



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.012

马超,唐志波,徐奎,等.平原地区城市河网水环境改善的补水调度策略研究——以天津市中心城区河网为例[J].南水北调与水利科技,2017,15(6):81-87. MA C, TANG Z B, XU K, et al. Study on water replenishment scheduling strategies for water quality improvement of urban river network in plain area: A case study of urban central river network in Tianjin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 81-87. (in Chinese)

# 平原地区城市河网水环境改善的补水调度策略研究

——以天津市中心城区河网为例

马超,唐志波,徐奎,贺蔚,赵明

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

**摘要:**针对平原地区城市河网中存在的补水效果差、水质不达标等水环境问题,采取问题解析-方法优化的思路开展河网水环境改善的补水调度策略研究,提出了融合现状模拟和成因分析、补水调度策略验证、补水调度实施方案的研究思路。以天津市中心城区环城河网进行实例应用,基于现状问题解析揭示了河网水质不达标原因,按照保持现有工程措施及增设工程措施的顺序提出了适用的推荐补水调度策略,并基于推荐补水调度策略提出了年度整体实施方案及实际实施方案,其中年度整体实施方案对应的年度补水调度总需水量为3.19亿 $m^3$ 。研究表明本文提出的补水调度策略研究方法可利用有限的补水资源有效地改善水环境,可在其他平原地区城市河网中进行推广。

**关键词:**城市河网;补水调度策略;水环境改善;平原地区;天津

**中图分类号:** X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0081-07

## Study on water replenishment scheduling strategies for water quality improvement of urban river network in plain area: A case study of urban central river network in Tianjin

MA Chao, TANG Zhibo, XU Kui, HE Wei, ZHAO Ming

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The urban river network in the plain area has various water environment problems such as poor water replenishment effect and deterioration of water quality. In order to solve these problems, we adopted the approach of problem analysis and method optimization to carry out the research on water replenishment scheduling strategies for water quality improvement of urban river networks. The approach included three parts: analyzing and evaluating the present situation, validating the strategies, and proposing implementation schemes. A case study of Tianjin City was carried out. Based on analysis of the current problem, we uncovered the reasons for the substandard water quality of the river network and put forward a set of water replenishment scheduling strategies. Based on the recommended strategies, we proposed an annual overall implementation scheme and an actual implementation scheme. The water demand of the annual overall implementation scheme was 319 million cubic meters. This study showed that the proposed research approach for water replenishment scheduling strategy could increase water utilization efficiency and improve water quality effectively. The approach can be applied to other river networks in plain areas.

**Key words:** urban river network; water replenishment scheduling strategy; water quality improvement; plain area; Tianjin

收稿日期: 2016-12-13 修回日期: 2017-08-14 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.0817.001.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大专项课题(2017ZX07106-004);天津市应用基础与前沿技术研究计划(一般项目)(15JCYBJC21800)

Funds: Major National Water Pollution Control and Treatment Project (2017ZX07106-004); Tianjin Application Foundation and Frontier Technology Research Program (General Project) (15JCYBJC21800)

作者简介: 马超(1981-),男,天津人,副教授,博士,主要从事复杂水利工程综合调控理论与方法研究。E-mail: mac\_tju@126.com

通讯作者: 徐奎(1987-),男,天津人,博士(后),主要从事城市防洪减灾研究。E-mail: jackykui@126.com

随着社会发展和城市化进程,河流的功能需求不断增加且开发程度显著提高。部分城市河流由于开发和利用程度超过其自身承载能力,水环境和生态问题日益突出,已对河流可持续发展和城市产生严重影响<sup>[1]</sup>。针对上述问题,水利部和住建部等在 2015 年分别印发了《关于进一步加强城市水利规划工作的通知》(水规计[2015]363 号)<sup>[2]</sup>和《城市黑臭水体整治工作指南》<sup>[3]</sup>,明确了未来城市河流开发和治理工作方向,河道水质不达标、黑臭水体、河道生态破坏等已成为下阶段城市发展亟待解决的重点和难点。补水调度技术是现阶段平原地区治理和修复城市河道水体污染中的研究热点,孙娟<sup>[4]</sup>等以南京为例,通过一维河网水质模型证明了引调清洁水源稀释污水可有效地改善河道水动力条件并解决水环境问题;王超<sup>[5]</sup>等通过试验区河网原型调水实验研究,证明了引清调水工程改善平原型城市河网水质的可行性;陈建标<sup>[6]</sup>以南通为例建立了河网水量水质模型,提出了科学的调水实施方案;周芬<sup>[7]</sup>制定的引配水方案为萧绍宁平原实施污水治理提供了技术支撑;其它学者<sup>[8-13]</sup>也对平原河网补水调度技术也进行了相关研究。在补水调度技术的实际应用中,应依据河流自身生态特点和功能需求,结合其它物理、化学、生物生态等辅助技术量身定制合理可行的综合治理修复方案。

