

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.08.022

# 沙河水库水环境改善及水生态修复示范工程设计

李枬林<sup>1</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 张鸿涛<sup>1,2</sup>, 黄守斌<sup>1</sup>, 曲丹<sup>3</sup>, 魏源送<sup>4,5</sup>,  
黄炳彬<sup>6</sup>, 张俊亚<sup>4</sup>, 郁达伟<sup>4</sup>

(1. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 3. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083; 4. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 5. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 6. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

**摘要:** 北京沙河水库一直以来面临着多源污染汇集、生态系统脆弱、水动力缺乏等问题, 呈现非常规水源补给的缓滞水体特征。针对以上问题, 示范工程制定了“溢流污染防控、面源污染削减、库区生态修复”的技术路线, 治理措施包括面源污染防控库滨植被缓冲带、合流制排口初雨截流及溢流污染控制、湿地水域生态修复等。工程实施前预测入库污染量、水环境容量、工程措施污染削减量等指标, 评估目标可达性, 对设计参数进行纠偏, 工程阶段实施后沙河水库外源污染已得到控制, 水环境质量明显改善。该系统化分析方法在沙河水库治理中应用效果较好, 可为类似库湖水环境治理工程实施提供参考。

**关键词:** 沙河水库; 溢流污染; 面源污染; 水环境; 水生态修复; 示范工程; 系统化分析方法

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)08-0140-09

## Design of Demonstration Project for Water Environment Improvement and Water Ecological Restoration of Shahe Reservoir

LI Cong-lin<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, ZHANG Hong-tao<sup>1,2</sup>, HUANG Shou-bin<sup>1</sup>, QU Dan<sup>3</sup>,  
WEI Yuan-song<sup>4,5</sup>, HUANG Bing-bin<sup>6</sup>, ZHANG Jun-ya<sup>4</sup>, YU Da-wei<sup>4</sup>

(1. Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100084, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 5. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Shahe Reservoir in Beijing has been faced with problems such as the afflux of multiple source pollution, fragile ecosystems, and lack of hydrodynamic force, representing the characteristics of a slow stagnant water body replenished with reclaimed water. The demonstration project which mainly

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102-002-006)

通信作者: 李俊 E-mail: emmali0709@163.com

include overflow pollution prevention and control, non-point source pollution reduction, and reservoir ecological restoration was adopted in order to solve the above problems. Treatment measures include reservoir-side vegetation buffer zone, initial rain interception and overflow pollution control of the combined drainage system, ecological restoration of wetland, etc. Before the implementation of the project, it is necessary to predict indicators such as incoming pollution volume, water environment capacity, and pollution reduction loads of engineering measures, then analyze the target accessibility and correct design parameters. After the implementation of the project phase, the external source pollution of Shahe Reservoir has been controlled, and the water environment quality has been significantly improved. The systematic scheme is effective in Shahe Reservoir treatment and can provide practical reference for similar reservoir and lake water environment treatment projects.

**Key words:** Shahe Reservoir; overflow pollution; non-point source pollution; water environment; water ecological restoration; demonstration project; systematic scheme

北运河是北京市五大水系中唯一发源于北京且干流常年有水的河流,北运河流域是北京市人口最集中、产业最聚集、城市化水平最高的流域<sup>[1]</sup>,其水环境质量和水生态状况影响着区域经济社会协同发展。

沙河水库是北运河上游的重要节点,其汇水主要来源于东沙河、北沙河和南沙河,流域面积1 125 km<sup>2</sup>,总库容2 045×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

北运河径流补给主要靠城市污水处理厂退水和降雨等非常规水源,其中城市污水处理厂退水占比55%~85%<sup>[2]</sup>。北运河上游是仅有的清洁水源,但一直以来都面临着区域面源污染、合流制溢流污染等外在污染威胁。沙河水库是北运河上游水系的重要的“汇”<sup>[3]</sup>,是多源污染的重要聚集处,库区水体生态系统也有不同程度的退化,不合理的水体生态结构与周边环境不相适应,呈现非常规水源补给的缓滞水体特征,库区水环境质量和生态系统的健康程度将严重影响下游水体。因此,沙河水库的综合治理对下游河段的水质改善和水生态修复至关重要。

针对沙河水库面临的一系列问题,采用了“溢流污染防控、面源污染削减、库区生态修复”的技术路线,取得了较好的工程治理效果。对沙河水库相关问题进行了解析,并对各项工程措施的设计理念和要点进行阐述,可为类似湖库水体治理提供工程案例借鉴和参考。

