

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.12.022

旁路循环复合垂直流潜流湿地水质提升工程研究

王文冬¹, 王利军¹, 高晓薇¹, 董宁宁², 周俊³, 刘艳⁴,
袁林⁵

(1. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048; 2. 北京市昌平区供水服务中心, 北京 102200; 3. 北京市昌平区回天地区水务服务中心, 北京 102200; 4. 北京昌水建筑有限公司, 北京 102200; 5. 北京市昌平区十三陵地区水务服务中心, 北京 102200)

摘要: 基于妫水河设计年份存在的生态流量不足、水体流动缓慢、水质功能不达标、水生态景观较差等实际问题,依托河道沿岸现状循环管线,构建旁路循环复合流潜流湿地。研究表明,该项目最佳循环流量为 $7\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,需配套建设湿地占地总面积为 22.6 hm^2 ;"下向流池+上向流池"复合垂直流潜流湿地可有效解决水平潜流湿地易出现的"短路"问题,同时可为湿地微生物提供良好的厌氧/缺氧/好氧微生环境;湿地出水COD、TP、氨氮三项指标优于地表水Ⅲ类标准,同时对TN有一定的削减效果。

关键词: 旁路湿地; 循环回水; 复合垂直流湿地; 水质净化; 景观提升

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)12-0135-06

Research on Circulating Bypass IVCW for Water Quality Improvement

WANG Wen-dong¹, WANG Li-jun¹, GAO Xiao-wei¹, DONG Ning-ning², ZHOU Jun³,
LIU Yan⁴, YUAN Lin⁵

(1. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China; 2. Beijing Changping District Water Supply Service Center, Beijing 102200, China; 3. Huitian Water Service Center of Changping District of Beijing, Beijing 102200, China; 4. Beijing Changshui Construction Co. Ltd., Beijing 102200, China; 5. Ming Tombs Water Service Center of Changping District of Beijing, Beijing 102200, China)

Abstract: Based on the actual problems of insufficient ecological flow, slow water flow, substandard water quality and poor water ecological landscape in the design year of Guishui River, the circulating bypass integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW) is constructed on the basis of current circulating pipelines along the river. The main result shows the optimal circulating flow of the project is $7\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, and the total area of the constructed wetland is 22.6 hm^2 . The IVCW combined with "downward flow pool and upward flow pool" could effectively solve the problem of short circuit which is prone to occur in horizontal subsurface flow wetland, and it could provide a good anaerobic/anoxic/aerobic micro-environment for wetland microorganisms. The effluent COD, TP and ammonia nitrogen of the wetland are superior to level Ⅲ criteria of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), and it has a certain removal effect on TN.

Key words: bypass wetland; circulating backwater; IVCW; water purification; landscape improvement

人工湿地是20世纪70年代在土地处理系统、稳定塘、生物滤池等污水处理技术基础上发展起来的一种由人工构建并控制的污水生态处理技术:在人工湿地系统成熟后,填料表面和植物根系上将由于大量微生物的生长而形成生物膜;污水在流经生物膜时,大量SS被填料和植物根系阻挡截留;有机污染物则通过生物膜的吸收、同化及异化作用而被去除;人工湿地系统中由于植物根系对氧的传递释放作用,植物根系周围依次形成好氧、缺氧、厌氧状态,使得污水中的N、P等污染物质能够作为植物、微生物的营养物质而被吸收利用,还可以通过硝化反硝化等作用而被去除,最后通过对人工湿地进行填料更换或植物收割而将污染物从湿地生态系统中彻底清除^[1-3]。

人工湿地生态系统对污水的净化处理是湿地填料、植物以及微生物三者协同作用的结果,即通过过滤、吸附、共沉、离子交换、植物吸收和生物降解等多重作用来实现对污水的净化处理^[4-5];与常规的污水处理工艺相比,具有处理效果好、氮磷去除能力强、运转维护管理方便、工程基建和运转费用低以及对负荷变化适应能力强等显著特点^[6-8]。若将人工湿地直接应用于河道水体的水质净化与生态修复,仍存在河道行洪与水质净化兼顾困难、项目大规模占地与规划许可集约用地冲突、湿地净水效果提高与建设成本降低需求矛盾冲突等实际问题^[9-10]。

