

## 种植不同植物的人工湿地深度处理城镇污水处理厂尾水的中试研究\*

岑璐瑶<sup>1</sup>, 陈滢<sup>1,3\*\*</sup>, 张进<sup>2</sup>, 刘敏<sup>1,3</sup>, 吴庆明<sup>1</sup>

(1: 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

(2: 四川省科学城天人环保有限公司, 成都 610225)

(3: 中德水环境与健康研究中心, 成都 610065)

**摘要:** 利用种植不同植物的人工湿地对污水厂尾水进行深度处理以达到更严格的排放标准. 利用 5 块尺寸一致的中试规模人工湿地, 以潮汐流作为运行方式, 研究不同植物对尾水的处理效果. 经过一年的实验, 结果表明: 5 块人工湿地出水各指标均能达到提升标准的排放要求. 在不同植物的去污效果对比实验中, 种植芦苇 (*Phragmites communis*) 的人工湿地对化学需氧量 (COD)、氨氮和总氮 (TN) 的平均去除率均为最高, 分别为 24.01%、68.15% 和 92.70%; 种植风车草 (*Cyperus alternifolius*) 的人工湿地对 TP 的平均去除率最高, 为 71.68%. 在不同季节的去污效果对比实验中, 春季芦苇湿地对 COD、氨氮和 TN 的去除效果最好, 平均去除率分别为 52.51%、76.06% 和 92.04%, 美人蕉 (*Canna indica*) 湿地对 TP 去除效果最好, 平均去除率为 66.72%; 夏季对 COD、氨氮、TP 和 TN 处理效果最好的分别是种植丝带草 (*Phalaris arundinacea*)、菖蒲 (*Acorus calamus*)、风车草和芦苇的人工湿地, 平均去除率分别为 15.83%、78.11%、67.30% 和 91.73%; 秋季对 COD、氨氮、TP、TN 处理效果最好的分别是种植芦苇、丝带草、风车草、美人蕉的人工湿地, 平均去除率分别为 12.19%、58.82%、83.16% 和 94.01%; 冬季对 COD 去除效果最好的是种植丝带草的人工湿地, 平均去除率为 33.39%, 对氨氮、TP 处理效果最好的是种植美人蕉的人工湿地, 平均去除率分别为 76.33% 和 79.43%, 对 TN 处理效果最好的是种植芦苇的人工湿地, 平均去除率为 94.97%. 在以后的实际工程中, 可以考虑用种植不同季节、不同指标对应的最佳去污植物为主, 并且搭配种植其他植物的人工湿地进行污水厂尾水的深度处理.

**关键词:** 人工湿地; 水质标准; 植物; 污水处理厂尾水

## Pilot-scale study on advanced treatment of tail water of urban sewage treatment plant by constructed wetlands with different plants

CEN Luyao<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>1,3\*\*</sup>, ZHANG Jin<sup>2</sup>, LIU Min<sup>1,3</sup> & WU Qingming<sup>1</sup>

(1: School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R.China)

(2: Tianren Environmental of Protection Science City, Chengdu 610225, P.R.China)

(3: Sino-German Center for Water and Health Research, Chengdu 610065, P.R.China)

**Abstract:** In order to meet stringent water quality standards, the tail water of the local wastewater treatment plant has been treated by constructed wetlands with different plants. Five pilot-scale constructed wetlands were investigated for the advanced treatment of the tail water of wastewater treatment plant, they had the same size, and were operated with a tidal flow, while they were planted with different plants to compare their treatment effects. After one year's experiment, the results showed that the all indexes of effluent from five constructed wetlands could meet the improved requirements. Among them, the constructed wetland planted with *Phragmites communis* had the highest average removal rates of chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen, and total nitrogen (TN), which were 24.01%, 68.15%, and 92.70%, respectively. The constructed wetland planted with *Cyperus alternifolius* had the highest average removal rate of total phosphorus (TP), which was 71.68%. In the contrast experiment of the performance

\* 国家国际科技合作专项 (2012DFG91520) 资助. 2018-05-21 收稿; 2018-08-18 收修改稿. 岑璐瑶 (1993~), 男, 硕士研究生; E-mail: 13648589229@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: cylv@163.com.

in different seasons, in the spring, the constructed wetland planted with *Phragmites communis* had the best removal effect on COD, ammonia nitrogen and TN, the average removal rates were 52.51%, 76.06% and 92.04%, respectively, and the constructed wetland planted with *Canna indica* had the best removal effect on TP, the average removal rate was 66.72%. In the summer, the constructed wetland respectively planted with *Phalaris arundinacea*, *Acorus calamus*, *Cyperus alternifolius* and *Phragmites communis* had the best removal effect on COD, ammonia nitrogen, TP and TN, the average removal rates were 15.83%, 78.11%, 67.30% and 91.73%, respectively. In the autumn, the constructed wetland respectively planted with *Phragmites communis*, *Phalaris arundinacea*, *Cyperus alternifolius* and *Canna indica* had the best removal effect on COD, ammonia nitrogen, TP and TN, respectively, the average removal rates were 12.19%, 58.82%, 83.16% and 94.01%, respectively. In the winter, the constructed wetland planted with *Phalaris arundinacea* had the best removal effect on COD, the average removal rate was 33.39%, the constructed wetland planted with *Canna indica* had the best removal effect on ammonia nitrogen and TP, the average removal rates were 76.33% and 79.43%, respectively, and the constructed wetland planted with *Phragmites communis* had the best removal effect on TN, the average removal rate was 94.97%. It will be of significance to the practical engineering in the future.

