

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.018

旁路复合流湿地用于新风河流域面源污染治理

邓文静¹, 蔡伟², 徐昕³, 李枞林¹, 孔维杰¹, 池艳峰¹

(1. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 200082; 2. 北京禹冰水利勘测规划设计有限公司, 北京 100161; 3. 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 湖泊污染控制国家环境保护重点实验室 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012)

摘要: 为实现北京市新风河流域的面源污染治理、行洪排涝和景观功能,基于调蓄池建设,采用前置塘→两级水平潜流湿地→上行垂直潜流湿地→表流湿地的串联旁路复合流湿地工艺。为提升湿地在低温下的运行效果和面源污染收集能力,优化了湿地的空间布局、填料和植物配置。工程实际运行表明:①该湿地系统布局灵活、节省占地、布水均匀并能形成好氧/厌氧/缺氧多种微生物生存环境和良好生态景观;②通过植被覆盖、低水位运行和保温填料覆盖等措施,确保湿地在低温下发挥净水效果;③河道水质基本达标,非降雨条件下湿地出水优于地表水Ⅲ类标准,降雨条件下出水优于地表水Ⅳ类标准。

关键词: 旁路湿地; 复合流; 面源污染; 新风河流域; 水环境治理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0116-08

Bypass Composite Flow Wetland Purification for Non-point Source Pollution Control in the Xinfeng River Basin

DENG Wenjing¹, CAI Wei², XU Xin³, LI Conglin¹, KONG Weijie¹, CHI Yanfeng¹

(1. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co. Ltd., Shanghai 200082, China; 2. Beijing Yubing Hydraulic Survey Planning Design Co. Ltd., Beijing 100161, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To address non-point source pollution, flood regulation, and landscape enhancement in the Xinfeng River basin in Beijing, a composite flow wetland system was constructed, incorporating a detention pond and a series of treatment processes: pre-pond, two-stage horizontal subsurface flow wetlands, vertical flow wetlands, surface flow wetlands with bypasses. To improve performance in low temperatures and enhance pollution collection efficiency, the system's spatial layout, media, and vegetation were optimized. The results demonstrate that: ① The wetland system is flexible in design, space-efficient, and provides uniform water distribution, creating diverse microbial habitats (aerobic, anaerobic, and anoxic) and an aesthetically pleasing ecological landscape. ② Measures such as vegetation

通信作者: 池艳峰 E-mail: chiyanfeng@ccccltd.cn

coverage, low water level operation, and insulated media ensure effective water purification even in low temperatures. ③ During operation, the river water quality meets regulatory standards, with wetland effluent exceeding class III surface water quality under non-rainfall conditions and class IV surface water quality under rainfall conditions.

Keywords: bypass wetland; composite flow; non-point source pollution; Xinfeng River basin; water environment treatment

城市化发展使城市不透水面积增加,径流量增大,降雨径流产流时间缩短,污染负荷变大,因此城市降雨径流污染已成为水体污染的主要来源之一^[1]。王海邻等^[2]研究发现,北京城市主干道TSS、COD、TN、TP污染负荷分别为3 273.15、266.86、16.24、1.89 kg/(hm²·a),均超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类水体排放限值。现阶段面源污染治理主要采取调蓄池、潜流湿地及海绵城市建设手段^[3],存在的主要问题包括海绵城市建设需在城市规划阶段进行规划方可达到目标且改造难度大^[4],调蓄池收集处理费用高、污水处理厂运行难度大、运营费用高等。人工湿地具有生态景观效果好、净化效率高、经济成本低、无二次污染、氮磷处理能力强等优点,是面源污染治理的首选工艺^[5]。复合流湿地工艺因具有丰富的流态和多种微生物生存环境而成为人工湿地的优先选择。

目前复合流湿地的工程研究主要针对污水处理厂尾水^[6-7]及河道微污染水^[8-9],对面源污染的工程研究主要针对农田面源污染^[10-11],或利用单一表流湿地治理小城镇面源污染^[12],而利用复合流湿地治理城镇面源污染的研究较少。若将复合流湿地系统直接应用于城镇面源污染的收集、净化,可能存在初期雨水难以收集,进水SS高导致湿地易堵塞,河道行洪、景观、水质净化三者难以兼顾,湿地用地需求和可用地位置冲突,湿地净化初期雨水效果提高和建设成本矛盾,以及需降低运营成本等问题。