基于以上分析,项目研究采用构建河道旁路湿地,兼顾实现河道行洪及生态净水功能,同时采用“下向流池+上向流池”串联复合垂直流潜流湿地形式,有效降低湿地占地面积,并有效避免水平潜流湿地容易出现的水流短路及堵塞问题,取得了积极的社会及环境效益^[11-12]。现将所采用技术的设计要点进行梳理分析,以为后续类似工程项目开展提供技术参考。

1 工程概况

该项目位于延庆世园会主会场北部三里河上段河道,现状地形是由京包高速、北新路与三里河围成的区域,呈不规则多边形,处理规模 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要处理工艺为“下向流池+上向流池”串联复合垂直流潜流湿地,湿地占地约 22.6 hm^2 ,湿地整体布置如图1所示。项目处理对象为官厅水库上游重要支流(妫水河)地表微污染水,设计进水COD为30~40

mg/L、氨氮为1.5~2.0 mg/L、总磷为0.3~0.4 mg/L,设计出水考虑妫水河下游入官厅水库水质需求,主要水质指标执行地表水Ⅲ类标准(见表1)。



图1 湿地项目平面布置

Fig.1 Layout of project wetland

表1 设计进、出水主要水质指标

Tab.1 Design main influent and effluent quality

项 目	COD	氨氮	总磷
设计进水	30~40	1.5~2.0	0.3~0.4
设计出水	20	1.0	0.2

注: 总氮不作为考核指标。

1.1 工艺流程确定

基于妫水河设计年份存在的由于水系连通较差、缺乏补给水源造成生态流量不足、水体流动缓慢;由于水生态系统功能退化造成水质功能不达标、水生态景观较差等实际问题,依托妫水河沿岸现状城北循环管线,将谷家营考核断面上游来水提升至上游三里河支流右岸可利用地块,并建设潜流湿地,形成河道旁路循环湿地水质净化系统(见图2),发挥水质净化功能,通过循环回水,在一定程度上增加了区域水体的流动性能,有助于水生态系统自净能力的提升。

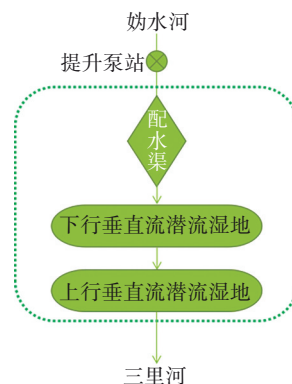


图2 湿地项目工艺流程

Fig.2 Flow chart of wetland project

1.2 循环处理水量确定

依托现状城北循环管线及循环泵站,综合考虑经济流速,同时结合《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)河道水系最小换水周期、湿地具体形式及可供建设的用地面积,最终确定湿地的处理规模为 $7\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,湿地占地约 22.6 hm^2 。

湿地主要设计参数见表2。

表2 旁路复合垂直流湿地主要设计参数
Tab.2 Main design parameters of bypass integrated vertical-flow constructed wetland

项 目	有机负荷/ ($\text{gCOD}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	水力负荷/ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	停留时间/ d
设计参数	13.33	0.34	2.2
规范标准	3~15	0.4~1.2	0.8~2.5

注: 湿地有机负荷、水力负荷、停留时间三个设计参数均能满足《人工湿地水质净化技术指南》Ⅱ区相关参数要求。

1.3 湿地形式确定

基于传统湿地存在的表流湿地占地面积大、水质净化效果差以及水平潜流湿地长宽比、结构形式控制严格等实际缺点,采用“下向流池+上向流池”串联复合垂直流潜流湿地,在工艺设计上,主要参照《人工湿地水质净化技术指南》Ⅱ区相关设计参数,在满足湿地设计长宽比、表面负荷、有机负荷、水力停留时间相关技术参数要求的基础上,将下向流池和上向流池进行有机串联,一方面能够有效解决水平潜流人工湿地易出现的“短路”现象,另一方面可形成基质床内好氧、厌氧的溶解氧状态变化,为微生物提供良好的生活环境。