**Keywords:** Constructed wetland; water quality standard; plant; tail water of urban sewage

污水处理厂尾水已经成为补充地表水的重要来源之一<sup>[1]</sup>,因而对污水处理厂尾水的水质要求变得更为严格. 愈加严格的水质排放标准建立起来后,使得相应的城镇污水厂急需找出经济有效的处理方法对其尾水进行深度处理.

人工湿地工艺由于其基建及运营成本低、维护方便、具有景观价值等优点,被认为是一种好的选择,广泛用于世界各地的污水处理中<sup>[2-9]</sup>,并已逐渐成为我国用于尾水深度处理的工艺之一<sup>[10-14]</sup>. 范远红等<sup>[15]</sup>比较了表面流人工湿地中风车草(*Cyperus alternifolius*)、再力花(*Thalia dealbata*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)和黑藻(*Hydrilla verticillata*)等植物对污水厂尾水的净化效果;吴丹等<sup>[16]</sup>研究了表面流人工湿地中睡莲(*Nymphaea tetragona*)、苦草、大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*)、鸢尾(*Iris tectorum*)和黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)等植物对污水厂尾水的净化效果. 此外,为改善传统湿地的运行方式并提高复氧能力,有学者进行了强化湿地复氧的研究,江林等<sup>[17]</sup>采用阶段曝气的方法强化了人工湿地的处理效果. 研究人工湿地深度处理尾水的学者多以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准为目的,比选出不同植物的去污效果. 然而,各地对出水水质的要求不断提高,如四川省要求当地污水厂达到最新出台的水质标准《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016),该提升标准对排放水质有着更加严格的要求,其中,COD 为 30 mg/L,当水温>12℃时,氨氮浓度为 1.5 mg/L,当水温≤12℃时,氨氮浓度为 3 mg/L,TP 浓度为 0.3 mg/L,TN 浓度为 10 mg/L,考察采用人工湿地是否能稳定达到此类更严格的水质标准的研究较少.

本课题以满足一级 A 标准的尾水为进水,考察经人工湿地处理后的出水是否能满足上述提升标准为目的,采用了能耗和维护费用低且复氧能力强的潮汐流作为运行方式,探索种植成都本土地区不同湿地植物的三级串联式中试规模人工湿地系统处理成都某污水厂尾水中化学需氧量(COD)、氨氮、总磷(TP)、总氮(TN)的效果,比选出成都本土地区处理效果最佳的人工湿地植物,并通过对一年中不同季节各种植物的去污效果的对比,选出各季节去污效果最佳的植物,为人工湿地深度处理尾水的实际工程应用提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 人工湿地系统结构

中试人工湿地系统坐落于成都市某污水处理厂内,占地约为 150 m<sup>2</sup>(图 1a). 湿地系统由五块人工湿地实验田组成,每一块湿地实验田由三级处理单元及两个集水池构成(图 1b),依次为一级处理单元(3.0 m×1.0 m×1.0 m)、一级集水池(0.6 m×1.0 m×0.8 m)、二级处理单元(3.0 m×1.0 m×0.8 m)、二级集水池(0.6 m×1.0 m×0.6 m)、三级处理单元(3.0 m×1.0 m×0.6 m). 所有湿地实验田均由砖块和水泥铺砌筑成,四周和底部均铺设防渗层. 人工湿地系统的基质配置如表 1 所示,湿地系统各个处理单元的基质层分为四层,由上而下分别为土壤、细河沙、石灰岩(孔隙率为 25%~41%)和大粒径砾岩.

表 1 人工湿地系统实验田的基质结构  
Tab.1 Substrates structure of experimental field in constructed wetland system

填料	位置 (从上往下)	厚度/cm			主要作用
		一级处理单元	二级处理单元	三级处理单元	
土壤	第一层	10	10	5	植物固定和生长
细河沙	第二层	5	5	5	出水
石灰岩	第三层	35	30	25	净化用基质
大粒径砾岩	第四层	45	35	25	布水

1.2 人工湿地系统进水

如图 1a,污水处理厂尾水进入系统前段集水池,作为整个湿地系统的进水. 集水池无盖敞开,其内所收集水的水质会受到其他自然因素和人为因素的影响,水质有一定波动.

进水 COD 浓度介于 8.71~49.88 mg/L 之间,平均为 25.75 mg/L,负荷在 0.48~2.77 g/(m<sup>2</sup>·d) 之间,平均为 1.43 g/(m<sup>2</sup>·d). 进水氨氮浓度在 0.34~4.98 mg/L 之间,平均为 1.69 mg/L,负荷在 0.02~0.28 g/(m<sup>2</sup>·d) 之间,平均为 0.09 g/(m<sup>2</sup>·d). 进水 TP 浓度在 0.07~0.66 mg/L 之间,平均为 0.27 mg/L,负荷在 0.004~0.04 g/(m<sup>2</sup>·d) 之间,平均为 0.02 g/(m<sup>2</sup>·d). 进水 TN 浓度在 6.11~14.99 mg/L 之间,平均为 10.87 mg/L,负荷在 0.34~0.83 g/(m<sup>2</sup>·d) 之间,平均为 0.60 g/(m<sup>2</sup>·d).

