

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.017

# 城市污水处理厂尾水人工湿地净化工程调试与运行

杜曼曼, 张琼华, 连斌, 王晓昌

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 基于宜兴城市污水处理厂尾水深度净化的需求,建设了5 000 m<sup>3</sup>/d以“建筑废弃块”为主要基质填料的复合式人工湿地系统。经过46 d的调试该系统完成启动,随后满负荷运行,运行6个月左右(186 d)发现,在稳定运行阶段该湿地系统对TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP、COD的平均去除率分别为40%、31.1%、46.4%、72%、12.5%。可见,复合式人工湿地系统对宜兴城市污水处理厂尾水具有良好的净化效果,可实现氮、磷营养物质的高效去除,有效实现“以废治废”的目的。该系统为污水处理厂尾水的深度净化提供了一种新范式。

**关键词:** 城市污水处理厂尾水; 人工湿地; 深度净化; 调试与运行

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0094-08

## Commissioning and Operation of Constructed Wetland Project for Purification of Tail Water from Municipal Wastewater Treatment Plant

DU Man-man, ZHANG Qiong-hua, LIAN Bin, WANG Xiao-chang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** A composite constructed wetland system with treatment capacity of 5 000 m<sup>3</sup>/d was constructed for advanced purification of tail water from Yixing municipal wastewater treatment plant. The fillers of the system were mainly building waste blocks. The wetland system was successfully commissioned after 46 days of operation, and then it was operated with full capacity. After nearly six months (186 days) of operation, the average removal rates of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, TP and COD by the system during the stable period were 40%, 31.1%, 46.4%, 72% and 12.5%, respectively. The composite constructed wetland system performed well in advanced purification of the tail water from Yixing municipal wastewater treatment plant, which effectively removed nutrients of nitrogen and phosphorus, and achieved the purpose of “waste control by waste”. The system provides a new reference for advanced purification of tail water from the wastewater treatment plant.

**Key words:** tail water from municipal wastewater treatment plant; constructed wetland; advanced purification; commissioning and operation

目前,我国大部分污水处理厂尾水直接汇入地表水系,不仅造成资源浪费,也加重了受纳水体污染

现状<sup>[1]</sup>。因此,提高污水厂尾水水质、进一步实现污水再生利用,可缓解我国水资源供需矛盾,也是有

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY01-08)  
通信作者: 张琼华 E-mail: qionghuazhang@126.com

效解决资源性缺水的关键。

常规污水处理厂尾水深度净化的方法主要有臭氧/活性炭<sup>[2-3]</sup>、生物滤池<sup>[4-5]</sup>、反渗透<sup>[6-7]</sup>、人工湿地<sup>[8]</sup>等。相较于其他技术,以“绿色系统”建设的人工湿地技术,不仅能提升营造景观的效果,而且具有基建投资及运行费用低、运行维护简单等优点,逐渐在尾水净化中得到越来越广泛的应用<sup>[9-14]</sup>。近年来,太湖水污染问题一直备受关注,宜兴为环太湖上游城市,河网密布,城市污水的排放对太湖影响较大,因此需进一步削减其周边污水处理厂尾水污染物负荷,控制进入太湖水体的氮、磷等营养物质的浓度非常关键。笔者基于研究团队在宜兴设计建设的5 000 m<sup>3</sup>/d 污水处理厂尾水净化复合式人工湿地系统,以“建筑废弃块”为主要基质填料,探究“以废治废”人工湿地系统的净化效果,旨在为尾水深度净化和人工湿地技术的应用推广提供技术支撑和工程示范。

## 1 工艺设计

### 1.1 设计水量、水质

人工湿地系统进水为宜兴城市污水处理厂的一级A标准出水,设计处理水量为5 000 m<sup>3</sup>/d。该系统于2018年12月启动通水,水力停留时间约为32.7 h,具体进水水质:TN为(8.4±0.65) mg/L、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为(0.53±0.081) mg/L、硝态氮为(7.4±0.64) mg/L、COD为(48±4.9) mg/L、TP为(0.11±0.047) mg/L、pH值为7.8±0.32。设计系统TN削减率≥40%、TP削减率≥50%。由于复合式人工湿地较单一人工湿地具有更高的污染物去除率,且能明显提升湿地在冬季低温条件下的运行效果,因此为保证湿地系统的长期运行,本试验采用复合式人工湿地处理工艺。

