

文章编号: 1674-5566(2010)03-0391-07

活性炭纤维填料床反应器硝化性能研究

黄霞峰, 谭洪新, 罗国芝, 孙大川, 梁洋洋, 董明来

(上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 构建新型材料活性炭纤维 (active carbon fiber ACF) 填料床反应器, 在温度 25~27 °C, 利用人工污水进行挂膜, 测定基本水质指标及生物膜氧吸收速率 (oxygen uptake rate OUR), 研究反应器稳态后水力停留时间 (hydraulic retention time HRT), 进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷以及 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变化对于 ACF 填料滤器的影响。结果表明, ACF 填料滤器最佳 HRT 时间为 3.1 h, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率最高达到 79.41%, 此时氨氧化菌 OUR 平均为 1.24 $\text{mg O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$ 。控制进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷分别为 0.05、0.09、0.24、0.44 $\text{g} / (\text{kg} \cdot \text{d})$, 最佳进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷为 0.09 $\text{g} / (\text{kg} \cdot \text{d})$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率可达 80.21%, 此时氨氧化菌 OUR 平均为 1.42 $\text{mg O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$ 。 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比在 2 至 6 时, 随着 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比升高, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率逐渐降低, 而 COD_{Mn} 去除率明显上升。在 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比为 2 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率最高, 为 80.96%, 此时氨氧化菌 OUR 平均为 1.40 $\text{mg O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$; 在 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比为 6 时, COD_{Mn} 去除率达到最高, 为 65.01%, 此时异养菌 OUR 平均为 2.02 $\text{mg O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$ 。

关键词: 活性炭纤维; 硝化性能; $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比; 氧吸收速率

中图分类号: X 171 **文献标识码:** A

The nitrification performance of active carbon fiber packed-bed reactor

HUANG Xia-feng TAN Hong-xin LUO Guo-zhi SUN Da-chuan LIANG Yang-yang DONG Ming-lai
(College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A new material activated carbon fiber (ACF) packed bed reactor has been developed to treat artificial sewage at 25–27 °C. Hydraulic retention time (HRT), influent of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ loading rate and $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ were changed to investigate the influence on reactor by measuring basic water quality indicator and oxygen uptake rate (OUR). The results demonstrated, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ removal rate was up to 79.41% and the average OUR of anammox bacteria was 1.24 $\text{mg O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$ when the best HRT of ACF reactor was 3.1 h. When the influent $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ loading rate were 0.05, 0.09, 0.24, 0.43 $\text{g} / (\text{kg} \cdot \text{d})$, the best water $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ loading rate was 0.09 $\text{g} / (\text{kg} \cdot \text{d})$ and the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ removal rate was 80.21%, the average OUR of anammox bacteria was 1.42 $\text{mg O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$. While the $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ rose from 2 to 6, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ removal rate decreased gradually and the COD_{Mn} removal rate increased remarkably. When $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ was 2, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ removal rate reached 80.96% and OUR of anammox bacteria was 1.40 $\text{mg O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$; Meanwhile

收稿日期: 2009-11-25

基金项目: 上海市重点学科建设项目 (S30701)

作者简介: 黄霞峰 (1984—), 女, 硕士研究生, 专业方向为设施渔业研究。E-mail: kikibhuc@163.com

通讯作者: 谭洪新, E-mail: hxtai@yahoo.com.cn

COD_{Mn} removal rate was up to 65.01% and OUR of heterotrophic bacteria was 2.02 mgO₂/(g·h), when COD_{Mn}/NH₄⁺-N was 6.

Key words: activated carbon fiber; nitrification performance; COD_{Mn}/NH₄⁺-N; oxygen uptake rate

生物过滤在循环水养殖系统 (recirculating aquaculture system, RAS) 的水质稳定中起着核心的作用^[1]。生物过滤器的原理是通过其滤料表层生物膜的微生物将水体中的氨氮和亚硝酸盐氮降解为硝酸盐氮。而生物膜的产生和生长离不开载体,因此,优质生物膜载体的选用在生物过滤器中十分重要。