1.3 实验分组方案及植物配置

根据本湿地系统所处的实际地理位置(四川省,成都市),调研了成都市当地常用的本土湿地植物. 最终,湿地系统采用了菖蒲、风车草、丝带草、美人蕉和芦苇 5 种湿地植物. 其中,菖蒲、风车草、丝带草和芦苇采用幼苗种植,美人蕉采用块茎种植. 同一块实验田种植一种植物,每种植物在实验田的各级处理单元上的栽种密度均为 25 株(丛)/m<sup>2</sup>,即每块实验田植物种植数量均为 225 株(丛).

在不同植物的对比实验中,湿地系统的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>湿地实验田,分别种植了菖蒲、风车草、丝带草、美人蕉和芦苇,不同湿地实验田的流态(均采用水平潜流作为湿地流态)、基质(均铺设 0.05~0.20 cm 石灰岩作为湿地基质)等条件均相同,用于比较人工湿地中种植不同湿地植物对尾水水质净化效果的影响.

1.4 人工湿地运行方式

各实验田的水力负荷为 0.06 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),水力停留时间为 4.75 d. 在人工湿地系统运行相对稳定后,于 2016 年 6 月 2 日开始进行数据记录,于 2017 年 6 月 5 日结束实验,实验为期 368 天(其中 2017 年 1 月 13 日—2 月 26 日为实验停滞期),并采用潮汐流的运行方式进水.

1.5 自然条件情况

实验期间的气温情况如图 2 所示,由于水质标准中氨氮的排放标准均与气温是否高于 12℃ 有关,图中标出了 12℃ 的气温线,一级 A 标准和提升标准中气温≤12℃ 时,氨氮排放标准分别为 8 和 3 mg/L,>12℃ 时氨氮的排放标准分别为 5 和 1.5 mg/L. 如图 2,实验期间气温≤12℃ 的日期,分别有 2016 年 10 月 29 日、2016 年 11 月 7 日至 9 日、2016 年 11 月 22 日至 2017 年 2 月 16 日、2017 年 2 月 21 日至 3 月 11 日、2017 年 3 月 13 日至 16 日以及 2017 年 3 月 24 日至 25 日. 这 6 个时间段内的氨氮浓度,以 8 mg/L(一级 A 标准)或 3 mg/L(提升标准)作为排放标准,其余时间检测的氨氮浓度均以 5 mg/L(一级 A 标准)或 1.5 mg/L(提升标准)作

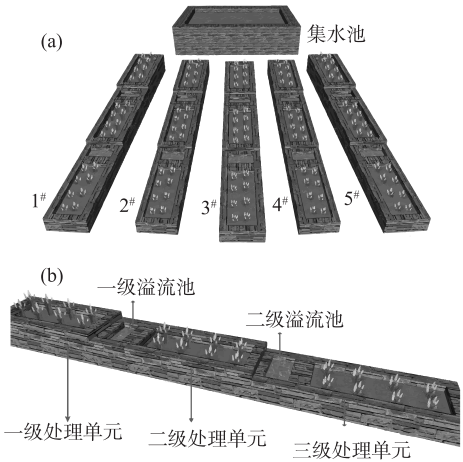


图 1 湿地系统全景图(a)和实验田结构图(b)  
Fig.1 Panorama of constructed wetland system (a) and structure chart of experimental field (b)

为排放标准。

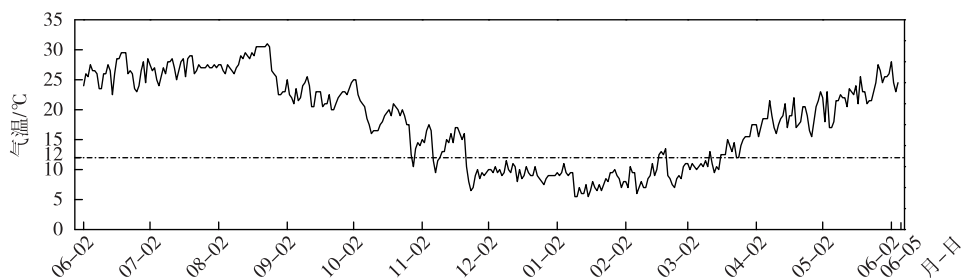


图2 实验期间气温情况

Fig.2 Air temperature during the experiment

## 1.6 检测指标与分析方法

COD 测定使用重铬酸钾法 (HJ/T 399—2007), 氨氮浓度测定使用纳氏试剂分光光度法 (HJ 535—2009), TP 浓度测定使用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法 (GB 11893—1989), TN 浓度测定使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (HJ 636—2012), 指标参照《水和废水监测分析方法》<sup>[18]</sup> 进行监测. 每周对该实验周期内湿地系统的进水和各个实验田的出水进行检测. 运用 SPSS 19.0 软件的方差分析功能, 对结果进行显著性分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同植物对处理效果的影响

湿地植物可为根系的微生物提供生存环境, 同时植物根系的分泌物, 可提高微生物的活性并加强微生物的生长速率<sup>[19]</sup>, 进而促进对污染物的去除<sup>[20]</sup>. 此外, 植物本身对水体中的氮、磷等营养元素也有一定的吸收作用<sup>[21]</sup>.

本课题人工湿地系统中的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 实验田, 所种植的植物不同, 分别为菖蒲、风车草、丝带草、美人蕉和芦苇, 其余条件均相同, 用于比较在人工湿地中种植不同植物对去污效果的影响.

