

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.012

北方某缺水性地表河流生态修复工程案例

高晓薇, 王利军, 卢金伟, 王文冬, 刘学燕, 龙元源, 赵佑
(北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 针对妫水河流域存在的底泥淤积、生态基流不足、植被生境单一、水质功能不达标等实际问题,采用生态清淤/底泥堆岛原位降解、外调水源/再生水补给、浅滩深潭/水生植物修复、水量循环/旁路湿地净化、流域水土保持与面源污染生态修复等多项生态修复技术进行综合治理,实施后项目区生态流量较实施前提高10%以上,水生植物多样性指数由0.3提升至1.8,有效保障了谷家营考核断面 COD_{Mn} 、TP、氨氮三项常规指标满足《水污染防治行动计划》相关考核要求,同时对TN具有一定的去除效果;通过营造浅水湾和生境岛,辅以植物色彩配比和植物色彩季节变化,营造了良好的生态景观效果。

关键词: 地表河流; 生态清淤; 原位降解; 生境营造; 生态补水; 旁路湿地; 生态景观

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2025)06-0077-06

Ecological Restoration of a Water-scarce Surface River in North China:A Case Study

GAO Xiao-wei, WANG Li-jun, LU Jin-wei, WANG Wen-dong, LIU Xue-yan,
LONG Yuan-yuan, ZHAO You
(Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: This study presents an ecological restoration project in the Guishui River basin, which addresses issues such as sediment deposition, insufficient ecological base flow, limited vegetation habitat, and substandard water quality. The project employs a suite of ecological restoration technologies, including ecological desilting and in-situ degradation of sediment islands, external water diversion and reclaimed water supply, shoals, deep pools and aquatic plant restoration, water circulation and bypass wetland purification, as well as soil and water conservation and ecological restoration of non-point source pollution in the watershed. These measures have increased the ecological flow in the project area by over 10% and raised the aquatic plant diversity index from 0.3 to 1.8. Additionally, the project ensures that the three key water quality indicators (COD_{Mn} , TP, and ammonia nitrogen) meet the requirements of the *Action Plan for Prevention and Control of Water Pollution* policy at the Gujiaying monitoring section. The project also demonstrates some removal of TN and creates an improved ecological landscape by constructing repulse bays and habitat islands, with optimized plant color ratios and seasonal variations.

Key words: surface river; ecological desilting; in-situ degradation; habitat construction; ecological water supplement; bypass wetland; ecological landscape

通信作者: 王文冬 E-mail: 819509617@qq.com

1 项目背景

妫水河位于北京市延庆区,隶属永定河水系,为官厅水库的三大入库河系之一,是永定河生态廊道的重要组成部分,也是北京市重要的水源保护区之一。妫水河流域范围见图1。

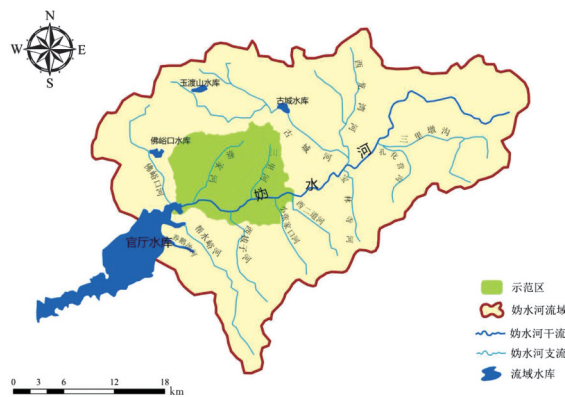


图1 妫水河流域范围

Fig.1 Sketch map of Guishui River basin

根据监测资料,2013年—2016年妫水河流域点源污染占比为57%,上游面源污染问题也很突出,入河污染物中面源污染占比平均达到38%。根据延庆区环保局的水质监测数据,项目研究年(2017年)妫水河水质总体呈恶化趋势:河道上段水质满足地表水Ⅱ~Ⅲ类标准,新城段水质常年处于地表水Ⅳ类~劣Ⅴ类水平,水质较差、环境容量不足,在一定程度上制约了流域范围内的社会经济发展和生态文明建设;同时妫水河是典型的北方缺水型河流,流域水资源短缺问题严重:2003年以前,妫水河生态基流平均为 $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$,而2014年平均基流只有 $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$,汛期出现断流达30余次;由于上游补给水量不足,进一步加剧了妫水河流域的生态系统脆弱性,导致河流沿岸及浅滩区水生植物稀少,水体自净能力较差,使得水域水生态系统退化严重,生态服务功能下降。加之水中污染物长期积聚,在较高的温度和充足的光照下,藻类繁殖速度大大增加,导致水体富营养化加重,亟需开展流域地表水体生态修复与水质提升技术研究,为区域水资源、水安全、水生态、水景观综合提升提供技术保障。