生物膜的载体材料是否能提供大的比表面积,是否具有好的生物相容性等是评价载体材料优劣的重要依据^[2]。碳材料具有良好的生物相容性已被人们所证实,并在生物材料的研究开发上已有所应用,对于生物活性炭(BAC)处理氨氮和亚硝酸盐氮的效果方面的研究也有报道^[3-5]。但是以生物活性炭作为载体其吸附容量小,机械强度差,在使用中易剥落,影响微生物挂膜效果。而活性炭纤维(ACF)由于其结构上的特点,比生物活性炭性能更优越,吸附量大,机械强度高,吸附、脱附速度快,再生能力强^[6]。研究表明^[7]活性炭纤维比生物活性炭具有更好的生物相容性,前者的微生物固着化速率是后者的4倍~16倍,更易于微生物的固着与挂膜。目前,已有报道以活性炭纤维(ACF)为生物膜处理载体在处理生活饮用水方面的研究^[8]。但鲜见以活性炭纤维作为生物过滤器的生物膜载体应用于RAS中对氨氮和亚硝酸盐氮去除效果的报道。

因此,本试验采用活性炭纤维(ACF)作为生物过滤器的填料,研究了其作为生物膜载体的挂膜情况及硝化性能,以期以活性炭纤维应用于闭合循环养殖系统生物过滤器的滤料提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料

粘胶基活性炭纤维毡(V-ACF),单丝直径10~20 μm,堆积密度0.05 g/cm³,比表面积为1200 m²/g

活性污泥取自上海市东区污水处理厂曝气池。原水为人工配方污水:氯化铵:硫酸镁:氯化

钾:磷酸二氢钾:磷酸氢二钠:三氯化铁=50:7:5:7:11:29:1(mg/L)^[9],按实验所需进水NH₄⁺-N浓度(mg/L)投入自来水中。

1.2 试验装置

本试验反应器配置如图1所示,由反应器、蓄水箱、配水箱、蠕动泵、加热装置构成。其中,反应器采用内径10 cm,柱高70 cm的PVC工程塑料,消除光合细菌的影响。反应器内填充规格2.5 cm×2.5 cm的ACF,填充体积为5262.2 cm³,ACF填料干重为472.9 g。蠕动泵将水从配水池带入反应器下层入水口,水流方向向上,经填料层后,从上层出水口流出进入蓄水箱。进水采用人工配方污水。

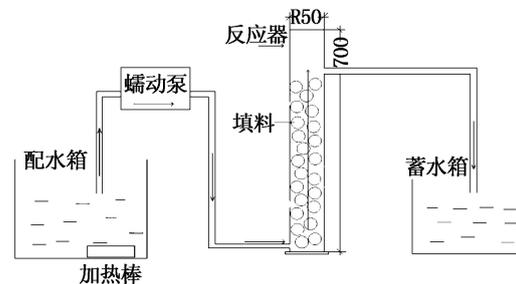


图1 ACF硝化填料床反应器示意图

Fig. 1 Schematic representation of ACF nitrification packed bed reactor

1.3 试验设计

1.3.1 ACF填料生物滤器挂膜条件

向活性污泥(约2 L)中加入管网水及河水各5 L,在25~27℃条件下曝气并加入营养物质(使BOD₅:N:P=100:5:1),用NaHCO₃调pH=6.8~7.2以符合微生物的生长条件。曝气2~3 d后静置24 h,用蠕动泵将上清液打入活性炭纤维柱中进行微生物固定(固定时间为6 h)^[10],其后用人工配方污水进行挂膜。表1为人工配方污水进水水质指标。蠕动泵控制HRT为2 h,挂膜期间每日9时取进出水口水样,测定NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N含量。当三态氮指标达到生物滤器生物膜成熟标准^[11],再继续测试三态氮直至第25天。

表 1 进水水质指标

Tab 1 Quality index of feed-in solution

NH_4^+ N含量	NO_2^- N含量	NO_3^- N含量	DO含量	PO_4^{3-} N含量	pH
1.97±0.13	0.29±0.01	5.27±0.46	6.3±0.25	0.76±0.02	7.42±0.31

1.3.2 不同 HRT对 ACF填料滤器硝化性能影响

生物滤器成熟稳定后,通过配水设定进水 NH_4^+ N浓度为 2 mg/L左右,调节 HRT分别为 0.5、1、2、3、4、5 h,水温控制在 25~27 °C条件下,待一个 HRT出水水质波动稳定后,测定生物滤器进出水的三态氮指标,计算并比较处理效率,同时取 ACF填料测定生物膜氧吸收速率(OUR)。

