

生物膜-人工湿地组合工艺处理城镇生活污水的研究

贺 锋¹, 曹湛清², 夏世斌², 徐 栋¹, 吴振斌¹

(1.中国科学院水生生物研究所,湖北 武汉 430072 2.武汉理工大学资源与环境学院,湖北 武汉 430070)

摘 要 采用以天然植物中空纤维作为填料的生物膜-生物膜反应器(BBFR)串联复合垂直流人工湿地(IVCW)的组合工艺处理系统,研究了5种不同的运行工况,即不同的停留时间、水力及污染负荷条件下对城镇生活污水的处理效果。结果表明,5种工况下组合系统的出水均能达到一级排放标准,COD、TN和TP的平均去除率分别达到89.86%、93.5%和74.78%。各工况条件下因为装置控制参数和稳定程度的不同,各运行阶段下的净化效果也有一定的差异。通过探讨BBFR和IVCW的最佳耦合模式,即系统处理效果达到最佳时的运行参数,实现了BBFR和IVCW二者间的优势互补。

关键词 组合工艺;生物膜;植物中空纤维;人工湿地

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)08-1655-06

Studies on Municipal Wastewater Treatment with A Combination System of Biofilm Reactor and Constructed Wetland

HE Feng¹, Cao Zhan-qing², XIA Shi-bin², XU Dong¹, WU Zhen-bin¹

(1.Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430072, China; 2.School of Resource & Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract The purification efficiency of a combination system, consisted of biofilm reactor and constructed wetland to treat municipal wastewater was studied. The biofilm reactor was filled with hollow fibre of natural plants. The system was operated under different running status, which was different combinations of hydraulic retention time, volume and pollutant loading. The results showed that the wastewater after treated under all the status could meet rank 1 of the integrated wastewater discharge standard of China, and the removal efficiency for COD, TN and TP were 89.86%, 93.5% and 74.78%, respectively. Because of the various combinations and the stability of the system, the treatment efficiency among the different status was somewhat different. This paper also explored more reasonable model for the combination system of biofilm reactor-constructed wetland that was the proper selection of running parameters, under which the highest treatment efficiency could be reached. Finally, the biofilm reactor and constructed wetland could fit each other well.

Keywords combination system; biofilm; hollow fiber; constructed wetland

人工湿地(Constructed Wetland)污水处理系统是一种包含土壤、植被、微生物的生态工程系统,它利用自然的净化能力来处理污水,具有投资少、能耗低、管理简便、过程稳定、处理效果好、无二次污染等优点^[1],在处理城镇污水方面具有独特的优势。但是人工湿地本身也存在着不足之处:①占地面积较大;②一般作为二级处理或深度处理,系统进水需要预处理^[2];③高

负荷运行易堵塞。加上小城镇污水水质也逐渐复杂多样,所以人工湿地与其他工艺组合,加强前处理越来越受到人们的重视。本工艺采用以天然植物纤维——丝瓜瓢作为载体的生物膜法和复合垂直流人工湿地结合,处理小城镇生活污水,在降低COD、脱氮除磷方面取得了明显的互补效果。

1 材料及方法

1.1 装置及材料

1.1.1 BBFR 填料

填料选用切割成段的天然植物中空纤维材料——丝瓜瓢,其主要化学成分为皂甙类,呈圆柱体型,平均直径为100 mm,平均高为60 mm,干密度

收稿日期 2008-10-07

基金项目 国家自然科学基金(50808172);国家“十一五”水专项(2008ZX07106-2-4);湖北省科技攻关重大项目(2006AA305A03);国家杰出青年基金(39925007)

作者简介 贺 锋(1973-)男,湖北黄冈人,博士,副研究员,研究方向为人工湿地。E-mail: hefeng@ihb.ac.cn

通讯作者 吴振斌 E-mail: wuzb@ihb.ac.cn

0.524 g·cm⁻³, 湿密度 0.925 g·cm⁻³。与传统填料相比, 具有比表面积大、抗水力冲刷性强、易于快速挂膜、处理后的填料易于生物降解、不污染环境的特点, 同时新型生物填料更具有经济性, 适宜推广应用。

