差/(mg·L ⁻¹)		负荷削减量/ (t·d ⁻¹)	
			2017 年	2020 年			进水		出水					
					2017 年	2020 年	2017 年	2020 年	2017 年	2020 年	2017 年	2020 年		
深圳 宝安区	沙井污水处理厂	一期	15	15	一级 A	地表水准Ⅳ类	40	43	5	1.5	35	41.5	5.25	6.23
		二期	35	35	一级 A	地表水准Ⅳ类	40	43	5	1.5	35	41.5	12.25	14.53
	松岗水质净化厂	一期	15	15	一级 A	地表水准Ⅳ类	35	38	5	1.5	30	36.5	4.50	5.48
		二期	15	15	一级 A	地表水准Ⅳ类	35	38	5	1.5	30	36.5	4.50	5.48
深圳 光明 区	光明污水处理厂	一期	15	15	一级 A	地表水准Ⅳ类	25	28	5	1.5	20	26.5	3.00	3.98
		二期		10		地表水准Ⅳ类		28		1.5		26.5		2.65
	公明污水处理厂	一期	10	10	一级 A	地表水准Ⅳ类	30	33	5	1.5	25	31.5	2.50	3.15
		二期		5		地表水准Ⅳ类		33		1.5		31.5		1.58
东莞	三洲水质净化厂		15	15	一级 A	地表水准Ⅳ类	38	41	5	1.5	33	39.5	4.95	5.93
长安区	长安新区污水处理厂		20	20	一级 A	地表水准Ⅳ类	30	33	5	1.5	25	31.5	5.00	6.30
注： ①负荷削减量数据为旱季的污染负荷削减量，雨季需考虑 1.2 的放大系数； ②出水标准中一级 A 为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 排放标准，地表水准Ⅳ类标准参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。														

2 再生水补水量及效果预测

2.1 河道再生水补水量估算

2.1.1 生态基流量

生态治河的目的之一在于逐步修复河流生态系统，并使其健康运行，而其中最重要的是生态需水量。生态基流量是指为维系和保护河流的最基本生态功能不受破坏而必须在河道内保留的最小水量。

国内河道生态需水量预测的常用方法主要有蒙大拿法、R2CROSS 法、湿周法等，结合深圳市特点，以蒙大拿法作为生态需水量预测方法。蒙大拿法是应用较多的计算河道生态环境需水量的综合方法，该方法是脱离特定用途的综合性计算方法，属非现场测定类型的标准设定法^[9]。

根据生态环境和水文条件特点，在分析历史流量记录的基础上，取天然年径流量的百分比作为河流生态环境需水量。依据《河湖生态环境需水计算规范》(SL/T 712—2021)规定(见表 2)，水资源短缺、用水紧张地区河流宜在“良好”分级以下取值，水资源较丰沛地区河流宜在“很好”分级以下取值。考虑该流域河流面临较严峻的水资源问题，采用“良好”等级对应流量占比计算生态基流量，即选取多年平均径流量的 20% 和 40% 分别作为非汛期和汛期的生态基流量。

表 2 河道内不同生态状况对应的多年平均天然流量占比

Tab.2 Percentage of annual average natural flow corresponding to different ecological conditions in the river channel %

不同流量百分比对应河道内生态状况	对应天然流量占比	
	年内水量较枯时段 (非汛期)	年内水量较丰时段 (汛期)
最佳	60~100	
优秀	40	60
很好	30	50
良好	20	40
一般或较差	10	30
差或最小	10	10
极差	0~10	0~10

2.1.2 景观需水量

城市河流作为重要空间资源，其经济用水功能(生产、生活供水等)正逐渐削弱，而休闲、景观等功能日益增强。景观需水量是指河流为满足美化环境功能等景观视觉效果而需维持某一水位所需的水量。综合考虑潮汐、比降、河流与建成区的关系等确定河流景观河道分段及长度、宽度和水深，各河道景观需水量的计算见下式：

$$Q_L = L \times F \times H \times 10^{-4} / C$$
 (1)