## 1 库区特征及问题解析

### 1.1 区位特征

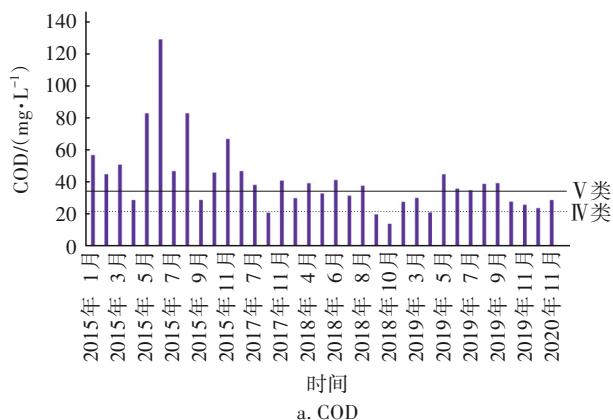
本项目位于北京昌平区东南部的昌平新城范

围内,库区面积约1.8 km<sup>2</sup>。项目区南侧紧邻科技商务区,东侧临近未来科技城,北侧为沙河大学城组团和国家工程技术创新基地组团。

### 1.2 库区水质特征

沙河水库水量充足,主要补水水源为降雨和再生水厂退水,库区水质月变化明显<sup>[4]</sup>,其中TN污染最为严重。由于该区域处于城乡接合部,其排水分区人类活动较为集中<sup>[5]</sup>,区域排水体制仍以合流制为主,溢流污染严重,导致沙河水库及温榆河的水质都较差。另外,库区呈现明显的非常规水源补给的缓滞水体特征,库区不规则的岸线形成局部壅水区,整体流动性差,对水体自净能力易造成负面影响。

随着近两年昌平区截污纳管和污水治理工作的强化推进,沙河水库水质状况出现明显好转,对比库区2015年—2020年水质变化(见图1)可以看出,主要变化为氨氮、总磷显著下降,COD存在波动,工程实施前水质不能稳定满足地表水V类标准。



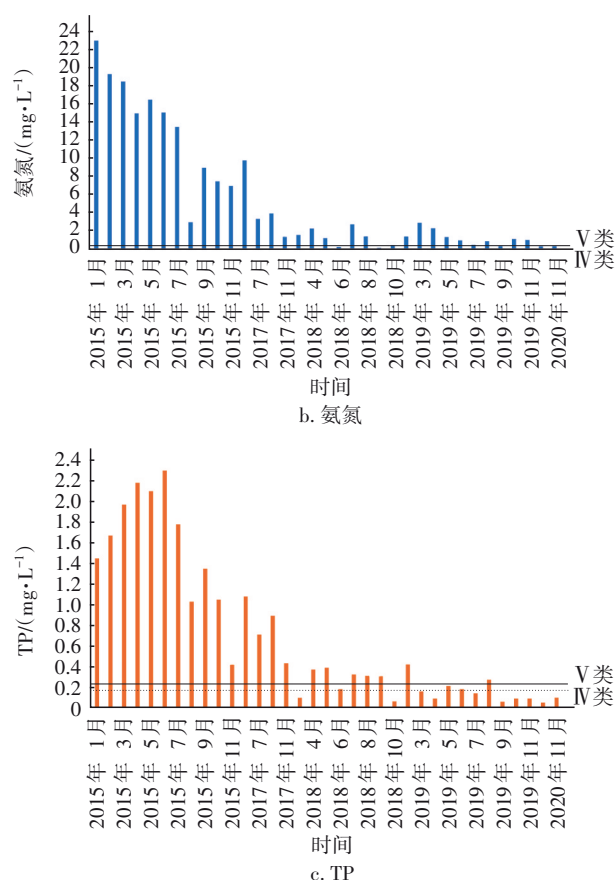


图1 2015年—2020年沙河水库水质

Fig.1 Water quality of Shahe Reservoir from 2015 to 2020

### 1.3 外源污染特征

库区外源污染主要包括沙河再生水厂退水、城区面源污染、排口溢流污染。目前汛期面源污染是影响沙河水库水质的主要因素<sup>[6]</sup>。沙河水库周边排水管网属合流制排水体制,存在大量合流制排口。另外,库区沿线存在多处排水干渠汇入,干渠周边面源污染也将随着径流汇入水库,对库区水质造成负面影响。

#### 1.3.1 点源污染

点源污染主要来自沙河再生水厂退水。沙河再生水厂目前分为两期工程,一期工程处理水量 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准;二期工程处理水量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)IV类标准。经计算,沙河再生水厂输入污染负荷:COD排放量为876 t/a,氨氮排放量为71.2 t/a,TP排放量为8.8 t/a。计算方法如下:

$$P_{\text{点源}} = \sum Q_i \times C_i \times 365 \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{点源}}$ 为污染物产生量,t/a; $Q_i$ 为沙河再生

水厂各期退水量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $C_i$ 为沙河再生水厂各期退水水质, $\text{mg}/\text{L}$ 。

#### 1.3.2 面源污染

水体两岸土地类型主要为林地、农田和草地,其中林地面积 $1\,891 \text{ hm}^2$ 、农田面积 $5\,214 \text{ hm}^2$ 、草地面积 $135 \text{ hm}^2$ 。采用累积指数法对目标区内的面源污染物产生量进行计算(见表1),得到城市面源产生的污染物COD排放量862.94 t/a,氨氮排放量16.29 t/a,TP排放量10.29 t/a。计算方法如下:

$$P_{\text{面源}} = \sum n \times R \times A_i \times \Psi_i \times 10^{-5} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{面源}}$ 为污染物产生量,t/a; $n$ 为污染物累积指数,可根据相关文献和实验测得, $\text{mg}/\text{L}$ ; $R$ 为年降水量, $\text{mm}$ ; $A_i$ 为第 $i$ 种下垫面类型的面积, $\text{hm}^2$ ; $\Psi_i$ 为第 $i$ 种下垫面径流系数,不同下垫面的径流系数根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)选取。

