

满滢, 陶然, 杨扬, 等. 高效降解菌固定化反应器-人工湿地组合工艺处理工业型村镇废水[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 1003–1011.
MAN Ying, TAO Ran, YANG Yang, et al. The use of immobilized microorganism reactor-integrated constructed wetland(IMR-ICW) system for rural comprehensive wastewater treatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 1003–1011.

高效降解菌固定化反应器-人工湿地组合工艺处理工业型村镇废水

满滢¹, 陶然^{1,2}, 杨扬^{1,2*}, 万翔¹, 郭菁菁¹

(1.暨南大学生命科学技术学院, 水生生物研究中心, 广州 510632; 2.热带亚热带水生态工程教育部工程研究中心, 广州 510632)

摘要:利用广谱高效毒害有机物降解菌 *Lysinibacillus* sp. FS1(CCTCC M 2013561)开展固定化微生物反应器-人工湿地(IMR-ICW)组合工艺对工业型村镇废水处理的工程应用研究。工程运行结果表明,组合工艺对 COD、TN、NH₃-N、TP 和 TSS 的平均去除率分别达到 71.5%、59.5%、56.9%、46.0%和 82.9%, 其中 COD 和 TSS 出水均值达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 排放标准。GC-MS 检测结果发现,固定化微生物反应器对混合废水中 10 种主要有机污染物的去除率均在 50%以上,其中毒害有机物 3,4-二氯苯酚和乙酸苯酯的去除率分别达到 81.2%和 95.6%,其脱毒减害作用可减缓人工湿地的生态压力,显著提升组合工艺对 COD($P<0.01$)、TN($P<0.01$)和 NH₃-N($P<0.05$)的去除效果。

关键词:工业型村镇废水;有机物降解菌;固定化微生物反应器;人工湿地;毒害有机物

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)05-1003-09 doi:10.11654/jaes.2016-1619

The use of immobilized microorganism reactor-integrated constructed wetland(IMR-ICW) system for rural comprehensive wastewater treatment

MAN Ying¹, TAO Ran^{1,2}, YANG Yang^{1,2*}, WAN Xiang¹, GUO Jing-jing¹

(1.Research Center of Hydrobiology, College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Engineering Research Center of Tropic and Subtropic Aquatic Ecological Engineering, Ministry of Education, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Combined with integrated constructed wetlands(ICW), an immobilized microorganism reactor(IMR) that contained a broad spectrum and highly efficient degradation bacteria *Lysinibacillus* sp. FS1(CCTCC M 2013561) were used to treat rural comprehensive wastewater in industrial cluster towns. The results showed that the immobilized microorganism reactor-integrated constructed wetland(IMR-ICW) system had high removal efficiencies of chemistry oxygen demand(COD), total nitrogen(TN), ammonium nitrogen(NH₃-N), total phosphorous(TP) as well as total suspended solids(TSS), with average removal rates of 71.5%, 59.5%, 56.9%, 46.0% and 82.9%, respectively. Meanwhile, the effluent quality of COD and TSS met the first class A criteria of Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB18918—2002). Furthermore, the results of GC-MS indicated that the removal rates for ten of main organic pollutants in comprehensive wastewater were over 50% by the IMR, and it reached 81.2% and 95.6% for toxic organic compounds 3, 4-dichlorophenol and phenylacetate especially. The detoxification and harm-reduction abilities of IMR could relieve the ecological pressure on constructed

收稿日期:2016-12-16

作者简介:满滢(1991—),女,湖南麻阳人,硕士研究生,从事人工湿地环境微生物研究。E-mail:ying_055@163.com

*通信作者:杨扬 E-mail:yangyang@scies.org

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAJ21B07);广东省应用型科技研发专项资金项目(2015B020235008)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2012BAJ21B07); Special-funds Project for Applied Science and Technology of Guangdong Province(2015B020235008)

wetlands, which significantly increased the removal efficiencies of COD ($P<0.01$), TN ($P<0.01$) and $\text{NH}_3\text{-N}$ ($P<0.05$) in the combined process.

Keywords: integrated industrial wastewater; degradation bacteria; immobilized microorganism reactor (IMR); constructed wetland; toxic organic compounds

随着全国性的产业转移,越来越多的高污染型企业和工业园区向乡镇地区迁移,对我国村镇的污水处理和生态环境造成严重压力。截止到2010年,全国村镇污水总产生量为136.2亿t,占全国生活污水排放总量的22.9%,然而村镇污水处理水平只占了不到10%^[1];乡镇企业排放量占工业排放总量的14.5%^[2],工业污染与生活污染叠加,导致村镇污水难以处理。珠三角作为我国人口密集、高污染工业聚集地之一,这一现象尤为突出。

人工湿地作为一种重要的污水生态处理技术,具有造价低、运行费用低、维护管理方便和耐冲击负荷等优点^[3],已在我国农村地区得以广泛应用^[4]。然而,工业型村镇污水水质、水量波动大,成分复杂且含有难降解的毒害有机污染物,对湿地生态系统造成一定危害,因此需对污水进行脱毒减害预处理。固定化微生物反应器是一种高效、低成本、无二次污染的污水处理技术^[5],通过选取适当的填料作为载体,固定选育的广谱高效降解菌^[6],既能增加微生物生物量、保持微生物代谢活性,又能实现菌株的连续重复利用,在污水处理方面较游离菌的活性污泥法以及自然挂膜的生物膜法具有较大的优势^[7]。利用固定化微生物反应器作为人工湿地的前处理措施,可以缓解毒害有机物对人工湿地的生态压力,保证污水处理效果。

本文以广州市花都区团结村的污水处理为研究对象,该村是珠三角典型的工业型村镇,有纺织印染厂、化妆品厂和养殖禽畜场等众多小型企业,以印染厂居多,且工业废水与生活污水混合,已有的人工湿地难以保证污水处理效果。本研究通过在人工湿地前增设高效降解菌固定化反应器,考察组合工艺对污水氮磷营养盐的去除效果,以及固定化反应器的脱毒减害能力,为我国工业型村镇的混合废水治理提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 菌种

固定化微生物反应器所用菌种为本课题组从佛山市某工业园污水处理厂筛选出的一株高效脱色菌,鉴定为赖氨酸芽孢杆菌属,命名为 *Lysinibacillus* sp.