1.3.3 不同进水 NH_4^+ N浓度对 ACF填料滤器硝化性能影响

将成熟的生物滤器进水 NH_4^+ N浓度分别由低到高调至 1、2、6、10 mg/L左右,相对应为负荷一、二、三、四,调节 HRT为上述试验得到的最佳 HRT,水温控制在 25~27 °C条件下,待一个负荷出水水质指标稳定后,测其进出水三态氮指标,计算并比较处理效率,同时取 ACF滤料测定生物膜 OUR,之后调至下一负荷至其稳定。

1.3.4 不同 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+$ N比对 ACF填料滤器硝化性能的影响

以成熟的生物滤器为反应柱,调配并控制进水 NH_4^+ N浓度为 2 mg/L左右,以葡萄糖为碳源,逐渐增加进水 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+$ N比分别为 2、2.5、3、4、5、6,调节 HRT为上述试验得到的最佳 HRT,水温控制在 25~27 °C条件下,测定不同 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+$ N比条件下 ACF填料对 NH_4^+ N、 COD_{Mn} 的处理效率,同时取 ACF滤料测定生物膜 OUR。

1.4 指标检测及数据分析

温度、pH、DO采用 YSI水质多功能分析仪;三态氮及 COD_{Mn} 水质指标的分析测试方法参见水和废水检测分析方法国家标准;生物膜氧吸收速率 OUR测试方法见文献[12];HRT为蠕动泵控制;扫描电镜拍摄在上海师范大学进行。

实验数据表格用平均值±标准误(mean±S.E.)表示,使用 SPSS 16.0软件对数据作图并进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),并以最小显著极差法(LSD)进行多重比较。

2 结果与讨论

2.1 ACF生物滤器的挂膜成熟以及成熟后的表面微观检测

生物滤器挂膜成熟一般都能在检测水质指标中明显体现^[11]。本试验中,ACF填料滤器挂膜成熟总共耗时 15 d期间三态氮指标变化情况如图 1所示。在 ACF吸附及接种微生物的共同作用下,从第 1天起 NH_4^+ N浓度稳定下降,第 6天后就稳定在 0.75 mg/L以下;同时 NO_2^- N的浓度随 NH_4^+ N浓度的降低而逐渐上升,峰值(2.26 mg/L)出现在第 6天,之后逐渐下降,第 15天后降至 0.04 mg/L并随之稳定, NH_4^+ N去除率也稳定在平均 78.58%,表明 ACF生物滤器已经成熟。整个挂膜期间 NO_3^- N浓度呈稳步增加趋势,三态氮之间的变化均表现出较好的相关性。研究表明淡水生物过滤器接种挂膜需要 8~20 d可建立硝化功能^[11,13-14],本实验采用 ACF新型填料进行挂膜,成熟用了 15 d与前人研究结果相符。

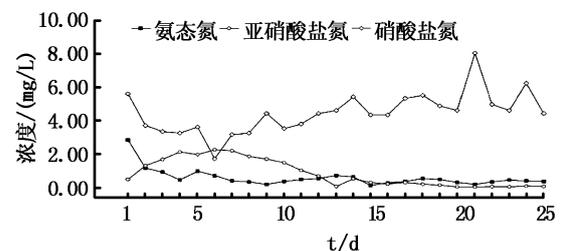


图 2 挂膜期间三态氮变化曲线

Fig 2 The change curves of ammonia-N, nitrite-N and nitrate-N in the experiment

2.2 不同 HRT对 ACF填料滤器硝化性能影响

本阶段试验在生物滤器成熟稳定后,在不同 HRT条件下对滤器进出水三态氮进行了测定,结果见表 2。实验期间,出水 NO_2^- N含量稳定在较低水平,硝氮也基本稳定。出水 NH_4^+ N的随着

HRT的升高有先降低后升高,与之相对应的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率有先升高后降低的趋势。其中,HRT控制在0.5~3.1 h范围内, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率呈上升趋势;方差分析表明0.5~2 h这一阶段对于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率有着极显著的影响($P < 0.01$), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率明显上升,2~3.1 h阶段内,影响不显著($P=0.484$),HRT为3.1 h时,有最大去除率为79.41%;3.1~5 h过程中, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率呈下降趋势,3.1~3.9 h时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率影响不显著($P=0.067$),3.9~5 h时,影响显著($P < 0.01$), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率明显下降。因此认为本试验HRT=3.1 h为ACF填料过滤器在 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为2 mg/L左右时的最佳HRT。