式中： Q_L 为景观需水量，10⁴m³/d； L 为景观河段长度，m； F 为景观河段宽度，m； H 为景观河段水深，m； C 为换水周期，d。

依据《深圳市河道补水设施规划》，深圳市城市

休憩型河道拦蓄水深取 0.7~1.0 m,产业服务型河道取 0.5~0.7 m;以再生水或海水补水时,换水周期取 2 d,以水库水、雨水等水源补水的河道,换水周期取 5 d,若有两种以上水源时,则取大值。结合研究区河道特性,为维持河流水质与景观,景观河段水深取 0.7 m,换水周期取 2 d。由于支流最终将汇入干流,供给支流的再生水即为供给干流的再生水,因此对茅洲河支流供给的量同时考虑在干流补给量内。各规划用地性质平均用水标准及污水排放系数见表 3。

表 3 各规划用地性质平均用水标准及污水排放系数
Tab.3 Average water consumption standard and sewage discharge coefficient of each type of planned land

序号	项目	用水标准/ (m ³ ·hm ⁻² ·d ⁻¹)		污水排放 系数/%
		取值范围	本文 取值	
1	居住用地	90~180	120	90
2	工业用地	80~160	120	85
3	商业服务等公共设施用地	110~330	150	70
4	政府社团用地	60~120	80	70
5	市政公共设施用地	25~50	40	70
6	绿地及市政道路广场用地	20	20	0
7	发展备用地	100~150	110	70
8	特殊用地	10	10	70
9	公共管理和服务设施用地	25~50	40	70
注: 各类建设用地用水及污水排放标准参考《城市给水工程规划规范》,根据《深圳市城市规划标准与准则》(2014 版)关于用水标准的规定,结合工程范围内的实际情况及控制性详细规划确定。				

2.1.3 河流水质达标需水量

河流水质达标需水量以河道水质恢复为目标,综合考虑补水水质、河道水质及入河污染负荷而确定。该方法假设漏排污水、再生水补水与原河道水质仅发生物理混合、稀释作用,忽略生化降解过程。根据工程目标要求,确定河道水质预期目标为地表水 V 类标准,并以氨氮、COD 为代表性指标,采用稀释法估算所需补水量,具体计算公式如下:

$$Q_r = \frac{(A_2 - A_3) \times Q_{sew} \times \alpha}{A_3 - A_1} \tag{2}$$

$$Q_{sew} = \sum S_i \times t_i \times \varphi_i / 10\,000 \tag{3}$$

式中:Q_r为河流达标需水量,10⁴ m³/d;A₁为再生水补水水质,mg/L,取地表水 IV 类标准(氨氮、COD 分别为 1.5、30.0 mg/L);A₂为漏排污水水质,mg/L;A₃为河道目标水质,mg/L,取地表水 V 类标准(氨氮、

COD 分别为 2.0、40.0 mg/L);α 为漏排污水率,%;Q_{sew} 为污水产生量,10⁴ m³/d,各河道污水产生量根据各小流域内单位建设用地用水量指标法预测;S_i 为各小流域内第 i 种建设用地占地面积,hm²;t_i 为第 i 种建设用地类型相对应的用水标准,m³/(hm²·d);φ_i 为第 i 种建设用地类型对应的污水排放系数,%。

根据北京、杭州等地已经实施的流域水环境综合整治工程经验,片区雨污分流工程建成后,仍将存在局部地区污水难以收集、雨污水管道错接等情况,导致污水漏排入河流水体,漏排量一般为污水量的 5%~15%。该区域各支流污水旱季漏排率根据片区内雨污分流设计实施率,综合考虑城市规划、现状暗渠覆盖率以及现场实际情况后确定。

2.1.4 河道补水量

根据上述 3 种计算方法可知,茅洲河流域(宝安片区)以水质达标稀释法计算得到的再生水需水量最大,但该片区内污水处理厂(松岗水质净化厂、沙井污水处理厂)处理规模远远不能满足水质达标所需的水量要求。因此,选择各河道漏排污水量为权重,对两座污水处理厂共 80×10⁴ m³/d 的再生水量进行分配,确定河道补水量,结果如表 4 所示。