1.1.2 BBFR 主体

主体由有机玻璃制成, 圆柱形, 直径 150 mm, 高 2 000 mm, 有效容积 35 L。填料用软绳串联悬挂于柱体下半部分 1 000 mm 高度的空间, 填充容积占反应器总容积的 50%。上部分是澄清区, 下部分为填料区。BBF 采用底部穿孔曝气, 孔径 3.2 mm。试验中运行周期分别为 12 h, 其中曝气反应 11 h, 曝气量 1.2 m³·h⁻¹。静置沉淀 0.5 h, 进出水 0.5 h。

1.1.3 IVCW 装置

选择钢板构架、玻璃墙体粘接而成。尺寸为 72 cm×42 cm×42 cm, 有效容积 44.5 L, 孔隙率 0.35。下行池植物选用美人蕉(*Canna indica*), 种植密度为 1 株/(21 cm×21 cm), 上行池种植菖蒲(*Acorus calamus*), 密度为 1 株/(21 cm×14 cm)。上、下行池选取填料相同, 下行池填装高度高于上行池约 6 cm。底层填料高度约 40 mm; 中层 150 mm; 上层填充高度上行池 150 mm, 下行池 210 mm。

BBFR-IVCW 联合工艺流程见图 1。

1.2 水样

污水来自中国科学院水生生物研究所学生公寓生活污水。水质指标见表 1。

1.3 测试方法与仪器

水温、溶解氧(DO)、pH 采用 Thermo Orion Five-Star 型便携式测定仪测定, 化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)等指标按国家标准方法进行测定^[3]。

1.4 试验设计

试验分为 5 个阶段, 、 、 阶段使用原水, 依次加大水力负荷, 考察系统的运行效果, 运行期间 10

表 1 进水水质状况(单位 mg·L⁻¹, pH 除外)

水质指标	COD	NH ₃ -N	TN	TP	DO	pH
浓度变化	41~573	6.3~32.2	6.6~35.5	0.7~5.5	0.38~4.56	6.95~7.68

d 排泥 1 次, 每次 1~2 L; 第 、 阶段使用原水和人工配水结合, 保持较高的污染负荷, 再逐渐提高水力负荷, 考察装置的运行情况, 运行期间 7 d 排泥 1 次, 每次 1~2 L。工艺运行参数见表 2。

表 2 试验系统的参数控制

阶 段	运行时 间/d	日处 理量/L	BBFR 运 行周期/h	湿地停留 时间/h	湿地水力 负荷/mm·d ⁻¹	BBFR 容积负荷/ kg COD·m ⁻³ ·d ⁻¹
1	30	34	12	33	110	0.012~0.143
2	20	48	12	23	158	0.047~0.307
3	20	72	8	15	240	0.039~0.353
4	15	34	12	33	110	0.184~0.526
5	20	48	12	23	158	0.254~0.497

2 结果及讨论

2.1 BBFR 的挂膜启动

试验采取直接启动挂膜。BBFR 内瞬时注入武汉市沙湖污水处理厂二沉池的回流污泥 15 L, 同时加入生活污水 10 L 进行曝气, 曝气量控制在 1.2 m³·h⁻¹, 每天进水 5 L, 不出水, 闷曝 3 d, 第 4 d 开始出水。一星期后, 载体上附着一层薄薄黄褐色絮状物, 同时 COD 去除率连续 3 d 达到 70% 以上, 并且起伏不大, 认为挂膜成功。挂膜稳定后对载体上的膜进行镜检可发现一定量的累枝虫(*Epistylis*), 还有草履虫(*Paramecium*)、线虫(*Nematoda*)、钟虫(*Vorticellidae*)等原生动物。与其他传统球形聚乙烯填料相比, 天然植物中空纤维便于生物附着, 易于挂膜。张召基、夏世斌等曾在同样填料和填充方式与传统球形聚乙烯填料生物膜反应器相比较, 结果发现, 传统球形聚乙烯填料生物膜反应器直到挂膜启动 2 周以后才达到对 COD、NH₃-N 的稳定去除率, 而植物纤维载体使生物膜反应器挂膜启动较传统填料启动效率提高了 78%、57%^[4]。