由于平原地区城市河网覆盖范围广、河道密布、连通复杂、流向复杂、坡降较小,易使水体流动缓慢,并出现回流、雍水<sup>[5]</sup>等现象,水体自净能力较差。如何针对上述特点,科学合理布置补水工程和制定补水调度策略及方案以解决水体流动滞缓和水质不达标等问题是当前关注重点和难点。基于此,开展平原地区城市河网水环境改善的补水调度策略研究,并以天津市中心城区(以下简称“中心城区”)环城河网进行实例验证,以期通过提出合理的补水调度策略和方案,达到提高有限水资源的补水效率和显著改善水环境的目的。

## 1 研究区概况

天津市地处北温带位于中纬度亚欧大陆东岸,主要受季风环流的支配,是东亚季风盛行的地区,属暖温带半湿润季风性气候。临近渤海湾,海洋气候对天津的影响比较明显。主要气候特征是四季分明,春季多风,干旱少雨;夏季炎热,雨水集中;秋季气爽,冷暖适中;冬季寒冷,干燥少雪。冬半年多西北风,气温较低,降水较少;夏半年太平洋副热带暖高压加强,以偏南风为主,气温高,降水较多。天津的年平均气温约为 14℃,7 月最热,月平均温度 28

℃。历史最高温度为 41.6℃。1 月最冷,月平均温度 -2℃。历史最低温度为 -17.8℃。年平均降水量在 360~970 mm 之间,1949-2010 年的平均降雨量为 600 mm。天津市位于海河流域下游干流,有山地、丘陵和平原三种地形,平原约占 93%。中心城区环城河网含 4 条一级河道和 22 条二级河道,各二级河道的补水来源均直接或间接来自各一级河道。截止 2015 年底,区域内建成闸门、泵站、涵管、橡胶坝工程共 23 座。依据 2014 年和 2015 年的河道水质监测数据:一级河道(北运河、海河、子牙河、新开河)水质较好,年均至少有 60% 的时间可达到地表水 V 类水及以上标准;水质较差的二级河道包括:东场引河、南运河(津河以西河段)、陈台子排水河、南丰产河、津港运河、四化河、纪庄子河、北塘排水河、张贵庄河、小王庄河、长泰河、先锋河。中心城区环城河网各河道连通布局、水质现状见图 1。以二级河道各监测断面 2014 年实测 NH<sub>3</sub>-N 浓度值超标(即超过地表 V 类水标准对应的 2.0 mg/L)的次数占总监测次数的比例来表示其水质超标时段比例,结果详见表 1。

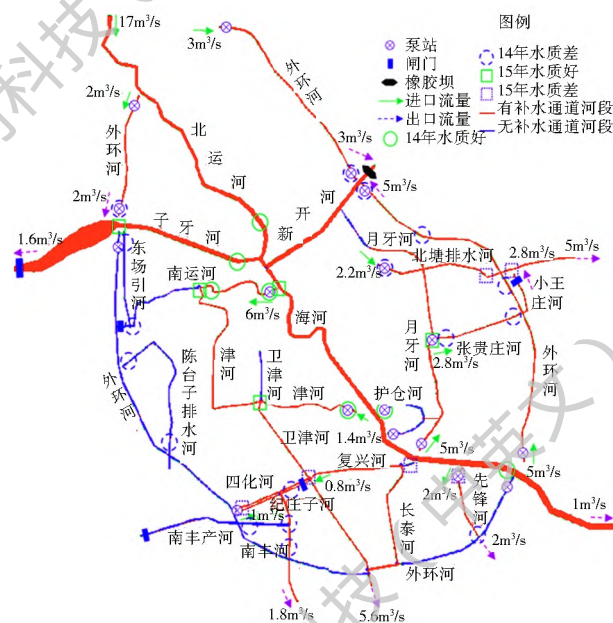


图 1 天津市中心城区环城河网现状信息及现行补水方案下河网补水效果图

Fig. 1 The present condition of Tianjin urban river network and replenishment effect of the current scheduling scheme

