农 业 资 源 与 环 境 学 报
2014 年 4 月·第 31 卷·第 2 期:190–196

Journal of Agricultural Resources and Environment
April 2014·Vol.31·No.2:190–196

复式潜流湿地净化生活污水的试验研究

商　平[1],白　涛[1],杨　健[1],李　彦[1],杨殿林[2]

(1. 天津市海洋资源与化学重点实验室,天津科技大学海洋科学与工程学院,天津 300457; 2.农业部环境保护科研监测所,天津 300191)

摘　要:研究了新型复式潜流人工湿地对生活污水的净化效果。在不同水力负荷、季节、曝气方式等条件下经过小试试验,分析了该湿地对污染物净化效果的影响。结果表明,该系统出水水质稳定,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。在水力负荷 184 mm·d^{-1} 条件下 COD、NH_3–N 去除率最大分别可达 87.2%、68.9%。冬季低温条件下对各类污染物去除率仍大于 20%。正交试验分析得知,最佳运行条件是气温 28.6 ℃、水力负荷 0.184 m^3·m^{-2}·d^{-1}、水力停留时间 2.4 d。对比试验表明,采用预曝气方式对湿地净化效果明显优于厌氧处理。

关键词:复式潜流湿地;水力负荷;基质;曝气;净化效果

中图分类号:X703.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2095–6819(2014)02–0190–07　　**doi:** 10.13254/j.jare.2013.0129

Experiment Research on Purifying Domestic Sewage by Duplex Subsurface Flow Constructed Wetlands

SHANG Ping[1], BAI Tao[1], YANG Jian[1], LI Yan[1], YANG Dian–lin[2]

(1.Tianjin Municipal Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2.Agro–Environmental Protection Institute,Ministry of Agrculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: The purification effect on domestic sewage were researched in the new–type of duplex subsurface flow constructed wetlands, of which pollutants were analyzed through the small scale test on the purification effect under different conditions of hydraulic loading, season, aeration pattern. The results showed that water quality of the system was stabilized, which could reach the Ⅰ class A criteria specified in the Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant(GB 18918—2002). The removal rate of COD, NH_3–N could reach up to 87.2%, 68.9% under the conditions of the hydraulic load being 184 mm·d^{-1}.And there were still more than 20% removal efficiency of various pollutants on the conditions of low temperature in winter. Orthogonal test showed that the optimum operating conditions was 28.6 ℃ for the temperature, 0.184 m^3·m^{-2}·d^{-1} for hydraulic loading, and 2.4 d for hydraulic retention time. The experimental research showed that pre–aeration was significantly better than the anaerobic treatment on purifying effect.

Keywords: duplex subsurface flow constructed wetlands; hydraulic loading; filtering media; aeration; purification effect

人工湿地是模拟自然湿地系统,以基质–植物–微生物为载体,利用物理、化学、生物的三重协同作用,通过过滤、吸附、沉淀、植物吸收和微生物分解等作用来实现对污水高效净化的生态系统[1]。在不同湿地类型中,水平潜流人工湿地由于其处理效果受气温影响较小、系统处理能力强且水力负荷高等特点[2],已被广泛研究和应用于农村生活污水处理[3]。垂直流人工湿地与表面流湿地相比,其占地面积相对较少,但是,易影响出水水质。当前人工湿地普遍存在着寿命短、低温处理效果差、占地面积大等技术瓶颈。因此,亟需采用一种新池型且能稳定运行的湿地技术来重新考虑农村生活污水的处理问题。

国内已建成的大部分人工湿地,在投入运行后都不同程度地出现了堵塞问题[4]。近年来,许多学者研究提出,悬浮物沉淀和有机质累积[5]是造成湿地前端堵塞、寿命缩短的重要原因[6]。因此,有必要针对有效减缓湿地前端堵塞的措施进行研究。另外,多数研究是以水平或垂直等单一流态进行湿地池型构建,而对兼有水平–垂直流的湿地研究较为少见。本研究构建了深床体新池型复式潜流人工湿地[7],考察其对农村生活污水的净化效果,以实现人工湿地池型优化[8–10]和

收稿日期:2013–08–28
基金项目:天津科技支撑计划重点项目(13ZCZDSF00800)
作者简介:商　平(1953—),男,内蒙古通辽人,博士,教授,主要从事环境矿物材料与生态环境方面的教学与研究。
E–mail:shangp@tust.edu.cn