FS1(CCTCC M 2013561)。菌株FS1是一株高效广谱有机物降解菌,对酸性红B脱色率可达98.73%^[8],具有处理工业废水的应用潜力。

菌种FS1采用液体LB培养基扩大培养,于摇床中37℃、200 r·min⁻¹下培养14 h后,5000 r·min⁻¹离心5 min,弃上清,用无菌生理盐水清洗菌体3~5次得到菌悬液,然后添加至反应器中。

1.2 固定化载体材料

经过前期重复批次实验筛选出挂膜效果最佳的醛化纤维丝球作为菌株固定化载体,纤维球直径30 mm,密度1.3 kg·m⁻³,比表面积3000 m²·m⁻³,孔隙率96%。用聚丙烯多孔悬浮球包埋纤维球,悬浮球可拆卸,耐酸碱稳定性,直径80 mm,比表面积800 m²·m⁻³,孔隙率大于95%,脆化温度-10℃,比重0.92。每个悬浮球内可装2~3个纤维丝球。

1.3 实验装置

1.3.1 固定化微生物反应器(IMR)

反应器高1.6 m、长2.8 m、宽1.5 m,有效体积约6.5 m³,水力停留时间约6 h。反应器内布设曝气支管及排泥管,连接鼓风机曝气装置一套,间歇曝气(图1)。挂膜阶段设定鼓风机曝气:暂停时间比约为1:2,运行阶段设定曝气:暂停时间约为1:3。悬浮球成串悬挂于反应器内部支架,可取出更换和清理,填料有效体积约1.8 m³。流经反应器的污水,通过底部开口过水、顶部开缺口溢流以及曲折迂回的流程,增加与固定化载体的接触时

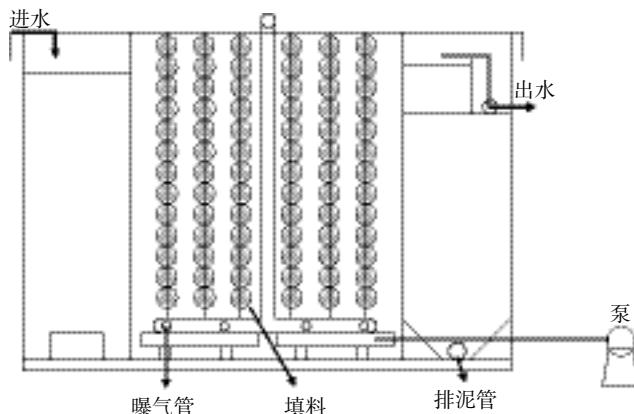


图1 固定化微生物反应器结构图

Figure 1 Structure scheme of immobilized microorganism reactor

间,从而增加水力停留时间,达到预期处理效果。

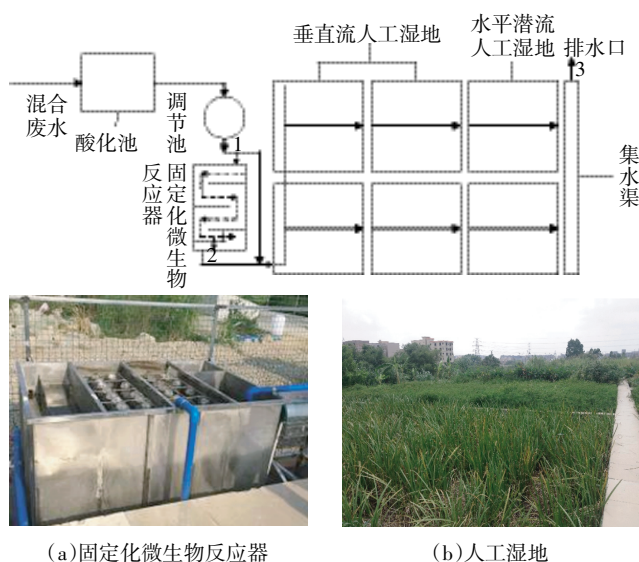
1.3.2 人工湿地(ICW)

采用垂直潜流与水平潜流湿地串联,构建湿地组合工艺,创造微好氧-厌氧-兼氧组合。垂直潜流湿地由四个种植香蒲(*Typha angustifolia*)和纸莎草(*Cyperus papyrus*)的碎石床单元组成,分为两组,两两串联,占地面积约 166 m²。水平潜流湿地由两个混合种植再力花(*Thalia dealbata*)和风车草(*Cyperus alternifolius*)的碎石床并联组成,占地面积约 83 m²。

1.4 工艺流程

采用固定化微生物反应器-人工湿地组合工艺(图2)。通过管网收集村镇混合废水,经格栅去除较大杂质,进入地下酸化池储存。当调节池中水位低于一定高度,电磁阀控制污水由酸化池泵入。通过分流阀调节,一部分污水进入中试规模固定化微生物反应器,一部分直接排入人工湿地。混合废水经过垂直潜流与水平潜流串联湿地,最终排出。整个系统由电气自控系统实现自动化运行。