本试验同时在不同HRT的水质稳定期对ACF填料过滤器生物膜OUR进行检测,结果见图3。发现生物膜总OUR呈先上升后下降的趋势。最大值出现在HRT为3.1 h时,平均为2.52 mg $\text{O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$;生物膜氨氧化菌OUR亦呈先上升后下降的趋势,最大值也出现在HRT为3.1 h时,平均为1.24 mg $\text{O}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$;生物膜硝酸菌OUR以3.1为界,之前均保持较高,之后下降明显;而生物膜异养菌OUR在HRT为3.1以前较低,之后明显增加。

表2 不同HRT对于滤器硝化性能影响

Tab. 2 The influence of HRT on nitrification performance

HRT/h	出水水质指标 (mg/L)			$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率 (%)
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	
0.5	1.18±0.03 ^a	0.11±0.01 ^a	4.83±0.05 ^a	48.93±0.88 ^a
1	0.86±0.07 ^b	0.12±0.001 ^a	5.29±0.02 ^{bd}	64.10±2.21 ^b
2	0.42±0.02 ^c	0.07±0.003 ^b	5.36±0.01 ^{bd}	78.06±1.48 ^c
3.1	0.42±0.03 ^c	0.05±0.004 ^c	5.42±0.01 ^{bc}	79.41±1.37 ^c
3.9	0.52±0.02 ^c	0.07±0.004 ^{bd}	5.33±0.02 ^{bd}	75.75±0.57 ^c
5	0.69±0.04 ^d	0.09±0.002 ^d	5.31±0.04 ^d	67.09±0.70 ^b

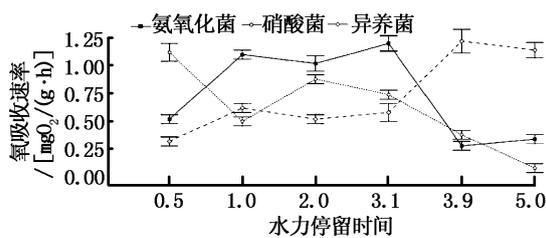


图3 不同HRT下OUR变化

Fig. 3 The influence of HRT on OUR

OUR是废水生物处理研究中生物膜微生物活性分析的一个常用方法。与各种酶(如脱氢酶、蛋白酶等)活性、ATP含量的测定相比,OUR是表征微生物活性的一个可以较为简便快捷地进行测定的指标,同时研究证明OUR同ATP含量具有较好的相关性^[15]。OUR的另一个特点,是通过测定过程加以控制,可以分别测定异养菌、硝酸菌和氨氧化菌各自的OUR^[12]。本试验发现ACF填料过滤器中的氨氧化菌、硝酸菌和异养菌三者OUR与水质三态氮指标都有较好的相关性。HRT从0.5升至3.1 h时,氨氧化菌被激活,耗氧率上升,同时高水力停留时间使氨氧化细菌对单位体积的水有更长时间进行氨氧化作用, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率也随之上升;HRT在3.1 h后继续变大时,水体中溶解氧浓度的降低,氨氧化菌繁殖量下降,耗氧速率也随之下降,同时异养细菌竞争力增强,繁殖量上升,随之耗氧速率上升。尹艳娥^[16]的研究中ACF柱最佳流量为4 mL/min大致换算成HRT为1.7 h,本实验最后确定的最佳HRT为3.1 h,较其研究时间长,分析可能是因为ACF填料的分布情况与反应器大小关系的原因。

2.3 不同进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷对反应器硝化性能影响

过滤器成熟稳定后,调节不同进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度,对ACF填料过滤器进出水三态氮进行了测定,结果见表3。试验期间, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率随着负荷的增加有上升再下降的趋势,经方差分析表明,进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷变化对于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率有显著影响($P < 0.01$)。其中由负荷一升高到负荷二时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率上升,最高达到80.22%。

出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 保持在低水平;由负荷二经负荷三调至负荷四时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率明显下降,出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 有积累的现象。因此认为,本试验中当 HRT 为 3.1 h 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 进水浓度在负荷二 $[0.09 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$ 时,有最佳硝化效率。