2.2 试验结果及分析

试验分为 5 个阶段, 试验装置从 2008 年 3 月 20 日启动, 正式记录时间从 2008 年 3 月 31 日至 8 月 1 日, 历时 120 d。各个阶段的运行结果如表 3。

在 5 个阶段里, BBFR 单元、湿地单元及系统整体对 COD、NH₃-N、TN、TP 的去除效果分述如下。

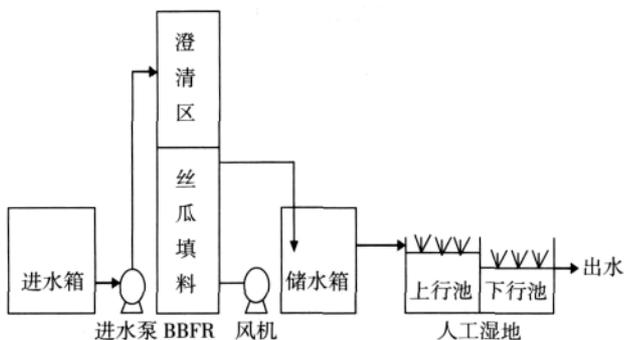


图 1 BBFR-IVCW 联合工艺流程图

Figure 1 The process chart of the BBFR-IVCW

2.2.1 对 COD 的去除

在第 阶段,由于装置刚刚启动,湿地里微生物尚未形成规模的生物群落, BBFR 对有机物的去除效果出现了暂时的下降,在进水水质有较大起伏时系统整体的抗负荷能力出现了相应的不稳定,整体去除率略有下降,随着温度的逐渐升高,湿地中植物和微生物生长迅速,生物菌落增多,加强了装置的稳定性,尤其当 BBFR 单元受进水水质起伏大而不稳定时,湿地单元能发挥二次拦截功效,在整体去除中发挥较高的贡献率(图 2)。

从第 到第 阶段, BBFR 单元去除率稳定在 70%~80%之间。尤其是第 和第 阶段,在污染负荷加大的情况下, BBFR 进水的碳源很充足,此时 BBFR 的去除率比较高,超过 80%,同时湿地辅助性的对有机物去除一方面在一定程度上缓解了湿地的堵塞,另一方面加强了整体的稳定性,使系统整体去除率也达到 90%以上,并且有较好的稳定性。在第 和第 阶段之初,污染负荷和水力负荷的突然加大, BBFR 在去除 COD 中发挥主要作用,湿地进行深度处理,加强了整体效果,出水 COD 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 A 排放标准。

2.2.2 对 NH₃-N 和 TN 的去除(图 3、图 4)