技术升级。

本试验重点研究复式潜流湿地在不同水力负荷、曝气、季节等条件下对各类污染物的净化效果,并探讨了好氧预处理对湿地系统处理效果的影响,旨在为人工湿地技术在生活污水处理中的的推广应用提供参考。

1　材料与方法

1.1 小试装置

复式潜流湿地小试装置采用砖砌构筑,设置土工膜防渗层,单元池尺寸(L×B×H)为 4.6 m×1.7 m×1.4 m,湿地有效深度 1.3 m。湿地主体采用大粒径 Φ50~80 mm 石灰岩装填,土工膜保护层及上层覆盖层采用小粒径 Φ10~30 mm 石灰岩。湿地所种植物主要有芦苇(*Phragmites communis* Trin)、黄花鸢尾(*Iris pseudacorus* L.)、美人蕉(*Canna glauca* L.)、灯心草(*Hymenachne pseudointerrupta* C. Muell.)。种植密度为 4~6 株·m^{-2}, 采用交错种植。试验装置结构如图 1 和图 2 所示。

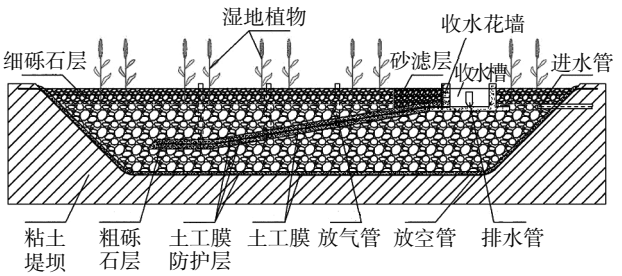


图 1 复式潜流湿地结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of compound constructed wetlands

图 2 复式潜流湿地试验装置

Figure 2 The experiment apparatus of compound constructed wetlands

1.2 试验水质及运行

试验进水取自天津市梅厂镇周庄村农户生活污水,其水质指标如表 1 所示。

表 1 试验进水水质(mg·L^{-1})

Table 1 Wastewater quality of inflow(mg·L^{-1})

项目	SS	COD	NH_3-N	TN	TP	pH 值
数值	220~280	110~420	20~55	25~70	4~12	6~8

注:SS 为悬浮颗粒物,COD 为化学需氧量,NH_3-N 为氨氮,TN 为总氮,TP 为总磷。

试验采用连续式进水方式。先用泵抽入供液水箱贮存,之后用流量计控制流量为试验系统所用。在水力负荷为 0.213 $m^3·m^{-2}·d^{-1}$ 条件下试运行 60 d, 待植物生长良好,出水稳定后,每隔 1 d 采集水样 1 次,监测水质,进行去除效果的分析比较。

1.3 试验方法及分析指标

各项水质指标测试方法均采用《水和废水监测分析方法(第四版)》标准方法。具体见表 2。

表 2 水质分析项目及方法

Table 2 Items and methods of water quality analysis

监测项目	分析方法	标准
COD	重络酸钾法	GB 11914—1989
NH_3-N	纳氏试剂分光光度法	GB 7479—1987
TN	碱性过硫酸钾分光光度法	GB 11894—1989
TP	钼酸铵分光光度法	GB 11893—1989