基于以上相关研究,在已实施截污治污、河道清淤、水系连通工程的基础上,通过建设北京大兴区新风河流域综合治理工程-生态廊道建设工程,对新风河流域的面源污染进行治理。该项目采用前置塘→两级水平潜流湿地→上行潜流湿地→表流湿地的串联旁路复合流湿地工艺形式,可有效节约占地面积,并积极探索解决湿地均匀布水、填料

选择和湿地保温等问题。现将所采用的设计技术要点进行总结和分析,以为后续类似工程设计提供参考。

1 工程概况

新风河流域位于北京市大兴区西北部、北京地区正南、永定河东岸,是大兴区的重要观景、防洪排水河道,是城市副中心通州区的重要水源之一,也是“三环水系绕京城”的“水三环”主要组成部分。新风河流域水系主要包括新风河、老凤河、安南支流、四海支流、南苑灌渠、凉凤灌渠等23条沟渠,最终汇入凉水河,汇水面积166.4 km²。

根据北京市黑臭水体治理相关文件,结合《城市黑臭水体整治工作指南》、《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)以及北京市黑臭水体判定成果等,新风河流域范围内有4条河流、5段河道共计35.68 km存在黑臭情况。末端烧饼庄闸断面2011年—2016年连续6年均均为地表水劣V类水体。经截污、清淤治理后,面源污染成为影响河道水质的最大污染源。

新风河流域综合治理工程面源污染治理设计思路见图1。



图1 工程设计思路

Fig.1 Engineering design concept

根据新风河流域内各支流汇水面积、计算水量及闸、坝等控制性建筑物的位置,在新西凤河、安南支流及四海支流汇入新风河前设置旁路复合流湿地净化水质。湿地工程通过构建前置塘→潜流湿地→表流湿地的复合流湿地净化系统净化面源污

染,保证和稳定河道水质,确保流域水体水质满足考核要求。

非雨季时,设计进水水质维持在地表水Ⅳ~Ⅴ类水平,设计出水关键指标 BOD_5 、 NH_3-N 、TP、COD、pH 满足地表水Ⅳ类标准。根据流域下垫面性质,初步估算河道汇入初雨时的水质,雨季时设计进水水质为劣Ⅴ类,设计出水关键指标 BOD_5 、 NH_3-N 、TP、COD、pH 满足地表水Ⅴ类标准。

2 工程设计及优化

2.1 工艺选择

新风河各湿地采用前置塘→潜流湿地→表流湿地的处理流程,具有以下特点:

① 前置塘作为潜流湿地的预处理设施,设置于园区内远离人流的区域,将水体中悬浮物、可降解颗粒物进行过滤拦截,避免堵塞潜流湿地;有效提升对进水水量、水质的耐冲击负荷能力,增加水力停留时间,改善潜流湿地的布水均匀性。

② 根据相关论文成果、人工湿地指南等可知,水平潜流人工湿地去除 COD 能力强、不容易堵塞、工程建设费用较低,上行垂直潜流人工湿地的水力负荷与污染物削减负荷、硝化能力、除磷能力都较强,但存在易堵塞、工程建设费用高的缺点,因此优选两级水平潜流湿地→上行垂直潜流湿地处理系统,使系统能在保障正常运行的基础上,减少投资,提升污染物去除能力。采用中间布水周边出水的水流方式,使湿地具有较强的灵活性,湿地边墙受水力条件约束小,因此可根据景观需要设置成不同形状。

③ 通过表流湿地,可以进一步提升水体复氧能力和生化作用,降解来水中 NH_3-N ,并形成湿地公园,为周边居民提供集游玩娱乐学习于一体的场所。

2.2 工艺参数确定

为合理分析流域范围内初期雨水产汇流过程及初期产流量,首先依据 MIKE 11 模型对设定降雨厚度的产流量、各子流域的综合径流系数进行模拟。河道沿线面源污染主要通过初雨径流汇入河道,流域范围内下垫面类型主要包括建成区、林地和耕地,参照相关规范,林地、耕地和绿地的径流系数分别为 0.6、0.15、0.15,核算出流域初期雨水量为 71.75 万 m^3 ,设计处理规模为 6.31 万 m^3/d 。