### 1.2 工艺流程

人工湿地系统建设用地的地势为西北高、东南低,落差超过6 m,东临宜兴城市污水处理厂,尾水经过一次提升以后,采用重力流进行湿地系统的配水。复合式人工湿地系统平面布置如图1所示。其中,A(A1、A2、A3)为生态强化单元;B(B1、B2、B3、B4)为双向横流单元;C(C1、C2、C3、C4)为多层介质潜流单元;D为折流式潜流单元;E为底部导流潜流单元;F(F1、F2)为表流湿地单元;G为生态人工湖;H为出水总渠。不同单元之间采用生态渠进行相关连接。

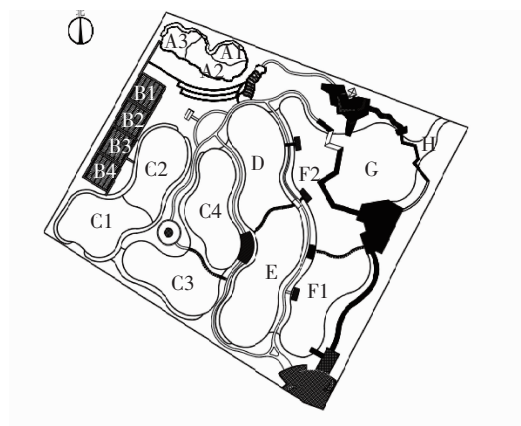


图1 复合式人工湿地系统平面布置

Fig. 1 Layout plan of composite constructed wetland system

该复合式人工湿地系统的工艺流程如图2所示。利用潜水泵将尾水运输至生态强化单元进行高位配水、调节水量,去除SS;出水自流进入4座并联的双向横流单元,完成有机物和SS的高效去除,并进行初步脱氮;出水自流进入多层介质潜流单元,强化层间氧传递,促进有机物的分解、磷的吸收和深度硝化;出水通过生态渠形成均匀水平流分别进入折流式潜流单元和底部导流潜流单元,进一步降解COD、TP等污染物,实现反硝化脱氮除磷;出水再流入表流湿地单元实现植物生态净化,深度去除水中氮、磷等污染物;出水最后进入生态人工湖,进一步提高水体的透明度,保障出水水质。

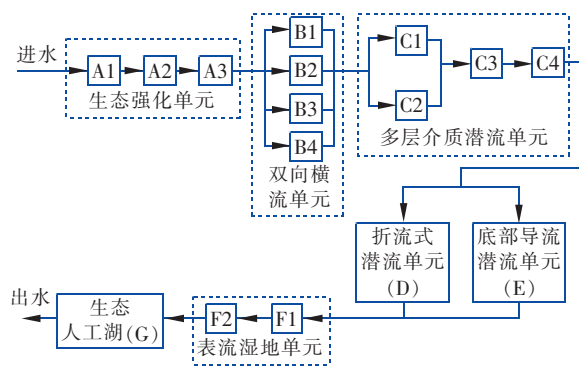


图2 复合式人工湿地处理工艺流程

Fig. 2 Flow chart of composite constructed wetland process

### 1.3 主要构筑物设计

A由3座串联池体A1、A2、A3构成,位于湿地系统地势最高点,为预处理单元;B由4座并联池体B1、B2、B3、B4构成,为潜流人工湿地,水位在基质填料以下,水体横向流动;C由4座池体C1、C2、C3、C4构成,此单元为非饱和流,通过管网在湿地表面

布水,污水先分别进入 C1 和 C2,再进入 C3 和 C4,水流方向为竖直向下;D 为半地下式结构,内部设有挡板,水体横向流动;E 为半地下式结构,其基质构成与 D 相同,此单元底部为集流与倾斜管的组合构