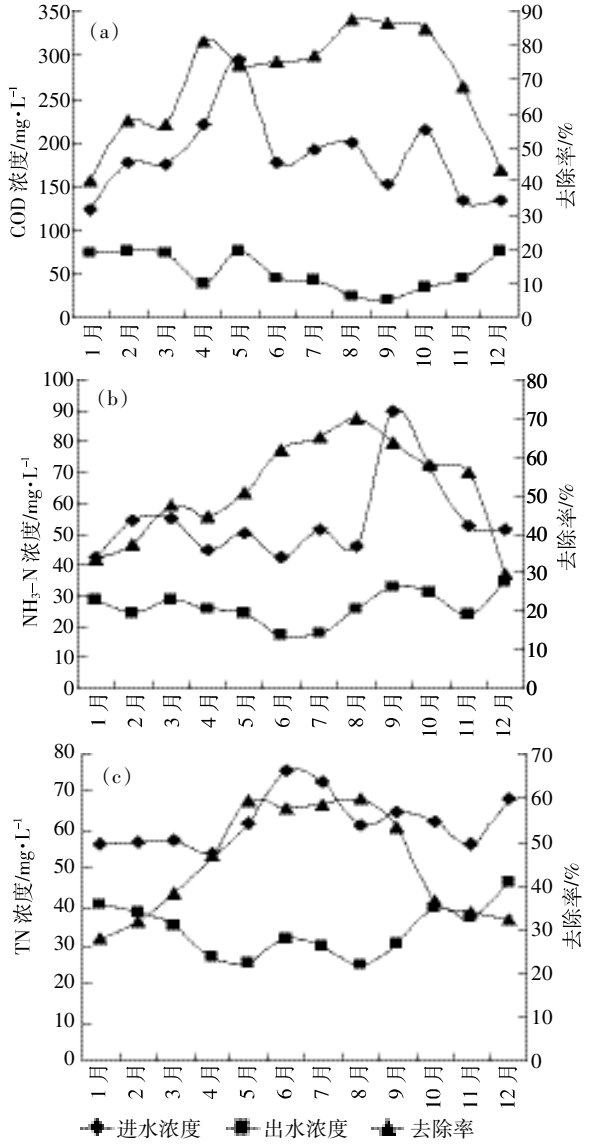
2　结果与分析

2.1 季节和温度变化对净化效果的影响

本试验用的复式潜流人工湿地经 60 d 的试运行后达到稳定,在此期间植物生长状况良好。稳定后于 2011 年 12 月初开始对系统采集水样,采样频率为一周 4 次,每月 16 次,连续运行至 2013 年 3 月结束采样,进行监测分析。

本试验是在相同床体结构, 相同进水条件下,考察了季节变化对湿地去除 COD、NH_3-N、TN 的影响,如图 3 所示。

由图 3 可知, 复式潜流人工湿地系统对 COD、NH_3-N、TN 的降解效率呈现出一定的季节性变化规律。季节变化对 COD、NH_3-N 去除率有较大影响,去除率曲线总体上在冬季降至最低点,在春夏季节则有较大幅度上升。1 月份气温最低为 6.9 ℃,7 月份高达 28.6 ℃,对应的 COD 去除率为 40.4%和 87.2%。因为进入春夏季,温度上升,植物光合作用日益加强,产氧



图中数据为湿地运行期间采样周期的月平均值，
最高月平均气温为 28.6 ℃，最低平均气温为 6.9 ℃

图 3 季节和温度对污染物去除的影响

Figure 3 Effect of temperature and season on pollutants removal

量变大；同时微生物活性增强，对营养物质需求变大，在植物和微生物共同作用下，污染物去除率呈上升趋势，夏季 COD 去除率最大为 87.2%。秋季温度开始下降，植物逐渐衰落，输氧能力降低，造成湿地氧浓度明显下降，微生物活性也随温度降低而下降，系统对污染物降解速率呈减小趋势。进入冬季后，低温下植物和微生物活性都处于抑制状态，污染物去除率最低。试验发现，NH_3–N、TN 和 COD 去除率随气温的变化趋势基本一致。

2.2 水力负荷对系统净化能力的影响

复式潜流人工湿地系统经数月的连续进出水，运行至夏季已处于稳定期，试验选在气温为 22~30 ℃的 7、8 月份，试验中对进水浓度（COD 保持在 120 mg·L^{-1} 左右）采取调配的方式使之相对较稳定，有机负荷保持在 40~55 g COD·m^{-3} 范围内，其他条件不变，使湿地连续稳定运行，对 COD、NH_3–N、TN 采取同步采样，同时监测分析得到水力负荷[11]与 COD、NH_3–N、TN 去除效果的关系如图 4 所示。

由图 4(a)可知，系统对 COD 的去除效果极为显著，各种水力负荷下的 COD 去除率均在 70%以上。在水力负荷 123~184 mm·d^{-1} 时，去除率随水力负荷的升高而呈上升趋势，系统净化能力也随之提高，这与系统稳定运行后内部净化环境已趋成熟、湿地植物处于生长季节等因素有关。当水力负荷为 246 mm·d^{-1} 时，COD 去除率随水力负荷的升高而逐渐降低，其原