复合垂直流人工湿地的结构形式见图3。

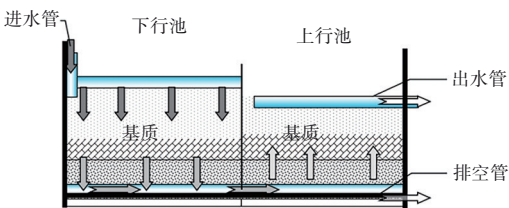


图3 复合垂直流湿地结构形式
Fig.3 Structure of integrated vertical-flow constructed wetland

2 湿地设计及功能优化

项目研究构建形成以复合垂直流潜流湿地为主导工艺,将下向流池和上向流池进行有机串联的

复合潜流人工湿地水质净化系统,发挥其抗短路、形态灵活的性能,最大限度节约工程占地;同时自发研制并申请授权软件著作权“人工潜流湿地水质模拟系统软件 V7.9”,该软件系统可通过模拟不同湿地填料、植物组合工况下的湿地出水水质,实现对特定湿地规模条件下,不同湿地填料、植物系统的最优配置。

2.1 湿地填料形式选择

在湿地填料类型及粒径级配选择上,在以节约湿地建设成本、构建以石灰石碎石为主要基质填料的基础上,充分考虑了沸石、火山岩、Fe/C 以及生物球填料在氨氮、TN、TP 去除及微生物挂膜方面的技术优势,实现了技术经济与湿地净化效果的统一;同时构建了由上至下不同级配的复合填料系统,形成了布水和集水层、主处理层、中间集水和布水层4个不同填料功能分区,有益于各层分区功能的正常发挥。

湿地填料床系统典型断面如图4所示。

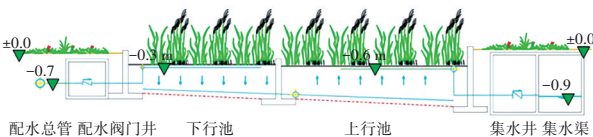


图4 湿地填料床系统典型断面
Fig.4 Typical section of wetland packed bed system

下行池、上行池前后两级湿地的填料布置大体相同,主要是依靠地形高差,形成水力坡度,保证均匀配水、集水。两级湿地填料床系统的设计总深度均为 1.5 m ,其中,超高 0.3 m ,填料总厚度为 1.2 m ,湿地填料床由下至上依次为:①承托层, $\text{Ø}16\sim 64\text{ mm}$ 石灰石碎石,厚 400 mm ;②净化层, $\text{Ø}8\sim 32\text{ mm}$ 石灰石+火山岩、沸石复合功能填料,厚 700 mm ;③保温层, $\text{Ø}4\sim 8\text{ mm}$ 珍珠岩+火山岩,厚 100 mm 。

2.2 湿地植物优选

按照“本地耐寒水生植物优先、环境适应性好、水质净化能力强、景观与生态效益显著”四个原则,优选芦苇、香蒲、菖蒲、水葱等生长旺盛、耐寒抗冻、生物量大的植物作为水质净化型先锋物种,湿地进配水系统前端进行重点布设,优先发挥水质净化功能,为后续空间景观营造创造有利条件;湿地系统中段、后段及驳岸亲水、观赏区域,考虑季节环境及色彩变化,重点布设鸢尾、千屈菜、美人蕉等多年生、耐寒景观营造型水生植物,发挥生境修复以及景观营造功能。

3 水质净化与生态景观效果分析

3.1 水质监测方案

为充分了解项目实施后的水质提升效果,在妣水河谷家营考核断面(湿地进水)、三里河入妣水河监测断面(湿地出水)设置自动水质监测装置,按照试验设计需求间隔取样自动化监测。

① 监测点位

监测点:妣水河谷家营考核断面(E115°53'24", N40°27'0")、三里河入妣水河监测断面(E115°58'27", N40°29'20")。

② 监测指标

监测指标包括COD、氨氮、TP、TN,共4项。

③ 监测时间与频率

对项目区域进行自动化取样检测,取样时间为2019年4月—9月的每月中旬,检测频率确定为1次/月。

④ 取样方法

取样方法参照《水环境监测规范》(SL 219—2013)中相关要求进行。

⑤ 检测方法

- COD:重铬酸盐法(GB 11914—1989);
- 氨氮:纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009);
- TN:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012);
- TP:钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—1989)。

3.2 水质净化效果分析

旁路循环复合垂直流湿地水质净化工程项目建设完成并稳定运行后,妣水河谷家营考核断面(湿地进水)、三里河入妣水河监测断面(湿地出水)在2019年4月—9月连续6个月的水质监测分析结果如图5所示。

