

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.04.010

兼具水质净化及调蓄功能的组合人工湿地设计

耿安锋¹, 杨仲韬¹, 李阳阳², 康文庆³, 高进仑¹, 李强⁴,
高镜清⁴

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 邯郸市园林局, 河北邯郸 056002; 3. 包头市排水产业有限责任公司, 内蒙古 包头 014030; 4. 郑州大学生态与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 邯郸两高湿地工程设计采用水质净化和雨洪调蓄相结合的方案。采用滞留塘+表流湿地+水平潜流湿地工艺处理邯临沟来水,最大处理规模为2 000 m³/d。在常规处理、应急处理、内循环处理三种运行工况下,出水主要污染物指标均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类标准,可用于绿化浇灌、生态补水等。在此基础上,工程利用滞留塘和表流湿地作为雨洪调蓄区对邯临沟汛期来水进行调蓄,最大调蓄规模为6 000 m³,可缓解河道行洪压力。

关键词: 水质净化; 雨洪调蓄; 组合人工湿地

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0059-06

Design of Hybrid Constructed Wetland with Water Purification and Storage Functions

GENG An-feng¹, YANG Zhong-tao¹, LI Yang-yang², KANG Wen-qing³,
GAO Jin-lun¹, LI Qiang⁴, GAO Jing-qing⁴

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Landscape Architecture Bureau of Handan City, Handan 056002, China; 3. Baotou City Drainage Industry Co. Ltd., Baotou 014030, China; 4. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The scheme combining water purification and rainwater storage was selected for design of Lianggao constructed wetland in Handan. The process of detention pond, surface flow wetland and horizontal subsurface flow wetland was applied to treat the effluent from Hanlingou River, and the maximum treatment scale was 2 000 m³/d. Under the three operating conditions of conventional treatment, emergency treatment and internal circulation treatment, the main pollutant indexes of effluent were better than the class V limits specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002), which could be used for greening irrigation and ecological water replenishment. On this basis, the detention pond and surface flow wetland could be used as stormwater regulation and storage areas to regulate and store the stormwater from Hanlingou River during flood season. The maximum storage volume was 6 000 m³, which alleviated the flood discharge pressure of the river.

Key words: water purification; rainwater storage; hybrid constructed wetland

通信作者: 杨仲韬 E-mail: yangzhongtao15@cemi.com.cn

人工湿地作为一种高效率、低投资、低运行费用的生态技术广泛应用于污染河水的处理并发挥了重要作用,同时在解决城市内涝、减轻河道行洪压力方面,人工湿地作为一种雨洪调蓄的重要手段有着不可取代的作用^[1-2]。邯郸两高湿地以非汛期水质净化和汛期雨洪调蓄为目标,构建滞留塘+表流湿地+水平潜流湿地的组合湿地处理污染河水,并利用滞留塘+表流湿地作为蓄滞区缓解河道行洪压力,为北方河道水体深度净化、回用及防洪排涝安全保障提供借鉴案例。

1 项目概况

邯郸市作为国家首批黑臭水体治理示范城市,在《邯郸市城市黑臭水体治理攻坚战三年工作方案》指导下制定了《邯郸市城市黑臭水体治理系统方案》,结合《邯郸市中心城区排水(雨水)防涝工程规划》设计的两高湿地为系统方案中的示范性节点,将水净化、水蓄滞、水回用、水景观等理念融为一体,并实现对邯临沟的部分雨洪调蓄功能。

两高湿地位于邯郸市邯临沟与高速西明渠交汇处,东临京港澳高速(见图1)。总占地面积约5.1 hm²,主要包括滞留塘、表流湿地、水平潜流湿地、污泥干化池及景观湖区五部分,湿地对邯临沟来水进行旁路净化处理达标后再排入邯临沟。工程设计最大处理规模为2 000 m³/d,最大可调蓄水量为6 000 m³,水质净化及调蓄部分总投资为1 286万元。



图1 工程地理位置

Fig.1 Location of the project

2 工程目标

2.1 设计规模

根据本工程可利用占地面积,计算得最大处理规模为2 000 m³/d,并根据工程布置,工程雨水调蓄能力最大为6 000 m³。

2.2 设计进、出水水质

湿地进水主要为邯郸市内污水厂排入邯临沟的尾水,该尾水水质已达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。考虑到河道受外水输入、降雨冲刷等外界因素影响,结合现场调研情况、流域内污水厂出水水质,并考虑远期截污控源措施及水质变化趋势,综合确定将设计进水水质分为“常规处理水质”和“超常规处理水质”,设计出水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类水标准。具体进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

		mg·L ⁻¹				
项目		BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TP
设计进水	常规处理水质	20	60	20	8.0	1.0
	超常规处理水质	40	100	40	15.0	3.0
设计出水		10	40	10	2.0	0.4

