

# 洋湖人工湿地再生水深度净化工程设计

王文明, 危建新, 尹振文, 宋凤鸣, 杨淇棕, 陈博儒, 周 丽  
(湖南先导洋湖再生水有限公司, 湖南 长沙 410208)

**摘 要:** 洋湖人工湿地是长沙市洋湖再生水厂污水深度净化系统,使达到一级 B 排放标准的尾水水质达到一级 A 排放标准。系统由三级“植物塘+湿地单元”和“垂直潜流+水平潜流+表面流+水平潜流”组成,规模为  $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水力负荷为  $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,水力停留时间约 15 h,各湿地单元  $\text{BOD}_5$  表面负荷为  $9.97 \sim 16.24 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、TP 表面负荷为  $0.48 \sim 0.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。实际运行表明,系统出水水质稳定优于一级 A 排放标准,各污染物去除率在 20% ~ 70% 之间。通过防堵塞、高效脱氮除磷工艺设计和精细化的运行调控管理,实现了 6 年来持续高效稳定运行。

**关键词:** 人工湿地; 防堵塞; 脱氮除磷

**中图分类号:** T992.3    **文献标识码:** B    **文章编号:** 1000-4602(2019)04-0059-04

## Design of Yanghu Constructed Wetland for Advanced Purification of Reclaimed Water

WANG Wen-ming, WEI Jian-xin, YIN Zhen-wen, SONG Feng-ming, YANG Qi-liang,  
CHEN Bo-ru, ZHOU Li

(Hunan Pilot Yanghu Reclaimed Water Co. Ltd., Changsha 410208, China)

**Abstract:** In order to improve the tail water quality from the first class B discharge standard to the first class A discharge standard, Yanghu reclaimed water plant in Changsha City had constructed Yanghu constructed wetland as an advanced purification system. The combination process of “plant pond + constructed wetland (CW)” and “vertical subsurface flow CW + horizontal subsurface CW + surface flow CW + horizontal subsurface CW” was established. The wastewater treatment scale was  $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . The total hydraulic retention time was about 15 h, and the hydraulic surface loading,  $\text{BOD}_5$  surface loading and TP surface loading were  $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,  $9.97 \sim 16.24 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , and  $0.48 \sim 0.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  respectively. The operation results showed that the effluent quality was better than the first class A standard with removal rates of various pollutants from 20% to 70%. Through effective prevention of substrate clogging, efficient pollutant removal process design, and the refined operation regulation management, the process system achieved highly stable operation performance for six years.

**Key words:** constructed wetland; prevention of substrate clogging; nitrogen and phosphorus removal

人工湿地具有工艺设备简单、建设和运行费用低、净化效果好、出水生物安全性高、生态环境效益

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3375)

显著、适合分散或非点源污水处理、可实现污水资源化等优点,在尾水深度处理、雨水径流处理、河湖污染防治、富营养化水体修复和海绵城市生态建设等方面得到越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

## 1 工程概况

洋湖人工湿地设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,占地面积为 $8 \text{ hm}^2$ ,由三级“植物塘+湿地单元”组成,是长沙市洋湖再生水厂污水深度净化工艺系统,具体工艺流程见图1。

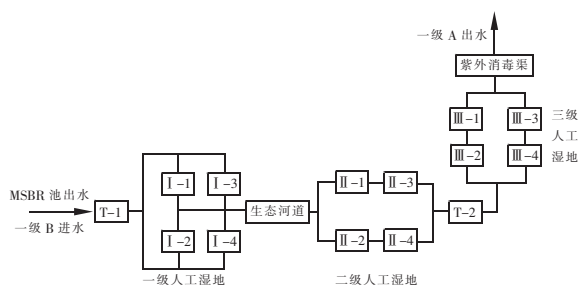


图1 洋湖人工湿地工艺流程

Fig. 1 Flow chart of Yanghu constructed wetland

二级生化工艺 MSBR 池一级 B 出水首先进入一级植物塘(T-1),出水流入4座并联运行的垂直潜流湿地(I-1、I-2、I-3、I-4),再流入生态河道;生态河道出水流过2组并联运行的“水平潜流湿地(II-1、II-2)+表面流湿地(II-3、II-4)”,再流入二级植物塘(T-2);二级植物塘出水流过2组并联运行的“表面流湿地(III-2、III-4)+水平潜流湿地(III-1、III-3)”,出水最后经紫外消毒处理后达到一级A标准。