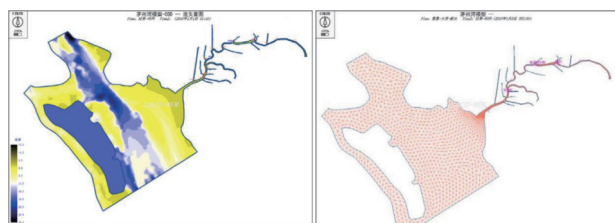
表 4 河道再生水补水量
Tab.4 Volume estimation of reclaimed water for river replenishment 10⁴ m³·d⁻¹

项目	平均 径流 量	生态基 流量		景观 需水 量	河流达标需水量				河道 补水量
		枯期	汛期		污水 产生 量	漏排 污水 量	补水量 (以 NH ₃ -N 计)	补水量 (以 COD 计)	
罗田水	6.25	1.25	2.50	3.74	3.71	0.30	13.66	6.54	6.45
龟岭东水	0.75	0.15	0.30	0.93	1.25	0.12	5.74	2.75	2.71
老虎坑水	0.95	0.19	0.38	0.65	0.43	0.04	1.97	0.94	0.93
塘下涌	1.25	0.25	0.50	1.40	1.61	0.19	8.88	4.25	4.19
沙埔西 排洪渠	0.40	0.08	0.16	0.70	3.94	0.20	9.07	4.34	4.28
松岗河	3.25	0.65	1.30	9.00	6.58	0.53	24.21	11.58	11.43
沙井河	6.55	1.31	2.62	12.60	3.68	0.29	13.53	6.47	6.47
潭头河	1.10	0.22	0.44	1.00	2.22	0.22	10.22	4.89	4.89
潭头渠	0.70	0.12	0.24	0.70	0.42	0.04	1.93	0.92	0.92
七支渠	0.28	0.07	0.14	0.28	1.14	0.09	4.18	2.20	2.00
共和涌	0.50	0.05	0.10	0.50	0.88	0.09	4.06	1.94	1.94
排涝河	2.91	1.45	2.90	2.91	3.93	0.39	18.07	8.64	8.64
新桥河	4.77	0.77	1.54	4.77	3.66	0.37	16.82	9.10	8.04
上寮河	3.78	0.58	1.16	3.78	6.01	0.48	22.11	11.58	10.57
万丰河	1.60	0.10	0.20	1.60	1.39	0.11	5.10	2.44	2.44
衙边涌	0.65	0.11	0.22	0.65	1.86	0.19	8.54	4.09	4.08

可以发现,最终补水量成果与以COD为代表性指标的河流水质达标需水量成果较为一致,说明此河道补水量估算成果具有科学性。

2.2 补水效果分析

通过构建茅洲河流域CJK3D模型(见图1),对茅洲河干流以及沙井河、排涝河等主要支流的水动力水质过程进行模型模拟研究,根据河道补水量估算结果,对比分析再生水补水前后的河道水质改善情况。



a. 模拟范围

b. 计算单元

图1 茅洲河流域CJK3D模型模拟范围与计算单元划分

Fig.1 CJK3D model simulation range and calculation unit division of Maozhou River basin

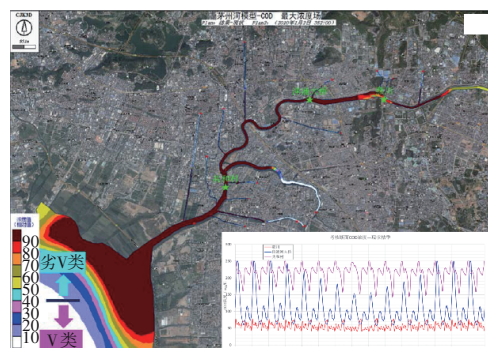
模型模拟北侧边界至仙脚屋、南沙,南侧边界至正强码头,西侧边界至罗天水上游6 km处,结合茅洲河流域片区和干支流汇入关系,按不利条件对流域水环境进行概化。上游控制断面来水暂不计河道天然径流,来水水质按地表水V类标准的边界条件考虑。选择燕川、洋涌河大桥和共和村3个断面作为考核断面进行模拟分析。