本项目基于妫水河建设年份存在的底泥污染物释放、生态基流不足、生境环境脆弱、水质功能不达标等现状问题,采用生态清淤/底泥堆岛原位降解、外调水源/再生水补给、浅滩深潭/水生植物修复、水量循环/旁路湿地净化综合技术进行水质、水

量“双提升”。

2 项目概况

妫水河发源于延庆区四海镇大吉祥村,沿平原中部流向西南,横贯延庆区盆地,注入官厅水库,全长74.3 km,平均河宽5~250 m,流域面积 $1\,062.9 \text{ km}^2$,占延庆区总面积的52%,海拔394~1 978 m。

2.1 存在的问题

2017年妫水河存在的主要问题包括底泥淤积、生态基流不足、水体流动性差(部分季节甚至出现断流)、植被生境多样性单一、水质功能不达标、水环境自净能力差等。

① 底泥淤积与污染物释放

根据妫水河河道断面监测资料,现状湖底淤泥厚约0.3~0.5 m,相较于区域水体地表水Ⅲ类标准,湿污泥中有机物、氮、磷等污染物含量高,存在向水体释放的风险,其中有机物含量3%~10%,总氮约 13 mg/L ,总磷约 0.5 mg/L 。由于污染物释放会对水体造成较严重的污染,因此需进行清理和资源化利用。

② 生态基流不足与季节性断流

妫水河是典型的北方缺水型河流,从1999年开始北京市持续干旱,年均降水量449 mm,2009年仅为315.4 mm,降水减少导致妫水河的来水量锐减。妫水河非雨季主要由夏都缙阳污水处理厂再生水补给,补给量约 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。妫水河农场橡胶坝至南关桥段水体流动性差,水体几乎处于静止状态。

③ 植被单一与生境多样性脆弱

作为典型的北方缺水河流,妫水河生境脆弱,特别是城区段受人为干扰强烈,水生植物群落退化严重。随着延庆区社会经济的快速发展,水土资源的过度开发以及全球气候变化,加剧了流域生态状况的恶化。2017年调查结果显示:妫水河存在水生植物12科12属14种,其中,挺水植物6种(占42.9%),沉水植物6种(占42.9%),浮叶植物1种(占7.1%),漂浮植物1种(占7.1%)。

④ 水体污染与水环境功能不达标

妫水河穿越延庆城区,沿河两侧集中分布村镇、机关、学校和旅游景点,人类活动和污水排放造成妫水河水质严重污染:上段及下段的水质均呈恶化的趋势,上段水质为Ⅱ~Ⅲ类标准,新城段水质常年为Ⅳ类~劣Ⅴ类标准,官厅水库入口断面水质已

处于劣Ⅴ类标准。

2.2 技术路线

基于妣水河流域存在的实际问题,按照“本底调查→问题分析→目标导向→技术研究→工程应用→效果监测→技术推广”的总体思路(见图2),开展对妣水河流域的水生态修复与水质提升的技术研究,通过技术总结形成机制,为后续类似工程项目开展提供参考。

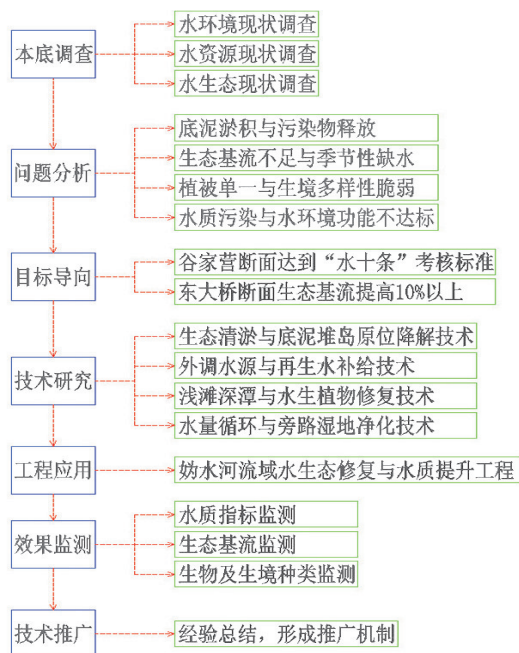


图2 技术路线

Fig.2 Technology roadmap

3 生态修复措施

基于前述实际问题,采用生态清淤/底泥堆岛原位降解、外调水源/再生水补给、浅滩深潭/水生植物修复、水量循环/旁路湿地净化、流域水土保持与面源污染生态修复等多项生态修复技术进行水质水量“双提升”。