与 COD 不同,对 NH₃-N 和 TN 的去除发挥主要功能的是湿地单元。在试验初期,一部分氮在 BBFR

内经过硝化和反硝化被去除,一部分依靠湿地利用内部基质的过滤、物理吸附、化学、络合、植物吸收等多种作用对各种形态的氮进行降解。试验中湿地的填料里选有沸石,据相关文献报道^[5],沸石具有巨大的比表面积(400~800 m²·g⁻¹),且沸石构架上的平衡阳离子与构架结合得不紧密,极易与水溶液中的阳离子发生交换作用,因而沸石具有良好的吸附、交换性能。同样,对铵态氮具有极强的选择吸附性,可快速截留污水中的氨氮,但吸附并不能作为氨氮去除的最终途径。由于其巨大的比表面积,沸石还是一种比较理想的生物载体,系统稳定运行一段时间后,沸石表面会形成生物膜,这时,离子交换和硝化、反硝化反应共同作用加大了对氮去除的力度^[6]。由于这些作用的存在,沸石作为人工湿地的填料在脱氮方面具有优势。所以在试验的几个阶段里,对氮一直保持较好的去除效果,去除率在 80%以上。相对而言, BBFR 在对氮的去除方面存在着一定的波动,去除效果在逐渐增大到某个阶段后会逐渐回落,然后再逐渐增大,呈现波浪型走势。

到中后期,湿地生物菌落成型,植物也生长成型,根系也逐渐发达。成水平等在有关湿地植物功能中提到,水生植物植株和根系的输氧作用促进了深层基质中微生物的生长和繁殖^[7]。此外,在人工湿地中植物能将光合作用产生的氧气通过气道输送至根区,在植物

表 3 装置在各阶段的运行情况

Table 3 Running status of the system in the five stages

阶段	COD 进水/平均出水/mg·L ⁻¹	NH ₃ -N 进水/平均出水/mg·L ⁻¹	TN 进水/平均出水/mg·L ⁻¹	TP 进水/平均出水/mg·L ⁻¹	BBFR/IVCW 对 COD 去除的贡献率/%	BBFR/IVCW 对 NH ₃ -N 去除贡献率/%	BBFR/IVCW 对 TN 去除贡献率/%	BBFR/IVCW 对 TP 去除贡献率/%
59~194/18.3	7.7~18.2/0.9	8.3~25.0/1.5	1.3~4.7/0.7	77.6/22.4	57.4/42.6	48.0/52.0	34.1/65.9	
34~238/15.6	6.3~32.2/0.6	11.3~34.4/1.6	0.6~4.0/0.5	85.1/14.9	52.4/47.6	36.3/63.7	21.6/78.4	
62~207/18.0	6.6~28.2/0.5	8.3~35.8/1.0	0.9~3.8/0.4	82.4/17.6	49.1/50.9	30.5/69.5	37.8/62.2	
225~573/15.5	16.0~33.3/0.4	16.7~35.6/1.2	1.8~5.5/0.3	95.7/4.3	84.6/15.4	57.0/43.0	78.8/21.2	
222~488/28.9	9.3~33.6/0.7	14.0~37.6/0.5	1.7~4.4/0.5	50.5/49.5	50.6/49.4	49.9/50.1	50.0/50.0	