整个实验期间, 进水 COD 浓度在 8.71~49.88 mg/L 之间上下波动, 各实验田出水 COD 浓度与进水浓度在总体变化趋势上相接近, 进、出水 COD 浓度差异并不明显, 去除效果一般 (图 3).

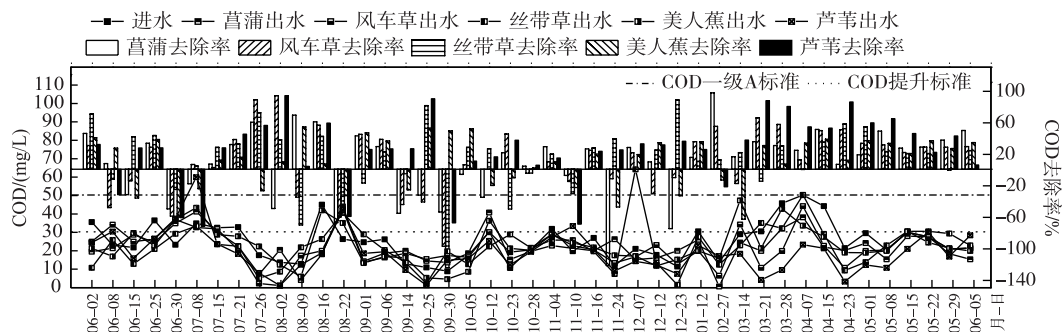


图3 人工湿地中不同湿地植物对 COD 去除的影响

Fig.3 Effects of different wetland plants on the removal of COD in constructed wetlands

在人工湿地系统中, COD 的去除是由沉降与过滤、微生物降解和植物吸收等作用所共同完成的, 而本课题中, 人工湿地对尾水中 COD 的去除效果并不理想, 这与刘昌伟等<sup>[22]</sup> 的研究结果相类似, 主要是由于尾水中 COD 浓度已经很低, 且其中难生物降解的有机物占绝大部分. 大部分湿地实验田出水 COD 浓度都能达到

30.00 mg/L 以下,并且随着湿地运行时间推移,各实验田 COD 去除率逐渐稳定. 其中,种植芦苇的人工湿地去污效果相对最好,平均去除率为 24.01%,各实验田的去除效果差异不明显( $P>0.05$ ).

对氨氮的去除,如图 4,进水氨氮浓度出现了 4 次峰值,分别是 2016 年 6 月(最高达 4.98 mg/L)、2016 年 8 月(最高达 1.98 mg/L)、2016 年 9 月(最高达 4.46 mg/L)和 2017 年 3 月(最高达 4.06 mg/L). 但无论进水浓度、季节和植物的不同,所有实验田的出水氨氮浓度很稳定,且全部能达到 1.50 mg/L 以下,可达到提升标准,去除效果较好.

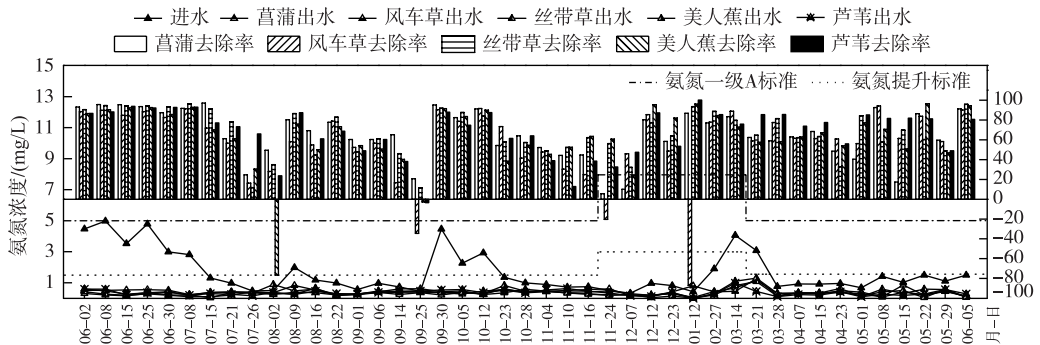


图 4 人工湿地中不同湿地植物对氨氮去除的影响

Fig.4 Effects of different wetland plants on the removal of ammonia nitrogen in constructed wetlands

人工湿地系统中的氨氮主要靠微生物硝化、基质吸附和植物吸收等作用进行去除,在本课题中,由于采用了潮汐流的运行方式,使得人工湿地的复氧能力大大增强,补充进湿地中的氧促进了微生物对氨氮的转化,氨氮的去除率也随之升高,这与 Sun 等<sup>[23]</sup>的研究结果相一致. 在不同的湿地实验田中,种植芦苇的人工湿地去除效果最好,平均去除率为 68.15%,各实验田的去除效果差异不明显( $P>0.05$ ).

在 TP 的去除上,如图 5,在 2016 年 7 月 15 日至 8 月 16 日,进水 TP 浓度维持了一段时间的增高,5 次测量进水 TP 浓度平均值为 0.41 mg/L,各实验田出水 TP 浓度也随之升高,种植菖蒲、丝带草、美人蕉和芦苇的人工湿地在这段时间内均出现超过提升标准(0.3 mg/L)的情况,在其余实验期内,各实验田出水都能稳定保持在 0.30 mg/L 以下,去除效果较好.