表1 沙河流域不同土地类型污染物累积指数

Tab.1 Cumulative pollution indexes of different land types in Shahe River basin  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 

土地利用类型	污染物累积指数		
	COD	氨氮	TP
林地	92.4	1.9	1.2
农田	104.5	2.1	1.2
草地	68.5	1.4	0.4

#### 1.3.3 合流制溢流污染

近年来昌平区水务局大力实施控源截污,水库周边污水直排现象基本杜绝,基本实现旱天污水零排放。但受污水处理能力及合流制管网影响,截流的排水口在降雨期间仍存在大量雨污混合水溢流入库现象,降雨溢流污染仍较严重。根据2015年—2018年的持续调研和流量监测,项目区内原有排口共31处,其中流量 $>50 \text{ m}^3/\text{d}$ 的典型排口有24个。

根据城市建设用地情况、排水分区划分、降雨等资料,评估年溢流量为 $1\,067.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,计算溢流污染负荷,COD排放量为1 558.8 t/a,氨氮排放量为126 t/a,TP排放量为17.1 t/a。计算方法如下:

$$P_{\text{溢流}} = \sum (Q_s - n \times Q_{\text{dr}}) \times t_i \times C \times 60 \times 10^{-9} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{溢流}}$ 为污染物产生量,t/a; $Q_s$ 为单次降雨流量, $\text{L}/\text{s}$ ; $Q_{\text{dr}}$ 为旱流平均流量, $\text{L}/\text{s}$ ; $t_i$ 为单次溢流时间,min; $C$ 为截流井溢流水质,实测获得COD为126~157  $\text{mg}/\text{L}$ ,氨氮为9~11  $\text{mg}/\text{L}$ ,TP为1.1~2.3  $\text{mg}/\text{L}$ ; $n$ 为截流井截流倍数。

1.4 内源污染特征

内源污染主要包括陆地外源输入和自身生物源降解两大来源,其中,陆地外源污染输入是导致沙河水库底泥沉积物中有机物、氮、磷累积的主要来源<sup>[7]</sup>。库区底泥污染物释放对水质影响是一个动态过程,为简化计算过程,假定库区各点底泥污染物释放量一致,计算内源污染负荷:COD 释放量为 181.7 t/a,氨氮排放量为 79.4 t/a,TP 排放量为 13.4 t/a。计算方法如下:

$$P_{\text{内源}} = F \times A \times 365 \times 10^{-5} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{内源}}$ 为污染物产生量,t/a; $F$ 为水-沉积物界面扩散通量,通过实验测定, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $A$ 为河道底泥覆盖层面积, $\text{hm}^2$ 。

1.5 库滨岸线特征

水库库滨以自然缓坡为主,库滨植物带主要包括原生植物和农田。植被林相比较单一,种类匮乏,大乔木种类最为丰富,缺乏常绿树种;小乔木和灌木数量相对较少;地被种类相对匮乏。库滨岸带缺乏灌木和地被,林地裸露地面过多,雨水冲刷将产生径流污染,尤其径流在斜坡处加速冲刷,导致近水体处地被拦截效果较差,库滨缓坡的水土流失是造成水库污染的关键问题。另外,库区堤顶路面的面源污染也是影响库区水质的关键因素,库区堤顶路人车流量较大,雨天形成的径流污染较为严重。部分区域堤顶路和缓坡之间设有防洪墙,防洪墙底部设有雨水口,雨天路面形成的径流通过雨水口集中进入库区缓坡,形成束流,加剧了地面冲刷。

1.6 综合问题解析

对入库污染源进行综合分析,数据见表2。

表2 沙河水库各类污染源污染负荷估算

Tab.2 Estimation of load of pollution sources of Shahe Reservoir

项目	输入负荷/(t·a <sup>-1</sup> )			比例/%		
	COD	氨氮	TP	COD	氨氮	TP
点源污染	876.0	71.2	8.8	25.2	24.3	17.7
面源污染	862.9	16.3	10.3	24.8	5.6	20.8
合流制溢流污染	1 558.8	126.0	17.1	44.8	43.0	34.4
内源污染	181.7	79.4	13.4	5.2	27.1	27.1
合计	3 479.4	292.9	49.6			

可以看出,合流制管网降雨溢流污染影响在各指标中占比最高,是库区水质的一个重要影响因素;其次是面源污染和点源污染;合流制管网溢流

污染、面源污染和点源污染三项污染负荷中的COD、氨氮、TP污染负荷分别占总污染负荷的94.8%、72.9%、72.9%,是水污染整治的重点;内源污染则主要体现为对氨氮和TP污染的影响。

结合以上各污染源特征分析,可以看出做好溢流污染防控、面源污染削减和点源污染净化对库区水质改善十分重要。另外,沙河水库以非常规水源补给为主,库区水体缺乏流动性,库区生态系统有着不同程度的退化,生态系统较为脆弱。因此,结合沙河水库库区特征,统筹水污染防治和生态修复、重构库区水生态、开展生态系统修复是十分必要的。

