

新型潮汐流人工湿地在分散型生活污水处理中的应用研究*

茆永峰¹ 惠振龙¹ 王竹梅² 杨永哲^{2#}

(1. 延安市环境保护监测站, 陕西 延安 716000; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要 为了克服人工湿地存在的供氧能力不足、总化学需氧量(TCOD)去除率不高及生物硝化不完全等问题, 采用新型的潮汐流人工湿地(TF-CWs)处理分散型生活污水。TF-CWs由四级人工湿地构成, 以潮汐流方式运行(运行周期为8 h), 以提高DO供给量; 并以从建筑固体废弃物中回收的砾石和粉煤灰为填料, 以强化除磷效果。结果表明, 出水水质基本满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准, 其中 NH_4^+-N 、TP的达标率均为100%, TCOD的达标率为98.31%; TF-CWs采用潮汐流方式运行, 提高了DO供给能力, 强化了对 NH_4^+-N 和TCOD的去除效果, 其平均去除率分别达到96.78%、86.98%; 以建筑固体废弃物粉煤灰砖制成的粉煤灰颗粒为填料的人工湿地对磷的吸附性能良好。TF-CWs可作为分散型生活污水的有效处理工艺之一, 而且为建筑固体废弃物的资源化利用提供了新途径。

关键词 人工湿地 分散型生活污水 潮汐流 建筑固体废弃物 强化脱氮除磷

Development of a novel tidal flow constructed wetland system and its application on decentralized domestic wastewater treatment MAO Yongfeng¹, HUI Zhenlong¹, WANG Zhumei², YANG Yongzhe². (1. Yanan Environmental Protection Monitoring Station, Yan'an Shaanxi 716000; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055)

Abstract: In order to improve the oxygen availability of traditional wetland system so as to achieve a higher degree of total chemical oxygen demand (TCOD) removal and biological nitrification efficiencies, a novel tidal flow constructed wetland (TF-CWs) was developed for treatment of decentralized domestic wastewater. The treatment system employing the 4-stage tidal flow strategy (8 h per cycle) to enhance the capacity of DO supplement and using the constructed solid waste (CSW) (waste gravel and fly ash brick) as the main substrate to improve P removal performance. The results showed that the effluent quality meet the class I-A standard of Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918-2002). The effluent NH_4^+-N and TP could fully meet the class I-A standard, and the standardized rates of effluent TCOD reached 98.31%. The tidal flow strategy could obviously improve the oxygen availability of construct wetland. The average NH_4^+-N and TCOD removal efficiency was 96.78% and 86.98%, respectively. The CSW based substrate, which made by waste gravel and fly ash brick, was shown an excellent P removal performance. The TF-CWs developed in this study can be utilized as one of the effective treatment process for decentralized domestic wastewater treatment and creates an alternative pathway for CSW reuse and disposal.

Keywords: constructed wetlands; decentralized domestic wastewater; tidal flow; construction solid waste; enhanced nitrogen and phosphorus removal

随着我国城市化进程的不断发展, 在城郊或远离城区的地方不断有居民区、大学园区或旅游度假区建成。这些新建成的社(园)区由于缺乏污水收集管网和相应的治理设施, 大部分生活污水未经任何处理直接进入受纳水体。在部分流域, 分散型生活污水排放已经成为点源污染的主要贡献者。因此, 这些分散型生活污水的处理十分紧迫。

人工湿地作为一种新型、高效、低投资的污水就

地处理技术, 常用于分散型生活污水处理^{[1]90-98}。但是, 人工湿地存在供氧能力不足、总化学需氧量(TCOD)去除率不高及生物硝化不完全等问题。潮汐流人工湿地(TF-CWs)通过进水—滞留—排水—闲置方式运行, 使空气中的氧能更多进入填料空隙中, 从而提高DO浓度, 强化 NH_4^+-N 和TCOD的去除效果^[2]。人工湿地中磷的去除是通过植物吸收、微生物同化和填料吸附等作用实现的, 但主要依靠

第一作者: 茆永峰, 男, 1969年生, 本科, 高级工程师, 研究方向为环境监测及水污染控制工程。# 通讯作者。

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No. 2009ZX07212-002-004-003); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20116120110008)。