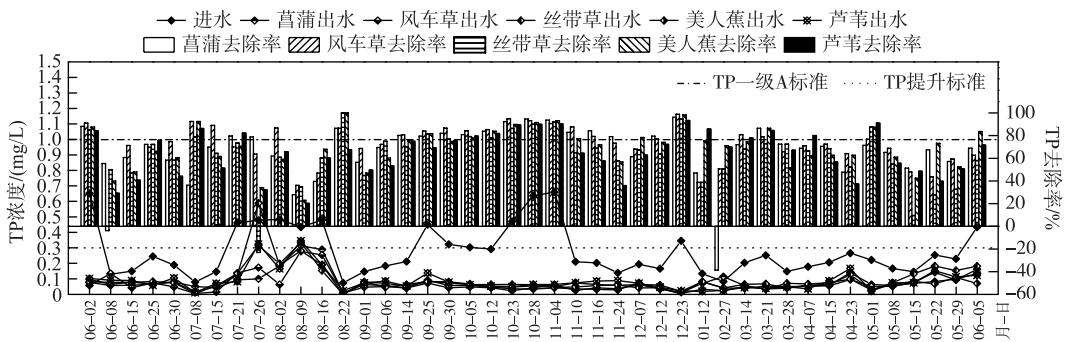


图 5 人工湿地中不同湿地植物对 TP 去除的影响

Fig.5 Effects of different wetland plants on the removal of TP in constructed wetlands

人工湿地可以通过基质吸附、植物吸收和微生物代谢作用去除磷. 本研究中湿地系统对磷的处理效果较好,这可能是由于所铺设的湿地基质中,含有石灰岩成分,而石灰中所含有的钙易与磷生成不溶性的磷酸钙,因此增强了对磷的去除能力<sup>[24]</sup>. 在所有实验田中,除磷效果最好的是种植风车草的人工湿地,平均去除率为 71.68%,5 种植物彼此差异不明显( $P>0.05$ ).



对 TN 的去除,如图 6,除了种植风车草的人工湿地在 2016 年 12 月 12 日和 23 日,以及种植丝带草的人工湿地实验田在 2017 年 1 月 12 日出水 TN 浓度超过了提升标准(10 mg/L),其余各实验田出水 TN 浓度均能达到提升标准. 其中,种植芦苇的人工湿地实验田出水 TN 浓度在整个实验期间始终保持稳定,其余实验田出水 TN 浓度均有明显随季节而变化的趋势,在 2016 年 7—11 月的去除效果好于其他月份,即夏、秋季去除率好于春、冬季,这与周旭丹等<sup>[25]</sup>的研究结果相一致,是因为湿地中植物和微生物在夏、秋季节的代谢强度要强于春、冬季,由植物和微生物吸收利用的氮素也更多.

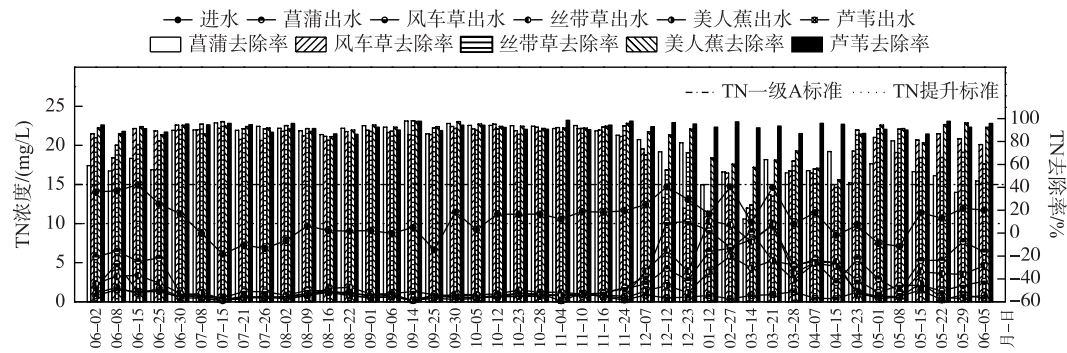


图 6 人工湿地中不同湿地植物对 TN 去除的影响  
Fig.6 Effects of different wetland plants on the removal of TN in constructed wetlands

人工湿地中 TN 的去除,不仅与植物的吸收和基质的吸附有关,也与湿地系统中的含氧条件密不可分,本课题采用了水平潜流作为湿地系统的流态,加以潮汐流的运行方式,易实现湿地系统中的好氧/缺氧相互交替的环境,促进了微生物的反硝化能力,使得 TN 的去除率较高<sup>[26-27]</sup>. 各植物间的差异较也较为明显,种植芦苇的人工湿地去除效果最佳,平均去除率为 92.70%,其次为种植美人蕉的人工湿地,平均去除率为 86.45%,两者显著高于种植菖蒲、风车草和丝带草的人工湿地( $P<0.05$ )(表 2).