工程进水为村镇工业与生活混合废水,水量变动大且成分复杂。总设计处理水量 $Q=240 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,其中固定化微生物反应器设计处理水量 $25 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,服务人口 2000 多人。构筑物占地面积约 300 m²,其中酸化池、调节池、固定化微生物反应器占地面积共 25 m²,湿地面积约 250 m²。



图中虚线代表固定化微生物反应器中曲折迂回的水流方式。1:进水采样点;2:固定化微生物反应器出水采样点;3:湿地出水采样点。

图2 工艺流程及现场图

Figure 2 Treatment process and photos of wastewater treatment system

1.5 测定方法与主要仪器

1.5.1 常规水质监测

水质各项指标依照国家标准水样化学分析方法^[9]测定,包括化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)和总悬浮物(TSS)。

1.5.2 有机物 GC-MS 检测

在示范工程稳定运行的 2015 年 11 月,采用高效气相色谱-质谱联用仪(GC-MS),对固定化微生物反应器进出水样进行 3 次采样用于有机物检测。样品前处理方法:取 10 mL 过滤后水样,稀释至 40 mL,然后分别用 10 mL 的正己烷、二氯甲烷、乙酸乙酯各萃取 3 次,得到的液体用无水硫酸钠进行干燥;将铜片放入干燥后的液体中进行脱硫,直至铜片不变色为止;取出铜片,旋蒸剩余液体,用正己烷定容至 1 mL,最后上机检测。

1.6 工程运行工况

工程设施建成于 2014 年 6 月,运行至今。2015 年 5—7 月为微生物固定化阶段,采用高效菌挂膜法^[6]固定菌株 *Lysinibacillus* sp. FS1,每周向固定化微生物反应器内投加 6 L 富集培养的 FS1 菌液。微生物固定阶段反应器处于关闭状态,该期间对人工湿地出水进行每月一次的水质监测,作为无反应器对照。2015 年 8—11 月对整个示范工程进行每月两次的水质监测。

1.7 数据处理

去除负荷($\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)计算采用如下公式:

$$\text{反应器(IMR)} = (C_i - C_{\text{IMR}})Q_{\text{IMR}}/V_{\text{IMR}}$$

$$\text{人工湿地(ICW)} = [C_i(Q - Q_{\text{IMR}}) + C_{\text{IMR}}Q_{\text{IMR}} - C_e Q]/A$$

式中: Q 为流量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; C_i 、 C_e 分别为进出水浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; A 为人工湿地面积, m^2 ; V_{IMR} 为固定化微生物反应器有效体积, m^3 。

采用 Origin 9.2 制图,采用 SPSS 19.0 进行独立样本 t 检验(Independent-Samples t Test)。

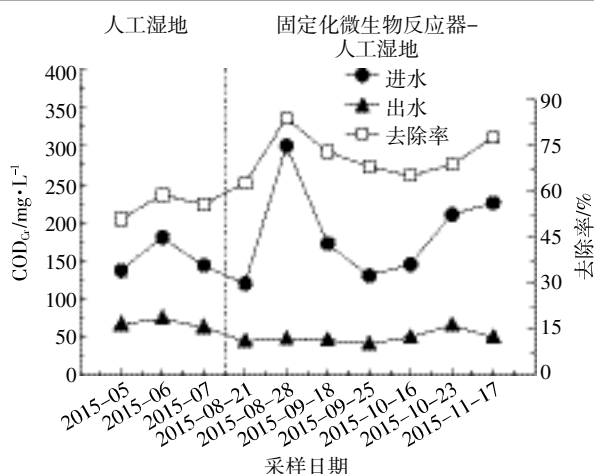
2 结果与讨论

2.1 组合工艺的处理效果

2015 年 5—7 月,固定化微生物反应器处于关闭状态,出水为人工湿地处理结果;2015 年 8—11 月,开启反应器,出水为固定化微生物反应器-人工湿地组合工艺的处理结果。

2.1.1 COD 的处理效果

2015 年 5—11 月固定化微生物反应器-人工湿地组合工艺对 COD 的处理效果如图 3 和表 1 所示。

图3 组合工艺的 COD_{Cr} 去除效果Figure 3 Removal efficiency of COD_{Cr} in the treatment system

实验数据表明,由于示范工程进水为村镇工业与生活混合废水,COD 浓度波动较大,范围为 120.2~300.3 mg·L⁻¹。2015 年 5—7 月,仅人工湿地处理阶段,出水 COD 浓度范围为 63.4~74.2 mg·L⁻¹,平均去除率为 55.4%,未达到排放要求;而在固定化微生物反应器稳定后的正式运行阶段,出水 COD 均值达到 49.5 mg·L⁻¹,平均去除率提高至 71.5%,部分出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 排放标准。

固定化微生物反应器于 8 月初开启,由于进水流量不稳定,生物膜受到水流冲击,流速越高生物膜脱落率越高^[10],影响微生物对有机物的利用率,COD 去除率在 8 月上旬没有明显提升。此后,反应器内微生物群落交联固定在载体纤维球上,逐渐生成新的混合生物膜,COD 去除率开始呈现出上升趋势,且在进水浓度波动较大时,出水水质仍较为稳定,去除率能稳定在 70%左右,表明组合工艺有较好的抗冲击能力。苏功平等^[11]采用更大规模的复合生物滤池+湿地组合