3 工程设计

3.1 工艺比选

3.1.1 预处理工艺比选

本工程考虑邯临沟来水中悬浮物含量较高、来水量不稳定等问题,为增强人工湿地处理效果并减小潜流湿地堵塞风险,在最前端设置以沉淀功能为主的预处理构筑物。参考国内较成功的工程案例,如宋公河人工湿地^[3]、皂河入渭口人工湿地^[4]等采用钢筋混凝土结构的平流式沉砂池作为预处理工艺,雄安新区孝义河河口湿地^[5]、石子河人工湿地^[6]等采用生态化的滞留塘作为预处理工艺,各工程案例情况见表2。考虑到钢混结构的沉砂池对悬浮物的去除效率高但是运行费用也高,生态化的滞留塘在后期塘底维护、清淤等方面不便利,本工程将上述两种类型的沉砂池功能相结合,采用浆砌石挡墙构建平流式滞留塘,塘底用混凝土面板进行硬化处理并设置一定坡度以利于集泥,塘内设人工水草及浮水植物以利于污染物降解。

表 2 典型工程预处理工艺

Tab.2 Typical engineering pretreatment processes

处理工艺	工程案例	进水水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	处理规模/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	规格
平流式沉砂池	宋公河人工湿地	$\text{COD}\leq 100, \text{NH}_3\text{-N}\leq 10, \text{TP}\leq 1$	4×10^4	$12\text{ m}\times 6\text{ m}\times 1.5\text{ m}$
	皂河入渭口人工湿地	$\text{COD}\leq 333, \text{NH}_3\text{-N}\leq 30, \text{TP}\leq 3.9, \text{SS}\leq 360$	7×10^4	$40\text{ m}\times 20\text{ m}\times 1.8\text{ m}$
生态滞留塘	雄安新区孝义河河口湿地	$\text{COD}\leq 58, \text{NH}_3\text{-N}\leq 1.5, \text{TP}\leq 0.54$	20×10^4	$2.8\text{ hm}^2\times 4.0\text{ m}$
	石子河人工湿地	$\text{COD}\leq 47, \text{NH}_3\text{-N}\leq 3.8, \text{TP}\leq 0.22$	20×10^4	$7.2\text{ hm}^2\times 1.6\text{ m}$

3.1.2 主体处理工艺比选

因本工程处理污染负荷较小,考虑水平流湿地较垂直流湿地有投资较低、维护成本较低、去除有机物效果较好等特点^[7],故选择水平潜流湿地作为主体处理工艺,并在前端增设可实现水体复氧的表流湿地,有利于其后端水平潜流湿地对污染物的进一步处理。

3.1.3 调蓄区选址比选

为实现调蓄功能,除潜流湿地外本工程拟选用“滞留塘+表流湿地”或“景观湖区”作为调蓄场地。景观湖区池底种植的沉水植物较多,如直接作为滞洪区则洪水夹带的泥沙会对沉水植物造成损伤且难以修复,故本工程选用“滞留塘+表流湿地”作为调蓄区。

“滞留塘+表流湿地”占地面积为 $3\ 850\text{ m}^2$,在邯临沟洪水位(53.00 m)以下的容积大于 $6\ 000\text{ m}^3$,且后期清淤较易操作,方便维护管理。

3.2 总体布局

本工程在场区北侧、紧邻邯临沟处布置滞留塘和表流湿地(见图 2),其南侧为水平潜流湿地及景观湖区,水平潜流湿地西侧布置污泥干化池。滞留塘西南侧设置了泄洪通道,使邯临沟汛期(7月—9月)洪水可排入调蓄区。

项目场地现状地形总体较为平坦、无较大起伏,人工湿地竖向设计(见图 3)在满足湿地处理流程和雨洪调蓄功能的基础上,结合邯临沟常水位(50.50 m)和洪水位(53.00 m)进行设计,并充分考虑土方平衡,利用处理区的开挖土方填筑湿地周边管理道路。