表 2 种植不同植物的人工湿地各季节对各污染物的平均去除率(%)

Tab.2 Average removal rates of pollutants in constructed wetlands planted with different plants in each season

季节	水质指标	菖蒲	风车草	丝带草	美人蕉	芦苇
春季	COD	30.74	32.01	22.12	20.09	52.51
	氨氮	64.29	71.04	66.74	67.37	76.06
	TP	66.65	66.06	56.01	66.72	63.44
	TN	52.13	63.25	62.60	77.63	92.04
夏季	COD	7.22	9.45	15.83	1.62	10.98
	氨氮	78.11	68.39	76.38	63.37	77.13
	TP	62.73	67.30	58.68	62.41	56.94
	TN	80.97	86.18	86.94	90.17	91.73
秋季	COD	-12.54	-3.80	0.60	10.51	12.19
	氨氮	56.91	42.24	58.82	55.54	49.36
	TP	81.51	83.16	74.32	75.52	70.15
	TN	92.57	90.01	90.94	94.01	93.39
冬季	COD	14.73	13.76	33.39	8.04	20.27
	氨氮	62.45	34.15	71.09	76.33	74.66
	TP	49.11	66.68	63.06	79.43	76.85
	TN	65.55	39.69	47.00	78.31	94.97

由以上结果,可将不同植物对不同污染物的去污能力由高到低依次排列,在 COD 的去除上:芦苇>丝带

草>风车草>美人蕉>菖蒲;在氨氮的去除上:芦苇>丝带草>菖蒲>美人蕉>风车草;在 TP 的去除上:风车草>美人蕉>菖蒲>芦苇>丝带草;在 TN 的去除上:芦苇>美人蕉>丝带草>风车草>菖蒲.

可见,种植芦苇的人工湿地去污能力优异,对 COD、氨氮、TN 指标均表现出最佳的去除效果,平均去除率分别为 24.01%、68.15%、92.70%,具有较好的去除有机污染物和脱氮的作用,这与刘霄等<sup>[28-29]</sup>的研究结果相一致. TP 去除率最高的则是种植风车草的人工湿地,平均去除率为 71.68%,这表明风车草的除磷效果较好,与杨长明等<sup>[30]</sup>的研究结果相一致. 芦苇和风车草都是我国最常用的湿地植物,它们植株高大,根系密集,泌氧能力很强,有助于为根系微生物提供良好生存环境,微生物的活性、多样性等也相对较高<sup>[31]</sup>,因而去污效果较好.

## 2.2 不同季节湿地植物的选择

在人工湿地处理污水的实际工程中,植物的生长情况受温度、降水等自然因素影响较大,因此,以下将讨论在人工湿地系统中,不同植物在不同季节对各指标的去污表现,以期灵活地在不同季节选用种植不同植物的人工湿地来处理污水,并且在不同季节均能得到最高的去除率.

由表 2,在春季,种植芦苇的人工湿地对 COD、氨氮、TN 的平均去除率均为最高,分别为 52.51%、76.06%、92.04%,对 TP 平均去除率最高的是种植美人蕉的人工湿地,为 66.72%;夏季时,对 COD、氨氮、TP、TN 处理效果最高的分别是种植丝带草、菖蒲、风车草和芦苇的人工湿地,平均去除率分别为 15.83%、78.11%、67.30%和 91.73%;在秋季,对 COD、氨氮、TP、TN 处理效果最高的分别是种植芦苇、丝带草、风车草、美人蕉的人工湿地,平均去除率分别为 12.19%、58.82%、83.16%、94.01%;冬季时,对 COD 去除效果最佳的是种植丝带草的人工湿地,平均去除率为 33.39%,对氨氮、TP 处理效果最好的是种植美人蕉的人工湿地,平均去除率分别为 76.33%和 79.43%,对 TN 处理效果最好的是种植芦苇的人工湿地,平均去除率分别为 94.97%. 由此可见,在不同季节,对于去除不同的污染物效果最佳的植物是不同的,因此,可以在不同季节选择种植对相应的污染物有着最佳去除效果的植物人工湿地来处理污水. 此外,在实际的工程运用中,组合搭配使用各种湿地植物,往往能得到更佳的去污效果,因此,可以根据所处理的污水中各种污染物浓度的具体情况,以各季节、各指标最佳植物为主,并以其他植物作为搭配,是较为合理的种植方案.

## 2.3 湿地系统出水水质

本课题中人工湿地系统处理的是污水厂的尾水,其水质各指标浓度已经较低,可生化性不好,进一步提高出水水质难度较大,尤其是 COD 的去除,各人工湿地对 COD 的去除率均不理想,而对其余 3 个指标的去除效果相对较好. 各实验田在各季节、各指标上的出水浓度见表 3. 如表 3,人工湿地系统各实验田出水水质在各季节、各指标的平均值全部达到提升标准.

## 3 结论

1)人工湿地系统对污水厂尾水水质改善效果明显,5 块人工湿地实验田的平均出水水质在各季节、各指标(COD/氨氮/TN/TP)全部达到提升标准.

2)在一年中,种植芦苇的人工湿地对 COD、氨氮、TN 的平均去除率均最高,分别为 24.01%、68.15%、92.70%,种植风车草的人工湿地对 TP 的平均去除率最高,为 71.68%.

3)在春季,芦苇人工湿地对 COD、氨氮和 TN 的平均去除率均为最高,分别为 52.51%、76.06%和 92.04%,TP 平均去除率最高的是美人蕉人工湿地,为 66.72%. 夏季时,对 COD、氨氮、TP 和 TN 处理效果最高的分别是丝带草、菖蒲、风车草和芦苇人工湿地,平均去除率分别为 15.83%、78.11%、67.30%和 91.73%. 在秋季,对 COD、氨氮、TP 和 TN 处理效果最高的分别是芦苇、丝带草、风车草和美人蕉人工湿地,平均去除率分别为 12.19%、58.82%、83.16%和 94.01%. 冬季时,对 COD 去除效果最佳的是丝带草人工湿地,平均去除率为 33.39%,美人蕉人工湿地对氨氮、TP 的处理效果最好,平均去除率分别为 76.33%、79.43%,对 TN 处理效果最好的是芦苇人工湿地,平均去除率为 94.97%. 在实际的工程运用中,组合搭配使用各种湿地植物,往往能得到更佳的去污效果,因此,可以根据所处理的污水中各种污染物浓度的具体情况,以各季节、各指标最佳植物为主,并以其他植物作为搭配,是较为合理的种植方案.