造,水体由下向上流动;F 由两座串联池体 F1、F2 构成,污水依次流入 F1、F2;G 属于表流人工湿地,具有较大的水面面积及丰富的植物群落。该复合式人工湿地系统的设计见表 1,各单元均铺设防渗膜。

表 1 主要构筑物设计

Tab. 1 Design of main structures

项 目	数量/座	面积/m <sup>2</sup>	基质	植物
A	A1	1	—	凤眼蓝(30~40 株/m <sup>2</sup> ) 睡莲(1~2 朵/m <sup>2</sup> ) 慈菇(2~3 株/m <sup>2</sup> )
	A2	1		
	A3	1		
B	B1	1	800 mm 的炉渣(粒径为 15~25 mm);2 000 mm 的建筑废弃块(粒径为 35~45 mm);500 mm 的鹅卵石(粒径为 40~60 mm)	菱角(3~5 株/m <sup>2</sup> ) 茭白(8~12 株/m <sup>2</sup> ) 问荆(7~10 株/m <sup>2</sup> ) 美人蕉(5~8 株/m <sup>2</sup> )
	B2	1		
	B3	1		
	B4	1		
C	C1	1	210 mm 的碎石(粒径为 10~20 mm);420 mm 的建筑废弃块(粒径为 15~30 mm);210 mm 的鹅卵石(粒径为 40~60 mm)	茭白(8~12 株/m <sup>2</sup> ) 菱角(3~5 株/m <sup>2</sup> ) 美人蕉(5~8 株/m <sup>2</sup> ) 水生鸢尾(6~8 株/m <sup>2</sup> )
	C2	1		
	C3	1		
	C4	1		
D	1	3 571	300 mm 的碎砖块(粒径为 35~45 mm);500 mm 的建筑废弃块(粒径为 40~60 mm);200 mm 的厚粗砂保护层	千屈菜(6~9 株/m <sup>2</sup> ) 黑三菱(3~5 株/m <sup>2</sup> )
E	1	2 237	300 mm 的碎砖块(粒径为 35~45 mm);500 mm 的建筑废弃块(粒径为 40~60 mm);200 mm 的厚粗砂保护层	再力花(1~2 丛/m <sup>2</sup> ) 水葱(2~3 丛/m <sup>2</sup> )
F	F1	1	300 mm 的厚粗砂;300 mm 的厚细土	花叶芦竹(2 丛/m <sup>2</sup> ) 睡莲(1~2 朵/m <sup>2</sup> ) 芦苇(6~10 株/m <sup>2</sup> ) 慈菇(2~3 株/m <sup>2</sup> ) 凤眼蓝(30~40 株/m <sup>2</sup> ) 水葱(2~3 丛/m <sup>2</sup> ) 蒲苇(1 丛/m <sup>2</sup> ) 再力花(1~2 丛/m <sup>2</sup> )
	F2	1		
G	1	4 278	厚细土 600 mm	芦苇(6~10 株/m <sup>2</sup> ) 泽泻(6~8 株/m <sup>2</sup> ) 千屈菜(6~9 株/m <sup>2</sup> ) 睡莲(1~2 朵/m <sup>2</sup> ) 水生鸢尾(6~8 株/m <sup>2</sup> ) 蒲苇(1 丛/m <sup>2</sup> )

## 2 运行效果分析

研究阶段分为:①启动期(2018 年 12 月—2019 年 2 月),系统进水量为 4 000 m<sup>3</sup>/d,采样频率为 1 周 1 次;②过渡期(2019 年 3 月—5 月),系统进水量为 5 000 m<sup>3</sup>/d,采样频率为 2 周 1 次;③稳定期(2019 年 6 月—8 月),系统进水量为 5 000 m<sup>3</sup>/d,采样频率为 2 周 1 次。2019 年 4 月中旬种植植物,各类植物均长势良好。

分析了系统从启动到稳定运行 8 个月(232 d)内各单元进出水 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、COD、TP