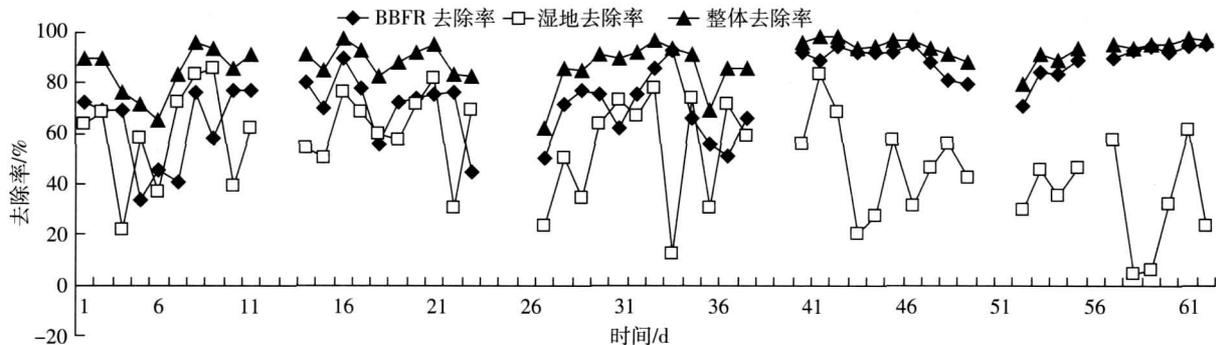


图 2 5 个阶段 COD 去除率

Figure 2 Removal efficiency of COD in the five stages

根区的还原态介质中形成氧化态的微环境^[8]。所以,湿地内部介质依托植物根系,形成大小不一、数目众多的生物膜好氧区。同样,在远离根区的介质之间的空隙形成的生物群落处于厌氧区。好氧区是污染物去除的主要区域,具有最强的硝化作用,缺氧、厌氧区主要是进行反硝化反应和有机物的厌氧分解^[9]。硝化作用和反硝化作用广泛存在于湿地系统中,湿地底层的厌氧区对维系硝化反硝化作用起着重要的作用,硝化作用由于底物浓度、氧含量的区别存在一定的空间差别,而反硝化作用则差别不明显^[10]。

试验中发现, BBFR 对总氮的去除效果不明显,但出水的 DO 一般在 4~10 mg·L⁻¹ 间,有一半左右的氮在 BBFR 中已被氨化和硝化。BBFR 出水进入湿地以后,硝化反应持续进行。因为湿地微生物不断摄取微生物进而导致厌氧状态,所以水中的氮在反硝化菌的作用下进行反硝化,产生 N₂ 从而被去除。另外植物和微生物生长发育需要一部分氮源,这些氮转换为有机氮被固定下来。两级单元 BBFR 和湿地对 NH₃-N 和 TN 的处理走势基本相同,在脱氮方面,湿地发挥

主要功能, BBFR 发挥次要功能。当出现 BBFR 去除率高时,湿地的去除率会相应低一点,但是整体去除率一般都稳定在 90% 以上。在第 一、阶段, BBFR 的功能日益成熟,碳源也充足,其对 N 的去除率基本上达到 70%,并且贡献率也超过 50%。

对比发现,进水中 C/N 对 BBFR 去除率影响较大。在本试验中,第 阶段和第 阶段水力负荷、曝气量、停留时间等控制条件完全相同,只是进水浓度有较大差别。第 阶段进水采用原水, C/N 为 5.0±3.5,且受杂质影响碳源成分复杂,有机碳含量优势不明显, BBFR 的脱氮效果不好, TN 出水浓度相对较高, BBFR 去除率只有 44.8%。在第 阶段,进水采用原水和人工配水混合, C/N 为 8.0±11.7, BBFR 的脱氮效果明显提高,同等水力负荷下, BBFR 对 TN 去除率由第 阶段的 44.8% 提高到 68.2%。