3.1 生态清淤与底泥堆岛原位降解

① 生态清淤

基于妣水河设计年份存在的河道淤积、底泥污染物释放问题,设计采用生态清淤的办法,疏挖去除表层0.3~0.5 m厚的河道淤泥,消除部分河道内源污染,同时保留部分底泥营养物质,便于后期水生植物的种植、成活。

通常河道清淤的方式主要有两种:干法、湿法。由于干法清淤具有施工方便、工程投资低、不需设

置专门的晾泥场、对周边环境和水体环境影响较小等优点,该项目采用干法清淤,即将妣水河东西湖河水全部放空后,直接在现场挖土的方法来清除河底淤泥。清淤范围:起点妣水东湖,终点为农场橡胶坝^[1-3]。淤泥清挖平均深度:东湖0.30 m,西湖0.5 m,总清淤量约 $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

② 底泥堆岛与污染物原位降解

常见的淤泥处理方式有原位吹填、晾晒填埋、土壤改良、堆肥以及建材等。由于妣水河底泥中有机质含量较高,基本无有毒有害物质,重金属含量符合《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)和垃圾填埋要求,且项目建设要求“开挖出淤泥原则不出河,全部就地消纳”,因此考虑将开挖的淤泥在东湖、西湖堆填浅水湾,并在西湖宽阔水面处堆造生境岛,通过种植水生植物、附着微生物发挥对底泥污染物的植物吸收、微生物代谢降解多重作用,实现对河道淤泥的就地消纳^[2-3]。

结合妣水河的水系特征、生态清淤污泥量,共设计河心生境岛8处,占地面积 2.94 hm^2 ,可消纳污泥量 $12.6 \times 10^4 \text{ t}$,通过种植水生植物可实现对底泥污染物的原位降解,同时形成良好的生境效果。

3.2 外调地表水与再生水补给

项目区处于北方干旱地区,河道主要补给水源为天然降水、再生水厂处理尾水,由于天然降水的不确定性、再生水厂补水规模的有限性,按照“优先使用再生水,充分利用地表水,合理利用外调水”的技术思路,采用多水源优化配置及调度模型,模拟制定多水源联合调度方案。配置水源包括:①城西再生水厂的再生水 $1.095 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$;②天然径流及雨洪水 $109 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$;③白河堡水库的外调水 $1.344 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,发挥多路水源相互调度补给作用^[4-5],综合提升了区域水体的流动速度、缩短了换水周期,使东大桥考核断面枯水期流量保持在 $1.06 \sim 3.03 \text{ m}^3/\text{s}$,能够支撑区域农业、工业及生态景观用水需求;通过设置在线监测断面进行实时水位、流量信息反馈,使区域水体丰水期流量保持在 $0.60 \sim 5.08 \text{ m}^3/\text{s}$,生态流量较2017年提高10%以上,实现了研究设定目标和再生水的资源化利用。

3.3 浅滩深潭与水生植物修复

结合妣水河空间格局及河道断面水深状况,通过土方开挖、地形填筑,形成浅滩、深潭交错布置的河道复式断面结构^[6-7],包括浅水塘 85.2 hm^2 、深水

潭315.0 hm²,其中,浅水湾区域水深0~0.5 m、流速低于0.05 m/s,种植芦苇、千屈菜、香蒲等高大挺水植物,形成植被缓冲带50.9 hm²;深水潭区域水深0.5~2.5 m,流速低于0.05 m/s,种植狐尾藻、苦草、金鱼藻等沉水植物,形成水下森林94.5 hm²,有效改善了区域河道的水生态系统结构。通过现场布点、样方检测可知,项目实施前后水生植物多样性指数(香浓威纳指数)由0.3提升到了1.8,重塑了妫水河的河流生态景观格局。