由于一级河道水质较好,因此选定各二级河道作为中心城区补水调度策略的研究对象。现行补水方案下,中心城区二级河道的补水水源主要为引滦水(地表 III 类水<sup>[14]</sup>),最大补水规模为 20 m<sup>3</sup>/s,各二级河道的水质目标为地表 V 类水;除降雨情况及冰冻期(12 月至次年 2 月)不实施补水外,其它时间中心城区均实施补水(补水方案不考虑丰、枯水年份

的影响),总时长约为 200 d。现行补水方案下各二级外环河用水 293 万 m<sup>3</sup>,海河以西二级河道用水 2437 级河道单次河道冲洗的总用水量为 3 529 万 m<sup>3</sup>,其中 2 243 万 m<sup>3</sup>,海河以东二级河道用水 799 万 m<sup>3</sup>。

表 1 现行补水方案下二级河道的水体置换周期及水质不达标成因

Tab. 1 The replacement cycle and water quality problems of secondary rivers under current scheduling scheme

河道名称	南运河		津河		卫津河		复兴河		月牙河		外环河																									
	津河以西	津河以东	卫津河以西	卫津河以东	津河以北	津河以南	长泰河以西	长泰河以东	张贵庄河以南	张贵庄河以北	北运河-子牙河	北运河-新开河	子牙河-卫津河	海河-卫津河	海河-新开河	东场引河	长泰河	四化河	纪庄子河	津港运河	南丰产河	陈台子河	先锋河	张贵庄河	小王庄河	护仓河	北塘排水河									
水体置换周期/d	-	0.8	1.8	1.2	-	3.3	5.7	-	1.5	-	2.4	2.5	-	-	2.8	-	5.9	5	1.4	3.5	-	-	2.3	2.4	2.4	-	4.7									
不达标成因分析	A	S	S	S	A	S	S	A	S	A	C	D	C	D	A	A	C	D	A	C	S	C	D	C	D	A	C	A	B	S	C	D	C	D	A	B
水质超标时段比例	0.5	0	0.1	0	0.5	0.2	0.1	0.5	0.3	0.9	0.4	0.4	0.8	0.4	0.7	0.7	0.2	0.3	1.0	0.9	0.7	0.7	0.3	1.0	1.0	0	0.4	0.9								

注: 水体置换周期中,“-”表示该二级河道水体置换周期大于 30 d; 不达标成因分析中各符号的含义: S 为现状水质较好, A 为补水通道不畅或无补水通道, B 为承接污水处理厂污水, C 为存在沿程排污, D 为存在底泥污染。

## 2 结果分析

### 2.1 数值模拟模型

研究将中心城区环城河网的河道地形和连通布局、闸泵工程布局和规模、实测水质数据等多方面信息,采用 Hec\_ras 软件构建中心城区环城河网一维示踪模型和一维水动力水质耦合模型,模型基本方程见式(1)至式(3)。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qu}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC + S \quad (3)$$

式中:  $Q$  为过流断面流量(m<sup>3</sup>/s);  $u$  为过流断面水体流速(m/s);  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>);  $z$  为水位(m);  $q$  为沿程入流(m<sup>2</sup>/s);  $A$  为过流断面面积(m<sup>2</sup>);  $S_f$  为摩阻坡度(m/m);  $C$  为污染物浓度(mg/L);  $E_x$  为对流扩散系数(m<sup>2</sup>/s);  $K$  为污染物一级衰减系数(d<sup>-1</sup>);  $S$  为污染物外部源、漏项(mg/L)。

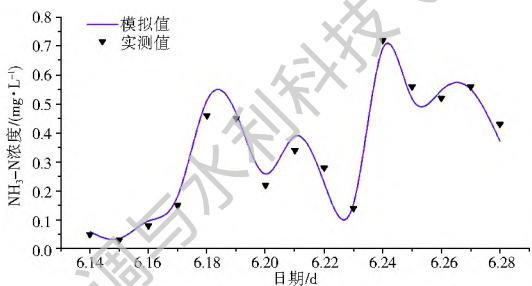
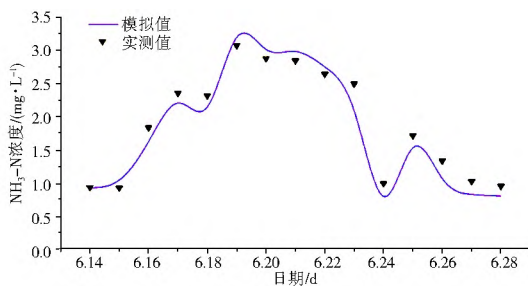


图 2 四化河(左图)及月牙河(张贵庄河以南河段,右图)下游断面 NH<sub>3</sub>-N 衰减系数率定结果

Fig. 2 The calibration results of NH<sub>3</sub>-N decay coefficient in downstream sections of Sihua river (left) and Yueya river (right)

