

“表潜结合式”人工湿地用于处理城市微污染水体

王文冬, 王利军, 王艳梅, 武少伟

(北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 将“表潜结合式”人工湿地用于北京某地表微污染水体的生态处理,在优化人工湿地设计参数、填料选择(再生填料)以及植物搭配的基础上,当湿地处理区上游来水为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类标准时,通过“表潜结合式”人工湿地的填料吸附、植物吸收以及微生物降解等多重作用,最终能够实现湿地出水 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 分别稳定达到 30、1.5 mg/L 以下,满足甚至优于地表水 IV 类标准的水质设计需求,具有显著的环境、生态与景观效益。

关键词: 表潜结合式潜流湿地; 微污染水体; 生态处理; 再生填料

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)02-0100-05

Application of Surface & Subsurface Constructed Wetland in Treatment of Urban Micro-polluted Water Body

WANG Wen-dong, WANG Li-jun, WANG Yan-mei, WU Shao-wei

(Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: The surface & subsurface constructed wetland was applied in treatment of an urban micro-polluted water body in Beijing. Through optimization of design parameters, filler selection (recycled filler) and plant configuration of constructed wetlands, when the upstream water in the wetland treatment area was controlled to level V in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), the content of COD and $\text{NH}_3 - \text{N}$ in the wetland effluent could be stable below 30 mg/L and 1.5 mg/L respectively, which met and even exceeded level IV water quality design requirements. Consequently it could bring significant environmental, ecological and landscape benefits.

Key words: surface & subsurface constructed wetland; micro-polluted water body; ecological treatment; recycled filler

人工湿地的污染物去除机理包括吸附过滤、离子交换与共沉、植物吸收与微生物降解等多重作用^[1-3],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^[4]。

通常情况下,按照系统布水方式的不同,可以将人工湿地划分为表面流型和潜流型,潜流型人工湿

地又可划分为水平潜流型和垂直潜流型:表面流型人工湿地设计水位较浅,一般控制在 0.3 ~ 0.5 m,主要依靠湿地内部水生植物的拦截以及附着在植物根茎上生物膜的生物降解作用,具有投资少、操作简单、运行费用低等优点,但占地面积较大,水力负荷率较小,去污能力有限;水平潜流型人工湿地通常由一个或多个填料床构成,内设吸附能力较强的填料,底部敷设有防渗膜或者其他防渗层用于防止污染地

下水,能够承载相对较大的水力负荷,对 BOD₅、COD、SS、重金属等污染物质具有较好的去除效果,在水平潜流型人工湿地中,水面在填料以下,污水能够从池体进水端水平流向出水端,可有效避免污水恶臭以及蚊蝇孳生等问题;同时,能够适应一定程度的温差变化,但是水平潜流型人工湿地的代谢需氧量主要来自大气复氧,容易出现溶解氧含量不足,因而对氨氮、有机氮类污染物的去除能力有限;垂直潜流型人工湿地的填料床体处于不饱和状态,污水从填料床的纵向进入到填料床的底部,与此同时氧气可以通过大气扩散以及植物的根茎传输作用进入到人工湿地系统,垂直潜流型人工湿地系统具有较高的硝化能力,对氮、磷的去除效果较好,但是垂直潜流型人工湿地对进水悬浮物浓度要求比较严格,对有机污染物的去除能力相对较弱,且落干/淹水周期较长、夏季蚊蝇孳生现象严重。

基于以上原因,自主研发并已成功申请发明专利的“表潜结合式”人工湿地能够将表面流型人工湿地和潜流型人工湿地有机地融为一体,工程实施后外观为表面流型人工湿地,实际水体处于潜流状态,既能充分发挥表面流型人工湿地的生态景观效果,又能实现潜流型人工湿地的水质净化高效率,具有占地小、净水能力强、景观效果好等显著特点。