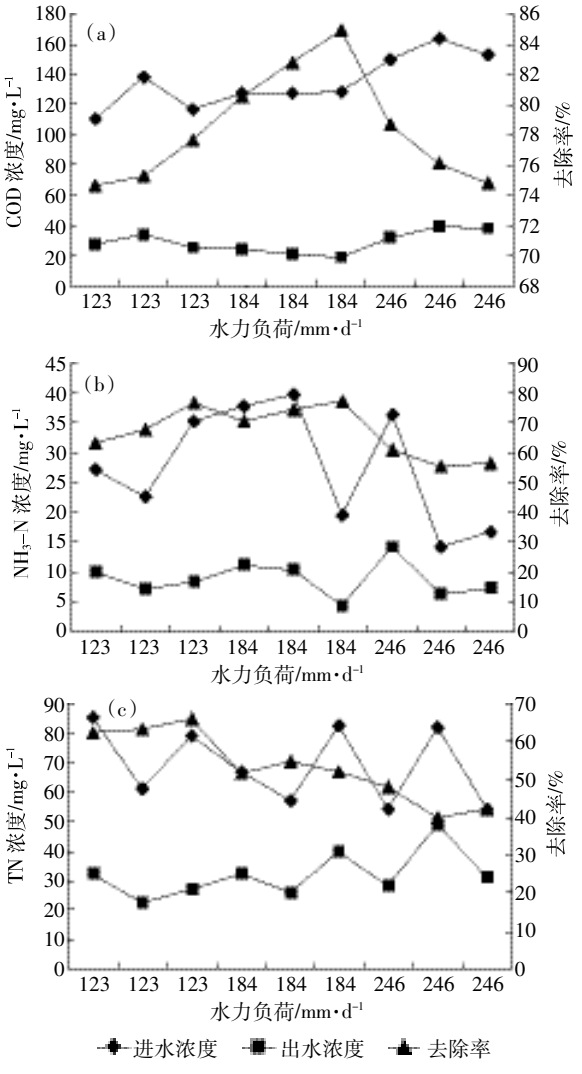


图 4 水力负荷对湿地净化能力的影响

Figure 4 Effect of the hydraulic loading on purification capacity of wetland

因主要是湿地系统中大部分有机物首先被植物根系、填料表面生物膜吸附,继而被微生物逐步降解;随水力负荷升高,部分吸附在生物膜表面的有机物未被降解即随出水带出,故使 COD 去除率下降。

由图 4(b)可知,系统对氨氮的去除效果也比较显著,其中最高为 77.3%,最低为 55.3%,平均去除率达 65%以上。NH_3–N 开始时去除率随水力负荷的增高而升高,达到最大值后又逐渐下降。由于水力负荷较小时,污水在湿地系统内停留时间较长,硝化菌因得不到充足的营养物质而处于弱势,从而抑制了硝化作用,导致去除率不高。而水力负荷过大时,水力停留时间过短,无法达到硝化菌的世代时间,部分硝化菌易随水流带出系统[12],从而抑制了硝化作用,使氨氮去除率下降。

由图 4(c)可知,湿地系统对 TN 去除率随水力负荷的增加而逐渐下降。水力负荷的增加,水力停留时间缩短,减少了污水在系统内的反应时间,而造成 TN 去除效果下降。表明人工湿地对 TN 的去除需要较长停留时间,尤其是在低碳源情况下,TN 去除率可能和反硝化速率[13]有关。

2.3 曝气方式对系统净化效果的影响

复式潜流人工湿地作为一种生态污水处理技术,去除效率很大程度上受湿地中 DO 水平的影响[14]。曝气在一定程度上提高了复式潜流湿地的溶氧水平。本试验以预曝气、厌氧水解酸化、空白对比分析其对整个湿地系统净化效果的影响。图 5 为湿地系统进水流量为 80 $L\cdot h^{-1}$ 时,不同曝气方式对系统净化效果影响的对比关系曲线。