### 2.2 现状模拟和水质不达标成因分析

利用构建的中心城区环城河网一维示踪模型(基本方程为式(1)~(2))和一维水动力水质耦合模拟模型(基本方程为式(1)~(3))分析现状补水方案下的河道水流和水质变化情况,并以水体流速、水体滞留时间和置换周期、示踪剂浓度、水质指标浓度等为评价指标,提出现行补水方案下的河道水质不达标原因。

(1) 中心城区环城河网水环境模拟模型参数设定。  
NH<sub>3</sub>-N<sup>[16-17]</sup>、COD<sup>[18]</sup>等为评价水质的常用指标。由于中心城区环城河网 NH<sub>3</sub>-N 监测完整性明显优于 COD,因此选取 NH<sub>3</sub>-N 作为水质评价指标, NH<sub>3</sub>-N 衰减系数取值为 0.1~0.3。根据河道断面护砌类型,河道糙率设定为 0.025。选取海河以西四化河及海河以东月牙河(张贵庄河以南河段)的下游断面在 2015 年 6 月 14 日至 6 月 28 日的实测 NH<sub>3</sub>-N 数据进行模拟计算,结果见图 2。NH<sub>3</sub>-N 模拟值与实测值间的平均误差为 10.58% 和 12.63%,误差较小,处于合理范围内,计算结果表明模型参数设定合理。

#### (2) 现行补水方案效果分析。

由示踪模型得现行补水方案下二级河道的补水效果见图 1。基于示踪模型及水质模型所得现行补

水方案下二级河道的水体置换周期和水质不达标成因分析见表 1。由示踪模型模拟结果可知,现行补水方案下,中心城区环城河网中部分二级河道由于缺少

有效补水通道, 水体流动缓慢甚至停滞, 水体置换周期很长, 再加上承接上游排放污水、沿程截污不彻底以及底泥释放污染等原因, 极易发生水体水质恶化现象, 亟需合理的补水调度策略和方案来改善。

### 2.3 补水调度策略验证

基于河网中各河道水质不达标原因, 按照保持现状工程措施(改变补水流量配比、差量周期置换<sup>[19]</sup>)和增设工程措施(增设补水进出口、分时分区补水等策略)的分类, 分析各类策略对改善河网水质的效果, 总结提出合理的河网水环境改善补水调度组合策略。基于一维数值模拟模型, 按照先保持现状工程措施, 再增设工程措施的顺序, 逐步分析上述各补水调度策略的补水效果及其可行性, 形成完善的补水调度策略库。

(1) 改变补水流量配比策略。在保持现状补水工程措施布局和补水规模的前提下, 通过调整补水

进口的流量配比来改善补水效果。由图 1 及表 1 可知, 现状水质不达标区域主要集中在海河以西的外环河沿线, 海河以东水质条件较好。因此, 综合考虑整体补水规模和泵站取水规模, 采取调减海河以东分区的补水流量来增加海河以西分区的补水流量, 达到改善海河以西河道水质的目的。经多方案的对比计算及分析, 最终确定改变补水流量配比策略为: 外环河(北运河至新开河段)由  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  减至  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 外环河(北运河至子牙河段)由  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  减至  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 外环河(子牙河至海河段)由  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  增至  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因改变补水流量配比策略降低了外环河(北运河至新开河段及北运河至子牙河段)补水量, 外环河分区单次冲洗用水量较现行补水方案减少  $23 \text{ 万 m}^3$ 。其它补水分区单次冲洗用水量与现行补水方案保持一致, 改变补水流量配比策略实施前后的河道水质达标用时见图 3。