工艺对四川某乡镇生活污水的处理中,COD 出水平均值 51.75 mg·L⁻¹,最高去除率达到 80.09%水平。

2.1.2 氮的处理效果

2015 年 5—11 月固定化微生物反应器-人工湿地组合工艺对 TN 和 NH₃-N 的处理效果如图 4、图 5 和表 1 所示。

实验数据表明,经过厌氧酸化池和调节池预处理后,进水 TN 浓度为 45.63~74.78 mg·L⁻¹,NH₃-N 浓度为 41.27~62.08 mg·L⁻¹,养殖禽畜场的存在导致该地区 NH₃-N 浓度较高。开启反应器后,工程对 TN 和 NH₃-N 的去除效果得以提升,平均去除率分别达到 59.5%和 56.9%,但出水 TN 浓度仍未达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 B 排放标准。分析其原因,一方面是系统供氧不足,偏厌氧环境不利于好氧硝化菌的生长,硝化效率低,出水中氮形态主要为氨氮,反硝化所需的硝态氮不足;而且,硝化菌生长慢、易流失^[12],因此随着固定化微生物的生长稳定,10 月份后系统对氮的去除率逐步提升。

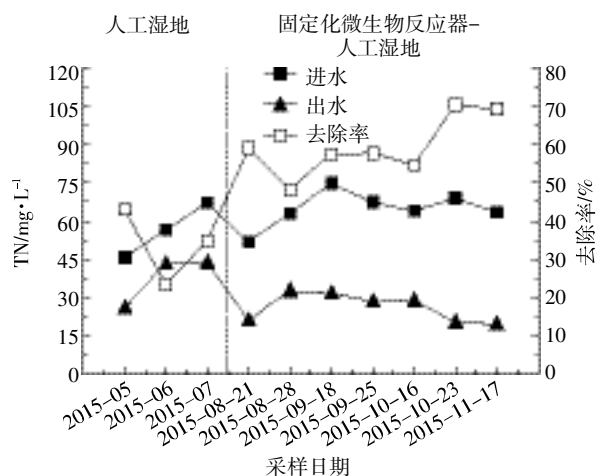


图4 组合工艺的 TN 去除效果

Figure 4 Removal efficiency of TN in the treatment system

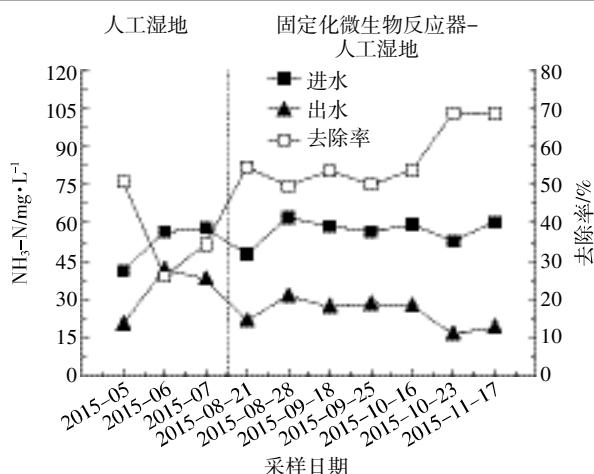
表 1 不同阶段示范工程对污染物处理效果的比较

Table 1 Comparison of removal efficiency in different stages of the treatment system

污染物	人工湿地 ICW(n=3)			固定化微生物反应器-人工湿地 IMR-ICW(n=7)		
	进水浓度范围/mg·L ⁻¹	出水均值/mg·L ⁻¹	平均去除率/%	进水浓度范围/mg·L ⁻¹	出水均值/mg·L ⁻¹	平均去除率/%
COD _{Cr}	136.7~180.8	68.1±5.5	55.4±4.0**	120.2~300.3	49.5±7.7	71.5±7.4**
TN	45.63~67.17	37.69±10.13	33.7±9.9**	51.96~74.78	26.17±5.58	59.5±7.9**
NH ₃ -N	41.27~57.92	33.37±11.44	37.0±12.6*	47.74~62.08	24.51±5.44	56.9±8.2*
TP	3.03~5.00	3.06±0.39	35.7±3.0	3.87~5.39	2.36±0.60	46.0±10.0
TSS	46.47~76.44	12.67±8.30	79.9±12.6	30.77~92.00	7.92±4.80	82.9±10.9

注:* 表示不同处理间差异显著($P<0.05$);** 表示不同处理间差异极显著($P<0.01$)。

Note:* Indicates significant differences among treatments($P<0.05$);** Indicates significant differences among treatments($P<0.01$).

图 5 组合工艺的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果Figure 5 Removal efficiency of $\text{NH}_3\text{-N}$ in the treatment system

另一方面,进水的 C/N 比值为 2.7,低于最佳比值 5^[13],碳源在反硝化过程中充当电子供体,碳源不足将不利于反硝化反应。易齐涛等^[14]在评估农村生活污水处理效果中提到,TN 的去除率变动最大,特别是在 C/N 比值低的情况下,脱氮效率一般只有 50%左右。

因此,为提高组合工艺对 TN 的去除效果,一方面,可适当增加固定化微生物反应器曝气时长,促进硝化反应,提高湿地进水中硝态氮的比例;另一方面,可就地取材在第二级人工湿地中添加收割湿地植物秸秆的水解液作为外加碳源^[15]来促进反硝化反应,提高氮去除率。