的变化情况。相关水质指标的测定参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)。

### 2.1 人工湿地系统的启动

2018 年 12 月湿地系统初步建成,启动调试分为各单元的调试、各单元联动调试、系统启动调试 3 个步骤。首先考虑间歇尾水进入各单元,持水 48 h 以上,检查各单体进出水是否正常、是否存在漏水,确认没有问题后排空,再通水,重复 2~3 次,然后进行单元联动调试。单元联动调试的主要任务是确认系统之间水力连通情况、系统之间的布水效果及水

头损失,首先在进水量为  $2\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$  的条件下对各单元进行定期巡查(1周3次),运行1周待系统波动不大时,增加进水量至  $3\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ ,重复上述操作,再增加至  $4\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 。启动期选择的进水量略小于设计水量,该阶段需要重点巡查湿地系统出现断流或死水区的问题,及时调整优化布水,确保系统水力过程均匀,促进湿地功效的发挥。由于启动期为冬季,气温较低(平均气温为  $5.6\ ^\circ\text{C}$ ),因此未在系统内种植植物,仅表流湿地单元和生态人工湖有少量芦苇。该系统采用废旧建筑砌块作为填料基质,需要经过一段时间的冲刷才能有效淘洗砌块中残留和附着的污染物,相应时间较火山岩、沸石等成品填料的时间长一些。待湿地系统各单元运行均良好后,即持续  $7\sim 10\ \text{d}$  对尾水中污染物表现出较稳定的去除效果,可认为湿地启动调试成功,期间共计历时  $46\ \text{d}$ 。

启动运行过程中需要确保机械设备及配水系统等正常运转,并加强日常运维管理。冬季低温期,需加强对湿地管道的维护和防冻,考虑降低系统进水量,在潜流湿地单元让尾水接触温度较高填料介质的中层和下层,保障系统的处理效果。在强降雨条件下,可通过降低系统进水量方式减少系统风险、提升净化效果。

## 2.2 对TN的去除效果

复合式人工湿地系统对TN的去除效果如图3所示(D/E出水TN值为两者的平均值)。由图3(a)可知,稳定期时系统各单元对TN的去除效果明显优于启动期和过渡期。随着尾水在系统内的流动,TN浓度逐渐下降,各单元中折流式潜流单元和底部导流潜流单元对TN的去除率较高,这是由于该两个单元均为潜流人工湿地,且折流式潜流单元内部设有挡板,可延长水体与基质的接触时间,利于氮类污染物的吸附降解;底部导流潜流单元水体由下向上流动,其内部可形成好氧、兼氧及缺氧的多元环境,能产生同步硝化反硝化作用,实现尾水的高效脱氮,因此该单元对TN的去除率较高。由图3(b)可以看出,在启动期,系统对TN的去除率略低,平均值仅为12%。系统运行25d左右,出现出水TN浓度略高于进水的情况,这可能是由于进水TN浓度较低,且湿地系统生物膜尚未形成,系统停留时间较长,基质中的部分污染物溶于水,使得出水TN浓度有所升高。随着系统长期运行,过渡期TN去

除率逐渐升高,平均值达到18%,稳定期时系统对TN的平均去除率达到40%,最高接近65%。因启动期为冬季,气温较低,微生物活性偏低,致使系统对TN的去除率不高。随着气温升高及植物种植,系统运行状况趋于稳定,过渡期和稳定期时系统对TN的去除率逐渐升高。

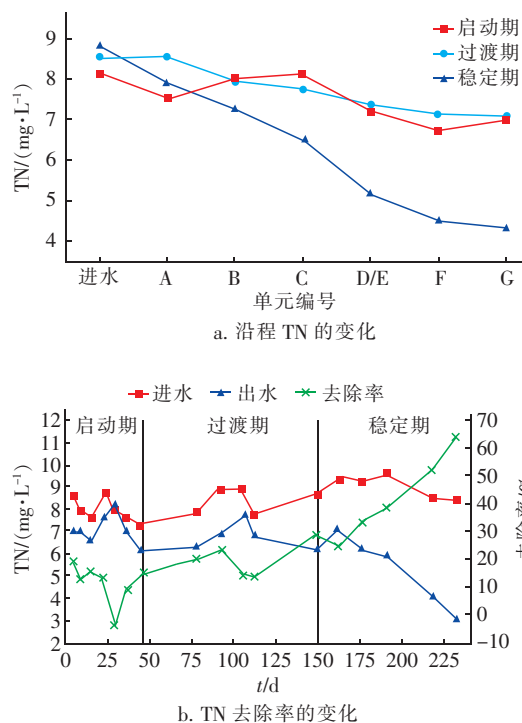


图3 复合式人工湿地系统对TN的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of TN by composite constructed wetland system