现以北京某地表微污染水体的生态处理工程为例,对“表潜结合式”人工湿地的净水原理、设计参数以及污染物去除效果等进行探讨。

1 工程概况

本项目设计处理对象为北京某地表微污染水体,设计处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,项目建设于 2017 年 5 月,主体处理工艺为“表潜结合式”人工湿地,项目区占地 20 hm^2 ，“表潜结合式”人工湿地有效占地 10.2 hm^2 ,设计污染物 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 削减量分别可达 182.50、9.13 t/a,具有良好的环境效益,出水水质能够稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准,满足下游景观公园的用水水质需求,具有良好的社会效益。

1.1 设计进、出水水质和处理目标

设计进、出水水质见表 1。根据人工湿地污染物去除负荷,同时结合本项目设计处理目标,“表潜结合式”人工湿地设计进水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 V 类标准,即 $\text{COD} \leq 40 \text{ mg/L}$, $\text{BOD}_5 \leq 10 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 2.0 \text{ mg/L}$,

TP ≤ 0.4 mg/L;通过“表潜结合式”人工湿地的填料吸附、植物吸收以及微生物降解等多重作用,湿地出水最终能达到甚至优于地表水Ⅳ类标准。

表1 设计进、出水水质及处理效果

Tab.1 Design influent and effluent quality and pollutant treatment effects

项 目	COD	BOD ₅	NH ₃ - N	TP
设计进水/(mg · L ⁻¹)	40	10	2.0	0.4
设计出水/(mg · L ⁻¹)	30	6	1.5	0.3
去除率/%	≥25	≥40	≥25	≥25

1.2 工艺流程

工艺流程见图 1。

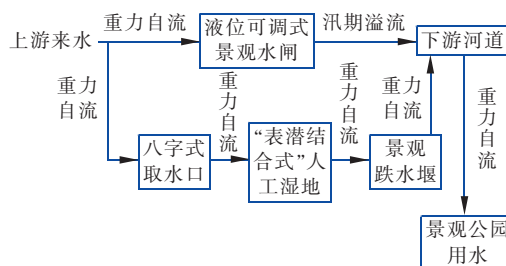


图 1 人工湿地工艺流程

Fig. 1 Flow chart of constructed wetland

依赖新建的液位可调式景观水坝形成壅水,在“表潜结合式”人工湿地建设区上下游形成液位差:新建水坝上游来水依靠重力流,通过“八”字取水口进入到“表潜结合式”人工湿地生态系统,在湿地系统的填料吸附、植物吸收以及微生物降解等多重作用下,实现对微污染水体中各类污染物质的有效削减,出水达到甚至优于地表水Ⅳ类标准的水质设计要求后,经由末端的景观跌水堰进行富氧曝气,随后再次退回到下游河道内,对河道内现有污染物进行进一步的稀释净化,最终出水补充下游的景观公园用水。

2 工程设计

2.1 工艺选择

本次设计优先采用自主研发并成功申请发明专利的“表潜结合式”人工湿地,该技术能够实现表面流型人工湿地和潜流型人工湿地的空间立体结合(上层为表面流型人工湿地部分和下层为潜流型人工湿地部分),在同一投影面内既能体现表面流型人工湿地的景观效果,又能实现潜流型人工湿地的净水能力,有效降低了人工湿地对土地占用面积的限制需求,具有占地面积小、净水能力强、景观效果

好等显著特点。

2.2 参数设计

参照并对《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)的相关参数进行优化,本项目设计处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，“表潜结合式”人工湿地有效占地 10.2 hm^2 ,下层潜流型人工湿地部分填料床有效高度为 1.2 m ,上层表面流型人工湿地部分设计水深控制在 $0.3 \sim 1.2 \text{ m}$,平均水深为 0.5 m 。人工湿地主要设计参数见表2。

表2 人工湿地主要设计参数

Tab.2 Main design parameters of constructed wetland

湿地类型	有机负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	水力负荷/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	水力 停留 时间/d
潜流湿地(下层)	49.02	0.49	1.10
表流湿地(上层)	31.86	0.49	1.02