本试验同时在不同负荷水质稳定期对 ACF 填料滤器生物膜 OUR 进行检测,结果如图 4 所示。总 OUR 随着进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷的升高逐渐增大;生物膜氨氧化菌 OUR 的最大值出现在负荷二,平均为 $1.42 \text{ mg O}_2/(\text{g} \cdot \text{h})$;生物膜硝酸菌 OUR 在负荷一与负荷二时均保持在较高水平,之后开始下降;而生物膜异养菌 OUR 在负荷一与负荷二时均保持较低水平,之后开始上升。期间氨氧化菌、硝酸菌和异养菌三者 OUR 与水质三态氮指标都有较好的相关性。

本阶段试验负荷一到负荷二的过程中由于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 量的增加,使得氨氧化菌有充足的养分,氨氧化菌增殖,耗氧速率增大,随之 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率也增大;再次加大负荷后,可能由于供氧量保持不变时,负荷的增加造成溶解氧相对的不足,因此出现了 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的积累,此时的氨氧化菌与硝酸菌的耗氧速率都有所下降,异养菌在此阶段有所增殖,耗氧速率增加,竞争力加强,也导致了氨氧化菌与硝酸菌的耗氧速率的下降。Mohamad 等^[17]用泥煤作为反应器的填料,进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷 $0.13 \sim 4.18 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 处理效果平均为 95%。本实验采用新型填料 ACF 填料本身质量比一般常用过滤材料轻,处理 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 效果也比较理想,不会加重过滤器本身的承重负担。

表 3 不同 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷下反应器硝化功能情况

Tab. 3 The influence of ammonia concentration on nitrification performance

负荷	水质指标			$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除情况		
	进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷 $\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$	出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度 (mg/L)	出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度 (mg/L)	出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度 (mg/L)	去除负荷 $\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$	去除率 (%)
负荷一	0.05 ± 0.001^a	0.04 ± 0.001^a	0.05 ± 0.007^a	5.09 ± 0.03^a	0.04 ± 0.001^a	70.93 ± 1.09^a
负荷二	0.09 ± 0.001^b	0.07 ± 0.001^b	0.06 ± 0.004^a	5.32 ± 0.04^b	0.07 ± 0.001^b	80.21 ± 0.71^b
负荷三	0.24 ± 0.009^c	0.19 ± 0.007^c	0.35 ± 0.016^b	6.71 ± 0.01^c	0.11 ± 0.005^c	44.99 ± 0.52^c
负荷四	0.44 ± 0.007^d	0.26 ± 0.02^d	0.42 ± 0.040^c	7.87 ± 0.04^d	0.16 ± 0.004^d	37.61 ± 0.53^d

注: $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率按进出水浓度 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 计算得出。

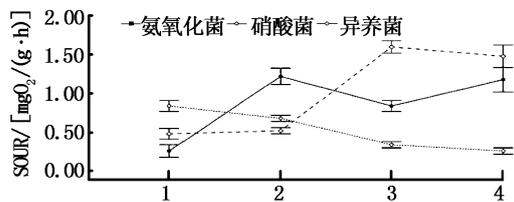


图 4 不同进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度下的 OUR

Fig. 4 The influence of ammonia concentration on OUR

2.4 不同 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比对反应器硝化性能的影响

过滤器成熟稳定后,调节进水 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比,对 ACF 填料滤器进出水三态氮及 COD_{Mn} 进行了测定,结果见表 4。试验期间,出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 含量稳定在较低水平, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 也逐渐下降;经方差分析表明, $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比在 2~5 之间,对于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率和 COD_{Mn} 去除率都有

显著影响 ($P < 0.01$), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率随着 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比升高呈明显下降趋势,而 COD_{Mn} 呈明显上升趋势; $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比在 5~6 之间时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率影响不显著 ($P = 0.825$), COD_{Mn} 去除率影响也不显著 ($P = 0.561$)。在 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比为 2 左右时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 有最大去除率为 80.96%;在 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比为 6 左右时, COD_{Mn} 有最大去除率为 65.01%。

同时对 ACF 填料滤器生物膜 OUR 进行检测,结果见图 5。生物膜总 OUR 变化趋势不明显;氨氧化菌 OUR 随着 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比上升,而逐渐下降,峰值出现在 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比为 2 时,氨氧化菌 OUR 值为 $1.40 \text{ mg O}_2/(\text{g} \cdot \text{h})$;硝酸菌 OUR 变化不稳定;异养菌 OUR 随着 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比上升,而逐渐上升,在 $\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比为 6 时有最大 OUR 值 $2.02 \text{ mg O}_2/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