2.2.3 对 TP 的去除

BBFR 在脱磷方面表现的不够稳定,尤其是第 阶段在 BBFR 中载体上的生物膜未完全成熟时,对磷去除的波动比较大,甚至出现出水高于进水。由图 5

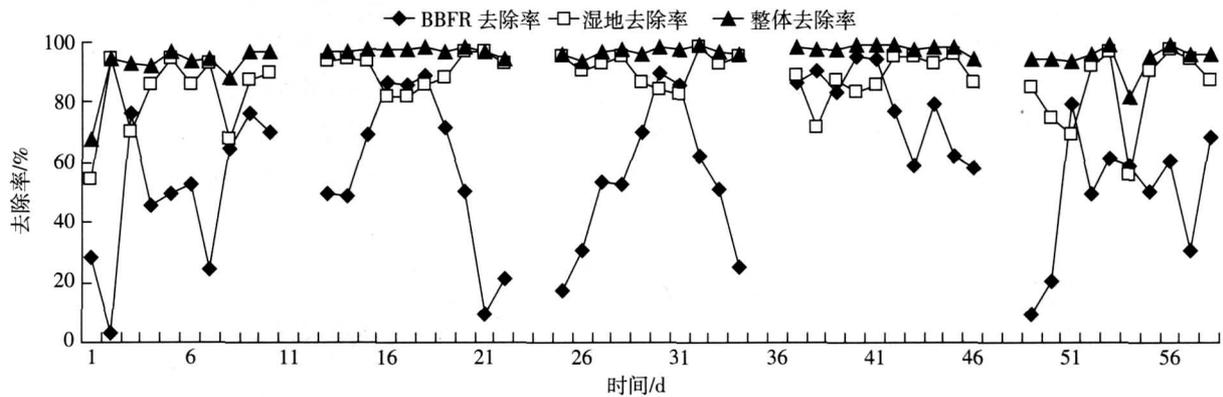


图 3 5 个阶段 NH₃-N 去除率

Figure 3 Removal efficiency of NH₃-N in the five stages

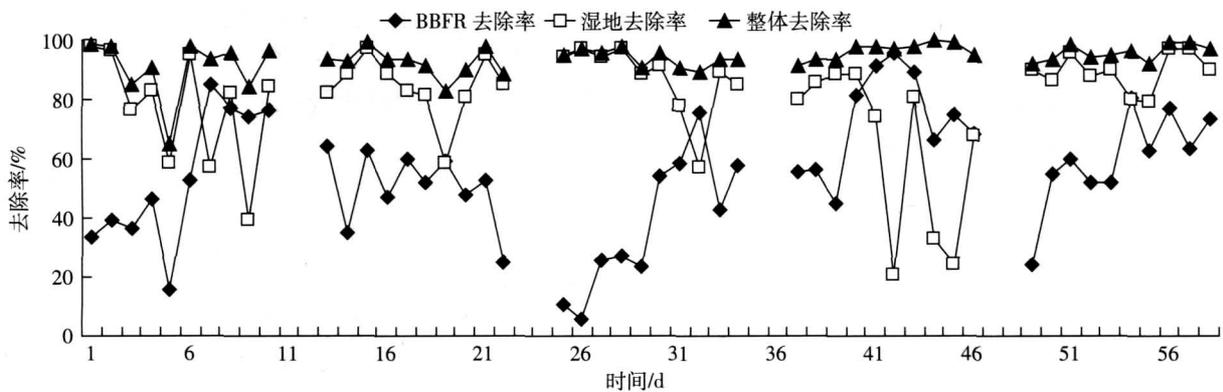


图 4 5 个阶段 TN 去除率

Figure 4 Removal efficiency of TN in the five stages

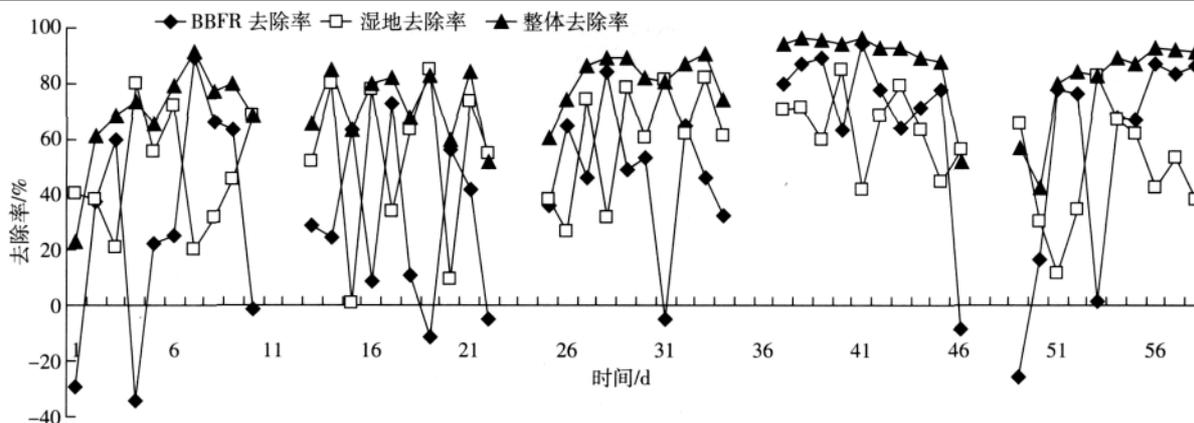


图 5 5 个阶段 TP 去除率

Figure 5 Removal efficiency of TP in the five stages

可知,在逐渐提高水力负荷的前 3 个阶段, BBFR 对磷去除的波动性逐渐减小,而且对磷的平均去除率也逐渐提高,而在第 4 阶段提高了污染负荷, BBFR 去除率反而提高,相对比较稳定;在保持同等的污染负荷下加大水力负荷的第 5 阶段,阶段初期 BBFR 去除率有一定波动,但逐渐回归稳定。分析原因,在后两个阶段,主要是有机负荷增大,有助于磷的去除。王建翔等在研究中发现,在生物膜系统中,当进水 COD 负荷达到某一值时,磷的去除效率将会随进水 COD 负荷的升高而降低。由于微生物在生长时所需要的有机碳源是有一定比例要求的,在去除磷时微生物所需要的 COD 负荷不是越高越好,而是越接近合理的 C:N:P 比越好。一般来说,此比值在厌氧段为 COD:N:P 为 200~300:5:1,好氧段为 100:5:1^[11]。在本试验中,5 个阶段的 COD:P 依次为 61:1、66:1、57:1、118:1、135:1,后两个阶段的去除率比其他阶段高也印证了这一说法。