2.1.3 磷(TP)的处理效果

2015 年 5—11 月固定化微生物反应器-人工湿地组合工艺对 TP 的处理效果如图 6 和表 1 所示。

由于研究区域有大量印染和纺织企业,废水中

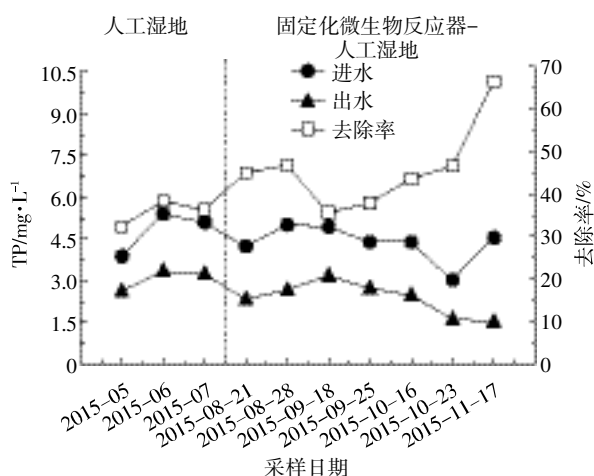


图 6 组合工艺的 TP 去除效果

Figure 6 Removal efficiency of TP in the treatment system

TP 浓度较生活污水偏高,组合工艺出水 TP 平均去除率达到 46.0%,出水浓度均值为 2.36 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而易齐涛等^[14]研究的湿地系统,对 TP 的去除率仅为 32.4%。湿地系统中,沉积、吸附、沉淀、植物吸收和微生物吸收与积累等均对磷的去除有一定贡献^[16],随着反应器中微生物的生长和稳定,固定化微生物反应器在一定程度上提高了磷的去除。但磷的主要去除仍为湿地系统中基质的吸附^[14,17],对磷的处理效果有限。因此,可在人工湿地前增设强化除磷措施。Adrados 等^[18]采用轻质骨料除磷材料的生物滤池作为人工湿地前处理,显著提高了整个湿地的除磷效果。

2.1.4 TSS 的处理效果

2015 年 5—11 月固定化微生物反应器-人工湿地组合工艺对 TSS 的处理效果如图 7 和表 1 所示。混合废水经格栅、酸化池、调节池前处理,沉淀了部分大颗粒杂质。由于进水水量波动和潜水泵扰动,进水 TSS 浓度呈现较大波动,浓度范围为 30.77~92.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。示范工程出水 TSS 浓度均值为 7.92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均去除率为 82.9%,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 排放标准。

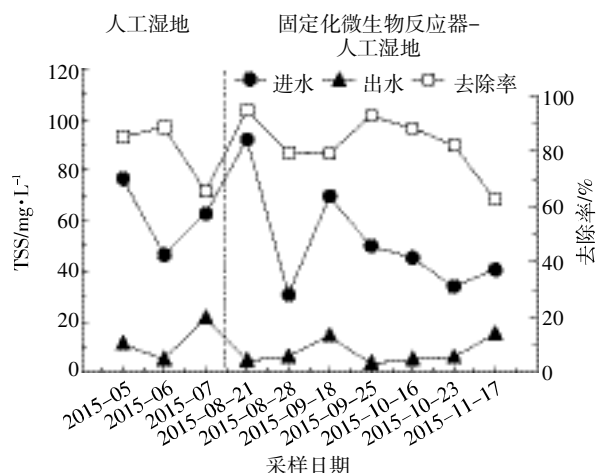


图 7 组合工艺的 TSS 去除效果

Figure 7 Removal efficiency of TSS in the treatment system

2.1.5 组合工艺对污染物去除负荷

根据示范工程实际运行情况,监测期间平均总进水流量 $Q=92\pm 23 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,反应器平均进水流量 $Q_{\text{MR}}=14\pm 4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。工程各处理单元进出水污染负荷及去除负荷如表 2 所示。结果表明,固定化微生物反应器的 COD、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 平均进水负荷较高,可见原污水对处理系统带来高负荷压力,而固定化微生物反应器对污染物去除发挥了一定作用。相比 Vymazal 等^[19]利

表2 组合工艺的污染物去除负荷
Table 2 Removal loading of the treatment system

污染物	固定化微生物反应器 IMR(<i>n</i> =7)		人工湿地 ICW(<i>n</i> =7)	
	进水负荷/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$	平均去除负荷/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$	进水负荷/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	平均去除负荷/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$
COD _{Cr}	326.62±122.82	74.99±30.24	66.94±23.15	48.66±22.19
TN	122.40±11.91	17.15 ±11.71	23.49±2.41	13.82±2.28
NH ₃ -N	105.88±12.48	16.40 ±9.91	20.55±1.78	11.49±1.74
TP	8.12±1.46	1.26±0.96	1.58±0.24	0.71±0.20
TSS	119.93±50.22	-8.43±38.06	19.35±7.81	16.42±7.98

用人工湿地处理市政废水时 NH₃-N 进水负荷 3.0~19.9 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 本研究中人工湿地进水 NH₃-N 负荷 20.55±1.78 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 较高, 对湿地脱氮效率造成一定影响。Harada 等^[20]研究垂直流-水平潜流人工湿地处理北海道奶牛场废水, 结果表明湿地系统对 COD、TN、NH₃-N 平均去除负荷分别为 24.5、0.90、0.38 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。相比之下, 本研究中人工湿地的去除负荷较高。

2.2 固定化微生物反应器的处理效果

2.2.1 毒害有机物的处理效果

采集连续运行过程中固定化微生物反应器进出水, 利用 GC-MS 分析混合污水中有机物含量和主要

成分。由反应器进水与反应器出水的气相色谱图(图8)可以看出, 进水中含有 22 个较为明显的峰, 而处理后污水只在 55、70 min 左右出现明显的产物峰, 峰的数量和面积明显降低。质谱定性结果表明, 该废水样品中的化合物十分复杂, 存在许多难以质谱鉴定的碳氢化合物。如图 9 所示, 保留时间 32.15 min 处的峰为 3,4-二氯苯酚, 其去除率为 81.2%; 68.88 min 处的峰为乙酸苯酯, 其去除效果最好, 可达 95.6%。通过污水处理前后主要峰面积(表 3)可以看出, 除保留时间为 56.38 min 外, 其余 10 个主要产物峰的去除率都在 50% 以上。通过对进水中有机物成分分析可以看出,