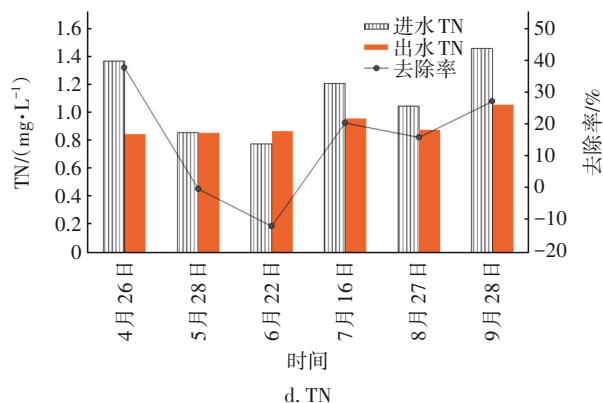
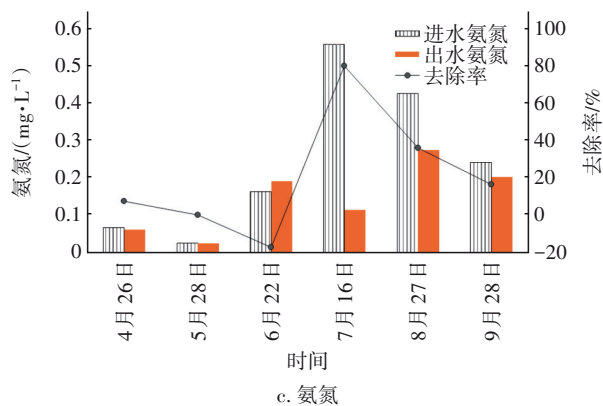
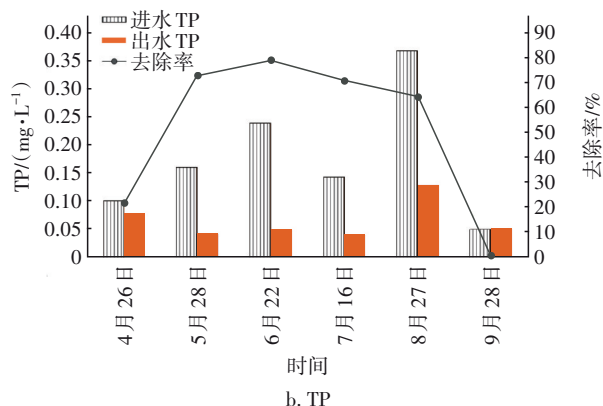
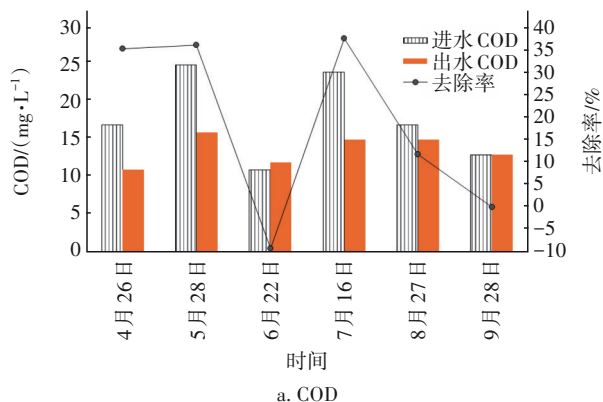


图5 湿地系统实际出水水质监测结果

Fig.5 Monitoring results of actual effluent quality of wetland system

① 湿地进、出水COD变化结果分析

在运行监测期间,尽管湿地进水COD表现出一定程度的波动变化,但湿地出水COD相对稳定保持在11~16 mg/L,平均为13.67 mg/L,即湿地出水COD最高监测浓度以及平均监测浓度均低于地表水Ⅲ类标准考核的20 mg/L限值要求;其中,6月份湿地出水COD略高于进水值,主要原因可能是湿地进水本身为河道微污染水,可供微生物利用的碳源浓度相对较低;同时在监测取样前期降雨进一步稀释了