2.3 填料设计

2.3.1 填料选择

为了实现对建筑垃圾的资源化利用,优先采用再生填料(主要成分为碎砖陶粒滤料),该类填料应用于人工湿地水质净化领域应满足如下主要技术参数要求:

- ① 不含可见泥土、粉屑或有机杂质;
- ② 碎砖陶粒滤料不应使滤后水产生有毒、有害成分;
- ③ 碎砖陶粒滤料的粒径为 $8 \sim 16 \text{ mm}$;
- ④ 碎砖陶粒滤料不均匀系数 ≤ 1.6 ;
- ⑤ 粒径 $< 8 \text{ mm}$ 、粒径 $> 16 \text{ mm}$ 的量均不应大于5%;
- ⑥ 加工材料应以废砖为主,来源稳定,材料成分比例稳定;
- ⑦ 不同批次产品堆积密度差距 $< 10\%$ [5-7]。

2.3.2 填料床设计

“表潜结合式”人工湿地下层潜流型人工湿地部分填料床有效设计高度为 1.2 m ,采用级配填料进行填充,由下往上依次为夯实粘土(200 mm 厚)、HDPE防水土工膜(450 g/m^2)、 $d50 \sim 80 \text{ mm}$ 碎砖陶粒滤料(600 mm 厚)、 $d20 \sim 50 \text{ mm}$ 碎砖陶粒滤料(300 mm)、 $d10 \sim 20 \text{ mm}$ 碎砖陶粒滤料(300 mm 厚)。

2.4 植物设计

“表潜结合式”人工湿地水生植物全部在上

层表面流型人工湿地部分种植,该部分设计水深控制在 $0.3 \sim 1.2 \text{ m}$ 之间,平均水深为 0.5 m 。

湿地植物选择污染水体适应能力强、污染物去除效果好、生态景观塑造功能显著的土著类水生植物^[8-11],浅水区($0.3 \sim 0.5 \text{ m}$)主要种植芦苇、香蒲、千屈菜,种植密度均为 16 株/m^2 ;中水区($0.5 \sim 0.8 \text{ m}$)主要种植荷花、睡莲,种植密度均为 4 株/m^2 ;深水区($0.8 \sim 1.2 \text{ m}$)主要种植菹草、狐尾藻、眼子菜,种植密度均为 30 株/m^2 。同时对“表潜结合式”人工湿地周边的植物缓冲带进行了优化配置,与“表潜结合式”人工湿地一起构建了一个生物多样性丰富、水质净化效果稳定的生态景观型人工湿地生态系统。

3 运行结果与讨论

3.1 人工湿地对COD去除效果

“表潜结合式”人工湿地对水体中COD的去除机理以湿地植物根区生物膜的吸附降解作用为主,此外还兼有自然沉淀、物理过滤、填料吸附等多重作用^[12]。对2018年5月—8月的实际现场监测结果进行定量分析,得出“表潜结合式”人工湿地对微污染地表水体中COD的实际去除效果如图2所示。

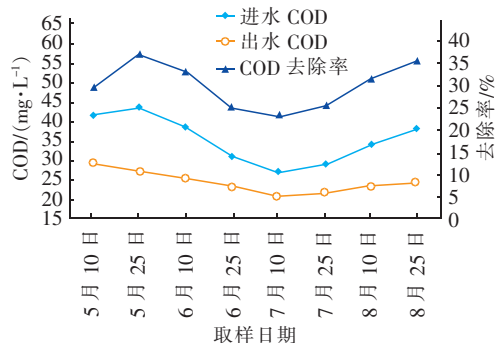


图2 人工湿地对水体中COD去除效果

Fig.2 Removal effect of COD by constructed wetland

由图2可知,在连续4个月的实际运行中,尽管湿地进水COD浓度存在一定程度的波动,尤其是在5月的两次检测中,由于河道上游农田灌溉等原因造成湿地进水COD浓度超过了设计进水限值,但是经过湿地的填料吸附、植物吸收,尤其是根区微生物的代谢降解作用,始终能将湿地出水COD浓度控制在 30 mg/L 及以下,湿地出水COD浓度能够满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定的Ⅳ类水限值要求;在实际检测中,湿地进水COD浓度在7月达到了最低值,随后在8月又出现了上升,这