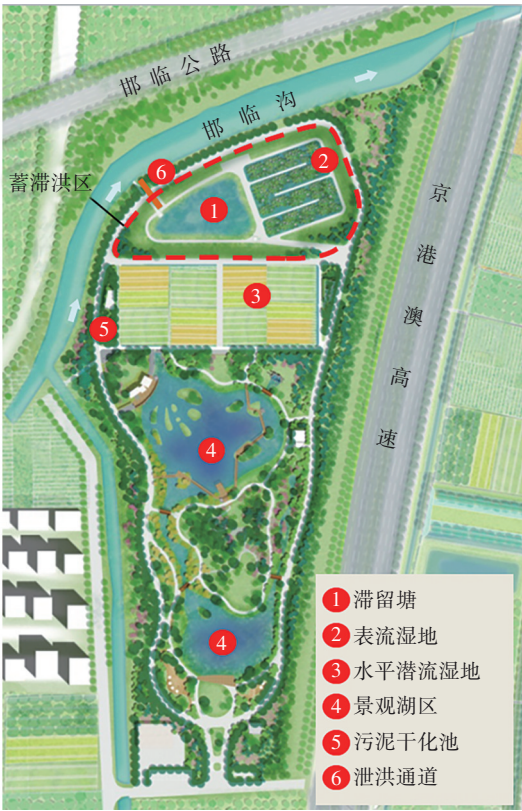


图 2 工程总平面布置

Fig.2 General layout of the project

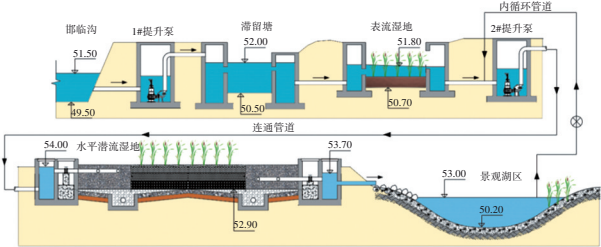


图 3 工程竖向高程设计

Fig.3 Vertical elevation design of the project

3.3 处理构筑物设计

3.3.1 滞留塘

滞留塘在处理流程上位于水质净化工程的最前端,邯临沟来水经泵站提升后直接引入滞留塘进行沉淀及预处理。滞留塘可有效降低进水的SS浓度,防止表流湿地淤积及潜流湿地填料阻塞。滞留塘总面积 $1\ 705\text{ m}^2$,设计有效水深 1.5 m ,有效容积为 $2\ 200\text{ m}^3$,水力停留时间为 1.1 d 。滞留塘中间设隔墙,分为 2 池,2 池共用一座进水井及一座出水井,各池内设 2 道导流墙。各分区末端设集泥坑,方便后期管理维护。

滞留塘平面布置见图 4。

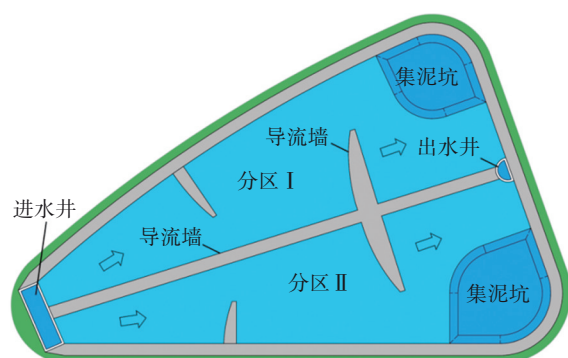


图4 滞留塘平面布置

Fig.4 Plane layout of detention pond

3.3.2 表流湿地

表流湿地总面积 $1\,675\text{ m}^2$, 设计有效水深 0.6 m , 有效容积为 700 m^3 , 水力停留时间为 0.35 d 。平面布置(见图5)采用S型流道设计, 流道总长度 176 m , 净宽度 6.5 m , 总宽度 9.3 m 。池体采用浆砌石挡墙围挡, 挡墙高度 1.2 m 。本区域内种植的植物为香蒲, 种植密度为 $16\text{ 株}/\text{m}^2$ 。