初期雨水通过湿地和初雨截流调蓄设施进行净化。根据周边污水处理厂的处理能力,初雨截流与调蓄设施工程主要设置于建成区,收集随管网排出的雨水径流,该部分径流污染物浓度较高,需经初雨截流调蓄设施截流后进入污水处理厂进行净化;剩余的雨水径流污染物浓度较低,与河水混合后排入复合流湿地。

湿地系统与初雨截流调蓄设施联合运行工况见图 2。

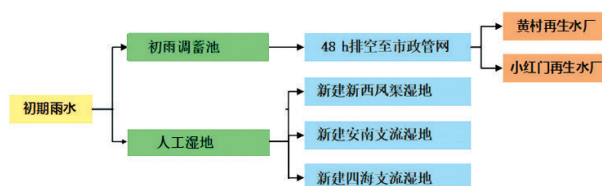


图2 湿地系统与初雨截流调蓄设施联合运行

Fig.2 Combined operation of wetland system and initial rainwater interception and storage facilities

湿地系统水力负荷为 $0.17 \sim 0.24 m^3/(m^2 \cdot d)$,水力停留时间为 1.8~3.0 d。根据待处理水量及水力负荷、水力停留时间等参数计算确定人工湿地总面积为 30.04 hm^2 。

基于水质净化、总体景观效果及可用地考虑,湿地系统设计面积见表 1。

表1 湿地系统设计面积

Tab.1 Design area of the wetland system hm^2

项目	前置塘	两级水平潜流湿地	垂直潜流湿地	表流湿地
新西凤渠湿地	3.30	8.94	4.70	1.20
安南支流湿地	1.50	5.34	2.98	2.50
四海支流湿地	1.10	5.60	3.01	1.86

2.3 湿地系统设计及优化

2.3.1 空间布局优化

为不影响河道行洪,设置旁路复合流湿地对面源污染进行治理。新风河流域各支流自北向南汇入新风河干流,采用 DHI MIKE 模型对新风河流域范围内的可用地以及雨季产流量和污染物浓度进行分析,利用现状河道的走向及连通形式,同时考虑周边居民的景观生态需求,尽量使污水在进入新风河干流前进行截流净化。新西凤渠湿地将凤河故道作为连通渠,利用湿地系统及现有闸门截流净化南苑灌渠、凤河故道及新西凤渠流域范围内的初期雨水。

新西凤渠湿地空间布局见图3。

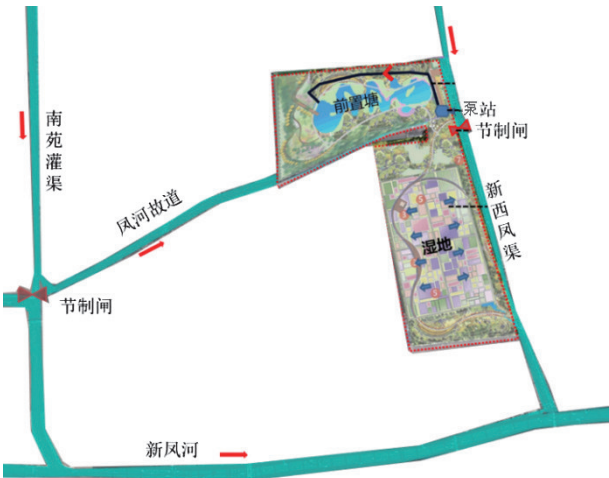


图3 新西凤渠湿地空间布局

Fig.3 Spatial layout of Xinxifengqu wetland

工程设计时充分考虑湿地系统内土方平衡及相关高程,为节省能源、减少投资,湿地系统内水体均为重力流,最终重力流排入河道。

前置塘、潜流湿地及表流湿地之间主要采用管道连接。为保障布水均匀性,设计时考虑:

- ① 前置塘和一级水平潜流湿地之间采用管道配合布水渠进行连接;
- ② 前置塘与一级水平潜流湿地之间设置阀门井,在保障单格湿地检修时能够断水操作的同时控制进入该处理单元的流量;
- ③ 一级水平潜流湿地、二级水平潜流湿地及垂直潜流湿地之间采用多段管道进行连接;
- ④ 布水管、集水管均采用穿孔花管进行布水和集水。末端阀门井用于控制湿地内运行水位。

各湿地间的连接方式见图4。

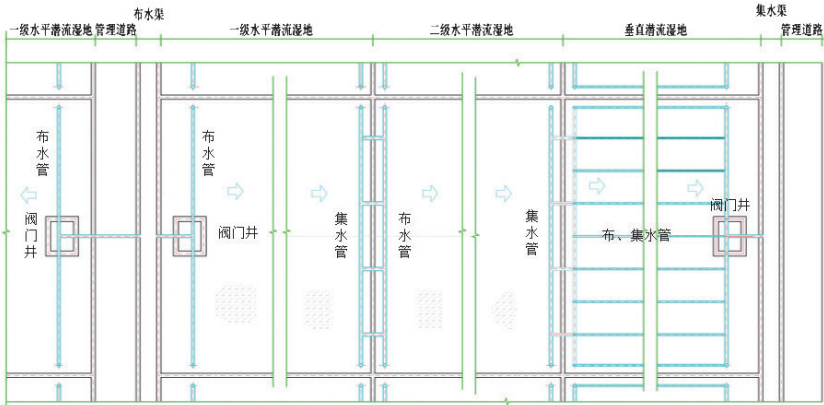


图4 潜流湿地典型平面示意

Fig.4 Typical floor plan of subsurface flow wetlands

2.3.2 湿地填料优化

潜流型湿地填料的种类繁多,选择适宜粒径和种类的填料对保证人工湿地处理效果十分重要。设计时对湿地填料的粒径进行计算,选择中等粒度的填料,并充分考虑湿地内水流方向,在湿地进水前端设置较大粒径填料,尾端无管道区域设置较小粒径填料。在填料种类的选择上,充分考虑建设成本及净化效率,选择级配碎石、石灰石作为主要填料,辅以较易挂膜的陶粒、火山岩、沸石等,优化湿地对BOD₅、NH₃-N、TP、TN的去除效果。同时,针对冬季湿地填料热传导速率大的问题,为保障冬季低温时湿地内的净化效果,在湿地上层设置保温隔热性能较好的填料陶粒。填料设计情况见表2。

另外,冬季采取收割水生植物在湿地上部覆盖、低水位运行等措施,能在湿地表面形成绝热保

温层,避免湿地内水温耗散,有效降低冬季低温对湿地的影响。

表2 填料设计情况

Tab.2 Design of filling materials

湿地类型	功能	填料类型	粒径/mm	厚度/cm
水平潜流湿地	覆盖层	陶粒	4~8	15
	进水区	石灰石	16~32	115
	粗过滤区	级配碎石和火山岩	8~16	115
	精过滤区	级配碎石和沸石	4~8	115
	出水区	级配碎石	16~32	115
垂直潜流湿地	覆盖层	陶粒	4~8	15
	集水层	级配碎石	4~8	40
	净化层	沸石	8~16	30
		火山岩	8~16	30
	配水、承托层	石灰石	8~16	20
		级配碎石	16~32	30

2.3.3 湿地植物搭配优化

水生植物是湿地水质净化的关键因素,湿地系统可通过水生植物直接吸附和吸收污染物、协同微生物分解污染物等途径从水体中去除污染物或降低其毒性^[13]。根据相关研究及区域气候条件、流域水文地质条件、园区景观需求及植物生长特性等,确定该项目湿地植物的5条筛选原则:净化能力强、适应范围广、可快速成活成片生长、根系发达;耐冲击负荷能力强;低温期能顺利越冬;景观效果佳;不易泛滥生长。