3.4 水量循环/旁路湿地净化

由于现状河道补水水源供给不足、河道生态基流较小、换水周期较长,使得区域水体水质存在恶化风险,因此充分利用位于世园段妫水河沿岸,京包高速、北新路与三里河包围形成的不规则多边形现状土地进行旁路复合流人工湿地建设(见图3),同时依托已有城北循环管线,将三里河、明渠及妫水河有效串联形成内外两个循环,其中,内循环将妫水河下游0.8 m³/s河道水体通过循环泵站加压,提升至三里河上游潜流湿地(湿地面积22.6 hm²,优选下向流/上向流相互串联的旁路复合人工湿地为主导工艺,可营造良好的厌氧/缺氧/好氧环境,有利于氮、磷污染物的有效去除),湿地净化出水(流量为0.4 m³/s)再经生态沟渠(2 040 m)及妫水河表流湿地(湿地面积7.7 hm²)深度处理后,重力自流进入妫水河;外循环的三里河上游潜流湿地出水流量为0.4 m³/s,通过加压泵站直接压力提升至妫水河;一方面通过反向供水,提高了区段河段的流动性、缩短了换水周期,另一方面通过发挥湿地系统的物理、化学以及生物净化作用,进一步实现了对循环水体中COD_{Mn}、氨氮、总磷等污染物的有效去除^[8-10]。

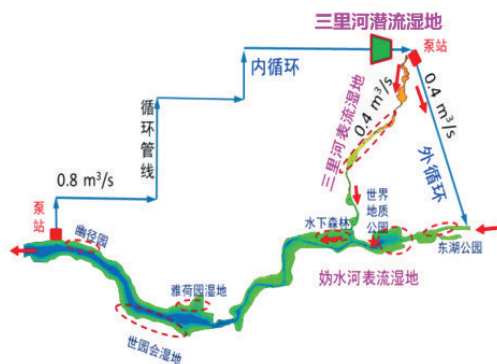


图3 旁路湿地工艺流程

Fig.3 Process flow diagram of bypass wetland

3.5 流域水土保持与面源污染生态修复

在对妫水河进行流域面源污染问题诊断、“山水林田湖草”时空格局演化解析的基础上,开展多项农村面源污染防治技术研发与系统集成,在农田果园等面源污染集中区域,采用台田雨水净化、林下渗滤沟、农田沿线渗滤沟、道路生态边沟等农田集成防控技术重点措施,集中连片打造形成30 km²面源污染控制示范区,发挥面源污染拦截、过滤及净化多重功效。

4 工程应用效果

4.1 生态环境效益

4.1.1 水质监测方案

为充分了解项目实施后的水质提升效果,在妫水河谷家营考核断面设置自动水质监测装置,定期对断面水质进行自动化监测。

① 监测点位

监测点:妫水河谷家营考核断面(E115°53'24", N40°27'0")。

② 监测时间与频率

研究取样检测时间为2019年4月—9月的每月中旬,监测频率为1次/月。

4.1.2 水质净化效果

配合沿岸植被绿化带、面源污染截流设施,该项目于2019年建设完成、稳定运行后,谷家营考核断面3月—9月连续7个月的COD_{Mn}为2.5~4.8 mg/L、TP为0.05~0.12 mg/L、氨氮为0.17~0.69 mg/L,满足“水十条”的相关考核需求,同时对TN具有一定的去除效果。具体监测结果见表1。

表1 妫水河流域考核断面水质监测结果

Tab.1 Water quality monitoring results of Guishui

River basin assessment section mg·L⁻¹

水质指标	监测结果							平均值	考核标准
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月		
COD _{Mn}	3.5	4.8	3.8	4.8	4.1	4.1	2.5	3.9	6
TP	0.03	0.06	0.11	0.05	0.06	0.11	0.12	0.1	0.2
TN	2.11	6.67	2.71	1.93	0.84	1.27	1.92	2.5	1
氨氮	0.23	0.17	0.69	0.3	0.18	0.63	0.5	0.4	1

注: TN仅作为参考指标,不作为考核指标。

① COD_{Mn}

连续运行监测期间,谷家营考核断面COD_{Mn}监测结果相对稳定,基本维持在2.5~4.8 mg/L,呈周期性波动,平均监测浓度为3.9 mg/L,低于考核标准要