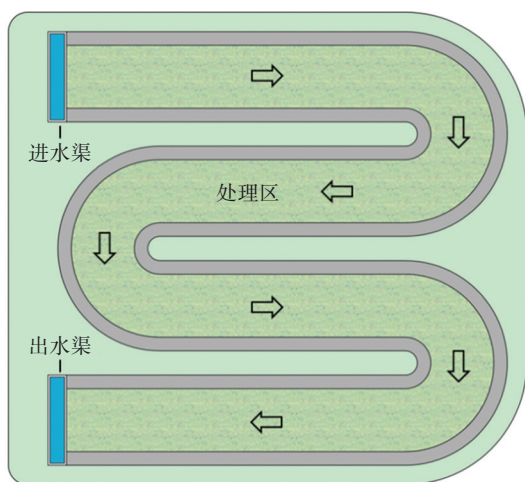


图5 表流湿地平面布置

Fig.5 Plane layout of surface flow wetland

3.3.3 水平潜流湿地

水平潜流湿地为本工程水质净化的核心区, 总面积 $5\,250\text{ m}^2$, 设计有效水深 1.25 m , 有效容积为 $2\,460\text{ m}^3$, 水力停留时间为 1.23 d , 水力负荷为 $0.42\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。水平潜流湿地对称分为2组(见图6), 每组4个处理单元, 总计8个处理单元, 每个单元设计平面尺寸为 $26\text{ m}(L)\times 22\text{ m}(B)$ 。

水平潜流湿地填料层厚度 1.2 m , 分为3层, 从上到下依次为砾石层 100 mm (粒径 $15\sim 30\text{ mm}$)、苍筤岩填料层 700 mm (粒径 $10\sim 30\text{ mm}$)、砾石层 400

mm (粒径 $40\sim 60\text{ mm}$)。苍筤岩填料是一种人工湿地高效脱氮除磷填料, 由负载功能微生物的生物陶粒、缓释碳源填料、植物生物基营养添加剂和除磷填料混合组成, 抗压强度 $\geq 1.5\text{ MPa}$, 孔隙率 $>30\%$, 堆积密度 $(400\pm 50)\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

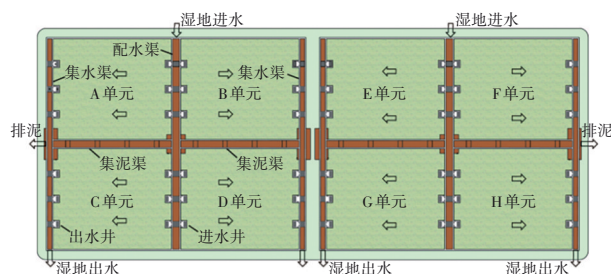


图6 水平潜流湿地平面布置

Fig.6 Plane layout of horizontal subsurface flow wetland

水平潜流湿地种植的植物为芦苇、香蒲、菖蒲、粉花美人蕉, 种植密度为 $9\sim 16\text{ 株}/\text{m}^2$ 。

3.3.4 景观湖区

景观湖区兼具出水稳定塘的作用, 水域面积 $7\,420\text{ m}^2$, 设计平均水深 2.5 m , 最大水深 3.0 m 。本项目在景观湖区不同水深区域种植挺水植物、浮叶植物和沉水植物。挺水植物主要有水葱、香蒲和茭白; 浮叶植物主要有荷花、睡莲、荇菜; 沉水植物主要有狐尾藻、金鱼藻。植物种植总面积约 $4\,930\text{ m}^2$, 其中挺水植物面积 $1\,850\text{ m}^2$ 、浮叶植物面积 550 m^2 、沉水植物面积 $2\,530\text{ m}^2$ 。

3.3.5 污泥干化池

污泥干化池主要用于承接潜流湿地各单元排空时放出的高含水率污泥。潜流湿地各处理单元需轮流排空检修时, 将处理单元配水井内的阀门关闭, 然后打开排泥阀, 将填料内的高含水率污泥排放至湿地底部的集泥沟, 最终进入污泥提升泵井。待湿地单元的排泥阀打开 30 min 后开启污泥提升泵, 将污泥提升至污泥干化池内。污泥干化池占地面积 92 m^2 , 最大容积约 37 m^3 。污泥干化池下部设渗滤液收集管, 渗滤液通过管道排入滞留塘的配水渠。

污泥干化池内自上向下依次设 200 mm 厚粗砂(粒径 $1\sim 6\text{ mm}$)、整体覆盖无纺布、 600 mm 厚砾石层(粒径 $10\sim 30\text{ mm}$)。污泥干化池表面种植芦苇。进口端填料表面铺设 $1\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 无纺布, 防止冲刷。