## 2.3 对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除效果

复合式人工湿地系统对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除效果如图4所示。由图4(a)可以看出,沿水流方向,各单元出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度基本呈下降趋势。整体来看,去除 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的单元主要为双向横流单元,此单元水体横向流动,在填料表面形成生物膜,前端以好氧硝化菌为主,可进行硝化反应,将 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 转化为 $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,末端DO浓度下降,形成缺氧环境,可进行初步反硝化,随着对该单元进水流向的调换,能够实现微生物的内源反硝化,有效提高 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除率。由图4(b)可知,在启动期系统对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除率较低,平均值约为20%,随着系统的运行,在过渡期系统对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的平均去除率上升至25%左右,稳定期上升至31.1%,最高接近40%。出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度可稳定小于 $0.5\ \text{mg/L}$ ,满足地表



水Ⅳ类标准。系统运行之初,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除以湿地基质的拦截吸附作用为主,随着时间的推移及植物种植,湿地基质生物膜逐渐形成,在系统内部及植物根系周围均形成好氧区和缺氧区,微生物可进行充分的硝化及反硝化作用,因此稳定期系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率明显上升。

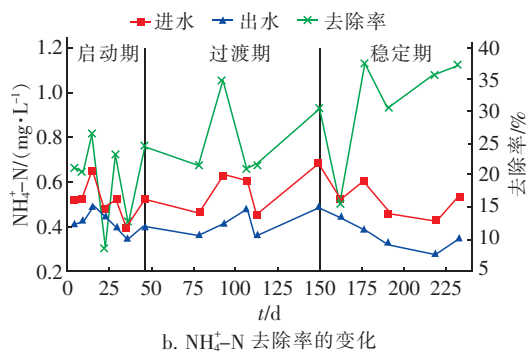
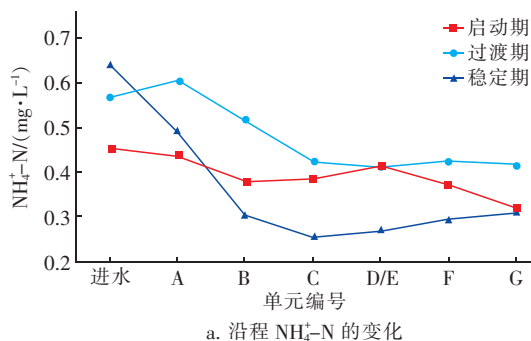


图4 复合式人工湿地系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  by composite constructed wetland system

## 2.4 对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果

复合式人工湿地系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果如图5所示。由图5(a)可以看出,沿程  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度逐渐下降,与启动期和过渡期相比,稳定期各单元对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果最好。总体来看,折流式潜流单元和底部导流潜流单元对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果最明显,由于两者水位均在基质填料以下,其中折流式潜流单元水流缓慢,底部导流潜流单元水体由下向上流动,因此两单元内部均可形成缺氧、厌氧环境,可进行生物反硝化作用,且污水经上一单元(多层介质潜流单元)的硝化作用积累了较多  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,使  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  转化为  $\text{N}_2$  得以去除。由图5(b)可知,启动期时系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的平均去除率偏低,不足10%,随着气温的升高,过渡期对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率略微上升,平均值为16%,稳定期种植植物后,系

统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率持续上升,平均去除率可达46.4%,最高值接近80%。由于湿地系统在冬季低温下启动,微生物活性较低,系统内DO普遍较高,限制了微生物的反硝化作用,因此启动期系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率较低。随着系统的长期运行,各单元逐渐形成缺氧环境,反硝化菌大量生长,使系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率持续上升。