由图 5(b)可知,在相同的水力负荷(80 $L\cdot h^{-1}$)条件下,采用好氧曝气处理时湿地对 COD、NH_3–N、TN、TP 的平均去除率均高于厌氧水解酸化预处理,特别是好氧条件下,对 NH_3–N、TN 平均去除率大幅度高于厌氧条件,曝气预处理的 NH_3–N 去除率为 77.5%,TN 去除率为 62.1%。同时指出,曝气预处理的 COD 平均去除率为 91.2%,TP 去除率为 72.8%,比厌氧预处理分别高出 10%和 30%。从本试验得出的结论看,采用预曝气处理明显优于厌氧水解酸化处理。

2.4 正交试验分析

复式潜流湿地兼有水平和垂直流 2 种流态,影响其处理效果的因素十分复杂,包括物理、生化、水力学等因素以及各因素的综合作用。本试验讨论和研究温度、水力负荷、水力停留时间三者的关系和对湿地净化效果的影响,最后通过优化参数提高对湿地的处理能力。

试验进水水质指标如下:pH 值 7.0~7.4;COD 128~164 $mg\cdot L^{-1}$;SS 220~260 $mg\cdot L^{-1}$。试验采取连续进水,其他环境条件不变,结果分析如表 3 和图 6 所示。

从图 6 可看出,三因素中对出水 COD 影响最大的是水力负荷,影响最小的是水力停留时间。根据表 3 中各因素的极差 R,影响复式潜流湿地净化过程中出水 COD 的三因素的主次顺序是:水力负荷→温度→水力停留时间。从表 3 可见,4 个试验中出水 COD 最低的操作条件是 $A_2B_2C_1$。即最佳运行条件是温度 28.6 ℃、水力负荷 0.184 $m^3\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$、水力停留时间 2.4 d。

3　讨论

复合人工湿地可以实现人工湿地优势互补,从而增强了污水的处理效果,但许多研究仍基于不同湿地单元间的串联或并联等组合方式,然而在同一床体结

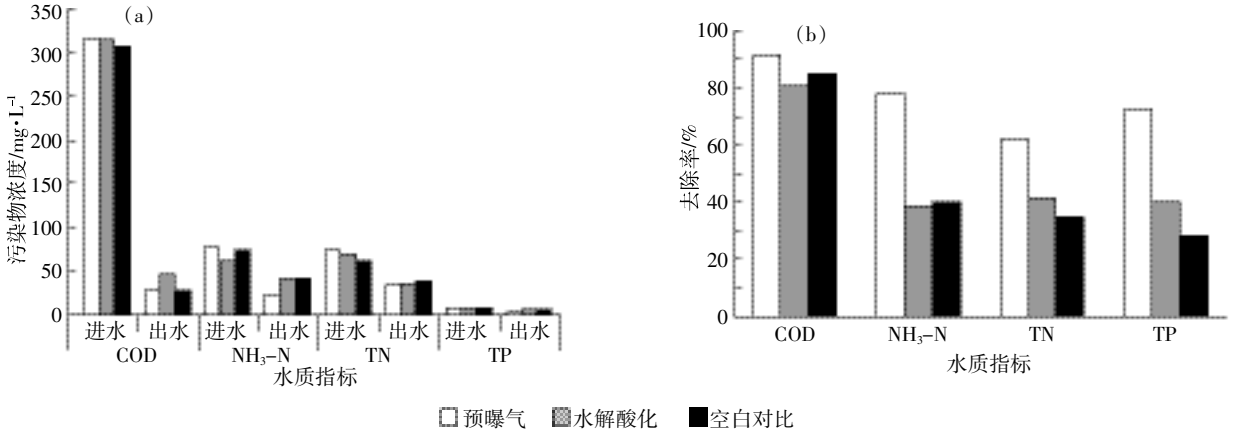


图 5 曝气对湿地净化效果的影响

Figure 5 Effect of aeration on purification effect of wetland

表 3 复式潜流湿地净化效果试验结果分析

Table 3 Test results analysis of duplex subsurface flow wetland on purifying effect

试验号	水平组合	因素(列号)			
		A 温度/℃	B 水力负荷/$m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$	C 水力停留时间/d	试验指标 出水 COD/$mg \cdot L^{-1}$
1	$A_1B_1C_1$	14.8(1)	0.246(1)	2.4(1)	39.4
2	$A_1B_2C_2$	14.8(1)	0.184(2)	3.2(2)	34.2
3	$A_2B_1C_2$	28.6(2)	0.246(1)	3.2(2)	36.5
4	$A_2B_2C_1$	28.6(2)	0.184(2)	2.4(1)	22.8
K1		73.6	75.9	62.2	
K2		59.3	57	70.7	
$\overline{K1}$		36.8	37.95	31.1	
$\overline{K2}$		29.7	28.5	35.4	
$R=\lvert\overline{K1}-\overline{K2}\rvert$		7.1	9.5	4.3	