河道再生水补水前后研究区河道COD分布模拟结果如图2所示。

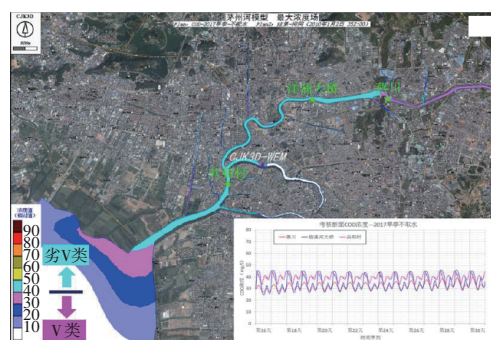
由图2(a)可知,在河道再生水补水前(现状)各考核断面的COD均超过地表水V类标准,其中燕川考核断面由于有污水处理厂尾水汇入,其COD浓度最低,最高COD仅为79.38 mg/L,且波动最小,这是由于燕川属于较上游的考核断面,受涨落潮的影响最小。处于最下游的共和村断面COD浓度最高,随着涨落潮在150~250 mg/L之间波动。洋涌河大桥断面受涨落潮的影响最大,这可能是由于涨潮时该断面上游支流(塘下涌)汇入,河口内部水体交换缓慢,污染物扩散受阻所致,而在落潮时,随着污染物被迅速带到下游,COD降至约60 mg/L。

根据河道补水水量估算结果,对河道再生水补水后水质变化情况进行模拟分析发现,茅洲河水质有了显著提升。由图2(b)可知,燕川断面COD基本

达标;而洋涌大桥、共和村断面仅在落潮时基本达标,涨潮时COD仍达不到地表水V类标准(40 mg/L),峰值约为45 mg/L。



a. 补水前COD分布



b. 补水后COD分布

图2 再生水补水前后茅洲河流域河道COD分布

Fig.2 Distribution of COD concentration in the river of the Maozhou River basin before and after replenishment of reclaimed water

图3(a)展示了河道再生水补水前(现状)各考核断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的分布情况。可以发现,各考核断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均超标,燕川考核断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度最低,洋涌大桥、共和村断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度相近,均接近30 mg/L。河道再生水补水后 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分布如图3(b)所示。再生水补水后,燕川断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度已基本达到地表水V类标准(2.0 mg/L),仅在涨潮时略高于地表水V类指标(2.1 mg/L);而洋涌河大桥和共和村断面仍难以达标,最高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为2.8 mg/L,其中位于最下游的共和村断面在落潮时也难以达标。

通过再生水补水量估算与模型模拟结果可知,河道再生水补水工程对河道水质改善具有显著效果,各河道的换水频率将明显增大,河道水位会相应提高。然而,该方案仍无法实现河道水质持续达标。

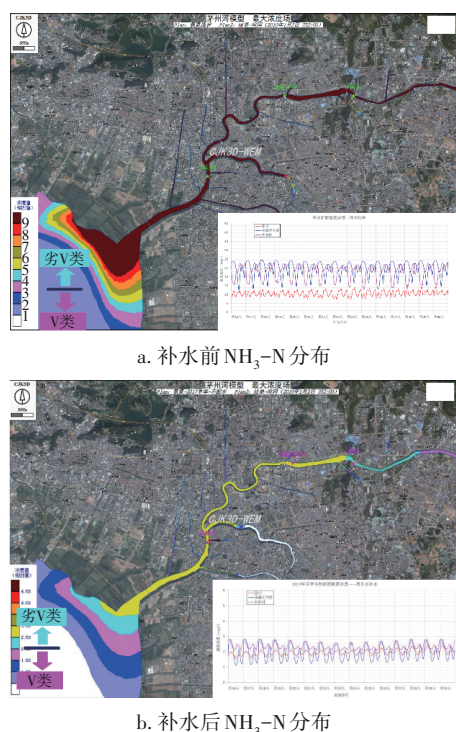


图3 再生水补水前后茅洲河流域河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分布
Fig.3 Distribution of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in the river of the Maozhou River basin before and after replenishment of reclaimed water