本阶段试验 ACF 填料滤器中的氨氧化菌、硝酸菌和异养菌三者 OUR 与水质三态氮指标也都有较好的相关性。

在本阶段试验 $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ 比从 2 至 6 的过程中, $NH_4^+ - N$ 去除率明显下降, 而 COD 去除率则明显上升, 因为较高的有机负荷导致了好氧异养菌的过度繁殖, 这样消耗了大量的氧气, 耗氧速率上升, 使得本身就不具备竞争优势的氨氧化细菌无法得到充足的氧, 耗氧速率下降, 生物膜过度增厚, 阻碍了 $NH_4^+ - N$ 由液相向生物膜

内层的传递, 所以 $NH_4^+ - N$ 的去除效果明显下降^[18], 而 $NO_3^- - N$ 也由于氨氮去除率的降低而降低。Sato 等^[19]研究了 C/N 比对于硝化反应生物膜的影响, 表明 C/N 升高会诱发种间竞争氧气, 而异养细菌更占优势, 氨氧化细菌群落数量会降低, 从而氨氧化作用受到抑制, 本试验中也观察到相同现象, 所以在实际应用中, 应尽量控制 $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ 比在 2 以下, 就会有比较好的 $NH_4^+ - N$ 处理效果。

表 4 不同 $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ 下, $NH_4^+ - N$ 和 COD_{Mn} 去除效果比较

Tab. 4 The influence of $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ on nitrification performance

$COD_{Mn}/NH_4^+ - N$	出水水质指标 (mg/L)			去除率 (%)		
	$NH_4^+ - N$	COD_{Mn}	$NO_2^- - N$	$NO_3^- - N$	$NH_4^+ - N$	COD_{Mn}
2	0.42 ± 0.03^a	4.09 ± 0.07^a	0.06 ± 0.01^a	4.59 ± 0.08^a	80.96 ± 0.85^a	-4.66 ± 0.45^a
2.5	0.69 ± 0.01^b	3.79 ± 0.02^b	0.16 ± 0.01^b	4.87 ± 0.05^b	66.35 ± 0.94^b	14.66 ± 1.23^b
3	1.14 ± 0.05^c	$4.03 \pm 0.12^a, b$	0.26 ± 0.01^c	4.30 ± 0.02^c	44.79 ± 1.71^c	21.21 ± 2.12^c
4	1.56 ± 0.04^d	3.96 ± 0.07^{ab}	0.13 ± 0.02^{bd}	2.46 ± 0.09^d	23.55 ± 0.38^d	48.79 ± 3.07^d
5	2.16 ± 0.01^e	4.65 ± 0.10^e	0.07 ± 0.01^a	1.82 ± 0.08^e	0.86 ± 0.05^e	63.43 ± 0.39^e
6	2.74 ± 0.04^f	5.61 ± 0.08^d	0.11 ± 0.02^d	1.20 ± 0.09^f	0.46 ± 0.06^e	65.01 ± 0.46^e

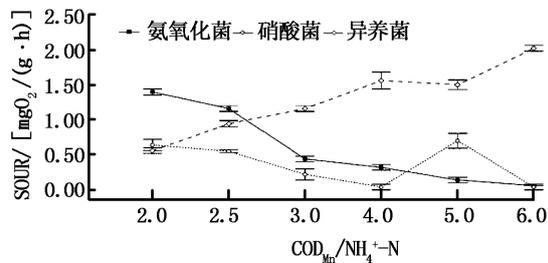


图 5 不同 $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ 下, OUR 变化

Fig. 5 The influence of $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ on OUR

3 结论

(1) 本试验 ACF 柱微生物固定后挂膜成熟时间为 15 d, 硝化细菌能比较好的附着于 ACF 填料表面。

(2) HRT 对于 ACF 填料柱在稳态后的 $NH_4^+ - N$ 去除效果有着较大的影响, 本实验中, 进水 $NH_4^+ - N$ 为 2 mg/L 左右时, 最佳 HRT 时间为 3.1 h, $NH_4^+ - N$ 去除率最高达到 79.41%, 相应的氨氧化菌 OUR 为 1.24 mg $O_2/(g \cdot h)$ 。

(3) HRT 为 3.1 h 时, 进水 $NH_4^+ - N$ 在达到一定的负荷后, ACF 填料柱在稳态后的 $NH_4^+ - N$ 去除率会明显下降。最佳进水 $NH_4^+ - N$ 负荷为