2 示范工程方案

2.1 方案思路

针对沙河水库面临的合流制溢流污染、面源污染、水生态系统脆弱等一系列问题,结合沙河水库库区特征,示范工程采用了“溢流污染防控、面源污染削减、库区生态修复”为主的技术路线(见图2)。

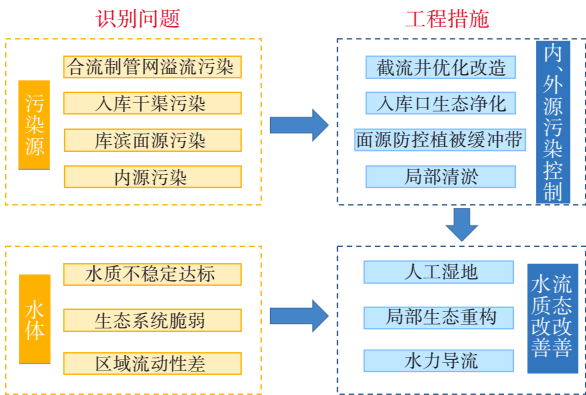


图2 示范工程技术路线

Fig.2 Technical route of demonstration project

合流制溢流污染和面源污染是水环境问题的关键因素,针对合流制溢流污染问题,对合流制排口截流优化改造,并在溢流口处设置污染削减措施,以减轻降雨期间进入库区的溢流污染负荷;针对面源污染问题,利用库滨地形建设植被缓冲带,对冲刷雨水进行消能,并增强库区缓坡水土保持能力,减少雨水冲刷带来的入库面源污染;针对区域水动力差、生态系统脆弱问题,在库滨滩涂、壅水区建设近自然生态湿地,丰富植被物种,重构库区生态,提高水环境质量,使库区水质稳定达到地表水Ⅴ类标准。

## 2.2 合流制排口初雨截流及溢流污染控制

本次示范工程主要针对6处入库口进行整治优化,以“增大初雨截流+溢流污染净化”为治理思路,通过截流井优化、排口闸门改造、排口生态净化及导流调控等设施建设,减轻降雨溢流入库污染影响,削减进入库区水体的污染负荷。

### 2.2.1 排口截流优化

充分发挥主干管截流能力,尽量减少雨污水溢流。拟对排水支管(或干渠)与截流主干管相交的6处排口截流井进行优化改造(见图3),其中小型排口4处,较大排口2处。

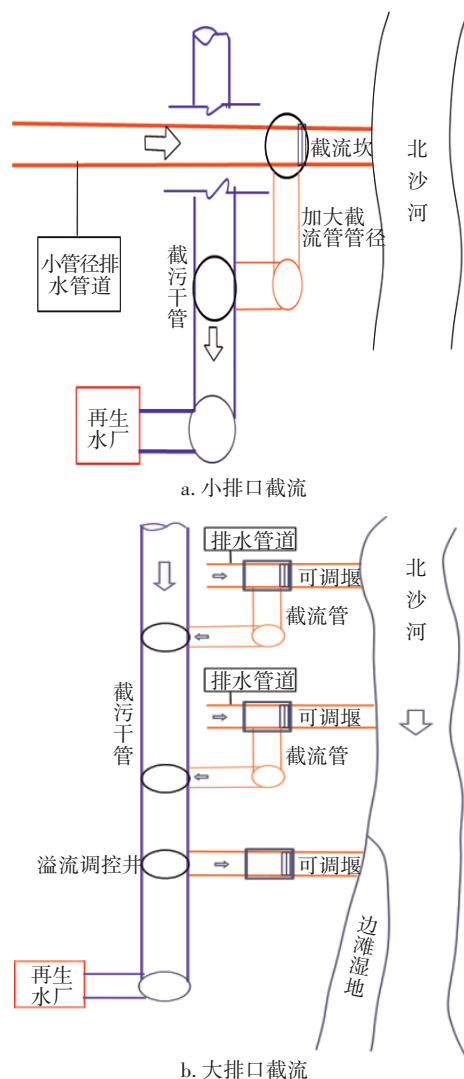


图3 排口截流优化改造

Fig.3 Optimized modification of outlets intercepting

小排口降雨溢流量不大,主要通过改造截流堰和加大截流管管径提升截流倍数,基本可消除雨天溢流污染。针对大排口,现状主要为截流坎或闸门

控制。除了加大截流管管径,还需对排口闸门进行改造,将旧有截流堰改造为可调堰,小雨期间可通过提升堰板高度,利用管道空间进行初雨调蓄,减少雨天溢流流量,降低入库溢流污染负荷。