试验第 4 阶段, C/P 为 60.7±22.2,碳源明显不足,再加上其他因素影响, BBFR 对磷的平均去除率只有 24.9%,且波动较大。在相同水力负荷的第 5 阶段, C/P 为 118.13±41.7, BBFR 平均去除率可以达到 73.2%。在第 5 阶段,碳源持续增多,当 C/P 为 138.22±36.2 时, BBFR 的平均去除率下降到 47.6%。

相对而言,湿地单元对磷的去除效果优于 BBFR,湿地不仅可以依靠介质的吸附、沉淀、络合、离子交换等物化作用,同时基质里生长和附着的微生物也可以摄取磷,对磷的形态进行转化,使其被吸收或沉淀。在试验初期,主要依靠湿地基质的吸附沉淀作用,当湿地植物根系发达形成大量的厌氧和好氧区时,微生物和植物会加强对磷的摄取,合成 ATP,细胞壁上嵌入的磷,自身需要的物质以及体内遗传物质 DNA 或

RNA。在 5 个阶段中,随着生物膜的生长, BBFR 对磷的去除率也在逐渐增加,尤其是第 4 到第 5 阶段, BBFR 去除率逐渐从 50% 上升到 80% 左右,整体去除率一般稳定在 80%,在第 4 阶段整体去除率更是一度达到 90%,该阶段由于 BBFR 生物膜的成熟,温度的升高,碳源的充足, BBFR 和湿地的去除效率都有较大的提高。

2.2.4 微生物镜检

随着 BBFR 的成熟,载体上的生物量和种类都有较大的提高,并且生物多样性的提高有助于食物链的拉长,也有利于装置的稳定性和净化效果的提高。镜检发现,除了在挂膜期间观察到的线虫、草履虫外,还发现了数目较多的长足轮虫(*Rotatia neptunia*)、仙女虫(*Naididae*)等微型后生动物(图 6)。在这些生物中,有的能直接利用水中的有机污染物,而起到了净化的功能;有的能以微生物为食,通过吞噬微生物,可以减少污泥排量,如仙女虫(*Naididae*)。张召基在研究 BBFR 工艺时发现,仙女虫的剧烈蠕动有利于老化的生物膜脱落,且对污泥的吞噬有助于污泥减量^[4]。