注:K1,K2,每个因素各个水平下的指标总和,R 为极差=平均得率最大值-平均得率最小值。

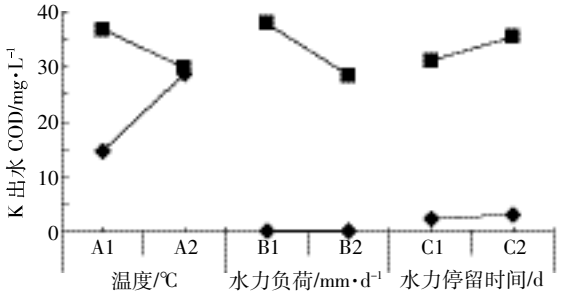


图 6 K 与 A、B、C 三因素的关系图

Figure 6 Diagram of the three factors A, B, C and K

构内实现水平流和垂直流态的复合还很少见,尤其是利用深床体复式潜流人工湿地系统处理生活污水在国内还未见报道。

表 4 列举了复式潜流湿地和国内外不同类型人工湿地对各类污染物净化效果的相关数据。由表 4 可知,不同湿地构型和运行方式使得湿地对污染物的去除效果存在一定差异。鄢璐等[15]研究的试验数据说明潜流型人工湿地对污水的处理效果较好,正常运行时 COD 去除率达>70%,7、8 月份效果最佳约为 90%。任

表 4 国内外不同类型人工湿地去除效果

Table 4 The pollutant removal efficiency of constructed wetlands in different countries and regions

湿地类型	SS 去除率/%	COD_{Cr} 去除率/%	氨氮去除率/%
潜流湿地[15]	84.0	70.0~90.0	—
表面流湿地[16]	65.3	—	50.0
人工湿地[17]	84.3	88.0	41.6
厌氧-潜流人工湿地[18]	83.5	71.7	73.8
复合人工湿地[19]	—	64.7	54.3
复式潜流人工湿地(本试验)	90.5	91.2	77.5

珊珊等[16]研究了厌氧-人工潜流型湿地工艺处理农村生活污水,结果表明,该工艺对污染物具有较好的去除效果,对 COD、NH_3-N 污染物去除率最高分别可达 71.7%和 73.8%。刘志平等[17]利用复合垂直流-水平潜流人工湿地系统,对农村生活污水的净化效果进行研究,其 COD_{Cr}、TN、NH_3-N 的平均去除率分别为 64.7%、40.2%、54.3%,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ 类水质标准。也有人统计了国外 104 座潜流湿地进水:140 $mg \cdot L^{-1}$ 出水:24 $mg \cdot L^{-1}$,SS 去除率为 82.9%;对氨氮去除率平均 30%~40%[18]; Jan Vymaza[19]总结了捷克约 100 座人工湿地近 10 年的运行情况指出,湿地 BOD_5 平均去除率为 88.0%,总氮为 41.6%。对国内 70 座表面流湿地统计结果为进水 49 $mg \cdot L^{-1}$,出水 17 $mg \cdot L^{-1}$,SS 去除率 65.3%;氨氮平均去除率>50%[18]。

复式潜流人工湿地与国内、外相关研究比较对污染物具有良好的去除净化效果,处理效果较稳定。在系统稳定运行期间,COD 去除率最高可达 91.2%,比刘志平等人[17]研究的复合人工湿地高出 26.5%,其出水水质基本可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。TN、NH_3-N 平均去除率可达到 62.1%和 77.5%,比常规人工湿地平均高出 20%左右。因为该复式潜流人工湿地下层有一定深度的厌氧空间,为反硝化菌提供了充足的碳源,适于湿地前置反硝化,因而进一步提高了湿地对 TN 的去除效果。