4 设计运行工况

水质净化及雨洪调蓄流程见图7。

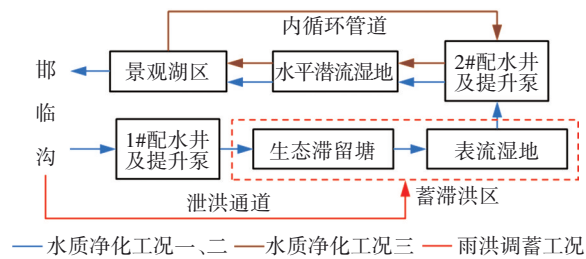


图 7 水质净化及雨洪调蓄流程

Fig.7 Flow chart of water purification and rainwater storage

4.1 水质净化运行工况

因邯临沟来水水质不稳定,本人工湿地根据进水质度的不同分为以下 3 种设计工况:

工况一(常规处理工况):邯临沟来水水质不劣于“常规处理水质”,处理规模 2 000 m³/d,来水经泵站提升后依次进入滞留塘、表流湿地、水平潜流湿

地处理,达到地表水 V 类标准后排入景观湖区。

工况二(应急处理工况):邯临沟来水水质劣于“常规处理水质”,但优于“超常规处理水质”,处理规模小于 2 000 m³/d,处理流程同工况一。

工况三(内循环工况):邯临沟来水水质劣于“超常规处理水质”,则暂停自邯临沟取水,改为内循环工况,即从景观湖区取水后进入水平潜流湿地处理,处理规模小于 2 000 m³/d,处理达标后再排入景观湖区。使用该工况时需注意景观湖区蒸发及渗漏损失对湖区水位下降的影响,必要时采用其他水源对湖区进行生态补水。

本设计在进水端(配水井及提升泵)设置水质在线监测设施,根据来水水质情况对设计工况进行调控。

以上三种处理工况汇总见表 3。

表 3 运行工况

Tab.3 Operation conditions

项目	进水水质	处理水源	处理单元	处理水量/(m ³ ·d ⁻¹)	出水指标	排放水体
工况一	不劣于“常规处理水质”	邯临沟来水	滞留塘+表流湿地+水平潜流湿地	2 000	地表水 V 类水质标准	景观湖区,最终排入邯临沟
工况二	劣于“常规处理水质”,优于“超常规处理水质”	邯临沟来水		<2 000		
工况三	劣于“超常规处理水质”	景观湖区水体	水平潜流湿地	<2 000		

4.2 雨洪调蓄运行工况

本工程在汛期利用滞留塘及表流湿地对邯临沟洪水进行调蓄,具体方案如下:

① 湿地公园管理部门应根据当地气象部门预报的天气情况,在较强降雨来临之前,预先关闭滞留塘进水渠处的闸门,停止运行水质净化系统,同时维持提升泵运行,将滞留塘及表流湿地内的水位由 52.00 m 降至 51.00 m,此时关闭提升泵,为调蓄邯临沟洪水做好准备。

② 当邯临沟水位超过 51.10 m 时可通过泄洪管道溢流进入滞留塘及表流湿地内进行调蓄,调蓄最高水位为 53.00 m,可调蓄容积约 6 000 m³。

③ 邯临沟洪水退水后,滞留塘和表流湿地的水位通过泄洪管道降至 52.20 m,此时开启提升泵,将滞留塘及表流湿地内的水排入水平潜流湿地处理(最终流入邯临沟),水位降至正常水位,此过程需保证表流湿地内植物的最大淹没时间不超过 24 h。

5 运行效果及经验

5.1 水质净化效果

该湿地于 2021 年 4 月竣工并开始运营至今,整

个湿地系统所接纳的邯临沟水量、水质基本保持稳定,湿地平均处理水量为 2 000 m³/d,出水主要指标优于设计标准,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类水标准,可用于绿化浇灌、生态补水等。2021 年 4 月—10 月平均水质见表 4。

表 4 工程各单元处理效果

Tab.4 Treatment effect of each unit

项 目	BOD ₅	COD	NH ₃ -N	TP
邯临沟来水/(mg·L ⁻¹)	18.3	55.2	2.53	0.83
滞留塘出水/(mg·L ⁻¹)	15.2	45.3	2.33	0.79
表流湿地出水/(mg·L ⁻¹)	13.8	40.5	2.08	0.75
水平潜流湿地出水/(mg·L ⁻¹)	5.3	20.6	0.71	0.26
总去除率/%	71.0	62.7	71.9	68.7