## 2 工艺设计与净化效果分析

### 2.1 植物塘和生态河道设计

植物塘和生态河道分浅水区、过渡区和深水区设计,在较窄位置只分为浅水区和深水区,在较宽位置分为浅水区、过渡区和深水区,具体的设计数据如表1所示。由于植物塘有一个进水口、两个出水口,而生态河道则有多个进水口、多个出水口,表1中的水力停留时间仅为植物塘和生态河道的最大水力停留时间。

表1 植物塘和生态河道设计参数

Tab. 1 Design parameters of plant pond and ecological river course

项 目	面积/ $\text{m}^2$	有效容积/ $\text{m}^3$	水力停留时间/h	浅水区/m		过渡区/m		深水区/m	
				水深	宽	水深	宽	水深	宽
T-1	1 892	1 812	1.09	$\leq 0.4$	7	0.4~1.6	6	1.6	1.47~8.03
河道	1 425	1 682	1.01	$\leq 0.3$	2	0.3~1.2	3	1.2	15
T-2	3 783	4 129	2.48	$\leq 0.4$	7	0.4~1.6	6	1.6	10

### 2.2 湿地单元设计

洋湖人工湿地填料孔隙率约30%~40%,总水力停留时间约为15 h,总水力负荷为 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,各湿地单元 $\text{BOD}_5$ 表面负荷约为 $9.97 \sim 16.24 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、TP表面负荷约为 $0.48 \sim$

$0.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。湿地单元的具体几何尺寸和填料设计数据如表2所示,各湿地单元水力坡度均为0.2%,设计中依据垂直潜流、表面流、水平潜流不同类型和污染物负荷差异设置了不同的长宽比、池深、填料深度和填料粒径。

表2 湿地单元几何尺寸和填料设计参数

Tab. 2 Physical dimensions of wetland units and design parameters of filler

单元	长/m	宽/m	长宽比	水力 坡度/%	池深度/m	填料深度/mm			填料粒径/mm		
						上层	中层	下层	上层	中层	下层
I - 1 ~ I - 4	35 ~ 48	18.5 ~ 24.0	1.50 ~ 2.60	0.2	1.4 ~ 1.6	350	500	350	40 ~ 50	20 ~ 30	40 ~ 50
II - 1	44 ~ 57	24.0	1.83 ~ 2.40	0.2	1.2 ~ 1.4	1 000			30 ~ 40		
II - 2	39 ~ 49	24.5	1.59 ~ 2.00	0.2	1.2 ~ 1.4						
II - 3	45 ~ 53	19.8	2.27 ~ 2.68	0.2	0.9 ~ 1.1	600					
II - 4	42 ~ 46	25.5	1.65 ~ 1.80	0.2	0.9 ~ 1.1						
III - 1	76 ~ 81	17.7	4.29 ~ 4.58	0.2	1.2 ~ 1.4	1 000					
III - 2	68 ~ 74	17.4	3.91 ~ 4.25	0.2	0.9 ~ 1.1	600					
III - 3	76 ~ 80	16.9	4.50 ~ 4.73	0.2	1.2 ~ 1.4	1 000					
III - 4	79 ~ 86	17.6	4.49 ~ 4.89	0.2	0.9 ~ 1.1	600					

## 2.3 植物配置设计

洋湖人工湿地植物配置设计方案见表3,选用了大量根系发达、耐污去污能力强、有较好观赏价值、具有抗冻抗病虫害能力和容易管理养护的多年生乡土植物,同时还考虑了植物优势种搭配栽种,增加植物多样性,营造生态景观。表面流和水平潜流湿地单元中植物的种植密度不小于6株/m<sup>2</sup>,垂直潜流湿地单元中植物的种植密度不小于9株/m<sup>2</sup>。

表3 植物配置设计方案

Tab.3 Design scheme of plant configuration

区域	分区	植物配置方案
一级植物塘	浅水区	香蒲+芦苇+茭白+水葱
	过渡区	睡莲+黄花水龙+香菇草
	深水区	苦草+狐尾藻+眼子菜
生态河道	浅水区	香蒲+鸢尾+再力花+水葱
	过渡区	睡莲+黄花水龙+香菇草
	深水区	苦草+狐尾藻+黑藻
二级植物塘	浅水区	千屈菜+黄菖蒲+芦苇+茭白+再力花
	过渡区	睡莲+荇菜+水芹菜+黄花水龙+香菇草
	深水区	狐尾藻+眼子菜+苦草+黑藻
一级人工湿地	I-1	黄菖蒲+美人蕉+芦苇+香蒲
	I-2	美人蕉+芦苇+香蒲+黄菖蒲
	I-3	黄菖蒲+芦苇+香蒲
	I-4	黄菖蒲+香蒲
二级人工湿地	II-1	黄菖蒲+香蒲+美人蕉
	II-2	黄菖蒲+香蒲+旱伞草
	II-3	黄菖蒲+香蒲
	II-4	旱伞草+灯芯草
三级人工湿地	III-1	黄菖蒲+芦苇
	III-2	黄菖蒲+千屈菜
	III-3	芦苇+香蒲
	III-4	美人蕉+黄菖蒲+旱伞草