基质吸附和沉淀作用去除^{[3]640,[4]}。一些常用的填料(如砾石和碎石),由于其中 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等金属离子含量较低,其对磷的去除率仅为 26.7%~65.0%。而我国每年仅施工建设产生的建筑固体废弃物就达 4 000 万 t 左右^[5],大量的建筑固体废弃物堆砌不仅占用了土地资源,还严重污染周边环境。将其中的粉煤灰砖(含 Al_2O_3 27.80%(质量分数,下同)、 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 6.63%、 CaO 3.22%)资源化利用作为人工湿地填料,不仅可以强化人工湿地的除磷功能,而且可以实现以废治废,为建筑固体废弃物的处置或资源化利用提供一种新的途径^[6]。

为了开发处理效率高、运行稳定性好的分散型生活污水处理新工艺,并寻求建筑固体废弃物处置或资源化利用的新途径,本研究拟采用以建筑固体废弃物为填料的新型 TF-CWs 处理分散型生活污水,研究其对主要污染物(TCOD、 NH_4^+-N 及 TP)的去除特征,以期工程化应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 原水来源及水质

实验用水为西安某大学的校园生活污水,水质见表 1。

表 1 实验用水水质
Table 1 The water quality in experiment

指标	最大值	最小值	平均值±标准偏差
TCOD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	805.12	81.98	331.37±153.55
$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	81.88	13.20	48.74±15.96
TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	5.90	1.30	3.11±0.70
$\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	8.80	0.50	0.63±1.00
$\text{NO}_2^--\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.20	0	0.02±0.03
pH	8.7	6.9	7.9±0.4
水温/ $^{\circ}\text{C}$	32.0	10.0	21.5±6.2

1.2 实验系统及运行方式

实验系统由预处理单元和四级人工湿地串联组成(见图 1)。预处理单元采用平流式沉淀池,表面负荷为 $0.500 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,沉淀时间为 2 h;每级人工湿地承托层为 15 cm,填料层为 50 cm。第一、三级人工湿地以从建筑固体废弃物中回收的砾石(粒径为 0.30~2.00 cm)为填料;第二、四级人工湿地以建筑固体废弃物粉煤灰砖制作成的粉煤灰(粒径为 0.09~2.00 cm)为填料。

实验系统采用潮汐流方式运行(进水 15 min,滞留 450 min,排水 5 min,闲置 10 min),运行周期为 8 h;第一、三级人工湿地的水力负荷为 $0.822 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;第二、四级人工湿地的水力负荷为 $0.038 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

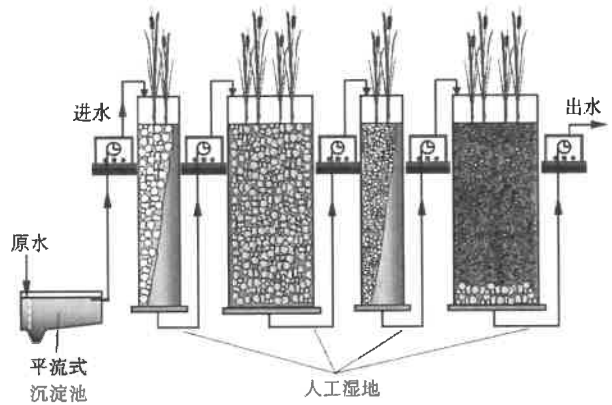


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

1.3 分析及测定方法

TCOD:重铬酸钾法; NH_4^+-N :纳氏试剂光度法; NO_3^--N :紫外分光光度法; NO_2^--N :N-(1-萘基)-乙二胺光度法;TP:过硫酸钾消解-钼锑抗比色法^[7]。

2 结果与讨论

2.1 TF-CWs 对 TCOD 的去除效果

TF-CWs 对 TCOD 的去除效果见图 2。由图 2 可见,进水的 TCOD 浓度变化较大,经沉淀预处理后,TCOD 质量浓度降至 $(118.60 \pm 37.91) \text{ mg/L}$;再经 TF-CWs 处理后,TCOD 质量浓度降为 $(43.15 \pm 16.56) \text{ mg/L}$,TCOD 平均去除率为 86.98%,其中沉淀去除了 64.21%,而 TF-CWs 系统去除的仅为 22.77%。由图 2 还可见,TF-CWs 运行 50 d 左右完成启动,其后的稳定运行阶段出水 TCOD 浓度基本达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准($\text{COD} \leq 50 \text{ mg/L}$),达标率为 98.31%。