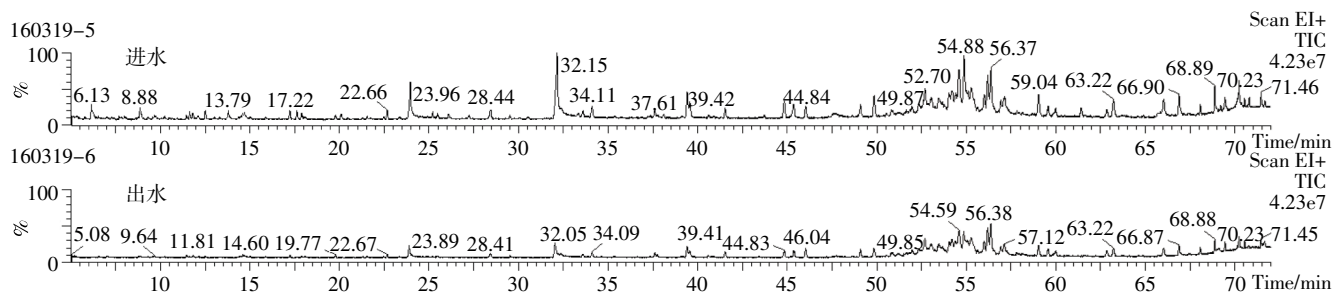


图8 GC-MS 测定废水样品的总离子流色谱图

Figure 8 Total ion current chromatogram of GC-MS for the determination of the wastewater

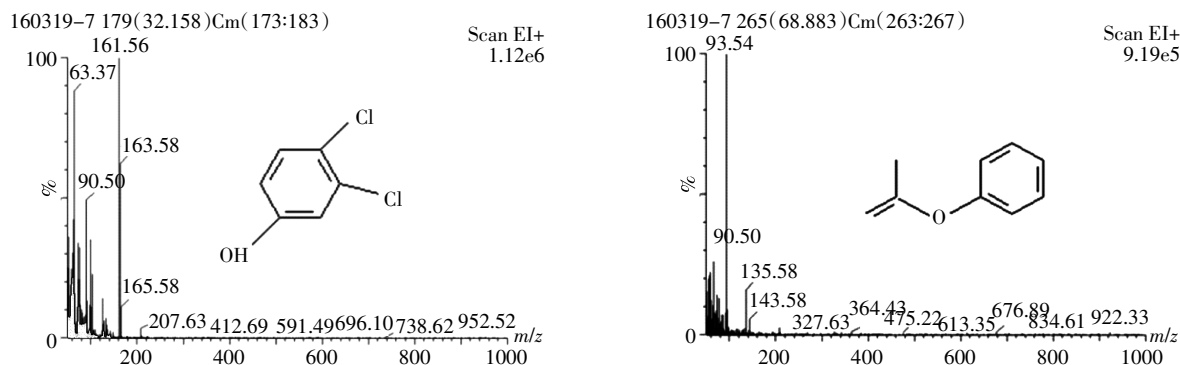


图9 质谱图鉴定结果

Figure 9 MS chromatogram and identification results

表 3 污水处理前后峰面积
Table 3 The peak area of sewage water

GC 停留时间/min	峰面积		去除率/%
	进水	出水	
23.96	3 126 117	1 035 236	66.8
28.43	577 126	276 868	52.0
32.15	6 941 854	1 304 656	81.2
34.10	677 520	288 092	57.4
39.42	1 552 198	603 744	61.1
44.83	1 028 201	391 288	61.9
49.86	1 223 037	548 256	55.1
56.38	4 210 548	2 842 424	32.4
63.22	1 430 808	611 091	57.2
66.89	1 384 498	656 570	52.5
68.88	1 130 577	49 061	95.6

混合污水以氯代苯酚和苯酯类等有机物为主,而大多数氯代苯酚和苯酯类化合物有毒性或致癌性^[21]。杨茜等^[22]在研究石化工业园区有毒废水时,将 3,5-二氯苯酚作为标准毒性物质。因此,若不针对混合废水进行前期脱毒减害处理,将给当地生态环境造成严重威胁。

目前关于高效菌对废水处理的研究,大多局限于小规模室内模拟实验,往往因为菌株的稳定性和适应性不佳,未推广到工程规模^[23]。例如任磊等^[24]在生物反应器中应用菌株 CN2 处理含对硝基苯酚的模拟工业废水,黎兵等^[25]采用活细胞固定化技术处理焦化废水。本研究中的菌株 FS1 能够快速、有效降解村镇混合废水中氯代苯酚和苯酯类等有机化合物,在用于固定化微生物反应器对村镇混合废水的脱毒减害处理中,取得良好的效果。

2.2.2 对湿地处理效果的影响

实验不同阶段示范工程对污染物处理效果对比如表 1 所示。串联固定化微生物反应器后,反应器中高效广谱性降解菌 FS1 与原污水中土著菌株发生生态位分离,形成协同互生关系。固定化微生物反应器中微生物将污水中难降解有机物转化为小分子物质^[26],在降低进水毒性的同时为后续人工湿地植物、微生物提供可利用的碳源储备,人工湿地出水中 COD 去除率显著性($P<0.01$)提升。固定化微生物反应器开启后,由于反应器间歇曝气充氧,促进了好氧微生物硝化反应, TN($P<0.01$)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ ($P<0.05$)去除率较未开启反应器时均有显著提高。组合系统出水 TP 去除率较未开启时平均提高了 10.3%,但差异不显著。