表 3 人工湿地系统各实验田在各季节的平均出水水质 (mg/L)

Tab.3 Average effluent quality of each experimental field in the constructed wetland system in each season

季节	水质指标	1#实验田	2#实验田	3#实验田	4#实验田	5#实验田
春季	COD	23.56	23.36	27.19	26.99	16.42
	氨氮	0.45	0.39	0.47	0.47	0.34
	TP	0.08	0.08	0.10	0.07	0.08
	TN	5.08	3.91	4.11	2.38	0.81
夏季	COD	24.17	24.02	21.44	26.34	24.31
	氨氮	0.28	0.47	0.28	0.44	0.34
	TP	0.11	0.10	0.14	0.12	0.13
	TN	2.32	1.43	1.48	1.01	0.86
秋季	COD	20.24	18.72	18.95	17.89	17.27
	氨氮	0.37	0.48	0.38	0.41	0.46
	TP	0.05	0.04	0.07	0.06	0.08
	TN	0.76	1.01	0.93	0.62	0.67
冬季	COD	15.39	15.59	13.55	15.82	14.64
	氨氮	0.27	0.39	0.20	0.15	0.19
	TP	0.06	0.05	0.05	0.03	0.04
	TN	4.52	7.94	6.92	2.87	0.64

4 参考文献

[ 1 ] Liang K, Chang JJ, Wang F *et al.* Purification ability of tail water and optimal hydraulic loading rates in vertical flow constructed wetland. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 114-123. DOI:10.18307/2016.0113. [ 梁康, 常军军, 王飞华等. 垂直流人工湿地对尾水的净化效果及最佳水力负荷. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 114-123. ]

[ 2 ] Huang JL, Chen Q, Xu LH. Problems and countermeasures in application of constructed wetlands. *Environmental Science*, 2013, (1): 401-408.[ 黄锦楼, 陈琴, 许连煌. 人工湿地在应用中存在的问题及解决措施. 环境科学, 2013, (1): 401-408. ]

[ 3 ] Zhao Y, Li FM, Wang H *et al.* Metabolic characteristics of microbial communities in constructed aerobic/anoxic subsurface flow wetlands with different structures. *Journal of Environmental Science*, 2012, (2): 299-307.[ 赵艳, 李锋民, 王昊云等. 不同结构好氧/厌氧潜流人工湿地微生物群落代谢特性. 环境科学学报, 2012, (2): 299-307. ]

[ 4 ] Choi JY, Maniquiz MC, Geronimo FK *et al.* Development of a horizontal subsurface flow modular constructed wetland for urban runoff treatment. *Water Science & Technology*, 2012, **66**(9): 1950-1957.

[ 5 ] Saeed T, Afrin R, Mueyed AA *et al.* Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh. *Chemosphere*, 2012, **88**(9): 1065-1073.

[ 6 ] Weerakoon GMPR, Jinadasa KBSN, Herath GBB *et al.* Impact of the hydraulic loading rate on pollutants removal in tropical horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 2013, **61**(8): 154-160.

[ 7 ] Ruiz AM, Maerz JC, Davis AK *et al.* Patterns of development and abnormalities among tadpoles in a constructed wetland receiving treated wastewater. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(13): 4862-4868.

[ 8 ] Cooper P. What can we learn from old wetlands? Lessons that have been learned and some that may have been forgotten over the past 20 years. *Desalination*, 2009, **246**(1): 11-26.

[ 9 ] Ruiz AM, Maerz JC, Davis AK *et al.* Patterns of development and abnormalities among tadpoles in a constructed wetland receiving treated wastewater. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(13): 4862-4868.

[ 10 ] Guan C, Yu DW, Zheng X *et al.* Removing nitrogen and phosphorus of effluent from wastewater treatment plants by constructed wetlands in China: An Overview. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(12): 2309-2320.[ 管策, 郁达伟, 郑祥等. 我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用进展. 农业环境科学学报, 2012, **31**(12): 2309-2320. ]

[ 11 ] Liu J, Zhang CJ. Application of constructed wetland technology to wastewater advanced treatment. *Environmental Science*