求的6 mg/L。

② TP

在运行监测期间,TP指标存在起伏波动,先是从3月的0.03 mg/L上升至5月的0.11 mg/L;随后下降至6月和7月的0.05、0.06 mg/L;8月和9月分别恢复至0.11、0.12 mg/L;分析原因在于3月—5月经历冬季冰雪融水、开春降水,部分面源污染物被带入水体,使得TP浓度上升;5月—7月,天气变暖,气温升高,水生植物、微生物代谢旺盛,富集大量的TP,使得水体TP浓度降低,直至八九月份,由于水生植物长势旺盛、收割不及时,又出现部分TP的释放问题,使得水体TP浓度上升;整体而言,监测期间TP浓度为0.05~0.12 mg/L,低于项目考核标准要求的0.2 mg/L。

③ 氨氮

氨氮指标在监测期间的浓度变化与TP指标相类似,即整体表现为先上升、后下降、随后又上升的波动规律;监测期间氨氮为0.17~0.69 mg/L,平均为0.40 mg/L,低于项目考核标准要求的1 mg/L。

④ TN

该河道水体生态治理项目中,TN不作为考核指标,仅对其考核断面指标数据进行简要分析:运行期间TN整体表现规律与TP、氨氮指标基本类似;3月—4月,冰雪融水、开春降水携带面源污染物入河,使得TN浓度上升至最大为6.67 mg/L;随后,由于水生植物、微生物吸收及降解作用,又大幅下降至0.84 mg/L;8月—9月,水生植物泛滥生长、水体局部厌氧,部分TN重新释放进入水体,TN浓度上升;监测期间TN为0.84~6.67 mg/L,平均为2.5 mg/L。

4.1.3 底泥处理效果

针对项目实施过程中清理产生的 $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ 淤泥,采取底泥堆岛、绿化浅水湾构建方式,共形成河心生境岛8处,堆岛占地 2.94 hm^2 ;左右沿岸浅水塘 85.2 hm^2 ,通过在浅水区种植芦苇、千屈菜、香蒲等挺水植物,深水区种植狐尾藻、苦草、金鱼藻等沉水植物,充分发挥植物吸收、根区微生物代谢降解等多重作用,实现了对输挖淤泥污染物的原位生态降解,同时构建形成了浅水湾塘交替、岛屿深潭相融合的多生境复式断面河道型湿地效果。

4.2 人文景观效果

该项目综合应用绿化浅水湾和生境岛、旁路复

合功能湿地、水生植物种植技术,以生态措施美化水景观为设计理念,充分考虑植物色彩搭配和季节变化等特点,打造绿叶色系、粉红色系、橙黄色系三大色系集中连片,创新采用冷季型、暖季型水生植物融合布设,形成多处独具特色、标志性的水生态景观节点(包括大地景观logo、生境岛屿地形等)。

该项目稳定运行后,通过现场布点、样方检测可知,实施后区域水生植物多样性指数(香浓威纳指数)由0.3提升到1.8,重塑了妫水河的河流生态景观格局,全面改善了实施范围内的水环境质量,有效保障了2019年世园会的胜利举办。妫水河被评为2018年度北京市优美河湖。

5 结论

基于妫水河2017年存在的底泥污染物释放、基流不足、水体滞留、植被单一、生境脆弱以及水质功能不达标等实际问题,采用生态清淤/底泥堆岛原位降解、外调水源/再生水补给、浅滩深潭/水生植物修复、水量循环/旁路湿地净化、流域水土保持与面源污染生态修复等多项生态修复技术,实现了区域水体水质、水量“双提升”。

① 采取生态清淤/底泥堆岛原位降解技术,可形成河心生境岛、沿岸浅水湾,种植水生植物实现对底泥污染物的生态降解,同时形成多生境河道型湿地效果。

② 通过外调水源/再生水补给技术综合提升区域水体流速、有效缩短换水周期,显著提高水体自净能力,同时实现对再生水的资源化利用。

③ 通过浅滩深潭/水生植物修复技术,显著改善区域水体的水生态系统结构,综合提升河道水体的生物多样性指数,重塑河流湿地系统的生态景观格局。

④ 通过水量循环/旁路湿地净化技术构建内、外两个循环,有效缩短河道水体的换水周期,同时发挥了湿地系统的水质净化效果。

⑤ 通过流域水土保持与面源污染生态修复技术对面源污染物的拦截、过滤及净化作用,实现了面源污染物径流入河总量的有效削减。

将以上5种生态修复措施综合运用,项目区生态流量较实施前提高了10%以上,水生植物多样性指数由0.3提升到了1.8,最终实现谷家营考核断面 COD_{Mn} 为2.5~4.8 mg/L、TP为0.05~0.12 mg/L、氨氮