5.2 雨洪调蓄效果

2021 年 7 月 20 日—22 日,邯郸市出现暴雨天气,国家级气象站平均降雨量为 148.3 mm,两高湿地于 7 月 21 日 10 时开启邯临沟泄洪通道进行分洪调蓄,7 月 21 日 12 时,蓄洪区达到最大设计调蓄水位 53.00 m,实测进水量为 5 380 m³,基本达到了预期调蓄洪目标。7 月 21 日 22 时蓄洪区开始退水,7

月22日6时滞留塘及表流湿地恢复至运行水位。

5.3 运行经验

本人工湿地工程自启动运行以来,除初期调试期间出水水质有所波动外,整体运行平稳,显示了较强的污染物去除能力。湿地建设时植物种植于砾石层以下,通过调节出水溢流堰,使湿地水位淹没砾石层植物根系,待植物成活以后,再降低水位至砾石层以下,避免藻类的滋生。

此外,填料床堵塞是制约湿地稳定运行的主要原因,本工程在设计和运行中采取了以下针对性措施:①设置滞留塘和表流湿地等预处理单元,有效降低了水平潜流湿地进水中的SS负荷;②在水平潜流湿地底部设置了集泥沟和排泥渠,用于收集潜流湿地运行过程中产生的污泥,并将其及时排至湿地外部,有效降低填料堵塞的风险;③在运行过程中及时清理植物的残体,避免其在湿地表面腐烂。

本工程运行费用约为18万元/a,单位处理成本为0.24元/m³。考虑资源化利用,本工程实施后芦苇等植物的估值约为3~5万元/a。

6 结语

本工程实施后可在非汛期净化邯临沟来水,对降低滏阳河流域水体污染、促进邯郸地区地表水质好转有重要作用。工程主要出水指标优于设计标准,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类水标准,可用于绿化浇灌、生态补水等。同时,工程利用滞留塘和表流湿地对邯临沟汛期来水进行调蓄,缓解河道行洪压力,最大调蓄规模为6 000 m³。本工程为北方河道水体深度净化、回用及防洪排涝安全保障提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 刘迪. 基于雨洪调蓄的城市新区湿地适宜性评价及保护区划定[J]. 中国园林, 2016, 32(4):85-90.
LIU Di. Wetland suitability evaluation and protection zone delineation in new urban district based on rainwater storage[J]. Chinese Landscape Architecture, 2016, 32(4):85-90(in Chinese).
- [2] 李雅. 哈尔滨群力国家城市湿地公园雨洪调蓄能力评价[J]. 现代园林, 2013, 10(1):43-50.

LI Ya. Evaluation of flood regulation and storage capacity in Harbin Qunli national urban wetland park [J]. Modern Landscape Architecture, 2013, 10(1):43-50 (in Chinese).

- [3] 魏俊, 赵梦飞, 王济来, 等. 宋公河人工湿地设计方案优化探讨[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4):16-19.
WEI Jun, ZHAO Mengfei, WANG Jilai, et al. Study on optimization of design of constructed wetlands in Songgong River[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 16-19 (in Chinese).
- [4] 熊家晴, 杜晨, 郑于聪, 等. 污染河水人工湿地生态净化工程设计[J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 89-92.
XIONG Jiaqing, DU Chen, ZHENG Yucong, et al. Design of constructed wetland system for ecological purification of polluted river water quality [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (24) : 89-92 (in Chinese).
- [5] 宋凯宇, 章栗繁, 魏俊, 等. 雄安新区孝义河河口湿地水质净化工程设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10):62-69.
SONG Kaiyu, ZHANG Sukan, WEI Jun, et al. Design of water purification project of Xiaoyi River estuary wetland in Xiong' an new area [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 62-69 (in Chinese).
- [6] 贺婷婷. 石子河人工湿地水质净化工程设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(14):50-53.
HE Tingting. Design of constructed wetland project for water purification in Shizihe area [J]. 中国给水排水, 2018, 34(14):50-53(in Chinese).
- [7] 吴树彪, 董仁杰. 人工湿地生态水污染控制理论与技术[M]. 北京:中国林业出版社, 2016.
WU Shubiao, DONG Renjie. Constructed Wetlands for Water Pollution Control: An Ecological Theory and Technology [M]. Beijing: China Forestry Press, 2016(in Chinese).

作者简介:耿安锋(1979—),男,河南商丘人,硕士,高级工程师,从事污水处理及其资源化技术研究和给排水工程设计工作。

E-mail: genganfeng06@cemi.com.cn

收稿日期:2021-11-15

修回日期:2021-12-01

(编辑:孔红春)