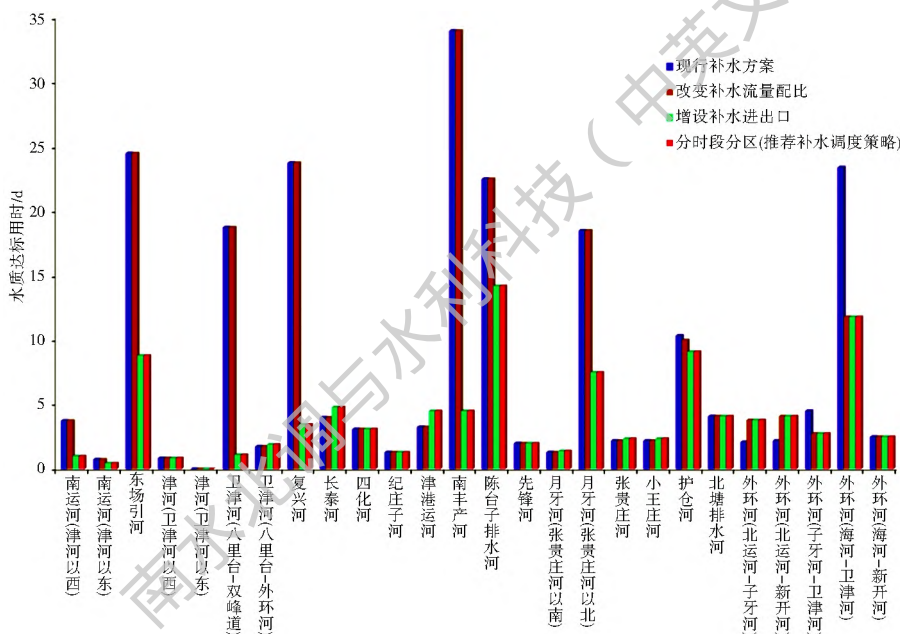


图 3 各补水调度策略下河道水质达标用时(水质由劣 V 类到 V 类所用时长)对比

Fig. 3 The time needed for water quality improvement in secondary rivers under different scheduling strategies

由图 3 可知补水流量配比调整减少了海河以西外环河(子牙河至卫津河段、海河至卫津河段)的水质达标用时, 但同时增加了外环河(北运河至子牙河段、北运河至新开河段)的水质达标用时, 其他二级河道补水效果无明显改变。结果表明改变补水流量配比策略可有效改善已有补水通道河道的补水效果, 但对无补水通道的盲肠河段无效。

(2) 差量周期置换策略。通过控制进、出口节制闸周期性地拉低或升高水位实现水体稀释和置换, 达到改善水环境的目的。按照改变补水流量配比策略的补水思路, 选择东场引河、南运河、卫津河、复兴河、月牙河及护仓河的补水盲区(盲肠河段)验

证差量周期置换策略的可行性。模拟结果表明: 差量周期置换策略仅能局部改善补水盲区的补水效果, 但无法作用整个河道。如补水盲区河段较长的东场引河与南运河(津河以西段), 仅南运河靠近补水通道侧的部分河段水质得到改善。由于现状补水盲区均离现状补水进出口较远, 因此, 差量周期置换策略难以有效, 故不推荐采用。

(3) 增设补水进出口策略。在合理改变补水流量配比的基础上, 通过新建补水工程增加补水进出口和有效补水通道来改善补水效果。策略实施方案和补水改善效果如图 4 及图 3 所示, 二级河道单次冲洗总用水量较现行补水方案减少 49%, 为  $1\ 802$

万 m<sup>3</sup>; 其中外环河用水 264 万 m<sup>3</sup>, 海河以西用水 1 105 万 m<sup>3</sup>, 海河以东用水 432 万 m<sup>3</sup>。补水盲区河道水质达标用时对比结果表明: 增设补水进出口策略可显著改善补水盲区和其它二级河道的补水效果。但因存在河道水质达标后的无效补水, 仍需考虑分时分区补水策略以进一步提高补水效率。