## 2.4 污染物净化效果分析

洋湖再生水厂运行管理中注重优化MSBR池运行状态,最大限度发挥二级生化工艺系统净化效果,尽可能降低人工湿地污染物负荷。2018年3月—5月洋湖人工湿地月均水质数据如表4所示,各级人工湿地单元对污染物都有较好的去除效果,一级垂直潜流湿地单元净化效果最好,系统总出水水质优于一级A排放标准,除TN、TP外其余水质指标达到地表Ⅲ类水质标准,COD去除率在50%~65%之间,SS去除率在30%~70%之间,TN去除率在15%~20%之间,TP去除率在40%~50%之间,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率在20%~40%之间。

表4 洋湖人工湿地污染物净化效率

Tab.4 Pollutant removal efficiency of Yanghu constructed wetland

时间	项目	MSBR池出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	T-1出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	河道/(mg·L <sup>-1</sup> )	T-2出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	Ⅲ-1、Ⅲ-3出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	总去除率/%
3月	COD	23.0	23.0	17.4	13.6	10.5	54.35
	SS	14.0	13.0	6.8	6.0	4.6	67.14
	TN	9.20	8.91	7.83	7.54	7.38	19.78
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.29	0.25	0.23	0.21	0.23	20.69
	TP	0.78	0.76	0.56	0.48	0.43	44.87
4月	COD	28.0	27.0	20.5	15.7	12.6	55.00
	SS	12.0	10.5	9.8	6.9	6.5	45.83
	TN	7.80	7.78	6.95	6.63	6.54	16.15
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.30	0.29	0.24	0.23	0.20	33.33
	TP	0.69	0.69	0.53	0.46	0.41	40.58
5月	COD	34.0	33.0	25.2	15.4	12.8	62.35
	SS	13.0	12.8	8.6	8.6	7.9	39.23
	TN	10.30	10.30	9.85	9.00	8.57	16.80
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.30	0.31	0.25	0.24	0.21	30.00
	TP	0.83	0.82	0.60	0.51	0.45	45.78

## 3 工艺设计与运行管理

### 3.1 采用有利于预防填料堵塞的工艺技术

为了预防负荷最高的一级垂直潜流湿地单元出现堵塞,首先在其前端设计了由沉水-浮叶-挺水植物组成的植物塘T-1,可以较好地过滤、沉淀和截留悬浮物;其次垂直潜流湿地单元采用了填料分层和粒径级配设计,填料共分上、中、下三层,即滤料层、过滤层、排水层,粒径分别为40~50、20~30和40~50mm;还设计了导气管往池体最深的垂直潜流湿地单元底部输氧,预防了底部大面积厌氧引起填料中胞外聚合物蓄积的情况。

各级湿地池体内都由砖墙分隔成四个单元,一级湿地有4座16个单元并联运行,二级、三级湿地有4座8个单元并联运行,每个单元都有进水系统、集水系统和排空系统,这种设计有利于按照一定周期对各个单元轮换进水,一定时间实现间歇性运行。湿地单元间歇运行,提供了湿地内适当的合理干化期,会使填料得到“休息”,保证填料一定的好氧状态,避免胞外聚合物过度累积,防止填料堵塞<sup>[3]</sup>。将最容易堵塞的垂直潜流湿地设计成16个单元并联运行,大大降低其填料堵塞几率。排空系统管道设施的设置可以对各单元定期排空清淤,将脱落的生物膜等排出系统,避免了湿地内生物量的长期积

累,保证了填料空隙,从而使污水可以在填料间流态稳定。此外,植物塘富氧和湿地系统出水堰口等位置的高差跌水充氧都可以提高湿地系统内水体溶氧量,对预防填料堵塞也起到一定作用。