### 2.2.2 排口生态净化

在溢流量较大的排口处设置生态净化设施,当溢流超出闸门控制流入水体,可通过设置板桩导流边沟,将排口溢流雨水导入近自然湿地进行调蓄净化;对于距离湿地较远且排口附近空间较大的,可通过在排口附近建设末端生态调蓄净化设施,实现进一步的处理。在不影响行洪过流能力前提下,利用现状河湾、边滩空间,围隔形成排口滞留、导流边沟,并局部设火山岩渗滤段,促进排口溢流初雨滞留净化。塘内种植水生植物,选择景观效果好、水质净化能力强的品种,进行景观设计,营造湿地景观,在促进水质改善的同时,恢复岸线水生态环境。

## 2.3 面源污染防控植被缓冲带

库滨岸带主要有“路面-防洪堤-植被型缓坡”和“路面-植被型缓坡”两种类型,缓坡概念示意图见图4。“路面-防洪堤-植被型缓坡”路面宽10 m,林地宽5~50 m,草地边坡坡度为1:3(约18.4°),属于斜坡(>15°),坡面长度为10~15 m。此类型缓坡所形成的面源污染主要来自堤顶路面,库滨缓坡植被缺乏,路面雨水在防洪墙雨水口处形成束流,加剧坡面冲刷,束流消能和水土保持是此类型缓坡需要解决的关键问题。

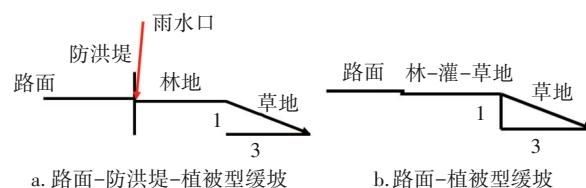


图4 沙河水库缓坡概念

Fig.4 Conceptual drawing of the gentle slope of Shahe Reservoir

针对“路面-防洪堤-植被型缓坡”,在防洪堤雨水口处设置雨水消能池,并在斜坡面设置截流植草沟,开展雨水束流和坡面消能,减缓束流和坡面造成的加速冲刷。同时在边坡裸露地面补种灌木和地被,增强地块水土保持能力,以减轻雨水冲刷形成的面源污染。针对“路面-植被型缓坡”,在斜坡面设置截流植草沟,开展雨水坡面消能,减缓雨水坡面造成的加速冲刷。同时在边坡裸露地面补种

灌木和地被,增强地块水土保持能力,以减轻雨水冲刷形成的面源污染。坡面改造见图5。雨水消能池和截流植草沟设计见图6。

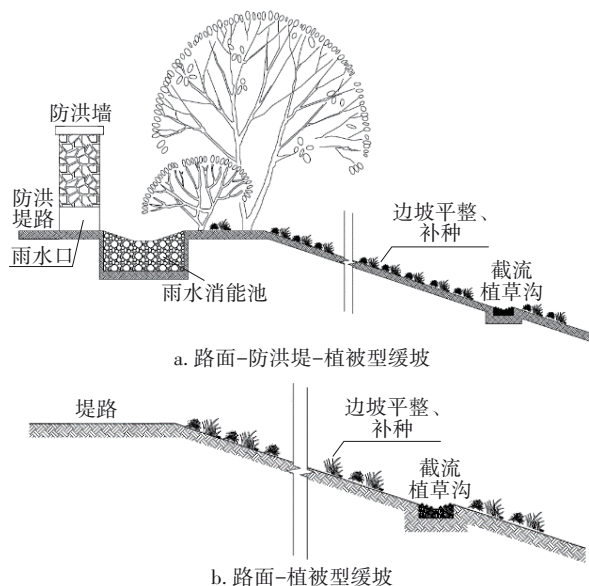


图5 库滨缓坡改造

Fig.5 Reconstruction of gentle sloper

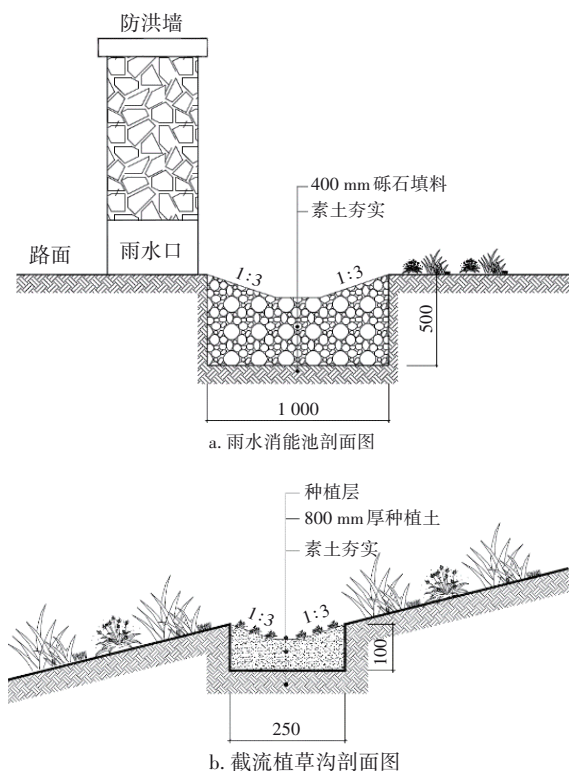


图6 雨水消能池和截流植草沟设计

Fig.6 Design of rainwater energy dissipation pool and intercepting grass ditch

雨水消能池设在防洪墙雨水口出口处,长1 m、

宽1 m、深0.5 m,底层素土夯实后,填入0.4 m深砾石。截流植草沟宽25 cm,深10 cm,沟底素土夯实后,填入8 cm种植土,并在表层种植植被。

## 2.4 湿地水域生态修复工程

库区生态系统存在不同程度的退化,生态功能羸弱。在库区北岸、南岸边滩处建设近自然湿地,重构库区生态,利用南北岸边滩近自然湿地分别净化南、北沙河来水,重点消除初雨期间南、北沙河水质隐患,保障清水入库,提高库区水环境质量。