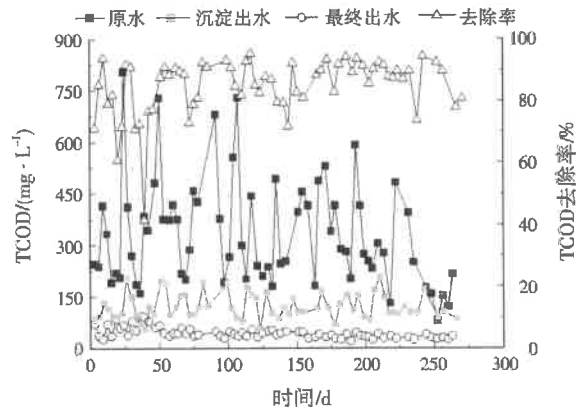


图 2 TF-CWs 对 TCOD 的去除效果

Fig. 2 TCOD removal performance of the TF-CWs

VYMAZAL^{[3]639}采用沉淀与潜流人工湿地的复合系统处理生活污水,结果表明,沉淀能去除大部分

的悬浮物,系统对 TCOD 的去除率为 74.90%。ABIDI 等^[8]以沉淀—消化池为预处理设施,采用复合潮汐流人工湿地处理分散型生活污水,TCOD 的去除率高达 90%。可见,本研究采用的 TF-CWs 系统对 TCOD 的去除效果优于相关的研究结果。

2.2 TF-CWs 对 NH_4^+ -N 的去除效果

由图 3(a)可知,沉淀预处理对 NH_4^+ -N 几乎没有去除效果,而各级人工湿地出水 NH_4^+ -N 平均浓度逐级递减;最终出水水质较为稳定, NH_4^+ -N 质量浓度稳定在 (1.57 ± 1.48) mg/L,平均去除率为 96.78%。出水 NH_4^+ -N 浓度稳定达到 GB 18918—2002 一级 A 标准(NH_4^+ -N $\leq 5(8)$ mg/L,括号内、外数分别为水温低于、超过 12 °C 的限值,实验中根据

水温的实际情况判断出水是否达标)。LANGERG-RABER 等^[9]采用两级串联的 TF-CWs 处理生活污水, NH_4^+ -N 质量浓度由 59.30 mg/L 降至 0.29 mg/L,去除率高达 99.51%。

由图 3(b)可知,各级人工湿地的 NH_4^+ -N 平均去除率依次为 39.94%、35.32%、16.55% 和 1.49%,第一、二级人工湿地的去除贡献较大。由图 3(c)可知,各级人工湿地出水中 NO_3^- -N 浓度均较高,其平均质量浓度由 0.63 mg/L(沉淀出水)上升至 24.67 mg/L(第四级出水)。根据物料平衡原理计算可知,出水中 NO_3^- -N 占 TN 的 94.02%, NH_4^+ -N 占 TN 的 5.98%。可见,以潮汐流方式运行的人工湿地提供了充足的 DO 供硝化过程顺利进行, NH_4^+ -N 主要通过硝化作用转化成 NO_3^- -N 而去除。

2.3 TF-CWs 对 TP 的去除效果

在过去的几十年里,许多学者对人工湿地的研究均表明其对磷的去除效果不佳。BRIX 等^[10]采用以沙作为填料的垂直流人工湿地处理小区生活污水时,磷的去除率为 20%~30%。CHAN 等^[11]采用以煤渣为填料的 TF-CWs 处理大学园区生活污水,磷的去除率仅为 40%。YE 等^[12]采用以砾石和沙为混合填料的人工湿地系统处理小区生活污水,TP 的去除率为 64%。VYMAZAL 等^{[1]90-98}采用以碎石作为填料的人工湿地处理生活污水,磷的去除率为 65.4%。由此可知,填料对于人工湿地的磷去除能力有很大影响^[13]。