湿地系统 BOD_5 浓度,使得湿地好氧微生物降解 BOD_5 的能力减弱,同时由于湿地周边部分渗滤液进入系统内部,使得湿地出水 COD 上升,略高于进水值。

② 湿地进、出水 TP 变化结果分析

监测期间,湿地进水 TP 浓度同样表现出较大幅度的变化,监测值为 0.05~0.37 mg/L,但湿地出水 TP 变化幅度相对较小,监测值为 0.04~0.13 mg/L,平均值为 0.06 mg/L,满足地表水Ⅲ类标准考核的 0.2 mg/L 限值要求;自 2019 年 4 月建成,至当年 9 月连续 6 个月的湿地出水 TP 监测结果均低于进水 TP,即湿地表现出了相对较好的 TP 去除效果。

③ 湿地进、出水氨氮变化结果分析

水质监测阶段,湿地进出水氨氮浓度均出现了较大波动:进水氨氮浓度变化范围为 0.025~0.553 mg/L,7 月进水氨氮浓度最高;出水氨氮浓度变化范围为 0.025~0.273 mg/L,8 月出水氨氮浓度最高。连续 6 个月监测结果中,湿地系统出水氨氮浓度均低于地表水Ⅲ类标准考核的 1.0 mg/L 限值要求,但在 6 月份湿地出水氨氮浓度监测值高于进水,分析其原因在于监测前期降雨使得部分渗滤液携带氨氮进入湿地系统,导致出水氨氮浓度高于进水。

④ 湿地进、出水 TN 变化结果分析

总氮不作为设计考核目标,仅作为参考指标。连续 6 个月监测结果显示:进水 TN 变化较大,监测值在 0.78~1.46 mg/L 之间波动,大部分时间超过 1 mg/L,平均值 1.12 mg/L;出水 TN 变化相对稳定,监测值在 0.86~1.06 mg/L 之间波动,平均值为 0.96 mg/L,低于 1 mg/L;大部分监测时段,湿地出水 TN 浓度低于湿地进水,表现出了良好的 TN 去除能力,但在 6 月由于降雨部分渗滤液携带部分 TN 进入湿地系统,使得湿地内部 TN 升高,出水 TN 浓度高于进水。

综上所述,尽管湿地进水 COD、TP、氨氮三项指标有一定程度的波动,但湿地系统通过发挥填料吸附、植物吸收、微生物降解多重作用,使其出水指标均能满足地表水Ⅲ类标准考核要求;尽管 TN 不作为考核指标,但湿地系统对 TN 也有一定的去除效果。

3.3 生态景观效果分析

结合建设区域不规则多边形用地现状,将湿地分为面积相当的 10 个分区,形成“田”字结构,各分

区将下向流池和上向流池潜流湿地单元进行有机串联,同时在湿地进水端、出水端分别布设生态稳定塘,各湿地单元(稳定塘)根据水深状况及形态特征,分别搭配水质净化型、景观营造型水生植物,形成坑塘、湿地单元有机串联,挺水植物、沉水植物交错配置的多生境空间生态结构,为鸟类、鱼类、小型野生动物、底栖动物、微生物提供栖息环境,取得了良好的生态及景观效益。该项目有效保证了世园会核心区及周边区域地表水体水质由 V 类向Ⅲ类的转化,对强化延庆北部水循环系统水质净化功能、提高世园区水体水质、修复妫水河河流水体的生态系统、维护生物多样性、恢复原有河道的生态功能起到了显著的促进作用。

4 结论

依托妫水河沿岸现状城北循环管线,利用妫水河支流三里河右岸可利用地块,建设“下向流池+上向流池”潜流湿地,形成旁路循环复合流潜流湿地,发挥水质净化功能,湿地出水回到妫水河,在一定程度上提高了区域水体的流动性。

① 依托现状城北循环管线及泵站,参考管道运行经济流速,同时结合河道水质换水周期、湿地净水潜能,最终确定最佳循环流量为 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,配套建设湿地占地为 22.6 hm^2 。

② 配置“下向流池+上向流池”串联复合垂直流潜流湿地,由下至上依次铺设承托层(400 mm 厚)、净化层(700 mm 厚)、保温层(100 mm 厚)以及超高层(300 mm 厚),形成了级配式填料床系统,可有效解决水平潜流湿地易出现的“短路”问题,同时可为湿地微生物提供良好的厌氧/缺氧/好氧微生物环境。