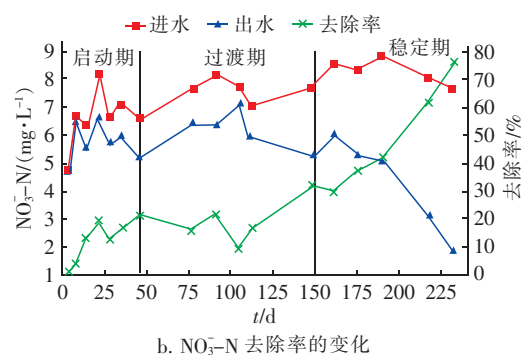
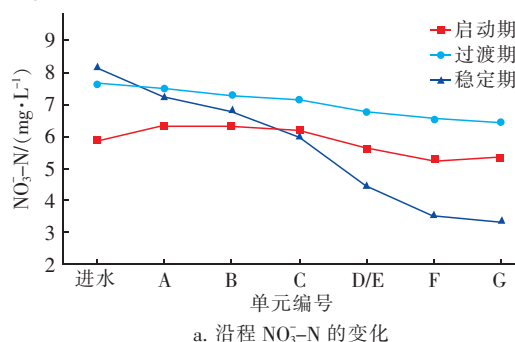


图5 复合式人工湿地系统对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  by composite constructed wetland system

## 2.5 对COD的去除效果

复合式人工湿地系统对COD的去除效果如图6所示。从图6(a)可以看出,尾水经湿地系统处理后COD浓度有所减小,系统启动10d内,对COD的总去除率超过70%,随着系统的运行,过渡期和稳定期系统对COD的去除率逐渐趋于稳定,但均低于启动初期。系统处于稳定期时,双向横流单元对COD的削减作用最为显著,由于该单元为系统首个净化单元,其基质填料能够有效截留尾水中颗粒态的有机物,从而实现COD的去除。由图6(b)可知,启动期时系统对COD的去除率波动较大,平均去除率约为25%,随着系统的运行,过渡期时系统对COD的平均去除率降低至20%左右,稳定期只有12.5%。系统对COD去除效果不佳可能与进水

为污水处理厂尾水有关,尾水中有有机物浓度偏低且大部分为难降解有机物;再者,由于该系统地处空旷地带,常受到周边人工养殖的鹅类干扰,其排泄物溶于水使各单元有机物浓度升高,导致系统对 COD 的去除率下降。