综上,该项目从水质净化能力、低温适应性及景观效果等方面考量,优选芦苇、菖蒲、香蒲、泽泻、水葱、黄菖蒲、千屈菜等挺水植物,睡莲、菱、荇菜等浮叶植物,苦草、金鱼藻、黑藻、狐尾藻等沉水植物。在湿地进水的前端、远离人群的区域布置芦苇、菖蒲、香蒲、水葱、粉绿狐尾藻等水生植物,在亲水及观赏区域结合园区景观布置菖蒲、黄菖蒲、千屈菜、睡莲、苦草、金鱼藻等水生植物。

3 运行效果评价

3.1 水质评价

根据北京市水务局官网发布的由第三方检测机构检测的新凤河水质情况,新凤河水质自2021年至今明显好转,水体透明度增加,2021年基本达到地表水Ⅴ类标准,2022年至目前水质均优于地表水Ⅳ类标准。新凤河2023年6月—2024年5月的水质情况见表3。

表3 新凤河水质情况

Tab.3 Water quality of Xinfeng River

时间	水质类别
2023年6月	地表水Ⅲ类
2023年7月	地表水Ⅳ类
2023年8月	地表水Ⅳ类
2023年9月	地表水Ⅳ类
2023年10月	地表水Ⅲ类
2023年11月	地表水Ⅲ类
2023年12月	地表水Ⅳ类
2024年1月	地表水Ⅳ类
2024年2月	地表水Ⅳ类
2024年3月	地表水Ⅲ类
2024年4月	地表水Ⅲ类
2024年5月	地表水Ⅲ类

湿地系统自2019年开始建设,于2020年建设完成,至2022年系统运行稳定。根据2024年1月—

7月人工湿地系统净化效果检测数据,湿地净化水质效果明显,出水水质基本能达到地表水Ⅳ类标准。湿地系统出水监测结果见图5,该湿地与其他湿地去除率的比较见表4。

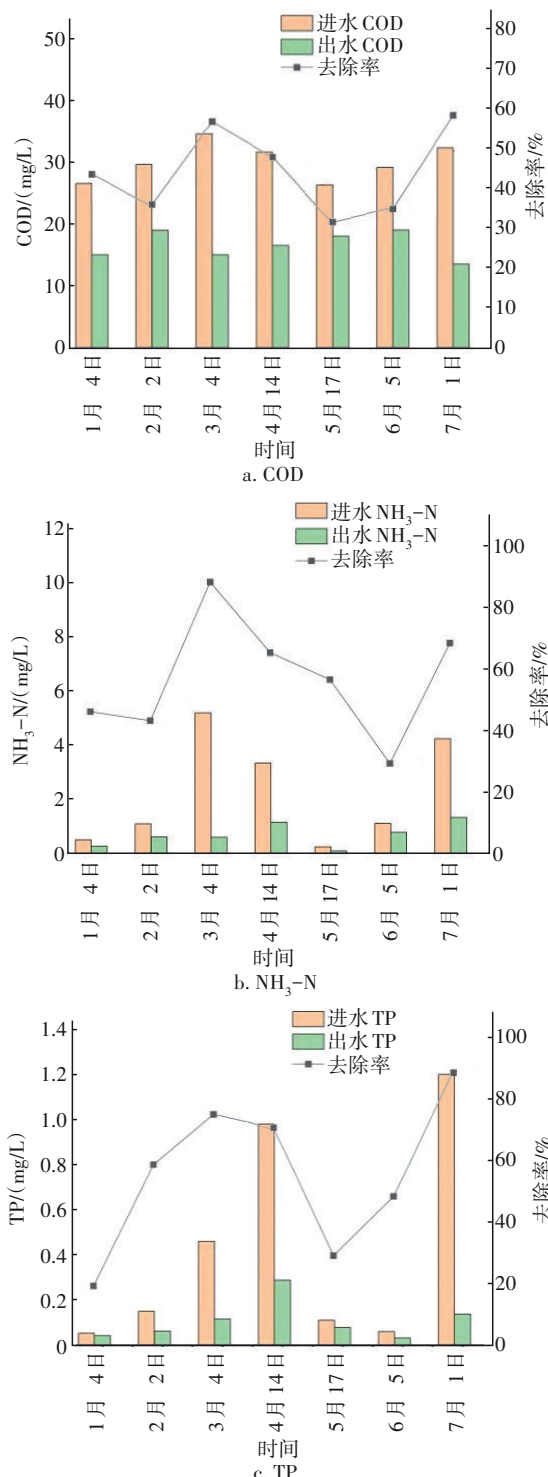


图5 湿地系统实际进、出水水质监测结果

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

表 4 湿地进、出水水质及去除率
Tab.4 Influent and effluent quality, removal rates
of wetland system