为0.17~0.69 mg/L,满足《水污染防治行动计划》相关考核需求,同时对TN具有一定的去除效果。

参考文献:

- [1] 魏昕,屈磊,李焕萍.西安城运公园兰湖清淤方案比选分析[J].陕西水利,2022(11):90-91.
WEI Xin, QU Lei, LI Huanping. Comparison and analysis of desilting schemes for Lanhu Lake in Xi'an urban transport park[J]. Shaanxi Water Resources, 2022(11):90-91(in Chinese).
- [2] 王青峰,周琪,吴国立,等.景观湖泊与人工池塘的治理及淤泥利用[J].科技创新与应用,2022,12(31):107-110.
WANG Qingfeng, ZHOU Qi, WU Guoli, et al. Treatment and sludge utilization of landscape lakes and artificial ponds [J]. Technology Innovation and Application, 2022,12(31):107-110(in Chinese).
- [3] 向莹,张鸿涛,高宏洲,等.九江市琵琶湖底泥环境特征与生态清淤工程[J].中国给水排水,2021,37(14):142-150.
XIANG Ying, ZHANG Hongtao, GAO Hongzhou, et al. Sediment environmental characteristics and ecological dredging project of Pipa Lake in Jiujiang[J]. China Water & Wastewater, 2021,37(14):142-150(in Chinese).
- [4] 陈黎明,陈炼钢,李褪来,等.城市湿地公园生态补水调度方案对比分析[J].水资源保护,2022,38(6):162-167,174.
CHEN Liming, CHEN Liangang, LI Tilai, et al. Comparative analysis of operation schemes for ecological water supply in urban wetland park [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):162-167, 174(in Chinese).
- [5] 潘若云,江雪,潘萃,等.基于水质-水量-水源地耦合模型的生态补水量研究[J].节水灌溉,2022(12):58-63,73.
PAN Ruoyun, JIANG Xue, PAN Luo, et al. Study on ecological water replenishment based on coupling model of water quality, water quantity and water source [J]. Water Saving Irrigation, 2022(12):58-63, 73(in Chinese).
- [6] 江秀朋,张翠英,刘焕然,等.不同湿地植物对污染水体的净化效果[J].工业水处理,2019,39(1):53-56.

- JIANG Xiupeng, ZHANG Cuiying, LIU Huanran, et al. Purifying effect of different wetland plants on polluted water bodies [J]. Industrial Water Treatment, 2019,39(1):53-56(in Chinese).
- [7] 孙园,魏心雨,丁怡.人工湿地在修复富营养化水体中的应用及研究进展[J].工业水处理,2021,41(2):8-14.
SUN Yuan, WEI Xinyu, DING Yi. Application and research progress of constructed wetland in restoration of eutrophic water body [J]. Industrial Water Treatment, 2021,41(2):8-14(in Chinese).
- [8] 陈功.组合表面流湿地处理化工区污水厂尾水的工艺设计[J].工业水处理,2022,42(5):169-175.
CHEN Gong. Process design of combined surface flow wetland to treat tail water from wastewater treatment plant in chemical industry park [J]. Industrial Water Treatment, 2022,42(5):169-175(in Chinese).
- [9] 丁怡,王玮,宋新山,等.人工湿地在水质净化中的应用及研究进展[J].工业水处理,2017,37(3):6-10.
DING Yi, WANG Wei, SONG Xinshan, et al. Application of constructed wetland to water purification and its research progress [J]. Industrial Water Treatment, 2017,37(3):6-10(in Chinese).
- [10] 王文冬,高晓薇,王利军,等.河道微污染水体旁路复合流湿地强化净化技术研究及应用[J].环境工程,2023,41(1):158-163.
WANG Wendong, GAO Xiaowei, WANG Lijun, et al. Research and application of enhanced purification technology of micro-polluted water bodies by bypass compound flow wetland in a river channel [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(1):158-163(in Chinese).

作者简介:高晓薇(1982-),女,北京人,博士,正高级工程师,主要从事水利规划与设计相关工作。

E-mail:51510972@qq.com

作者简介:王文冬(1987-),男,天津人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水生态系统与修复。

E-mail:819509617@qq.com

收稿日期:2023-01-31

修回日期:2023-03-28

(编辑:衣春敏)