由图 4 可知,第一、三级人工湿地对 TP 的去除效果很差,而且由于沉淀池排泥周期过长,沉淀污泥中磷发生水解、释放,导致出水 TP 浓度反而高于进水。TP 的去除主要发生在第二级人工湿地中,这一阶段 TP 平均质量浓度由进水的 (3.21 ± 1.04) mg/L 降至出水的 (0.43 ± 0.11) mg/L;其次,第四级人工湿地对 TP 的去除效果也较好,这一阶段 TP 平均质量浓度由进水的 (0.42 ± 0.07) mg/L 降至出水的 (0.07 ± 0.05) mg/L。第二级人工湿地(以粉煤灰为填料)对 TP 的去除贡献最大,平均去除率为 91.45%。出水 TP 浓度稳定达到 GB 18918—2002 一级 A 标准(TP 为 0.5 mg/L)。XU 等^[14]用 Langmuir 吸附等温线研究了人工湿地中不同基质对磷酸盐的吸附去除能力,结果表明,粉煤灰对磷酸盐有很好的去除效果,吸附量为 8.81 mg/g(以磷计),也证明了粉煤灰填料的磷去除效果明显优于沙、土及砾石等传统填料。同时,第一、三级人工湿地通过微生物同化吸收了 5.59% 和 0.33% 的 TP,第四级人

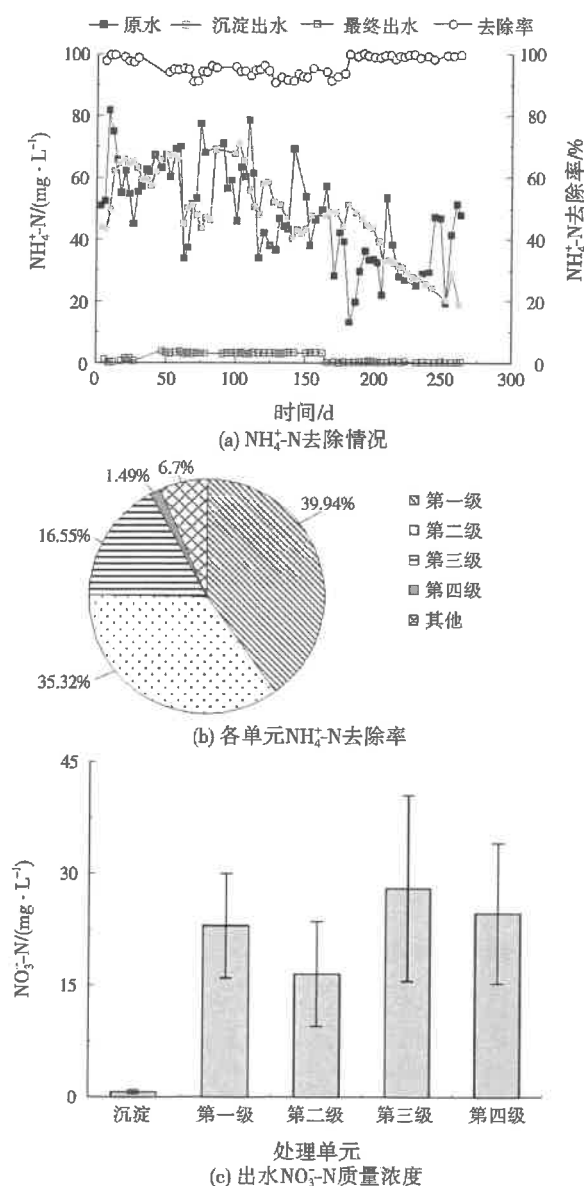


图 3 TF-CWs 对 NH_4^+ -N 的去除情况及 NO_3^- -N 的产生特征
Fig. 3 Characteristics of ammoniacal nitrogen removal and nitrate generation in the TF-CWs

工湿地对 TP 去除的贡献率为 11.51%。

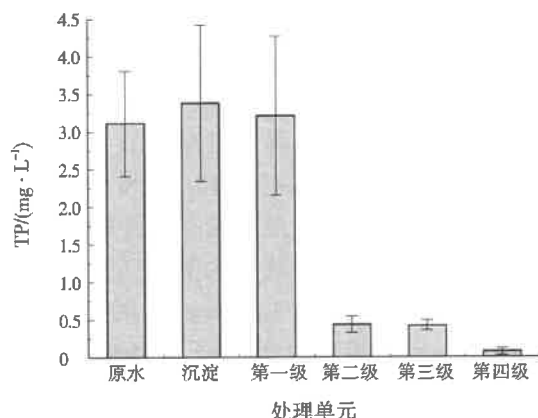


图4 TF-CWs对TP的去除效果

Fig. 4 TP removal performance of the TF-CWs

2.4 TF-CWs 中 DO 的供给与消耗特点

供氧不足是人工湿地运行中存在的主要问题之一。传统人工湿地采用连续流方式运行,其 DO 主要来源于植物根部传递、大气扩散复氧及进水中含有的少量 DO,往往不能满足污染物氧化的需求。而 TF-CWs 是间歇进出水,在闲置阶段空气中的氧会进入到基质空隙,能提高 DO 的供给量,强化 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TCOD 的去除效果。本研究采用的 TF-CWs 系统的 DO 供给与消耗特点见图 5。