项目	COD	NH ₃ -N	TP
湿地进水/(mg/L)	26~35	0.26~5.20	0.05~1.21
湿地出水/(mg/L)	13~19	0.11~1.34	0.03~0.28
湿地去除率/%	31~58	30~88	19~88
项目 1 ^[14] 去除率/%	26~42	28~48	25~43
项目 2 ^[15] 去除率/%	55.03	76.92	63.14
地表水Ⅲ类标准/(mg/L)	20	1	0.2
地表水Ⅳ类标准/(mg/L)	30	1.5	0.3

① 湿地进、出水 COD 监测效果及分析

由于降雨、上游来水、天气状况及其他因素的影响,湿地系统进水 COD 波动较大,但湿地出水 COD 为 13~19 mg/L,去除率为 31%~58%,出水 COD 最高浓度及平均浓度均优于地表水Ⅲ类标准。受降雨影响,3月4日、4月14日、7月1日进水 COD 浓度较高,去除率为 47%~58%。非降雨条件下,出水 COD 最高浓度及平均浓度均优于地表水Ⅲ类标准。

② 湿地进、出水 NH₃-N 监测效果及分析

湿地系统进水 NH₃-N 波动较大,湿地出水 NH₃-N 为 0.11~1.34 mg/L,去除率为 30%~88%,出水 NH₃-N 最高浓度及平均浓度均优于地表水Ⅳ类标准。受降雨影响,3月4日、4月14日、7月1日进水 NH₃-N 浓度较高,去除率为 65%~88%。非降雨条件下,出水 NH₃-N 最高浓度及平均浓度均优于地表水Ⅲ类标准。

③ 湿地进、出水 TP 监测效果及分析

湿地系统进水 TP 波动较大,湿地出水 TP 为 0.03~0.28 mg/L,去除率为 19%~88%,出水 TP 最高浓度及平均浓度均优于地表水Ⅳ类标准。受降雨影响,3月4日、4月14日、7月1日进水 TP 浓度较高,去除率为 70%~88%。在非降雨条件下,出水 TP 最高浓度及平均浓度均优于地表水Ⅲ类标准。

3.2 生态景观评价

通过对前置塘、潜流湿地及表流湿地的建设,实现了水质净化目标,并建设了生态湿地公园,为市民提供了良好的游憩空间,丰富了河道内生态系统结构。

3.3 湿地净化效果评估

① 环境效益

利用 $K-C^*$ 模型^[16]分别评估雨季、非雨季的湿地净化效果,每种污染物达标时所需面积计算公式

如下:

$$A = \left(\frac{0.0365Q}{K} \right) \ln \left(\frac{C_i - C^*}{C_e - C^*} \right) \quad (1)$$

式中: C_i 为目标物进水浓度,mg/L; C^* 为该目标物水质指标的环境背景值,mg/L; C_e 为目标物出水浓度,mg/L; Q 为进水流量,m³/d; A 为所需湿地面积,hm²; K 为一级面积速率常数,m/a。

背景值和速率常数^[16]见表 5。

表 5 背景值和速率常数

Tab.5 Background values and rate constants

项目	参数	TP	NH ₃ -N	BOD ₅
潜流湿地	$K_{20}/(m/a)$	12	34	180
	$C^*/(mg/L)$	0.02	0	$3.5+0.053C_i$
表流湿地	$K_{20}/(m/a)$	12	18	34
	$C^*/(mg/L)$	0.02	0	$3.5+0.053C_i$

注: K_{20} 为 20℃时的一级面积速率常数值。

湿地设计进水水质依照湿地地理位置和运行工况进行分析,进水为流域初期径流与河道内现状水的混合水。湿地系统进水水质及模拟结果见表 6。

表 6 湿地系统净化结果

Tab.6 Purification results of wetland system

项目	TP	NH ₃ -N	BOD ₅
雨季进水/(mg/L)	0.80	4.3	30.0
模拟雨季出水/(mg/L)	0.39	1.5	8.1
模拟雨季去除率/%	51.25	65.12	73.00
非雨季进水/(mg/L)	0.40	2.0	10.0
模拟非雨季出水/(mg/L)	0.21	0.7	4.0
模拟非雨季去除率/%	47.50	65.00	60.00