### 2.4.1 北岸边滩近自然湿地工程

#### ① 平面布置

北岸边滩近自然湿地位于北岸滩地,总占地面积 $46.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,其中有效净化面积 $26 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,附属区面积 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ;由前置塘-水生生物塘-渗滤堤-水生生物塘-湿地出水组成,分为一、二两个并联运行的湿地净化区。平面布置见图7。



图7 北岸边滩近自然湿地工程布置

Fig.7 Layout plan of the natural wetland on the north bank beach

#### ② 工艺流程

雨天湿地承接北沙河初雨截流工程水量和部分北沙河来水,设计处理规模 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;旱天湿地主要承接沙河再生水厂退水,设计处理规模 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为保证北沙河支流来水顺利进入北库边滩湿地,在北沙河入库口设生态跌水堰,并通过沿河边滩设导流隔挡形成导流沟渠进入北岸湿地,同时也作为初雨截流工程的生态净化塘和再生水进水的导流沟渠。具体工艺流程见图8。

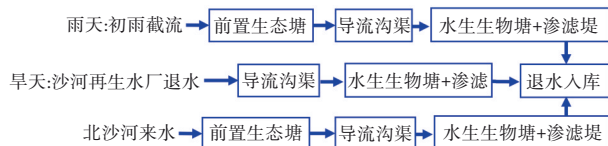


图8 北岸边滩近自然湿地工艺流程

Fig.8 Process flow chart of natural wetland on the north bank beach

#### ③ 主要设计参数

结合库区运行水位变化,设计水位为35.6(常水位)~36 m(高水位),淹没水位36.5 m,平均水深

1.7~2 m。经核算,旱天停留时间约5.1 d,对应表面水力负荷 $0.35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;雨天停留时间3.8 d,表面水力负荷 $0.46 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

## 2.4.2 南岸边滩近自然湿地工程

### ① 平面布置

充分利用库区低水位运行形成的南岸边滩空间,建立南岸边滩近自然湿地,总占地面积 $26.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,该湿地主要由多级生态景观塘组成。其中大岛南侧河汊面积 $7.9 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,起前置生态塘作用,边滩近自然湿地地区面积 $18.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,平面布置见图9。

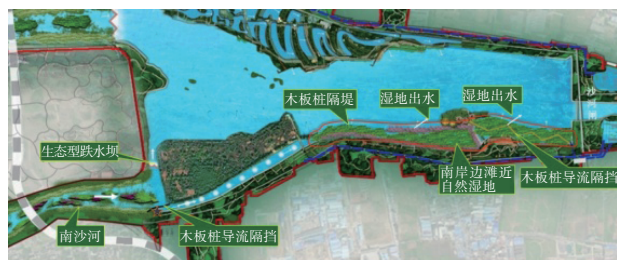


图9 南岸边滩近自然湿地工程布置

Fig.9 Layout plan of the natural wetland on the south bank beach

### ② 工艺流程

工艺流程见图10。

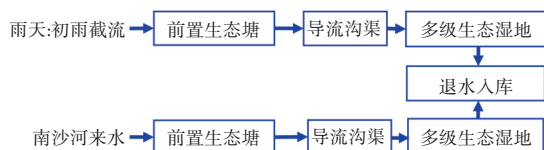


图10 南岸边滩近自然湿地工艺流程

Fig.10 Process flow chart of natural wetland on the south bank beach

雨天,调蓄、净化由初雨截流工程导入的排水渠初雨或南沙河河道初雨来水,设计流量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;旱天,调节净化南沙河富营养化的再生水厂退水,设计水量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

在南岸大岛与岸边的过水通道中设置流量可控的木板桩导流隔板,并在大岛与靠近巩华城地铁站侧岸边的过水通道中设置流量可控的生态跌水坝,调控进入近自然湿地水量。在大岛南侧的过水通道设置前置生态塘,调节净化初雨污染。在大岛东侧到水库闸坝之间采用木板桩将库区与南岸隔离,使南岸形成一条宽为50~150 m的边滩近自然湿地。湿地中通过基质、微生物和水生植物的共同作

用对南沙河初雨来水或上游再生水厂退水进一步净化后入库;湿地中种植以荷花为主的观赏性水生植物,也提升了水库南岸的景观。

### ③ 主要设计参数

湿地设计水位为34.6(常水位)~35.4 m(高水位),平均水深1.2~2 m。常水位停留时间约2.3 d,高水位停留时间3.9 d,表面水力负荷为 $0.53 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