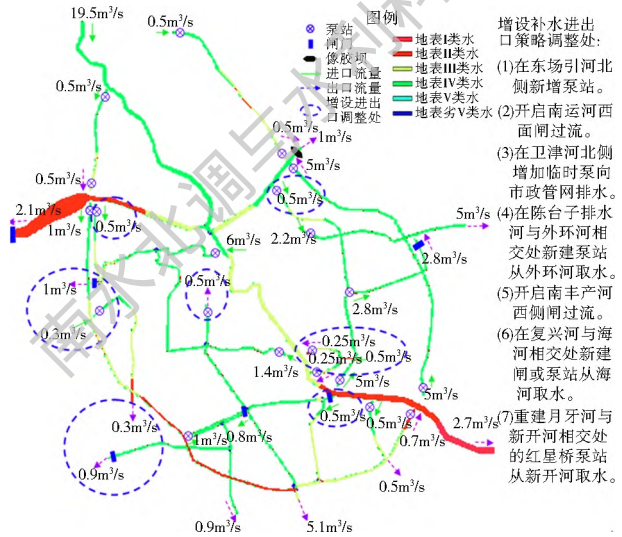


图 4 设补水进出口策略实施方案及其补水改善效果

Fig. 4 The replenishment effect under the strategy of adding inlets and outlets

(4) 分时分区补水策略。基于增设补水进出口策略, 依据河道等级、水流走向和水量联系, 将河网划分为多个补水分区, 采取合理的分区补水顺序实施补水调度, 补水分区水质达标后停止补水, 从而达到减少补水量的目的。以海河以东补水分区为例, 实施增设补水进出口策略 4.2 d 后, 张贵庄河、小王庄河及北塘排水河水水质达标, 停止补水, 整体补水流量从 20 m<sup>3</sup>/s 降至 17.2 m<sup>3</sup>/s; 7.5 d 后月牙河水水质达标, 整体补水流量进一步降至 15.5 m<sup>3</sup>/s; 9.1 d 后海河以东所有二级河道水质均达标, 无需再补水, 整体补水流量降至 15 m<sup>3</sup>/s。分时分区补水策略与增设补水进出口策略的补水效果相同, 且二级河道单次补水量进一步降低至 1 200 万 m<sup>3</sup>, 较现行补水方案减幅 66%; 其中外环河用水 256 万 m<sup>3</sup>, 海河以西用水 565 万 m<sup>3</sup>, 海河以东用水 379 万 m<sup>3</sup>。

综上所述, 以改变补水流量配比、增设补水进出口结合分时分区补水的组合策略为中心城区环城河网的推荐补水调度策略, 其综合考虑了各二级河道的补水水源的合理分配、水质达标用时及补水效果。推荐策略实施后的补水效果如图 3、图 4 所示。实施上述组合策略需新建或改建泵站 5 座、闸门 4 座; 去除堤坝 1 座、开挖涵管 1 处。各工程的匡算总投资额为 1 980 万元。

## 2.4 补水调度实施方案

根据中心城区环城河网补水调度策略, 提出补水调度实施方案, 包括年度整体实施方案和实际实施方案两部分。

年度整体实施方案对应“河道最大允许排污量”及河道水质目标情景下的年度需水量和分期使用建议。“河道最大允许排污量”指实施推荐补水调度策略后, 为维持河道水质目标所能允许的污水排放浓度。其计算思路如下: 假定二级河道的污水排放位置均位于最上游断面, 且污水排放流量均为恒定值 (10 L/s), 以推荐补水调度策略补水流量和 2014 年二级河道实测最高 NH<sub>3</sub>-N 浓度为初始条件, 依据不同排放浓度数值模拟结果得到其“河道最大允许排污量”。

基于二级河道的“河道最大允许排污量”, 按下述思路确定年度整体补水调度实施方案及其对应的总用水量: 根据补水效果模拟结果, 将 200 d 补水调度期分为 4 个 50 d 的实施周期, 每个实施周期又分为河道冲洗及水质维持两个时间段。单个实施周期内, 不同补水分区河道冲洗时长为其内所有二级河道 NH<sub>3</sub>-N 浓度由 2014 年最大实测值降至达标浓度 (2.0 mg/L) 的总用时; 而单个实施周期与河道冲洗时长之差即为水质维持时长, 假定水质维持时间段内各二级河道持续承担“河道最大允许排污量”。计算单个实施周期内河道冲洗和水质维持时间段所需的补水量 Q<sub>1</sub> 和 Q<sub>2</sub>, 则年度实施方案的总用水量为 Q = 4 × (Q<sub>1</sub> + Q<sub>2</sub>), 计算结果见表 2。由表 2 可知, 中心城区环城河网年度整体实施方案所需补水量为 3.19 亿 m<sup>3</sup>。

表 2 年度整体实施方案下天津市中心城区各二级河道的总用水量

Tab. 2 The total water demand of secondary rivers in Tianjin under the annual overall implementation scheme

各分区二级河道相关计算结果	海河以西	海河以东	外环河	合计
单个实施周期内河道冲洗时长/d	14.2	9.1	11.8	/
单个实施周期内水质维持时长/d	35.8	40.9	38.2	/
单个实施周期内河道冲洗用水量/万 m <sup>3</sup>	565	379	256	1 200
单个实施周期内水质维持用水量/万 m <sup>3</sup>	2 026	1 944	2 799	6 769
单个实施周期内总用水量/万 m <sup>3</sup>	2591	2 323	3 055	7 969
年实施方案下总用水量/亿 m <sup>3</sup>	1.04	0.93	1.22	3.19

实际实施方案将依据推荐补水调度策略,并结合河道实时水质监测数据和水质目标来确定河道冲洗和水质维持的补水调度方案。实施补水对象可以是水量联系紧密的补水区域、单个补水分区或单条河道,所需补水量将根据补水对象的水质情况和水质目标确定。