③ 湿地设计有机负荷 13.33 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、水力负荷 0.34 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、停留时间 2.2 d,均能满足《人工湿地水质净化技术指南》Ⅱ区相关参数要求,通过发挥填料吸附、植物吸收、微生物降解多重作用,对上游来水 COD、TP、氨氮和 TN 的平均去除率分别为 18%、52%、20% 和 15%。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 黄炳彬, 岳伦. 人工湿地技术在北京市的研究及应用进展[J]. *北京水务*, 2018(3): 26-30.
- HUANG Bingbin, YUE Lun. Research and application progress of constructed wetland technology in Beijing [J]. *Beijing Water*, 2018(3): 26-30 (in Chinese).
- [3] 赵倩, 庄林岚, 盛芹, 等. 潜流人工湿地中基质在污水净化中的作用机制与选择原理[J]. *环境工程*, 2021, 39(9): 14-22.
- ZHAO Qian, ZHUANG Linlan, SHENG Qin, *et al.* Mechanism and selection principle of substrate in subsurface flow constructed wetland for sewage purification [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39 (9): 14-22 (in Chinese).
- [4] 余俊霞, 陈双荣, 刘凌言, 等. 复合人工湿地系统对低污染水总氮的净化效果及其微生物群落结构特征[J]. *环境工程*, 2022, 40(1): 13-20.
- YU Junxia, CHEN Shuangrong, LIU Lingyan, *et al.* Purification effect of compound constructed wetland system on total nitrogen in low pollution water and its microbial community structure characteristics [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40 (1) : 13-20 (in Chinese).
- [5] 杨杨阳, 万蕾, 张林军. 人工湿地低温运行效果及强化措施研究现状[J]. *生态经济*, 2012(12): 192-195.
- YANG Yangyang, WAN Lei, ZHANG Linjun. Research status of low temperature operation effect and strengthening measures of constructed wetlands [J]. *Ecological Economy*, 2012(12): 192-195 (in Chinese).
- [6] 姚东, 冯雪丽, 张保君, 等. 龙河人工湿地在北方冬季低温条件下的运行效率[J]. *环境工程*, 2022, 40(1): 148-154.
- YAO Dong, FENG Xueli, ZHANG Baojun, *et al.* Operation efficiency of Longhe constructed wetland under low winter temperature in north China [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40 (1) : 148-154 (in Chinese).
- [7] 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): 192-195.
- 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): 192-195 (in Chinese).
- [8] 范远红, 崔理华, 林运通, 等. 不同水生植物类型表面流人工湿地系统对污水厂尾水深度处理效果[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(6): 2875-2880.
- FAN Yuanhong, CUI Lihua, LIN Yuntong, *et al.* Advanced treatment of tail water from sewage plant by different aquatic plant types of surface flow constructed wetlands [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(6): 2875-2880 (in Chinese).
- [9] 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 body by bypass compound flow wetland in a river channel [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41 (1) : 158-163 (in Chinese).
- [10] 王文冬, 王利军, 王艳梅, 等. “表潜结合式”人工湿地用于处理城市微污染水体[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(2): 100-104.
- WANG Wendong, WANG Lijun, WANG Yanmei, *et al.* Application of surface & subsurface constructed wetland in treatment of urban micro-polluted water body [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (2) : 100-104 (in Chinese).
- [11] 倪冬生. 城区河段水生态修复与治理模式研究——以妫水河世园段为例[J]. *地下水*, 2021, 43(6): 135-136, 168.
- NI Dongsheng. Study on water ecological restoration and control mode of urban river reach—taking Guishui River Shiyuan section as an example [J]. *Ground Water*, 2021, 43(6): 135-136, 168 (in Chinese).
- [12] 李亚娟, 杜彦良, 毕二平, 等. 妫水河湿地植物作用及调水水质响应模拟[J]. *环境科学*, 2020, 41(9): 4095-4104.
- LI Yajuan, DU Yanliang, BI Erping, *et al.* Simulation of water quality response of Guishui River wetland plants and water diversion [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4095-4104 (in Chinese).

作者简介:王文冬(1987-),男,天津人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水环境治理与生态修复。

E-mail:819509617@qq.com

收稿日期:2022-12-09

修回日期:2022-12-22

(编辑:衣春敏)