## 3 目标可达性分析

### 3.1 水环境容量分析

沙河水库输入流量包括降水带入、再生水厂退水、上游河道客水和溢流量,合计流量 $13284.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ;根据沙河水库水域面积、地区年蒸发量、库区地质下渗系数等资料,计算沙河水库蒸发量为 $236 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、下渗量为 $728.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ,因此终末径流量为 $12320 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

水环境容量是指在保持水环境功能用途前提下,水体所能容纳的污染物的量或自身调节净化并保持生态平衡的能力。水环境容量可划分为自身容量和自净容量两部分。

其中,沙河水库水环境自身容量COD为4928 t/a,氨氮为308 t/a,TP为61.6 t/a,自身容量的计算公式如下:

$$W_{\text{自身}} = Q \times C_s \times 10^{-2} \quad (5)$$

式中: $W_{\text{自身}}$ 为水环境自身容量,t/a; $Q$ 为终末径流量,等于输入流量扣除蒸发量和下渗量, $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ; $C_s$ 为水环境治理目标,mg/L。

另外,沙河水库水环境自净容量COD为394.2 t/a,氨氮为24.6 t/a,TP为4.9 t/a,自净容量的计算公式如下:

$$W_{\text{自净}} = k \times Q \times C_s \times 10^{-2} \quad (6)$$

式中: $W_{\text{自净}}$ 为水环境自净容量,t/a; $k$ 为降解系数,0.05~0.1,本次计算取0.08。

因此,沙河水库水环境总容量COD为5322.2 t/a,氨氮为332.6 t/a,TP为66.5 t/a。

### 3.2 整治措施削减量分析

库区整治措施包括面源污染防治、合流制溢流污染削减、湿地水域净化和原位生态净化等。其中,库滨植被缓冲带能削减20%的面源污染,削减负荷COD为198.7 t/a、氨氮为20.2 t/a、TP为2.6 t/a;合流制溢流污染削减措施能够削减41%的溢流水

量,结合溢流水质,削减负荷 COD 为 639.1 t/a、氨氮为 51.7 t/a、TP 为 7.0 t/a;湿地水域净化效果模拟比较复杂,参考较为通用的  $k-C^*$  模型进行推算<sup>[8]</sup>,计算公式如下:

$$C_e = C^* + (C_0 - C^*) \exp(-\frac{k \times A}{T \times Q_1 \times 10^{-4}}) \quad (7)$$

式中: $C_e$ 为出水浓度,mg/L; $C_0$ 为进水浓度,mg/L; $C^*$ 为目标水质指标环境背景值,mg/L; $Q_1$ 为湿地净化规模, $m^3/d$ ; $T$ 为湿地工作时间,d; $k$ 为一级反应速率常数, $m/a$ ;A 为湿地面积, $hm^2$ 。

根据推算出的出水浓度,结合进水浓度和水量,可以得出削减负荷 COD 为 464.7 t/a、氨氮为 78.8 t/a、TP 为 11.5 t/a。

因此,面源污染防治、合流制溢流污染削减、湿地水域净化三者综合整治措施削减量 COD 为 1 302.5 t/a、氨氮为 150.6 t/a、TP 为 21.1 t/a。

3.3 水质达标分析

3.3.1 水质预测分析

通过整理沙河水库入库污染量、上游客水转输量、水环境容量、措施削减污染量等数据,对比削减后的入库污染量和库区水环境容量,分析水质目标可达性,具体数据见表 3。

表 3 沙河水库水质指标达标分析

Tab.3 Water quality compliance analysis of Shahe Reservoir				
项 目		t·a <sup>-1</sup>		
入库污染量	面源污染	862.9	16.3	10.3
	合流制溢流污染	1 558.8	126.0	17.1
	点源污染	876.0	71.2	8.8
	内源污染	181.7	79.4	13.4
	合计	3 479.5	292.9	49.6
上游客水转输量	北沙河	943.2	47.2	9.4
	南沙河	1 024.9	51.2	10.2
	合计	1 968.1	98.4	19.6
工程措施削减量	库滨植被缓冲带	198.7	20.2	2.6
	合流制溢流污染控制	639.1	51.7	7.0
	湿地水域净化	464.7	78.8	11.5
	合计	1 302.5	150.7	21.1
削减后入库污染量		4 171.1	257.6	48.7
水环境容量	自身容量	4 928.0	308.0	61.6
	自净容量	394.2	24.6	4.9
	合计	5 322.2	332.6	66.5

由表 3 可以看出,削减后的入库污染量:COD 为 4 171.1 t/a、氨氮为 257.6 t/a、TP 为 48.7 t/a,全面低于库区水体环境容量,可实现水质达标。

3.3.2 实际监测分析

目前工程还在实施中,库区外源污染已得到控制,生态系统得到改善。2021 年 4 月—9 月期间对沙河库闸位置水质数据进行监测,COD 稳定在 25~33 mg/L,氨氮稳定在 0.85~1.6 mg/L,TP 稳定在 0.09~0.2 mg/L。水质指标可稳定满足 COD<40 mg/L、氨氮<2.5 mg/L、TP<0.5 mg/L 的示范工程要求,已达到预期目标,具体见图 11。