3 再生水补水方案优化研究

3.1 旱、雨季河道水质对比

为进一步优化河道再生水补水方案,选择2019年旱季(10月—次年3月)、雨季(4月—9月)各河道平均 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度进行对比,结果如图4所示。

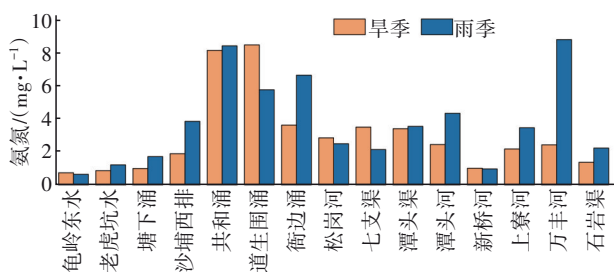


图4 2019年研究区各河道旱、雨季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度
Fig.4 Average of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in dry and rainy seasons of each river in the study area in 2019

由图4可知,各河道水质差异较为显著,且大部分河道在雨季出现明显恶化。茅洲河流域属典型高密度建成区,雨季短时强降雨频发,雨水径流污染持续危害河道水质健康^[10]。茅洲河上阶段再生水补水方案以稀释河道污染物漏排为主要目标,忽略了雨后大量面源污染冲刷入河所带来的污染负

荷。各支流之间的旱、雨季污染差异明显,表明开展以雨后水质恢复为目标的再生水补水方案优化研究,制定旱、雨季差异化的再生水补水方案,有助于进一步提升再生水补水对河道水质的改善效果。

3.2 构建茅洲河流域水质-水动力模型

采用SWMM+MIKE11耦合模拟,综合SWMM在面源污染模拟方面的优势与MIKE11在河网水质模拟方面的优势,构建茅洲河流域水质-水动力模型,将SWMM计算得到的排口流量和浓度作为MIKE11的输入边界,有效实现对感潮河段有闸控制情况下的河道水质模拟。茅洲河流域水质-水动力模型率定结果^[11]如图5所示,水位、水质的Nash系数分别达到0.99和0.73,说明该模型能够较好地模拟茅洲河流域水动力及水质变化情况。

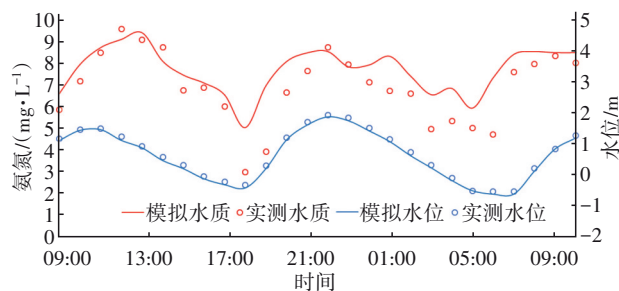


图5 茅洲河流域水质-水动力模型率定结果
Fig.5 Calibration results of water quality-hydrodynamic model in Maozhou River basin

3.3 考虑雨水面源污染的再生水补水方案优化

为探究不同降雨情景下再生水补水对雨后水质恢复的影响,分别选择典型小雨(8.8 mm)、中雨(17.6 mm)、大雨(43.3 mm)事件,在考虑雨水径流面源污染情况下,开展降雨期间、原补水方案(见表4)、优化补水方案3种工况的模型模拟研究。

小雨情景下各河道降雨期间及以原补水方案补水后 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分布如图6(a)、(b)所示。小雨期间污染物入河量较大,导致多数支流河道水质不能达到地表水V类标准。采用原补水方案,雨后补水1 d后,仍有少部分支流河道水质不能达标,主要包括塘下涌、松岗河、石岩渠、七支渠、万丰河,说明原补水方案不能保障雨后河道水质的正常恢复。基于模型模拟结果及实际工程现状,对原补水方案提出如下优化方案:松岗河、石岩渠增大补水规模,增加量分别为0.43、0.35 m^3/s ;塘下涌、七支渠和万丰河补水点优化至相应河道上游起点处。该优化补水