### 3 结论

(1) 提出了平原地区城市河网水环境改善的补水调度策略研究方法,该方法采取问题解析-方案优化的思路,按照现状模拟和水质不达标成因分析、补水调度策略验证和补水调度实施方案的步骤,揭示现状水质不达标原因和层次分析多类型措施的补水效果,进而提出可行的组合补水策略和补水方案。

(2) 以天津市中心城区环城河网为例开展实例应用,研究结果表明:无有效补水通道、承接上游排放污水、沿程截污不彻底以及底泥释放污染是天津市中心城区环城河网水质不达标的主要原因。需采取改变补水流量配比、增设补水进出口结合分时分区补水的组合策略来改善河道补水效果和维持河道水质,推荐补水调度方案的年度补水调度需水量为3.19亿 $m^3$ ,实际执行中需依据河道实时水质监测数据和水质目标,结合推荐的补水调度策略,制定合理的补水区域、补水分区或单条河道的补水调度方案。

#### 参考文献(References):

[1] 钱正英,陈家琦,冯杰.人与河流和谐发展[J].河海大学学报(自然科学版),2006(1):1-5.(QIAN Z Y, CHEN J Q, FENG Jie. Harmonious development of humanity and rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006(1): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1000-1980.2006.01.001.

[2] 中华人民共和国水利部.关于进一步加强城市水利规划工作的通知[Z].2015-9-22.(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The circular on further strengthening urban water conservancy planning [Z]. 2015-9-22. (in Chinese))

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国环境保护部.城市黑臭水体整治工作指南[Z].2015-8-28.(Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. The guide on urban black odor water remediation [Z]. 2015-8-28. (in Chinese))

[4] 孙娟,阮晓红.引调清水改善南京城市内河水环境效应研究[J].中国农村水利水电,2008(3):29-31.(SUN J, RUAN X H. Study on improving the water environmental effect of Nanjing inland rivers by bringing in clear water [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(3): 29-31. (in Chinese))

[5] 王超,卫臻,张磊,等.平原河网区调水改善水环境实验研究

[J].河海大学学报(自然科学版),2005(2):136-138.(WANG C, WEI Z, ZHANG L, et al. Experimental study on improvement of water environment by water diversion in plain river networks [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005(2): 136-138. DOI: 10.3321/j.issn.1000-1980.2005.02.005 (in Chinese))

[6] 陈建标,钱小娟,朱友银,等.南通市引江调水对河网水环境改善效果的模拟[J].水资源保护,2014(1):38-42,94.(CHEN J B, QIAN X J, ZHU Y Y, et al. Simulation of improvement of water environment in river network of Nantong City by water diversion from Yangtze river [J]. Water Resources Protection, 2014(1): 38-42, 94, DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.008 (in Chinese))

[7] 周芬,李红仙,盛海峰.基于浙东引水的萧绍宁平原引配水研究[J].水资源保护,2016(4):34-38,44.(ZHOU F, LI H Xn, SHENG H F. Research of water diversion and allocation in Xiaoshaoxing Plain based on Eastern Zhejiang Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2016(4): 34-38, 44. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.005 (in Chinese))

[8] 何文学,邹冰,陈冬云,李茶青,谢其华.平原河网区调水配水改善水环境方案设计[J].中国给水排水,2012(17):63-67.(HE W X, ZHOU B, CHEN D Y, et al. Design of water transfer and distribution schemes of river network in plain areas for improving water environment [J]. China Water & Wastewater, 2012(17): 63-67. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4602.2012.17.017 (in Chinese))

[9] 何文学,陈冬云,李茶青,樊任华.城河河网一维水力特征模拟与配水方案设计[J].中国农村水利水电,2011(2):8-10.(HE W X, CHEN D Y, LI C Q, et al. The simulation of one dimensional hydraulic characteristics and the design of distribution water scheme about urban river networks [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(2): 8-10. (in Chinese))

[10] 徐贵泉,褚君达.上海市引清调水改善水环境探讨[J].水资源保护,2001(3):26-30,60-61.(XU G Q, CHU J D. Discussion on water environment improvement by clean water diversion in Shanghai City [J]. Water Resources Protection, 2001(3): 26-30, 60-61. (in Chinese))

[11] 王水,胡开明,周家艳.望虞河引清调水改善太湖水环境定量分析[J].长江流域资源与环境,2014(7):1035-1040.(WANG S, HU K M, ZHOU J Y. Quantitative analysis on water environment improvement by clean water diversion from Wangyu River [J]. Resources and Environment in the Yangtze River, 2014(7): 1035-1040. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201407014 (in Chinese))