- and Technology*, 2010, **23**(3): 30-33.[刘建, 张晨君. 人工湿地水质净化技术在污水深度处理中的应用. 环境科技, 2010, **23**(3): 30-33.]
- [12] Yu J, Tian NN, Qian JH *et al.* Application of constructed wetland to wastewater advanced treatment and project design. *China Water & Wastewater*, 2009, **25**(4): 53-55.[余杰, 田宁宁, 钱靖华等. 人工湿地在污水深度处理中的应用与工程设计. 中国给水排水, 2009, **25**(4): 53-55.]
- [13] Liao B, Lin W. Application of enhanced vertical flow constructed wetland to advanced treatment of effluent from wastewater treatment plant. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(16): 74-77.[廖波, 林武. 强化型垂直流人工湿地用于污水处理厂尾水深度处理. 中国给水排水, 2013, **29**(16): 74-77.]
- [14] Wu YH, Yang XN, Han R. Advanced treatment effect and influencing factor of nitrogen in hybrid constructed wetland. *Wetland Science*, 2014, **12**(1): 35-42.[吴英海, 杨旭楠, 韩蕊等. 复合人工湿地对氮的深度处理效果及影响因素. 湿地科学, 2014, **12**(1): 35-42.]
- [15] Fan YH, Cui LH, Lin YT *et al.* Advanced treatment of tail water from sewage plant by different aquatic plant types of surface flow constructed wetlands. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(6): 2875-2880.[范远红, 崔理华, 林运通等. 不同水生植物类型表面流人工湿地系统对污水厂尾水深度处理效果. 环境工程学报, 2016, **10**(6): 2875-2880.]
- [16] Wu D, Miao AJ, Li L *et al.* Research on different plants in surface flow constructed wetlands and their combination effects on purification of tail water from sewage treatment plant *Water Resources Protection*, 2015, **31**(6): 115-121.[吴丹, 缪爱军, 李丽等. 表面流人工湿地不同植物及其组合净化污水处理厂尾水研究. 水资源保护, 2015, **31**(6): 115-121.]
- [17] Jiang L, Liu RL, Chen P *et al.* Effect of intermittent aeration and plants on the treatment of tail water of municipal wastewater treatment plant by constructed wetlands. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(9): 4761-4767.[江林, 刘润龙, 陈培等. 阶段曝气和植物对人工湿地处理城镇污水厂尾水的影响. 环境工程学报, 2016, **10**(9): 4761-4767.]
- [18] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods eds. *Water and wastewater monitoring and analysis methods: 4th edition*. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.[国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [19] Baudoin E, Benizri E, Guckert A. Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(9): 1183-1192.
- [20] Xie L, Wang DG, Dai Y. Study on removal model of organic substances in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chinese Environmental Science*, 2009, (5): 502-505.[谢龙, 汪德燿, 戴昱. 水平潜流人工湿地有机物去除模型研究. 中国环境科学, 2009, (5): 502-505.]
- [21] Cheng SP, Wu ZB, Kuang QJ. Constructed wetland plant research. *J Lake Sci*, 2002, **14**(2): 179-184. DOI:10.18307/2002.0213. [成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究. 湖泊科学, 2002, **14**(2): 179-184.]
- [22] Liu CW, Xue C, Yang YZ *et al.* Novel tidal-flow constructed wetland for advanced treatment of domestic sewage. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(11): 10-13.[刘昌伟, 薛晨, 杨永哲等. 新型潮汐流人工湿地深度处理生活污水的研究. 中国给水排水, 2012, **28**(11): 10-13.]
- [23] Sun G, Zhao Y, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *Journal of Biotechnology*, 2005, **115**(2): 189-197.
- [24] Zhu T, Jenssen PD, Meahlum T *et al.* Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates (LWA) - potential filter media in treatment wetlands. *Water Science & Technology*, 1997, **35**(5): 103-108.
- [25] Zhou XD, Sun XG, Zhao CL *et al.* Research on enzymatic activities in the rhizosphere of constructed wetland plants and purification of wastewater in seasonal. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(6): 1043-1049.[周旭丹, 孙晓刚, 赵春莉等. 人工湿地植被根区土壤性质及其净化水质季节效应分析. 生态环境学报, 2015, **24**(6): 1043-1049.]
- [26] McBride GB, Tanner CC. Modelling biofilm nitrogen transformations in constructed wetland mesocosms with fluctuating water levels. *Ecological Engineering*, 1999, **14**(1/2): 93-106.
- [27] Liu MH, Wu SB, Ju XX *et al.* Progress and prospects of polluted water treatment of tidal flow constructed wetland. *Technology of Water Treatment*, 2014, (5): 10-15.[柳明慧, 吴树彪, 鞠鑫鑫等. 潮汐流人工湿地污水强化处理研究进展. 水处理技术, 2014, (5): 10-15.]

- [28] Liu X, Tang TFZ, Huang SL. Growth characteristics and purification efficiency of four wetland plants. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2013, **28**(3): 392-399.[刘霄, 唐婷芳子, 黄岁樑. 4种湿地植物的生长特性和污水净化效果研究. 云南农业大学学报, 2013, **28**(3): 392-399.]
- [29] Chu R, Chen NL, Wang XJ *et al.* The nitrogen removal effect of emergent plant in constructed wetland. *Environmental Pollution & Control*, 2017, **39**(8): 884-889.[褚润, 陈年来, 王小娟等. 人工湿地挺水植物脱氮效果研究. 环境污染与防治, 2017, **39**(8): 884-889.]
- [30] Yang CM, Gu GQ, Deng HH *et al.* Comparison of phosphorous removal efficiency from aquaculture water between *Cyperous alternifolius* and *Typha angustifolia* subsurface-flow constructed wetlands. *China Environmental Science*, 2008, **28**(5): 471-475.[杨长明, 顾国泉, 邓欢欢等. 风车草和香蒲人工湿地对养殖水体磷的去除作用. 中国环境科学, 2008, **28**(5): 471-475.]
- [31] Zhao QJ. Study on the soil microbial diversity in the running constructed wetland cultivated with four plants. *Journal of Shanghaijiaotong University: Agricultural Science*, 2011, **29**(3): 47-52.[赵庆节. 种植不同植物的人工湿地土壤微生物群落研究. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2011, **29**(3): 47-52.]