固定化微生物反应器的良好运行表明,本课题组

筛选出的菌株 FS1 不仅对染料具有很好的脱色效果,且能有效降解废水中的毒害有机污染物。此外,已经报道的同属 *Lysinibacillus* sp.对有机磷农药马拉硫磷有很好的降解效果^[27],对重金属也具有很高的耐性^[28],印证了 *Lysinibacillus* sp. FS1 适用于本研究中以印染为主的团结村工业与生活混合废水的脱毒减害预处理。反应器稳定运行后,我们发现湿地系统机能逐渐恢复,对氮磷等营养盐有一定去除效果,进而整体提升示范工程的处理效果。因此,可将菌株 FS1 应用于含混合工业废水处理的工程中。

2.2.3 对所需湿地面积的影响

设计人工湿地时,占地面积一般根据进水水质特征和出水水质标准,再依据模型公式计算得出。在湿地应用研究中,常用一级动力学模型对处理系统进行动力学分析^[29],因其计算出的 k 值具有一定局限性,本文不做比较。基于同一系统降解常数 k 值相同的原理,在固定化微生物反应器能处理所有进水的条件下,进行原污水(无固定化微生物反应器处理)人工湿地面积(A_1)和有反应器处理人工湿地面积(A_2)计算,可估算出 A_2/A_1 。面积比值计算方法如下^[30]:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\ln(C_{i2}/C_e)}{\ln(C_{i1}/C_e)} \quad (1)$$

以 COD 为例,考虑到湿地最终出水须达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 排放标准, $\text{COD} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,计算中 C_e 取 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;根据进水数据计算出, C_{i1} 为 $186.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, C_{i2} 为 $151.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,将上述进出水 COD 质量浓度带入公式(1),得出 A_2/A_1 为 0.84,即增加固定化微生物反应器,可减少约 16%的所需湿地面积。卢建等^[31]采用生物法-人工湿地组合工艺处理小城镇混合污水发现,增加生物预处理可减少约 44%的所需湿地面积,但其反应器规模大。根据计算,本研究中减少的湿地面积仅为 16%,可能一方面由于进水水质复杂,含有难降解有机物,难以彻底矿化,影响反应器出水 COD 质量浓度;另一方面,反应器的规模也限制了其处理效果。增加前处理措施,可降低人工湿地进水负荷,减少所需湿地面积,提高整个工艺流程对污染物的处理效果。但在实际工程应用中,需要考虑系统投资与运行成本来权衡反应器与人工湿地占处理面积的比例。

3 结论

(1)固定化微生物反应器-人工湿地组合工艺能有效处理工业型村镇混合废水,其中 COD 和 TSS 出

水均值达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 排放标准。

(2)广谱高效降解菌 *Lysinibacillus* sp. FS1 能有效降解村镇混合废水中的毒害有机污染物, 对其中 10 种主要有机污染物的去除率均在 50% 以上。固定化微生物反应器对混合废水的脱毒减害作用减缓了人工湿地的生态压力, 显著提升组合工艺的处理效果。

(3)高效降解菌固定化微生物反应器-人工湿地组合工艺实现对村镇混合废水的低成本和持续有效处理, 是高效有机物降解菌对污水脱毒减害处理成功应用的案例, 为微生物资源菌种在污水处理工程中的应用提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 鞠宇平. 村镇污水治理存在的问题与对策[J]. 水工业市场, 2012(9): 16-21.
- [2] JU Yu-ping. Existing problems and countermeasures of village sewage treatment[J]. *Water-Industry Market*, 2012(9): 16-21.
- [3] 关亮炯. 我国水污染现状及治理对策[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(6): 80-81.
- [4] GUAN Liang-jiong. Present situation of and control measures for the water pollution of china[J]. *Sci/Tech Information Development & Economy*, 2004, 14(6): 80-81.
- [5] Zhang T, Xu D, He F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990—2010[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47(5): 189-197.
- [6] 梁 康, 王启烁, 王飞华, 等. 人工湿地处理生活污水的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 422-428.
- [7] LIANG Kang, WANG Qi-shuo, WANG Fei-hua, et al. Research progresses in domestic wastewater treatment by constructed wetlands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 422-428.
- [8] Zhou J, Han Y, Zhang J B, et al. Seasonal performance of sequencing batch biofilm reactors and ecosystem sewage treatment hybrid processes in small towns of the three gorges reservoir area in China[J]. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 2014, 27(6): 4276-4283.
- [9] 孔秀琴, 任瑞芳, 石小锋, 等. 光合细菌(PSB)处理明胶废水中填料挂膜性能研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(12): 2761-2765.
- [10] KONG Xiu-qin, REN Rui-fang, SHI Xiao-feng, et al. Study on property of biofilms on different carriers in treating gelatin wastewater by photo-synthetic bacteria (PSB)[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(12): 2761-2765.
- [11] 赵欣欣, 孙 玲, 董玉玮, 等. 固定化微生物技术及其在污水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2015(7): 17-20.
- [12] ZHAO Xin-xin, SUN Ling, DONG Yu-wei, et al. Immobilized microorganism technology and its application in wastewater treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015(7): 17-20.
- [13] 苏 萌, 陶 然, 杨 扬, 等. 偶氮染料脱色菌 *Lysinibacillus* sp. FS1 的脱色性能[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 4664-4672.
- [14] SU Meng, TAO Ran, YANG Yang, et al. Biodecolorization of azo dyes by *Lysinibacillus* sp. FS1[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(10): 4664-4672.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 701-705.
- [16] State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 701-705.
- [17] Casey E, Glennon B, Hamer G. Biofilm development in a membrane-aerated biofilm reactor: Effect of flow velocity on performance[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2000, 67(4): 476-486.
- [18] 苏功平, 张小凤, 陈文清, 等. 复合生物滤池+潜流人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 775-780.
- [19] SU Gong-ping, ZHANG Xiao-feng, CHEN Wen-qing, et al. Biological filter and subsurface flow constructed wetlands to treat rural domestic sewage[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(2): 775-780.
- [20] Ni B J, Fang F, Xie W M, et al. Growth, maintenance and product formation of autotrophs in activated sludge: Taking the nitrite-oxidizing bacteria as an example[J]. *Water Research*, 2008, 42(16): 4261-4270.
- [21] Zhu H, Yan B X, Xu Y Y, et al. Removal of nitrogen and COD in horizontal subsurface flow constructed wetlands under different influent C/N ratios[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 63: 58-63.
- [22] 易齐涛, 李 慧, 章 磊, 等. 厌氧/生物滤池/潜流人工湿地组合工艺处理农村生活污水效果评估[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2394-2400.
- [23] YI Qi-tao, LI Hui, ZHANG Lei, et al. Evaluation of treatment performance of the combined processes of anaerobic tanks, aerated biofilter and subsurface constructed wetland on rural domestic wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(5): 2394-2400.
- [24] 钟胜强, 杨 扬, 陶 然, 等. 5 种植物材料的水解释碳性能及反硝化效率[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5): 1817-1824.
- [25] ZHONG Sheng-qiang, YANG Yang, TAO Ran, et al. Carbon releasing characteristics and denitrification effects of five plant materials[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(5): 1817-1824.
- [26] 卢少勇, 金相灿, 余 刚. 人工湿地的磷去除机理[J]. 生态环境学报, 2006, 15(2): 391-396.
- [27] LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Phosphorus removal mechanism of constructed wetland[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 391-396.
- [28] 贺 锋, 曹湛清, 夏世斌, 等. 生物膜-人工湿地组合工艺处理城镇生活污水的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1655-1660.
- [29] HE Feng, CAO Zhan-qing, XIA Shi-bin, et al. Studies on municipal wastewater treatment with a combination system of biofilm reactor and constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8): 1655-1660.
- [30] Adrados B, Sánchez O, Arias Ca, et al. Microbial communities from different types of natural wastewater treatment systems: Vertical and horizontal flow constructed wetlands and biofilters[J]. *Water Research*, 2014, 55(10): 304-312.