主要是7月降雨量达到了最大,对湿地上游河道内COD具有一定程度的稀释作用,8月降雨量减少,湿地上游河道内COD又出现了上升趋势,但是整个检测周期内,湿地生态系统始终处于一个逐渐自我完善的过程,尤其是在7月、8月湿地系统的生物多样性及系统稳定性达到最高,对上游来水的水质、水量波动适应能力最强,湿地系统对上游来水中的COD去除率基本维持在20%~40%,符合湿地生态系统对COD的去除规律。

3.2 人工湿地对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果

“表潜结合式”人工湿地对水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除机理主要是湿地植物根系生物膜的硝化、反硝化作用,将 $\text{NH}_3\text{-N}$ 转化为 N_2 或 N_2O 进而从湿地系统逸出^[13]。2018年5月—8月连续4个月的进出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分析结果如图3所示。

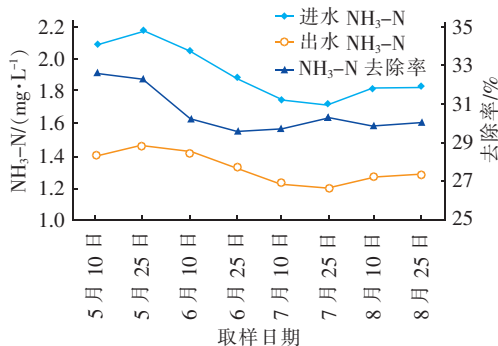


图3 人工湿地对水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果

Fig. 3 Removal effect of $\text{NH}_3\text{-N}$ by constructed wetland

由于存在灌溉退水等原因,湿地系统在5月的进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度最大,甚至超出了湿地进水的设计限值,随后在6月出现降低,在7月达到最低值,8月份降雨减少,湿地进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度又出现回升,但整个检测周期内,湿地系统都能够通过自身的调节功能将 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除能力控制在29%~33%的范围内,湿地出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 始终保持在1.5 mg/L以下,能够满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水的限值要求;在实际检测中,湿地对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果与COD表现出了基本类似的规律,在7月、8月湿地系统的生物多样性及系统稳定性达到最大,湿地植物生长、根区微生物的代谢过程对氮、磷等营养物质的需求量最大,湿地出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 甚至降低了1.2 mg/L左右,表现出了显著的氮、磷去除效果。

4 结论

① 利用液位可调式景观水坝上下游的水头差,依靠重力进入“表潜结合式”人工湿地,在水质达到甚至优于地表Ⅳ类标准的水质设计要求后,再依靠重力退回到河道下游,整个水质净化过程无动力消耗,实现了污水处理的“零成本”运行。

② 采用“表潜结合式”人工湿地,在同一投影面内既能体现表面流型人工湿地的景观效果,又能实现潜流型人工湿地的净水能力,有效降低了人工湿地对土地占用面积的限制需求。

③ 优先采用了再生填料,主要成分为碎砖陶粒滤料,实现了对建筑垃圾的资源化利用。

④ 尽管进水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在一定范围内出现了波动,甚至部分时段超出了设计进水浓度限值,但是湿地系统都能够通过自身的调节机制将出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别控制在30、1.5 mg/L及以下,湿地出水能够满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水限值要求。

参考文献:

- [1] 张清. 人工湿地的构建与应用[J]. 湿地科学, 2011, 9(4): 373-379.
Zhang Qing. Construction and application of constructed wetlands[J]. Wetland Science, 2011, 9(4): 373-379 (in Chinese).
- [2] 刘婧,黎忠,张太平,等. 生物接触氧化/人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(17): 9163-9164.
Liu Jing, Li Zhong, Zhang Taiping, et al. Application of combined process of biological contact oxidation with constructed wetlands in rural domestic sewage treatment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(17): 9163-9164 (in Chinese).
- [3] 钟成华,李杰,邓春光. 人工湿地废水处理中氮、磷去除机理研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(4): 141-146.
Zhong Chenghua, Li Jie, Deng Chunguang. Advances in the study of nitrogen and phosphorous removal mechanisms in constructed wetlands[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(4): 141-146 (in Chinese).
- [4] 曹笑笑,吕宪国,张仲胜,等. 人工湿地设计研究进展[J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 121-128.
Cao Xiaoxiao, Lü Xianguo, Zhang Zhongsheng, et al.