方案的模型模拟结果如图6(c)所示,小雨情景下以优化方案开展河道再生水补水0.5 d后,流域内各河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 即可达标。

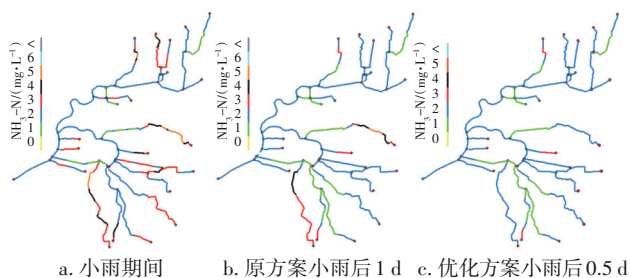


图6 小雨情景下各河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分布

Fig.6 Distribution of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in each river channel during the light rain scenario

中雨、大雨情景下各工况河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分布分别如图7、8所示。可以发现,降雨期间河道水质恶化严重,且有随降雨强度增加而增加的趋势。若以原补水方案补水,雨后2、3 d流域内各河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 尚无法完全达标,超标河流仍以塘下涌、松岗河、石岩渠、七支渠、万丰河等为主。若以优化补水方案进行雨后补水(同上述小雨情景优化方案),雨后2、3 d流域内各河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均能达到地表水V类标准。

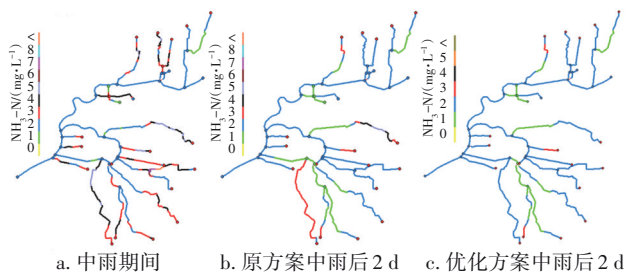


图7 中雨情景下各河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分布

Fig.7 Distribution of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in each river channel during the moderate rain scenario

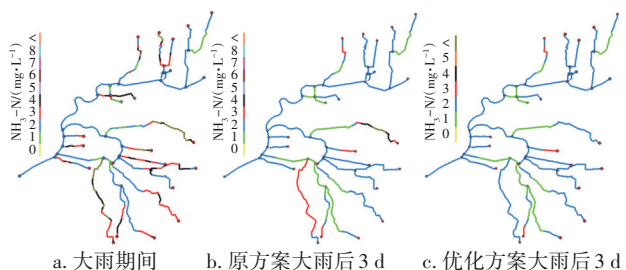


图8 大雨情景下各河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分布

Fig.8 Distribution of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in each river channel during the heavy rain scenario

4 茅洲河流域再生水补水设计实践

茅洲河流域再生水补水工程依托国内最大的

水环境综合整治工程——茅洲河流域水环境综合整治工程,覆盖东莞市与深圳市宝安区、光明区,利用茅洲河流域内6座水质净化厂的再生水对河道进行补水活水,兼顾区域内市政杂用水。该工程总投资13.8亿元,再生水补水总规模达到 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计补水水质为地表水IV类标准,新建补水泵站6座,铺设补水管总长度79 km,补水管径为DN600~DN2 000。

4.1 补水路线与规模

针对河流生态基流匮乏、多支汊河网水动力条件不同等实际问题,基于多种方法论证再生水补水量及考虑雨后面源污染的再生水补水方案优化研究结果,茅洲河流域采用“补水规模论证+泵站管道冗余设计+雨后水质恢复”的设计思路,构建了全流域尺度的河道再生水补水时空多点动态调配系统,形成了旱天及雨天降雨前、中、后全时段补水模式,为河道持续提供生态和景观用水,增加水环境容量,恢复河流生态韧性。

补水路线及规模见图9。



图9 茅洲河流域再生水补水线路及规模平面布置

Fig.9 Layout of the reclaimed water replenishment route and scale for the Maozhou River basin