- [19] Vymazal J, Kröpfelová L. A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: First 2 years of operation[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(1):90-98.
- [20] Harada J, Inoue T, Kato K, et al. Performance evaluation of hybrid treatment wetland for six years of operation in cold climate[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(17):12861-12869.
- [21] 宋瀚文, 王东红, 徐 雄, 等. 我国 24 个典型饮用水源地中 14 种酚类化合物浓度分布特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2):355-362.
- SONG Han-wen, WANG Dong-hong, XU Xiong, et al. Occurrence of 14 phenols in 24 typical drinking water sources of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2):355-362.
- [22] 杨 茜, 于 茵, 周岳溪, 等. 石化工业园区有毒废水来源识别研究[J]. 环境科学, 2014, 35(12):4582-4588.
- YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, et al. Source identification of toxic wastewaters in a petrochemical industrial park[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12):4582-4588.
- [23] 刘 亮, 刘 聪, 蒋继宏, 等. 希瓦氏菌在印染废水脱色中的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6):110-116.
- LIU Liang, LIU Cong, JIANG Ji-hong, et al. Research progress on decolorization of the dying wastewater using *Shewanella*[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 38(6):110-116.
- [24] 任 磊, 史延华, 贾 阳, 等. 菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学[J]. 环境科学, 2015, 36(5):1757-1762.
- REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, et al. Biodegradation characteristics and kinetics of *p*-nitrophenol by strain *Arthrobacter* sp. CN2[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(5):1757-1762.
- [25] 黎 兵, 刘永军, 刘姗姗. 活细胞固定化技术在焦化废水处理中的应用研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(5):109-111.
- LI Bing, LIU Yong-jun, LIU Shan-shan. Study on applications of live-cell immobilization technology in coked wastewater treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, 38(5):109-111.
- [26] 朱松梅, 周 振, 谢 跃, 等. 工业园区污水厂溶解性有机物转化规律研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(7):18-22.
- ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, XIE Yue, et al. Transformation of dissolved organic matters in an industrial park wastewater treatment plant[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 39(7):18-22.
- [27] Singh B, Kaur J, Singh K. Transformation of malathion by *Lysinibacillus* sp. isolated from soil[J]. *Biotechnology Letters*, 2012, 34(5):863-867.
- [28] Lozano L C, Dussán J. Metal tolerance and larvicidal activity of *Lysinibacillus* sp. haericus[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, 29(8):1383-1389.
- [29] 唐孟焯, 吴 娟, 代嫣然, 等. 组合式垂直流人工湿地工艺及其污水处理效果[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3):1017-1022.
- TANG Meng-xuan, WU Juan, DAI Yan-ran, et al. Treatment of domestic wastewater by hybrid vertical constructed wetland[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(3):1017-1022.
- [30] Barros P, Ruiz I, Soto M. Performance of an anaerobic digester-constructed wetland system for a small community[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33(2):142-149.
- [31] 卢 建, 杨 扬, 尹振娟, 等. 生物法-人工湿地组合工艺处理小城镇混合污水研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6):1262-1266.
- LU Jian, YANG Yang, YIN Zhen-juan, et al. Treatment of small town mixed sewage by the combined process of biological methods and constructed wetlands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(6):1262-1266.