复式潜流人工湿地兼有水平流和垂直流两种流态的一种新池型,在床体深度上有其优势,比较发现,常规潜流人工湿地深度一般在 0.6~0.8 m 之间,而复

式潜流人工湿地深度可达到 1.2~1.6 m。在一般潜流湿地的基础上增加深度,既节省了占地面积,又节约了工程费用,降低了投资和运行费。在维护上定期清理即可。

然而,该小试试验中湿地净化污水与实际应用中相比有一定差距,也存在很多问题需要进一步研究加以解决,尤其是湿地系统运行期间因悬浮物沉淀和有机质累积而出现的去污效果变差、湿地寿命缩短等。为此,深入开展利用渗透系数、干化物质量等堵塞机理方面的量化研究工作,并建立数学模型了解其运行机理,仍是今后研究的重要内容。

4　结论

(1)复式潜流人工湿地对 COD、NH_3-N、TN 的降解效率呈现一定的季节性变化规律,季节变化尤其对 COD、NH_3-N 去除率有较大影响,去除率曲线总体上在冬季降至最低,在春夏季节则有较大幅度上升。夏季对 COD、NH_3-N 去除率最大可达 87.2%和 68.9%。深床体池型冬季低温条件下对各类污染物仍有 20%以上的去除率。

(2)试验发现水力负荷对复式潜流人工湿地系统净化能力有明显影响。不同水力负荷条件下,对各类污染物去除效果影响不同,当水力负荷为 184 mm·d^{-1} 时,COD 去除率最大为 84.9%。

(3)复式潜流人工湿地在水力负荷为 184 mm·d^{-1} 条件下,COD、NH_3-N 去除率最大分别可达 87.2%、68.9%。最佳运行条件是气温 28.6 ℃、水力负荷 0.184 m^3·m^{-2}·d^{-1}、水力停留时间 2.4 d,出水水质达(GB 18918—2002)一级 A 标准。

参考文献:

[1] 吴树彪,董仁杰. 人工湿地污水处理应用与研究进展[J]. 水处理技术,2008(8):11-15.
WU Shu-biao, DONG Ren-jie. Application and research on sewage treatment of constructed wetland[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008(8):11-15.(in Chinese)

[2] 吴振斌,徐光来,周培疆,等. 复合垂直流人工湿地污水氮的去除效果研究[J]. 农业环境科学学报,2004(4):134-137.
WU Zhen-bin, XU Guang-lai, ZHOU Pei-jiang, et al. Removal effects of nitrogen in integrated vertical flow constructed wetland sewage treating system[J]. *Journal of Agro Environment Science*, 2004(4):134-137.(in Chinese)

[3] 王世和.人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2007:1-10.
WANG Shi-he. Constructed wetland treatment theory and technology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1-10.(in Chinese)

[4] USEPA.Subsurface flower constructed wetlands for wastewater treatment [M]. Washington DC: USEPA, 1993.

[5] 杜中典,崔理华,肖　乡,等. 污水人工湿地系统中有机物积累规律与堵塞机制的研究进展[J]. 农业环境保护,2002(5):91-93.
DU Zhong-dian, CUI Li-hua, XIAO Xiang, et al. Advance in regularity of organic matter accumulation and clogging mechanisms of constructed wetlands[J]. *Agro-Environment Protection*, 2002(5):91-93.(in Chinese)

[6] 詹德昊,吴振斌,徐光来. 复合垂直流构建湿地中有机质积累与基质堵塞[J]. 中国环境科学,2003(5):10-14.
ZHAN De-hao, WU Zhen-bin, XU Guang-lai. Organic matter accumulation and substrate clogging in integrated vertical flow constructed wetland[J]. *China Environmental Science*, 2003(5):10-14.(in Chinese)

[7] 居文钟, 李士荣, 商　平, 等. 复式潜流人工湿地系统:中国. ZL201010598743. 5[P]. 2010-12-21 [2011-03-30].
JU Wen-zhong, LI Shi-rong, SHANG Ping, et al. Duplex subsurface flow constructed wetlands: China. ZL201010598743. 5[P]. 2010-12-21[2011-03-30].(in Chinese)

[8] 肖恩荣,梁　威,吴振斌. 污水处理中的人工湿地强化技术研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2006(7):118-123.
XIAO En-rong, LIANG Wei, WU Zhen-bin. Studies of augmentation technologies of constructed wetland for wastewater treatment[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006(7):118-123.(in Chinese)