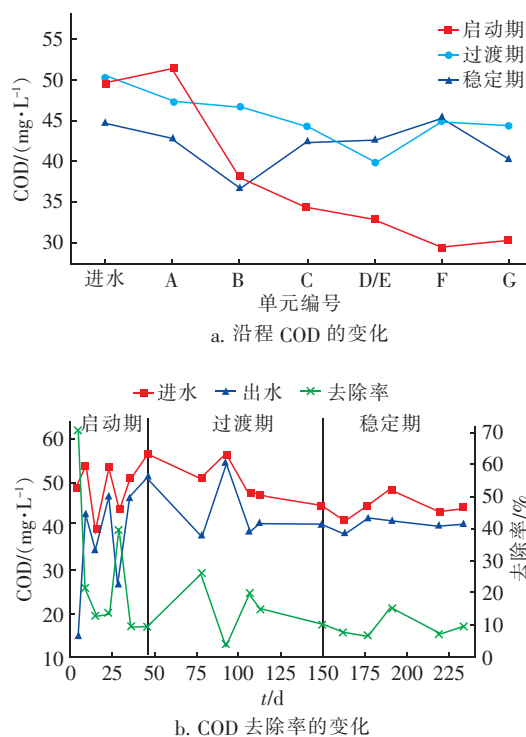


图6 复合式人工湿地系统对 COD 的去除效果

Fig. 6 Removal efficiency of COD by composite constructed wetland system

## 2.6 对TP的去除效果

复合式人工湿地系统对 TP 的去除效果如图 7 所示。由图 7(a)可以看出,系统对 TP 的去除效果显著,沿水流方向水体中 TP 浓度大幅度下降,稳定期时双向横流单元对 TP 的去除效果最好,其次是多层介质潜流单元。双向横流单元的基质主要为建筑废弃块,相关研究表明<sup>[15-16]</sup>,建筑废弃块(主要由砖块组成)能够有效吸附水体中的磷,随着系统的运行,该单元空隙率逐渐降低,SS 去除率升高,因而可有效去除尾水中各种形态的磷元素;多层介质潜流单元通过管网在基质表面布水,水体竖直向下流动,能够增强湿地基质植物根系对磷的吸收作用,从而提高 TP 去除率。从图 7(b)可以看出,出水 TP 浓度明显低于进水。与其他污染物相比,启动期时系统对 TP 的去除率最高,平均值约为 40%,随着系统的运行,对 TP 的去除率逐渐上升,过渡期时对 TP

的平均去除率可稳定高于 60%,稳定期种植植物后,对 TP 的平均去除率高达 72%,最高可以达到 85%,出水 TP 浓度满足地表水 IV 类标准。由于系统在启动期尚未种植植物,对 TP 的去除主要依靠湿地基质拦截吸附作用,随着时间的推移,植物及微生物的生长对磷的需求量逐渐增大,使系统对 TP 的去除效果显著增强。

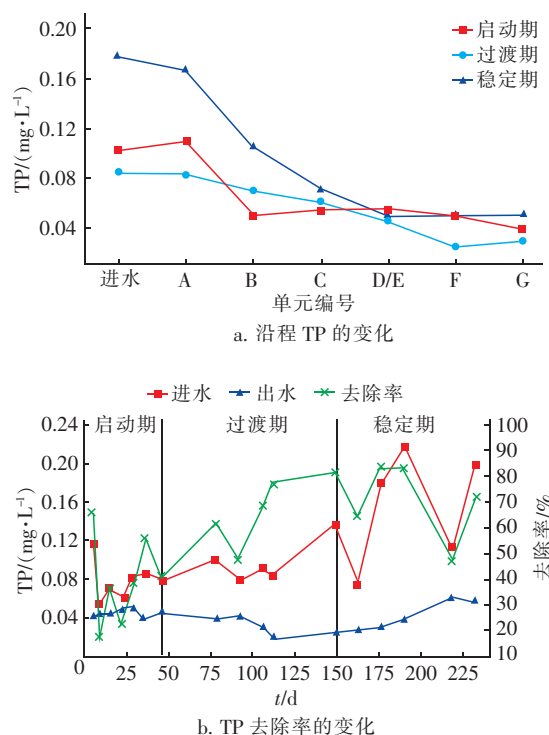


图7 复合式人工湿地系统对 TP 的去除效果

Fig. 7 Removal efficiency of TP by composite constructed wetland system

## 3 结论

复合式人工湿地系统运行和稳定的核心是保障系统单元具有良好、均匀的水力配水条件,在满足湿地处理负荷的前提下,让湿地单元最大化发挥去污功效。以“建筑废弃块”为主要基质的复合式人工湿地系统可有效削减污水厂尾水中残留的污染物,尤其对 TN、TP 的去除效果显著,稳定期时系统对 TN、氨氮、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP、COD 的平均去除率分别达到 40%、31.1%、46.4%、72%、12.5%。该系统管理简便、出水水质良好,适用于污水厂尾水的深度净化,还可营造良好的生态景观供人们休憩观赏,具有显著的社会、生态与环境效益。另外,虽然以“建筑废弃块”作为主要基质填料的人工湿地系统能够节省可观的建设成本(20%~30%),但废弃块本身含