### 3.2 采用强化脱氮除磷和去除悬浮物的工艺技术

为进一步提高总磷去除效果,末端湿地Ⅲ-1和Ⅲ-3填料采用花岗岩主体填料和石灰石吸磷填料混合强化除磷,保证出水总磷达标;为减轻石灰石吸磷填料的饱和堵塞问题,选用约40~50 mm较大粒径碎石提高填料孔隙率。

为确保出水悬浮物达标,末端湿地Ⅲ-1和Ⅲ-3采用水平潜流形式,而没有采用表面流工艺,避免了水的短流和植物残渣对水体的二次污染。湿地Ⅲ-1和Ⅲ-3还设计采用了一定量4~6 mm小粒径石英砂填料,该填料布置在出水端前约8 m位置,小粒径石英砂碎石填料过滤区宽约5~8 m,可以将悬浮物较好地过滤,保证出水悬浮物达标。

### 3.3 采用表流和潜流可以转化运行的工艺技术

冬季低温天气尤其是极端严寒可能造成植物越冬存活率较低进而导致植物群落退化。为避免出现这种情况,表流湿地和水平潜流湿地的进水管、集水管和排空管道设计成相同的布置方式,碎石填料的深度则不同,因此通常情况下的运行水位不同。但是,可以通过调节湿地单元出水水位的高度实现表流和潜流形式间的相互转化运行。

春秋季节因适宜的环境温度和日照条件,藻类生长繁殖较快,碎石填料表面以上水体中易出现水华,容易影响湿地的生态景观和净化效果,因此春秋季节一般考虑将表流湿地调整为水平潜流模式运行。在持续低温的寒冬,再将潜流湿地水位上升至碎石填料表面以上合适位置,有利于对湿地填料和植物根系进行保温,从而提高冬季植物存活率。长沙冬季低温时间较短,水面持续结冰的可能性较小,潜流湿地是否调整为表流模式视具体情况而定。

### 3.4 精细化运行管理确保人工湿地长期稳定运行

目前我国人工湿地仍然存在重建设、轻管理的现象,该人工湿地作为洋湖再生水厂污水深度处理工艺段,公司成立了湿地运行班组,编制了《人工湿地工艺管理技术规程》,从水位水质管理、植物管理、集配水管理、排水设施管理、防堵塞管理等方面系统规定了湿地运行管理的操作技术规程,规范了植物收割、移植或补种等养护工作,因此总体净化效

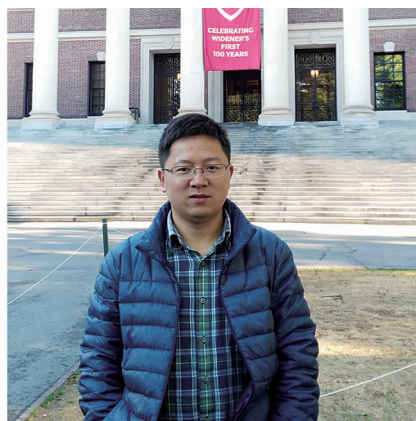
果良好且出水严格达到一级A排放标准。

## 4 结论

洋湖人工湿地工程采用了三级设计和不同工艺形式组合,且工艺参数合理取值,从而实现了高效脱氮除磷,同时,精细化的运行调控管理也是确保人工湿地长期持续稳定运行的核心所在。

## 参考文献:

- [1] 裴亮,梁晶,刘慧明,等. 新型阶梯式人工湿地处理生活污水的研究[J]. 环境工程学报,2013,7(1):86-90.  
Pei Liang, Liang Jing, Liu Huiming, et al. A novel staircase constructed wetland for treatment of domestic sewage [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(1): 86-90 (in Chinese).
- [2] 谢飞,黄磊,高旭,等. 潜流人工湿地对微污染河水的净化效果[J]. 环境工程学报,2013,7(1):65-71.  
Xie Fei, Huang Lei, Gao Xu, et al. Purification efficiencies of subsurface horizontal flow constructed wetland treating slightly polluted river water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(1): 65-71 (in Chinese).
- [3] 朱洁,陈洪斌. 人工湿地堵塞问题的探讨[J]. 中国给水排水,2009,25(6):24-28,33.  
Zhu Jie, Chen Hongbin. Discussion on constructed wetlands clogging [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(6): 24-28, 33 (in Chinese).



作者简介:王文明(1982-),男,四川平昌人,硕士,高级工程师,技术总监,主要从事水污染防治与生态修复技术研究。

E-mail:w. m. wang@126. com

收稿日期:2018-10-22