[12] 杜晓舜,王春树.上海市引清调水工作研究[J].水资源保护,2006(3):92-94.(DU X S, WANG C S. Study on clean water diversion in Shanghai City [J]. Water Resources Protection, 2006(3): 92-94. (in Chinese))

[13] 黄伟,何用,李荣,陈钢锋.感潮地区引清调水方案研究[J].水电能源科学,2004(2):19-22.(HUANG W, HE Y, LI R, et al. Research on scheme of clean water diversion in tidal area [J]. Water Resources and Power, 2004(2): 19-22. (in Chinese))

- [14] 王海英,武丹,卞少伟,等.近五年引滦入津工程天津段水质评价研究[J].生态科学,2014(3):520-526.(WANG H Y, WU D, BIAN Shaowei, et al. Research of water quality evaluation for Tianjin section of Luanhe River diversion project in recent 5 years[J]. Ecological Science, 2014, 33(3): 520-526. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8873.2014.03.019 (in Chinese))
- [15] 卿晓霞,张会波,周健,等.伏牛溪水污染治理效果的数值模拟研究[J].环境工程学报,2015(1):65-72.(QING X X, ZHANG H B, ZHOU J, et al. Numerical simulation research of water pollution control effect of Funiu River[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015(1): 65-72. (in Chinese))
- [16] 闫振广,孟伟,刘征涛,等.辽河流域氨氮水质基准与应急标准探讨[J].中国环境科学,2011(11):1829-1835.(YAN Z G, MENG W, LIU Z T, et al. Development of aquatic life criteria and last up standard for ammonia in Liao River basin[J]. China Environmental Science, 2011(11): 1829-1835. (in Chinese))
- [17] 王亚伟,杜向群,郁达伟,等.温榆河氨氮污染控制措施的效果模拟[J].环境科学学报,2013(2):479-486.(WANG Y W, DU X Q, YU D W, et al. Assessment of ammonia nitrogen pollution control in Wenyu River by QUAL2K simulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013(2): 479-486. (in Chinese))
- [18] 王辉,栾维新,康敏捷.辽河流域社会经济活动的COD污染负荷[J].地理研究,2013(10):1802-1813.(WANG H, LUAN W X, KANG M J. COD pollution load of social and economic activities in Liaohe River Basin, China[J]. Geographical Research, 2013(10): 1802-1813. DOI: 10.11821/dlyj201310004, (in Chinese))
- [19] 马超.考虑景观要求的河间市中心城区坑塘群水体置换策略研究[J].中国农村水利水电,2011(3):13-16.(MA C. Study on water displacement strategy of pond group in central urban area of Hejian City considering landscape requirement [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(3): 13-16. (in Chinese))

(上接第38页)

- [21] 康淑媛,张勃,郭玉刚,等.1959年至2008年石羊河流域日照时数时空变化特征[J].资源科学,2011,33(3):483-488.(KANG S Y, ZHANG B, GUO Y G, et al. Changes of sunshine duration over the Shiyang River Basin during the last 50 years[J]. Resources Science, 2011, 33(3): 483-488. (in Chinese))
- [22] 杨佳,钱会,高燕燕,等.西安市多年降水特征分析及降水量预测[J].南水北调与水利科技,2016,14(3):30-35.(YANG J, QIAN H, GAO Y Y, et al. Multi-year precipitation characteristics analysis and precipitation forecast of Xi'an city [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 30-35. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.03.006.
- [23] 刘义花,汪青春,王振宇,等.1971年2007年青海省日照时数的时空分布特征[J].资源科学,2011,33(5):1010-1016.(LIU Y H, WANG Q C, WANG Z Y, et al. Distribution characteristics of sunshine duration in Qinghai Province [J]. Resources Science, 2011, 33(5): 1010-1016. (in Chinese))
- [24] 张林梅,苗运玲,李健丽,等.新疆阿勒泰地区近50a夏季极端降水事件变化特征[J].冰川冻土,2015,37(5):1199-1208.(ZHANG L M, MIAO Y L, LI J L, et al. Variations of summer extreme precipitation events in Altay Prefecture, Xinjiang Region, from 1961 to 2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1199-1208. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0134.
- [25] 何彬方,冯妍,苟尚培,等.安徽省50年日照时数的变化特征及影响因素[J].自然资源学报,2009,24(7):1275-1285.(HE B F, FENG Y, XU N S P, et al. Climatic change of sunshine duration and its influencing factors over Anhui Province during the last 50 years [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1275-1285. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2009.07.015.