- Research progress on the design of constructed wetlands [J]. *Wetland Science*, 2013, 11(1): 121 – 128 (in Chinese).
- [5] 张翔凌. 不同基质对垂直流人工湿地处理效果及堵塞影响研究[D]. 武汉:中国科学院, 2007.
- Zhang Xiangling. Studies on Performance of Purification and Influence on Clogging of Vertical Flow Constructed Wetlands with Different Filter Media [D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences, 2007 (in Chinese).
- [6] 于君宝, 侯小凯, 韩广轩, 等. 多介质人工湿地对生活污水中氮和磷的去除效率研究[J]. *湿地科学*, 2013, 11(2): 233 – 239.
- Yu Junbao, Hou Xiaokai, Han Guangxuan, *et al.* Removal efficiency of multi-medium constructed wetlands on nitrogen and phosphorus in domestic sewage [J]. *Wetland Science*, 2013, 11(2): 233 – 239 (in Chinese).
- [7] 王荣, 贺锋, 徐栋, 等. 人工湿地基质除磷机理及影响因素的研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(6E): 12 – 17.
- Wang Rong, He Feng, Xu Dong, *et al.* The study on the mechanisms and influencing factors of substrates in constructed wetlands removing phosphorus [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(6E): 12 – 17 (in Chinese).
- [8] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(2): 179 – 184.
- Cheng Shuiping, Wu Zhenbin, Kuang Qijun. Macrophytes in artificial wetland [J]. *Journal of Lake Science*, 2002, 14(2): 179 – 184 (in Chinese).
- [9] 吴建强, 阮小红, 王雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择[J]. *水资源保护*, 2005, 21(1): 1 – 6.
- Wu Jianqiang, Ruan Xiaohong, Wang Xue. Selection and function of aquatic plants in constructed wetlands [J]. *Water Resources Protection*, 2005, 21(1): 1 – 6 (in Chinese).
- [10] 王圣瑞, 年跃刚, 侯文华, 等. 人工湿地植物的选择[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(1): 91 – 95.
- Wang Shengrui, Nian Yuegang, Hou Wenhua, *et al.* Macrophyte selection in artificial wetlands [J]. *Journal of Lake Science*, 2004, 16(1): 91 – 95 (in Chinese).
- [11] 尉中伟, 王晓昌, 郑于聪, 等. 水平潜流人工湿地脱氮功效中植物的作用[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(2): 595 – 602.
- Yu Zhongwei, Wang Xiaochang, Zheng Yucong, *et al.* Role of plants in horizontal subsurface flow constructed wetlands for nitrogen removal [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(2): 595 – 602 (in Chinese).
- [12] 冯琳. 潜流人工湿地中有机污染物降解机理研究综述[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 2006 – 2010.
- Feng Lin. Progress of study on the degradation mechanism of organic pollutants in subsurface flow constructed wetland [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 2006 – 2010 (in Chinese).
- [13] 李林峰, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(3): 337 – 342.
- Li Linfeng, Nian Yuegang, Jiang Gaoming. Contribution of macrophytes assimilation in constructed wetlands to nitrogen and phosphorous removal [J]. *Research of Environment Science*, 2009, 22(3): 337 – 342 (in Chinese).



作者简介:王文冬(1987 –),男,河北沧州人,硕士,工程师,主要从事水处理工程设计工作。

E-mail: 81950917@qq.com

收稿日期: 2018 – 11 – 13