有及吸附的污染物质使得系统启动和调试时间延长,这在一定程度会影响湿地系统的处理效果。

#### 参考文献:

- [1] 邵志昌,王长平,黄孟斌,等. 老旧水厂深度处理改造工程实践[J]. 中国给水排水,2018,34(2):81-85.  
Shao Zhichang, Wang Changping, Huang Mengbin, *et al.* Reconstruction practice of advanced treatment process in an aging waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2018,34(2):81-85 (in Chinese).
- [2] 李建民,刘培斌,魏伟,等. 臭氧-生物活性炭技术在再生水深度处理中的应用[J]. 环境工程,2012,30(4):4-6.  
Li Jianmin, Liu Peibin, Wei Wei, *et al.* Advanced treatment of reclaimed water with ozone - biological activated carbon[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(4):4-6 (in Chinese).
- [3] Chuang Y H, Szczuka A, Shabani F, *et al.* Pilot-scale comparison of microfiltration/reverse osmosis and ozone/biological activated carbon with UV/hydrogen peroxide or UV/free chlorine AOP treatment for controlling disinfection byproducts during wastewater reuse [J]. Water Res, 2019. DOI:10.1016/j.watres.2018.12.062.
- [4] Malekian F, Farhadian M, Sohrabi M, *et al.* Application of nanofiltration as a tertiary treatment in a polyester production industry for wastewater reuse [J]. Desalination & Water Treatment, 2016, 57(16):7175-7181.
- [5] 何翔. 深度处理技术用于北京某污水处理厂升级改造[J]. 中国给水排水,2018,34(8):80-84.  
He Xiang. Application of advanced treatment technology in the upgrading project of an existing wastewater treatment plant in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8):80-84 (in Chinese).
- [6] 段跟定,王先宝,金鹏康,等. 横流式滤池处理地表水作为景观用水的应用研究[J]. 中国给水排水,2015,31(17):78-81.  
Duan Gending, Wang Xianbao, Jin Pengkang, *et al.* Application of cross flow filter to treatment of surface water as landscape water [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(17):78-81 (in Chinese).
- [7] Rodriguez-Mozaz S, Ricart M, Köck-Schulmeyer M, *et al.* Pharmaceuticals and pesticides in reclaimed water: Efficiency assessment of a microfiltration - reverse osmosis (MF-RO) pilot plant[J]. J Hazard Mater, 2015, 41(2):165-172.
- [8] 谭洪涛,黄胜,张清东,等. 复合式人工湿地浮桥技术处理系统实验研究[J]. 水处理技术,2014,40(8):87-91.  
Tan Hongtao, Huang Sheng, Zhang Qingdong, *et al.* Study on a hybrid constructed wetland with floating bridge technology treatment system [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(8):87-91 (in Chinese).
- [9] 孔令为,邵卫伟,梅荣武,等. 浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究[J]. 中国给水排水,2019,35(2):39-43.  
Kong Lingwei, Shao Weiwei, Mei Rongwu, *et al.* Study on constructed wetland for advanced treatment of terminal effluent of wastewater treatment plant in Zhejiang Province [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2):35-43 (in Chinese).
- [10] 钱静,高守有. 高标准污水处理厂提标改造工程的设计与调试运行[J]. 中国给水排水,2016,32(8):29-32.  
Qian Jing, Gao Shouyou. Design, commissioning and operation of high-standard upgrading and reconstruction project of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(8):29-32 (in Chinese).
- [11] 刘亦凡,陈涛,李军. 中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J]. 中国给水排水,2016,32(16):36-41.  
Liu Yifan, Chen Tao, Li Jun. Process analysis of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants in China [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(16):36-41 (in Chinese).
- [12] 魏俊,赵梦飞,刘伟荣,等. 我国尾水型人工湿地发展现状[J]. 中国给水排水,2019,35(2):29-33.  
Wei Jun, Zhao Mengfei, Liu Weirong, *et al.* Development status of constructed wetland (CWs) for treatment of terminal effluent of wastewater treatment plants (WWTPs) in China [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2):29-33 (in Chinese).
- [13] 李婧,张国宇,孙娜,等. 生态砾石床+植物碎石床用于城市黑臭水体治理[J]. 中国给水排水,2019,35(6):102-107.  
Li Jing, Zhang Guoyu, Sun Na, *et al.* Application of ecological gravel bed and plant gravel bed combined process in urban black odor water body treatment [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6):102-107 (in Chinese).

(下转第104页)