由表 6 可知,雨季 BOD₅、NH₃-N、TP 去除率分别为 73.00%、65.12%、51.25%,非雨季 BOD₅、NH₃-N、TP 去除率分别为 60.00%、65.00%、47.50%。

② 社会效益和经济效益

湿地系统的建设充分利用初期雨水,净化后补充河道生态需水量,缓解水资源短缺的压力。湿地公园建成后,成为北京市青少年环境教育基地并促进该地区产业结构调整,带动周边区域旅游度假、休闲娱乐等产业的发展,也可为湿地科学研究提供范例,并提高周边居民对湿地保护的意识及周边房价。

利用成本-效益法对湿地的经济效益进行分析,其中成本主要包括投资成本、运行成本,由于该项目为公益项目,通过发放调查问卷,采用群众满

意度来评价湿地系统的效益。其中,安南支流湿地的成本-效益分析见表7。

表7 安南支流湿地的成本-效益组成

Tab.7 Cost-benefit composition of Annan tributary wetland

项目	指标	数值
成本	投资成本/(元/m ³)	8 932.20
	运行成本/(元/m ³)	0.12
效益	群众满意度/%	95

4 结论

利用旁路复合流湿地治理城市面源污染,是新凤河湿地生态治理工程的亮点之一。利用流域范围内可利用土地建设形成了前置塘→两级水平潜流湿地→上行垂直潜流湿地→表流湿地的旁路复合流湿地系统。

① 基于河道水体流向及连通形式,同时考虑周边居民的景观生态需求,利用已有河道及现有闸、坝,在可利用土地上建设旁路复合流湿地,形成好氧/厌氧/缺氧多种微生物生存环境,拦截净化多条河道的面源污染,并通过湿地系统内部连接方式的优化,达到节约用地、布局灵活、布水均匀的目的,有利于发挥复合型湿地的水质净化功能,形成良好的园区水系景观。

② 通过植被覆盖、低水位运行及保温填料覆盖等措施,能保障冰下水温,提高冬季低温情况下湿地系统的水质净化能力,非降雨条件下冬季湿地系统出水符合地表水Ⅲ类标准。

③ 湿地运行期的进、出水水质检测数据表明,非降雨条件下湿地出水水质达到地表水Ⅲ类标准,降雨条件下湿地出水水质达到地表水Ⅳ类标准。

参考文献:

- [1] 葛铭坤. 我国面源污染治理理论和措施研究综述[J]. 水利规划与设计, 2020(3): 24-28.
- GE M K. Review on theory and measures of non-point source pollution control in China[J]. Water Resources Planning and Design, 2020(3): 24-28(in Chinese).
- [2] 王海邻, 曹雪莹, 任玉芬, 等. 北京城市主干道降雨径流污染负荷分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(6): 1860-1867.
- WANG H L, CAO X Y, REN Y F, et al. Analysis on

pollution load of rainfall runoff in Beijing urban arterial roads[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(6): 1860-1867(in Chinese).