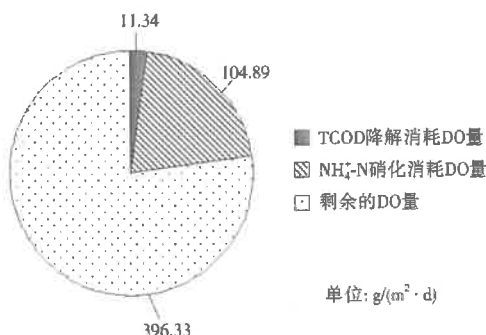


图5 TF-CWs系统的DO供给与消耗特点

Fig. 5 Characteristics of oxygen supply and consumption in the TF-CWs

研究表明,完全氧化 1 g TCOD 需要消耗 1 g 的 DO, 1 g $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 完全硝化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 需要 4.57 g 的 DO^[15]。本研究 TF-CWs 系统去除的 TCOD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别为 407.96、255.22 mg/d, 由此可得 TCOD 降解和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化所消耗的 DO 量分别为 11.34、104.89 g/(m²·d)。根据物料平衡原理计算可知,进入 TF-CWs 系统的氧气的理论值为 512.56 g/(m²·d),即使只有 25% 的氧转化为 DO,也高达 128.14 g/(m²·d),完全可以满足系统中 TCOD 降解和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化所需,可以保证两者高效去除。

3 结 论

(1) 采用 TF-CWs 处理分散型生活污水,出水水质基本满足 GB 18918—2002 一级 A 标准,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的达标率均为 100%,TCOD 的达标率为 98.31%。

(2) TF-CWs 采用潮汐流方式运行,可提高 DO 的供给能力,强化人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TCOD 的去除,其平均去除率分别为 96.78% 和 86.98%。

(3) 以粉煤灰砖制成的粉煤灰颗粒为填料的人工湿地对磷的吸附性能良好。本研究开发的 TF-CWs 可作为分散型生活污水的有效处理工艺之一,而且为建筑固体废弃物的资源化利用提供了新途径。

参考文献:

- [1] VYMAZAL J, KROPFLOVA L. A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage; first 2 years of operation[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(1).
- [2] SUN G Z, ZHAO Y Q, ALLEN S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system[J]. Journal of Biotechnology, 2005, 115(2): 189-197.
- [3] VYMAZAL J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic; 10 years experience[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(5).
- [4] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1/2/3): 48-65.
- [5] 王助国, 刘军, 李亚峰, 等. 粉煤灰处理废水的相关问题[J]. 辽宁城乡环境科技, 2005, 25(3): 39-40, 50.
- [6] YANG Y, WANG Z M, LIU C, et al. Enhanced P, N, and C removal from domestic wastewater using constructed wetland employing construction solid waste (CSW) as main substrate[J]. Water Science and Technology, 2012, 66(5): 1022-1028.
- [7] 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[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [8] ABIDI S, KALLALI H, JEDIDI N, et al. Comparative pilot study of the performances of two constructed wetland wastewater treatment hybrid systems[J]. Desalination, 2009, 246(1/2/3): 370-377.
- [9] LANGERGRABER G, LEROCH K, PRESSL A, et al. High-rate nitrogen removal in a two-stage subsurface vertical flow constructed wetland[J]. Desalination, 2009, 246(1/2/3): 55-68.
- [10] BRIX H, ARIAS C A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater; new Danish guidelines[J]. Ecological Engineering, 2005, 25(5): 491-500.
- [11] CHAN S Y, TSANG Y F, CUI L H, et al. Domestic wastewater treatment using batch-fed constructed wetland and predictive model development for $\text{NH}_3\text{-N}$ removal[J]. Process Biochemistry, 2008, 43(3): 297-305.

(下转第 46 页)