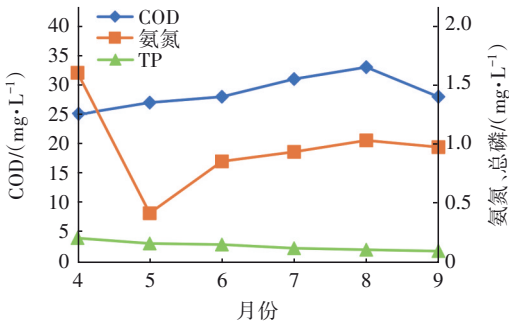


图 11 工程实施后沙河库闸水质  
Fig.11 Water quality of Shahe Reservoir gate after project implementation

4 结论及建议

① 针对沙河水库面临的多源污染汇集、生态系统脆弱、区域水动力差等问题,示范工程采用了“溢流污染防治、面源污染削减、库区生态修复”的技术路线,治理措施包括面源污染防治库滨植被缓冲带、合流制排口初雨截流及溢流污染控制、湿地水域生态修复等。目前示范工程还在实施当中,库区外源污染已得到控制,生态系统得到改善,取得阶段性成效。通过现场水质监测,库区主要水质指标可稳定满足 COD<40 mg/L、氨氮<2.5 mg/L、TP<0.5 mg/L,达到预期目标。

② 工程实施前,建立模型对项目的目标可达性进行分析,具有较好的指导及纠偏作用,通过分析预测入库污染量、水环境容量及工程措施削减量,对比三者之间的关系,可判断工程措施的目标可达性,具有较好的预测判断意义。

③ 沙河水库地处城乡郊野,结合水库区位环境,在控制外源污染的条件下,示范工程重点对库区进行湿地生态修复,以构建类自然系统的手法,利用库区自然浅滩和泛洪漫滩建设生态湿地。该种思路既解决了库区“水生态、水环境质量”问题,又统筹考虑了库区“水景观”功能,实现人与自然和谐共生。

④ 水体综合治理是一项复杂的系统工程,受区域环境、外部公用系统影响较大。要进一步提升流域水环境质量,需注重源头污染源控制,加强流域范围内污水收集处理;建设海绵措施,减少雨水径流冲刷,增加雨水渗透;同时,做好流域生态维护管理,以实现长制久清。

#### 参考文献:

- [1] LIU J, SHEN Z, YAN T, *et al.* Source identification and impact of landscape pattern on riverine nitrogen pollution in a typical urbanized watershed, Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628:1296-1303.
- [2] 郁达伟, 于森, 魏源送, 等. 1980—2010年温榆河的水环境质量时空演变特征[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(11):2803-2813.
- YU Dawei, YU Miao, WEI Yuansong, *et al.* Spatio-temporal evolution of water environment quality in Wenyu River during 1980-2010 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32 (11): 2803-2813 (in Chinese).
- [3] 魏源送, 常国梁, 吴敬东, 等. 基于“源流汇”的非常规水源补给河流水质改善与水生态修复专刊序言[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(1):1-6.
- WEI Yuansong, CHANG Guoliang, WU Jingdong, *et al.* Preface: special issue on water quality improvement and ecological restoration for river replenished with reclaimed water based on “source-flow-sink” concept [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1):1-6 (in Chinese).
- [4] 余昊翔, 杨东翰, 谢梦飞, 等. 北运河流域沙河水库水质时空变化特征[J]. *环境化学*, 2020, 39(10):2849-2857.
- YU Haoxiang, YANG Donghan, XIE Mengfei, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of water quality of Shahe Reservoir in Northern Canal Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(10):2849-2857 (in Chinese).
- [5] 海永龙, 郁达伟, 刘志红, 等. 北运河上游合流制管网溢流污染特性研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(8):2785-2794.
- HAI Yonglong, YU Dawei, LIU Zhihong, *et al.* Characteristics of the combined sewer overflows pollution in the upper North Canal of Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(8):2785-2794 (in Chinese).
- [6] 辛苑, 李萍, 吴晋峰, 等. 强降雨对北运河流域沙河水库水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(1):199-208.
- XIN Yuan, LI Ping, WU Jinfeng, *et al.* Impacts of heavy rainfall on the water quality of Shahe Reservoir in the North Canal Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1):199-208 (in Chinese).
- [7] 孙文, 王理明, 刘吉宝, 等. 北运河沙河水库沉积物营养盐分布特征及其溯源分析[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(5):1581-1589.
- SUN Wen, WANG Liming, LIU Jibao, *et al.* Nutrients distribution and its sources analysis of sediments in Shahe reservoir of Northern Canal [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(5):1581-1589 (in Chinese).
- [8] 尹军, 崔玉波. 人工湿地污水处理技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- YIN Jun, CUI Yubo. *Constructed Wetland Sewage Treatment Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006 (in Chinese).

作者简介:李枫林(1991—),男,山东济宁人,硕士,工程师,主要从事水污染防治科研及设计工作。

E-mail: conglin5143@163.com

收稿日期:2021-12-02

修回日期:2022-01-17

(编辑:衣春敏)

## 加强河湖保护与管理,推进水生态文明建设