0.09 g/(kg·d), ACF 填料对于 $NH_4^+ - N$ 去除负荷为 0.07 g/(kg·d), $NH_4^+ - N$ 去除率为 80.21%, 相应的氨氧化菌 OUR 为 1.42 mg $O_2/(g \cdot h)$ 。

(4) 污水中 $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ 比对于 ACF 填料柱水处理效果有很大的影响, $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ 比为 2 时, $NH_4^+ - N$ 有很好的去除效率平均为 80.96%, 相应的氨氧化菌 OUR 为 1.40 mg $O_2/(g \cdot h)$; 随着 $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ 比的升高, 硝化细菌活性受到抑制, $NH_4^+ - N$ 去除率能力减弱; 而异养菌开始繁盛, COD_{Mn} 去除率上升, $COD_{Mn}/NH_4^+ - N$ 比升至 6 时, COD_{Mn} 去除率达到 64.58%, 相应的异养菌 OUR 为 2.02 mg $O_2/(g \cdot h)$ 。

参考文献:

- [1] Huguenin J E, Colt J. Design and operating guide for aquaculture seawater systems [M]. Amsterdam: Elsevier, 1989: 168-170.
- [2] 范福洲, 康勇, 孔琦, 等. 废水处理用生物膜载体研究进展 [J]. 化工进展, 2005, 12(24): 1331-1335.
- [3] 马放, 姚宏, 黄鹏, 等. 生物反应器去除 COD、氨氮和油的中试研究 [J]. 工业水处理, 2003, 23(10): 39-42.
- [4] 刘建广, 张晓健, 王占生. 温度对生物炭滤池处理高氨氮原水硝化的影响 [J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 233-236.

- [5] 刘建广,张晓健,王占生. BACF处理高氨氮进水的硝化与反硝化作用[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 69-73.
- [6] 张学军,沈曾民. 沥青基活性炭纤维的制备、结构及性能[J]. 新型炭材料, 1999, 14(2): 59-66.
- [7] 刘杰,何振坤,王绍棠. 碳纤维生物膜的形成机制(I)碳纤维表面特性对微生物固着化的影响[J]. 新型炭材料, 2002, 17(3): 20-24.
- [8] 何振坤,刘杰,王绍棠. 碳纤维生物膜的形成机制(II). 碳纤维表面特性对微生物活性与增殖的影响[J]. 新型炭材料, 2003, 18(1): 43-47.
- [9] 罗国芝,刘艳红,谭洪新,等. 新建海水生物滤器接种培养的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(6): 443-451.
- [10] 周娟娟,胡中华. 活性炭纤维的微生物固定方法研究[J]. 中国给水排水, 2005, 21(1): 45-48.
- [11] 陈洪斌,梅翔,高廷耀,等. 受污染源水生物预处理挂膜过程研究[J]. 水处理技术, 2001, 27(4): 196-199.
- [12] 桑军强,王志农,李福志,等. 饮用水生物处理中微生物量和活性的测定方法[J]. 环境污染理技术与设备, 2005, 8(6): 88-90.
- [13] 张娇,徐晓军,宋任达,等. 生物滴滤池去除氨气的挂膜实验研究[J]. 北方环境, 2005, 30(1): 19-21.
- [14] 杨书平,严煦世. 软性填料用于膜法生物消化的性能研究[J]. 上海环境科学, 1988, 7(11): 11-14.
- [15] Lazarova V, Manem J. Biofilm characteristic and activity analysis in water and wastewater treatment[J]. Wat Res 1995, 29(10): 2227-2245.
- [16] 尹艳娥. 新一代水处理技术研究—臭氧生物活性炭纤维. [D]. 上海:同济大学, 2007: 1-102.
- [17] Mohamad Y, Mitsuyo H, Makoto S. Removal Kinetics of ammonia by peat biofilter seeded with night soil sludge[J]. Fermentation and Bioengineering 1998, 85(5): 502-506.
- [18] 胡绍伟,杨凤林,刘思彤,等. 膜曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 416-420.
- [19] Satoh H, Okabe S, Norimatsu N, et al. Significance of substrate C/N ratio on structure and activity of nitrifying biofilm determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes[J]. Water Sci Tech 2000, 41(4-5): 317-321.