[9] 夏宏生,蔡　明,向　欣. 人工湿地优化设计研究[J]. 人民黄河, 2008(7):56-58.
XIA Hong-sheng, CAI Ming, XIANG Xin. Optimization design of constructed wetlands[J]. *Yellow River*, 2008(7):56-58.(in Chinese)

[10] 邓欢欢,葛利云,顾国泉,等.水平潜流和组合人工湿地水处理研究进展[J]. 工业用水与废水,2007(2):6-9.
DENG Huan-huan, GE Li-yun, GU Guo-quan, et al. Research progress on horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetland systems for water treatment[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2007(2):6-9.(in Chinese)

[11] 韩耀宗. 不同水力条件下水平潜流人工湿地脱氮效果研究[D].上海:东华大学,2010.
HAN Yao-zong. The effect study on nitrogen removal horizontal subsurface flow constructed wetland under different hydraulic conditions [D].Shanghai: Donghua University, 2010.(in Chinese)

[12] 张荣社,李广贺,周　琪,等.潜流人工湿地负荷变化对脱氮效果的影响研究[J].环境科学,2006(2):63-66.
ZHANG Rong-she, LI Guang-he, ZHOU Qi, et al. Relationships between loading rates and nitrogen removal effectiveness in subsurface constructed wetlands[J]. *Environmental Science*, 2006(2):63-66.(in Chinese)

[13] 张甲耀,夏盛林,邱克明,等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究[J]. 环境科学学报,1999(3):101-105.
ZHANG Jia-yao, XIA Sheng-lin, QIU Ke-ming, et al. Nitrogen removal by a subsurface flow constructed wetlands wastewater treatment system and nitrogen-transformation bacteria[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999(3):101-105.(in Chinese)

[14] 彭青林,敖　洁,曾　经. 水生植物塘中的溶解氧变化及对污水处理研究[J]. 长沙电力学院学报:自然科学版, 2004(1):80-82.
PENG Qing-lin, AO Jie, ZENG Jing. Study on dissolved oxygen and treatment on wastewater in aquatic-plant pond[J]. *Journal of Changsha University of Electric Power: Natual Science*, 2004(1):80-82.(in Chinese)

[15] 鄢　璐,王世和,黄　娟,等. 潜流型人工湿地对污染物去除效果的研究[J]. 电力环境保护,2005,21(4):53-55.
YAN Lu, WANG Shi-he, HUANG Juan, et al. Study on the purification efficiency of subsurface constructed wetlands[J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2005,21(4):53-55.(in Chinese)

[16] 任珊珊,薛帅征,崔朝峰,等. 厌氧-人工潜流型湿地技术处理农村生活污水[J]. 给水排水,2013(S1):161-164.
REN Shan-shan, XUE Shuai-zheng, CUI Chao-feng, et al. Anaerobic-subsurface constructed wetland process for treatment of rural domestic sewage[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013(S1):161-164.(in Chinese)

[17] 刘志平,李国婉,范家豪,等. 复合人工湿地对新农村生活污水的净化效果[J]. 安徽农业科学,2013(13):244-246.
LIU Zhi-ping, LI Guo-wan, FAN Jia-hao, et al. Purifying effect of the domestic sewage in new countryside by integrated constructed wetland [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013(13):244-246.(in Chinese)

[18] 白晓慧,王宝贞,余　敏,等. 人工湿地污水处理技术及其发展应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1999(6):89-93.
BAI Xiao-hui, WANG Bao-zhen, YU Min, et al. Development of constructed wetland wastewater treatment technology and its application in china[J]. *Journal of Harbin University of C. E. & Architecture*, 1999(6):89-93.(in Chinese)

[19] Jan Vymaza. The use of subsurface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. *Ecological Engineering*, 2002,18:633-646.

[20] 涂盛辉,万金保,曾　艳,等. 负荷及温度对人工湿地去除有机物的影响[J]. 南昌大学学报:工科版,2009(4):313-316.
TU Sheng-hui, WAN Jin-bao, ZENG Yan, et al. Influence of load and temperature on contamination removal in constructed wetland[J]. *Journal of Nanchang University: Engineering & Technology*, 2009(4):313-316.(in Chinese)