- [3] 陆松柳, 章烨. 城市面源污染影响因子及控制技术的研究现状与展望[J]. 城市道桥与防洪, 2018, 7(7): 250-254.
- LU S L, ZHANG Y. Research status and prospects of influential factors and control technology of urban non-point source pollution[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018, 7(7): 250-254(in Chinese).
- [4] 周洋. 城市面源污染控制技术集成和工程评估及技术指导[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- ZHOU Y. Technology Integration, Engineering Assessment and Technical Guidance of Urban Non-point Source Pollution Control [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019(in Chinese).
- [5] 敬丹丹. 人工湿地净化城镇降雨径流面源污染的特征及微生物多样性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- JING D D. Research on Purification Characteristic and Diversity of Microbes in a Constructed Wetland Treating Towns Rainfall Runoff [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014(in Chinese).
- [6] 王宁, 田广宇, 陈泉. 针对黄河上游地区污水厂尾水的人工湿地净化系统研究与设计: 以宁夏昊盛污水厂尾水湿地为例[J]. 环境工程, 2023, 41(增刊1): 33-35, 51.
- WANG N, TIAN G Y, CHEN X. Research and resign of constructed wetland purification system for wastewater treatment plant tail water in upper yellow river area: taking Ningxia Haosheng wastewater treatment plant tail water wetland as an example [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S1): 33-35, 51(in Chinese).
- [7] 潘成荣, 陈建, 彭书传, 等. 复合型人工湿地对污水厂尾水的深度处理效果[J]. 中国给水排水, 2022, 38(13): 111-116.
- PAN C R, CHEN J, PENG S C, et al. Advanced treatment efficiency of effluent from wastewater treatment plant by composite constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(13): 111-116(in Chinese).
- [8] 王文东, 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]. 中国给水排水, 2023, 41(1): 158-163.
- WANG W D, GAO X W, WANG L J, et al. Research and application of enhanced purification technology of

- micro-polluted water bodies by bypass compound flow wetland in a river channel [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 41(1):158-163(in Chinese).
- [9] 张子钰,田伟君,高惠子,等. 复合潜流-潮汐流人工湿地基质对微污染水体的净化性能研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(8):104-112.
- ZHANG Z Y, TIAN W J, GAO H Z, et al. Study on the purification performance of integrated vertical subsurface flow and tidal flow combined constructed wetland substrate for slightly-polluted water body [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2023, 53(8):104-112(in Chinese).
- [10] 尚文,史笔函. 湿地生态修复在河道面源污染治理中的工程应用[J]. *环境保护与循环经济*, 2023(12):39-43.
- SHANG W, SHI B H. The engineering application of wetland ecological restoration in the management of non-point source pollution in river channels [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2023(12):39-43(in Chinese).
- [11] 蒋倩文,刘锋,彭英湘,等. 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应[J]. *环境科学*, 2019, 40(5):2194-2201.
- JIANG Q W, LIU F, PENG Y X, et al. Nitrogen and phosphorus removal by integrated ecological engineering treatment system in a small agricultural watershed [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5):2194-2201(in Chinese).
- [12] 刘小毓,谢壮,李权. 巢湖流域小城镇面源污染湿地净化技术工程设计及应用[J]. *湿地科学与管理*, 2024, 20(3):26-31.
- LIU X Y, XIE Z, LI Q. Engineering and application of wetland purification technology for surface source pollution in small towns in Chaohu Lake basin [J]. *Wetland Science & Management*, 2024, 20(3):26-31(in Chinese).
- [13] 王玮,侯宁宁,杨钙仁,等. 不同水生植物的污染物净化功能及其泌氧量研究[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(8):1924-1931.
- WANG W, HOU N N, YANG G R, et al. Pollutant purification function and radial oxygen loss of different aquatic plants [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(8):1924-1931(in Chinese).
- [14] 陈涛,李锋,毛文龙,等. 人工湿地-稳定塘处理生活污水站尾水应用实例[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(22):102-106.
- CHEN T, LI F, MAO W L, et al. Application example of tail water from a sewage treatment station by constructed wetland and stabilization pond system [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(22):102-106(in Chinese).
- [15] 苏孟白,王克勤,宋娅丽,等. 生态塘-潜表流复合人工湿地对抚仙湖入湖河流水质净化效应及途径[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(3):572-585.
- SU M B, WANG K Q, SONG L Y, et al. Effect and process of ecological pond-submerged surface flow composite constructed wetland on water quality purification of rivers entering Fuxian Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(3):572-585(in Chinese).
- [16] 崔理华,卢绍勇. 污水处理的人工湿地构建技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- CUI L H, LU S Y. *Constructed Wetland Technology for Wastewater Treatment* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003(in Chinese).

作者简介:邓文静(1989—),女,湖南怀化人,硕士,高级工程师,主要从事水污染防治科研及设计工作。

E-mail:704910862@qq.com

收稿日期:2024-08-19

修回日期:2024-09-18

(编辑:衣春敏)