4.2 冗余设计

充分考虑冗余量,泵站设备和管道选型具有应急增量补水能力,以应对远期再生水量增长或水质突发恶化情况。泵站采用变频软启模式,以适应补水量、压力的变化,有效避免水锤现象,延长电机、接触器及机械散件、轴承、阀门和管道的使用寿命,减少设备维修保养费用并节约大量电费。

4.3 灵活调配设计

基于空间分析、统计分析与流域水动力-水质

耦合模型等方法,提出以雨后河道水质改善为目标的生态补水优化调度策略,建立了以旱雨季、雨情、涨退潮等为依据的再生水补水智能化自动调节机制,采用可调配补水通道、高低压分区并联补配水方案,可降低能耗23%~31%,减少运行费用30%以上。通过“智能化、自动化”手段实现了全流域绿色低碳补水目标,进一步提高了流域水质整体稳定性,为水环境精细化调度管理提供了支撑。

4.4 “一处一景”设计

摒弃传统河道补水工程出水口的生硬设计,茅洲河流域再生水补水设计实践中大量运用叠石、绿植、跌水等元素,结合消能设计,使再生水入流自然化、生态化,与城市景观融为一体。

4.5 再生水补水成效

茅洲河流域再生水补水工程实现了 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的补水规模,建立了我国全流域覆盖、规模最大的河流再生水利用体系。茅洲河流域再生水补水系统构建后,河道的自净能力提升,河道水质也得到明显改善。该工程结合控源截污、内源治理等措施,已使茅洲河流域实现全面消除黑臭。

生态补水充分构建了雨源性流域的生物栖息环境,旱季河道流量得到了根本保证,雨季河道面源污染导致的河道溢流污染后恢复能力增强。2021年研究区各河道旱、雨季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度变化见图10。

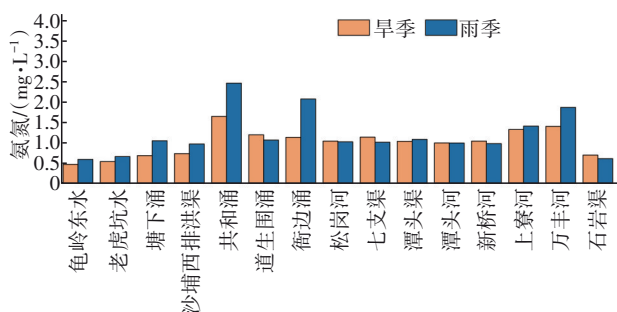


图10 2021年研究区各河道旱、雨季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度

Fig.10 Average of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in dry and rainy seasons of each river in the study area in 2021

与2019年相比,除少数支流雨季略超地表水V类标准外,其余支流2021年全年均在V类水标准内,且水质在旱、雨季均较为稳定。然而,在再生水补水工程实施过程中,茅洲河流域内控源截污、内源治理等措施也在同步实施,较难将某一种措施所改善的生态环境效益剥离评估,因此准确评价再生

水补水对流域综合整治环境效益改善的贡献还有待进一步研究。

5 结论与展望

充分利用城市污水处理厂再生尾水资源,优化调度,合理配置,为河道“补清水、赋活水”,对于南方高密度建成区雨源型流域河道环境容量增大、自净能力提升至关重要。以茅洲河流域为研究对象,采用多种方法估算河道再生水补水规模,模拟分析补水效益,发现河道水质与换水周期得到显著改善,但仍无法持续稳定达标;充分考虑雨水面源污染对河道水质的影响,开展再生水补水方案优化研究,优化后河道水质在小雨后0.5 d、中雨后2 d、大雨后3 d即可恢复至地表水V类标准;茅洲河流域再生水补水工程采用“补水规模论证+泵站管道冗余设计+雨后水质恢复”的设计思路,构建了全流域尺度的河道再生水补水时空多点动态调配系统,补水总规模达到 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,河道流量得到保证,雨后水质恢复能力得到增强,有效助力茅洲河流域黑臭水体的全面消除。