3 结论

(1) BBFR-IVCW 联合工艺在处理小城镇污水方面能相互耦合发挥各自优势,达到了处理效果好、稳定性强、抗负荷能力高的目的。

(2) BBFR 单元和 IVCW 单元在对污染物的去除上各有所长, BBFR 对 COD 有较好的去除作用, IVCW 对 N、P 有较好的去除作用。

(3) BBFR-IVCW 组合工艺在水力负荷和污染负荷都增大的情况下,所检测指标仍能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一



图 6 BBFR 内观察到的线虫、草履虫、钟虫、仙女虫($\times 150$)

Figure 6 *Nematoda*, *Paramecium*, *Vorticellidae*, *Naididae* observed in the BBFR($\times 150$)

级A类排放标准,表现出较强的抗冲击能力。

参考文献:

- [1] 郭明新, 李万庆. 天津市城市污水自由水面构筑物湿地处理系统中氮去除规律的研究[J]. 环境化学, 1996, 15(6): 516-522.
GUO Ming-xin, LI Wan-qing. A study on elimination pattern of nitrogen in wastewater in land treatment system(FWCS) of Tianjin City[J]. *Environmental Chemistry*, 1996, 15(6): 516-522.
- [2] 贺 锋, 吴振斌, 付贵萍, 等. 复合构建湿地运行初期理化性质及氮的变化[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 279-283.
HE Feng, WU Zhen-bin, FU Gui-ping, et al. Phys-chemical character and nitrogen changes in integrated constructed wetland at the initial stage of operation[J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2002, 11(3): 279-283.
- [3] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水分析方法(第三版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
State E P Administration. Methods for the examination of water and wastewater analysis(3rd ed)[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1997.
- [4] 张召基, 夏世斌, 等. 新型填料生物膜法处理城市污水的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(7): 73-76.
ZHANG Zhao-ji, XIA Shi-bin, et al. Experiment on wastewater treatment by a new sequencing biomass biofilm reactor[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(7): 73-76.
- [5] 何积秀, 吴 弢, 李 华. 天然沸石在水处理净化中的应用研究进展[J]. 科学情报开发与经济, 2006, 16(1): 149-105.
HE Ji-xiu, WU Tao, LI Hua. The application of natural zeolite in water treatment[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2006, 16(1): 149-105.
- [6] 杨晓忠. 人工湿地脱氮除磷研究进展[J]. 现代农业科技, 2007, 4: 128-129.
YANG Xiao-zhong. Research progress of denitrification and phosphorus removal in integrated vertical-flow constructed wetland[J]. *Anhui Agriculture*, 2007, 4: 128-129.
- [7] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2): 179-185.
CHENG Shui-ping, WU Zhen-bin, KUANG Qi-jun. Macrophytes in artificial wetland[J]. *Journal of Lake Science*, 2002, 14(2): 179-185.
- [8] Fennessy M S, Cronk J K, Mitsch W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. *Ecol Eng*, 1994, 3(4): 469-484.
- [9] 陶 敏, 贺 锋, 徐 栋, 等. 复合垂直流人工湿地氧化还原特征及不同功能区净化作用研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 291-294.
TAO Min, HE Feng, XU Dong, et al. Redox character and purification of different function units in integrated vertical-flow constructed wetland [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(2): 291-294.
- [10] 吴振斌, 周巧红, 贺 锋, 等. 构建湿地中试系统基质剖面微生物活性的研究[J]. 中国环境科学, 2003, 23(4): 422-426.
WU Zhen-bin, ZHOU Qiao-hong, HE Feng, et al. Studies on microbial activities of substrate in plot scale plot of constructed wetland[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(4): 422-426.
- [11] 王建翔, 陈洪斌, 合群彪, 等. 生物膜法除磷的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(1): 47-51.
WANG Jian-xiang, CHEN Hong-bin, HE Qun-biao, et al. Development of biological phosphorus removal in biofilm systems[J]. *Environmental Science and Management*, 2006, 31(1): 47-51.