再生水补水实现了污水处理厂尾水资源化利用,在解决生态基流匮乏、增强河道自净能力的基础上,提升了城市滨水环境,是“以水定城、水城融合、城水共鸣”的重要实践。河道再生水补水可进一步配合区域水库补水、闸门调度、域外调水等其他途径实现流域“活水”的综合配置,全方位保障河道水环境生态健康。

参考文献:

- [1] 徐宏菊. 再生水对深圳市典型城市河流水质影响的模拟研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
XU Hongju. Simulation Study of Influence of Reclaimed Water on Water Quality in Typical River of Shenzhen City [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese).
- [2] CROOK J, SURAMPALLI R Y. Water reclamation and reuse criteria in the US [J]. Water Science and Technology, 1996, 33(1): 451-462.
- [3] ASANO T, MAEDA M, TAKAKI M. Wastewater reclamation and reuse in Japan: overview and implementation examples [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(11): 219-226.
- [4] 梁耀元, 陈小奎, 李洪远, 等. 韩国城市河流生态恢复的案例与经验[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 93-

- 96,100.
- LIANG Yaoyuan, CHEN Xiaokui, LI Hongyuan, *et al.* Analysis and inspiration of urban river restoration cases in Korea [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26 (6):93-96,100(in Chinese).
- [5] 杨芬, 魏尊莉, 刘军梅, 等. 基于SWMM和MIKE11的改善雨后城市河湖水质优化调度方案研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(7): 73-84.
- YANG Fen, WEI Zunli, LIU Junmei, *et al.* Study on optimal water dispatching plan for improving urban river and lake water quality after rainfall based on SWMM and MIKE11 [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(7): 73-84(in Chinese).
- [6] 薛祥山, 张鸿涛, 袁国清, 等. 太原市汾河公园再生水补水方案优化模拟[J]. *环境工程学报*, 2013, 7 (10):4021-4026.
- XUE Xiangshan, ZHANG Hongtao, YUAN Guoqing, *et al.* Simulation and optimization of recycled water replenishment program on Fen River park in Taiyuan [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(10):4021-4026(in Chinese).
- [7] 王骁, 许素, 陶文绮, 等. 再生水补水河道水质的生态修复示范工程及效能分析[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(7): 2132-2140.
- WANG Xiao, XU Su, TAO Wenqi, *et al.* Ecological restoration project of water quality in urban river supplied with reclaimed water and its efficiency analysis [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(7): 2132-2140(in Chinese).
- [8] 楼少华, 唐颖栋, 陶明, 等. 深圳市茅洲河流域水环境综合治理方法与实践[J]. *中国给水排水*, 2020, 36 (10): 1-6.
- LOU Shaohua, TANG Yingdong, TAO Ming, *et al.* Methods and practice of comprehensive improvement of Maozhou River water environment in Shenzhen [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36 (10): 1-6 (in Chinese).
- [9] 徐志侠, 董增川, 周健康, 等. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用[J]. *水利水电技术*, 2003(11): 15-17.
- XU Zhixia, DONG Zengchuan, ZHOU Jiankang, *et al.* The Montana method for ecological water requirements and its application [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2003 (11): 15-17 (in Chinese).
- [10] 任珂君, 楼少华, 唐颖栋, 等. 深圳市重点面源污染源整治研究及实践[J]. *中国给水排水*, 2021, 37 (18): 35-41.
- REN Kejun, LOU Shaohua, TANG Yingdong, *et al.* Research and practice on the remediation of key non-point sources pollution in Shenzhen [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(18): 35-41(in Chinese).
- [11] 张凤山, 魏俊, 唐颖栋, 等. 流域水环境模型在茅洲河流域系统治理中的应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(24): 100-106.
- ZHANG Fengshan, WEI Jun, TANG Yingdong, *et al.* Application of watershed water environmental model in the systematic management of Maozhou River basin [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(24): 100-106 (in Chinese).

作者简介:赵思远(1992-),男,山东淄博人,博士,高级工程师,主要从事流域水环境综合治理工作。

E-mail:zhao_sy3@hdec.com

收稿日期:2022-07-05

修回日期:2022-08-07

(编辑:衣春敏)

复苏河湖生态 建设人水和谐美丽中国