

自然通风生物滴滤池的填料挂膜特性研究

王闪闪 郭新超 贾冬靖[#]

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要 研究了自然通风生物滴滤池内浮石、聚氨酯两种填料的挂膜特性,考察不同工况下的污水净化规律。结果表明,浮石填料在生物滴滤池内的挂膜效果更好,挂膜成功后对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均有较好的去除效果,去除率大都分别达到 70%~85%、60%~80%,且小粒径浮石比大粒径浮石的去除效果更佳。聚氨酯填料在第 9 天挂膜成功,大粒径聚氨酯填料对 COD 的去除效果略好于小粒径聚氨酯填料,挂膜成功后两者对 COD 的去除率均可以达到 60%~80%,而对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果较差,去除率仅达到 10%~40%。浮石填料生物滴滤池对 TN、TP 的去除率较好,当水力负荷为 $0.85 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, TN、TP 去除率分别为 45.58%、38.44%,而聚氨酯填料生物滴滤池对 TN、TP 的去除率较差。浮石在挂膜生物量上占优势,聚氨酯的孔径较大,污水流经时停留时间较短,使得微生物不易附着其上。

关键词 生物滴滤池 填料 自然通风 挂膜

Experimental research on film-forming characteristics on the packings in the natural ventilation bio-trickling filter WANG Shanshan, GUO Xinchao, JIA Dongjing. (College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055)

Abstract: The film-forming characteristic of pumice and polyurethane packings in natural ventilation bio-trickling filter was investigated and compared. The COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal efficiency of bio-trickling filter during film-forming process as well as the TN, TP removal regular after film-forming were analyzed. The experimental results showed that pumice packing hanging membrane much easier. The pumice packing with diameter of 6-12 mm achieved better treatment efficiency than that of 12-20 mm pumice packing, while for polyurethane packing, the performance of large size packing (50 mm) was slightly better than the small ones (25 mm). After bio-film forming, the COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal rates of pumice packing were 70%-85%, 60%-80% respectively, while for polyurethane packing, COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal rates were 60%-80%, 10%-40% respectively. The bio-trickling filter filled with pumice packing presented perfect performance on TN, TP removal, under the hydraulic load of $0.85 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, the TN, TP removal rate reached 45.58%, 38.44% respectively, while the effectiveness of polyurethane packing filter was relative poor. The large aperture of polyurethane packing shortened the residence of sewage flow in filter, thus limited the attachment of microorganisms on packing.

Keywords: biological trickling filters; packing; natural ventilation; film-forming

近年来,我国城镇化建设速度加快,但由于经济条件等的制约,部分新兴小城镇的集中式污水处理设施建设不及时或无法保证正常运行,导致局部水环境污染加剧^[1]。在城镇污水处理中,能耗主要用于曝气供氧、搅拌和污水提升等^[2]。生物滴滤池^[3-5]作为一种附着生长的生物处理工艺形式,可通过填料生物膜上各种微生物的代谢活动去除水中污染物,采用生物滴滤池处理污水具有负荷低、硝化细菌停留时间长^[6]、可依靠自然通风供氧、一次投资和运行费低等特点,适用于土地资源丰富、相对分散的新兴小城镇的生活污水处理。

白永刚^[7]利用珍珠岩熔渣作填料研究了生物滴

滤池处理农村生活污水的效果,在最佳条件下, COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别达 85% 和 92%,但对 TN 和 TP 的去除效果不佳。杨敏^[8]对复合式生物滴滤池的污水处理效果进行了研究,发现其对有机污染物、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、磷都具有较好的去除效果,还取得了较好的污泥减量化效果。国外对生物滴滤池的研究早在 20 世纪 60、70 年代便进入高峰,并取得了大量的研究成果。ECKENFELDER^[9]提出了生物滴滤池处理效果模拟的数学模式,该模式得到了 GROMIEC 等^[10]的验证与完善;HOWELL 等^[11]研究了生物滴滤池填料上生物膜的脱落规律,发现生物膜内的传质速率、胞外多聚物的产生、细胞的新陈

第一作者:王闪闪,女,1988 年生,硕士研究生,主要从事污水处理方面的研究。[#] 通讯作者。

表 1 生物滴滤池各部分的尺寸说明
Table 1 The reactor height sizes of each part

项目	超高(H1)	填料高度(H2)	承托层和支撑板(H3)	间隙高度(H4)	集水区(H5)	总高度
数值/cm	5	60	5	5	15	95

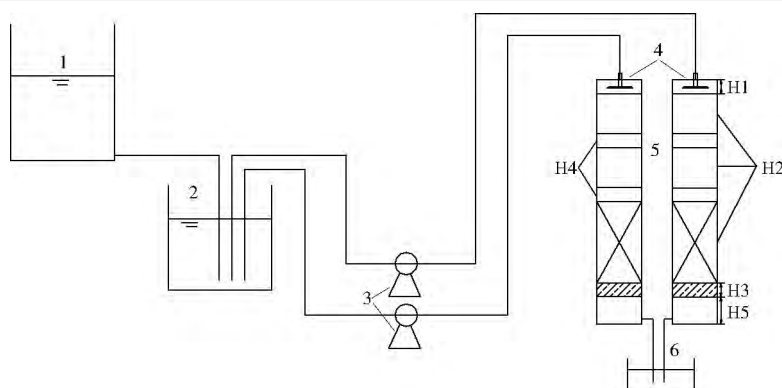


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of experimental device
1—水箱;2—水解池;3—蠕动泵;4—布水器;5—生物滴滤池;6—集水池

表 2 实验用水水质
Table 2 The quality of test water mg/L(除 pH 外)

水质指标	COD	NH_4^+-N	TN	TP	pH
数值	200~800	20~100	40~120	2.5~5.0	6~9

代谢及生物膜的种类与生物滴滤池的结构有关。

近年来,随着新材料不断涌现,生物滴滤池的填料选择也更加多样。本研究选择浮石、聚氨酯为填料进行生物滴滤池挂膜特性研究,考察不同工况下的污水净化规律,旨在为自然通风条件下生物滴滤池在生活污水处理中的应用提供参考。

1 实验方法

1.1 实验装置及方法

实验选用 2 座各自独立的生物滴滤池进行平行实验,实验装置见图 1。污水经水箱靠重力自流进入水解池,生物滴滤池间歇进水,每 15 min 为一个布水周期(进水 1 min 停止 14 min),每天进水量约 60 L。水流经自制布水器呈滴状滴入生物滴滤池的配水格栅,然后进入填料层,污水经过填料层净化,最终汇集至生物滴滤池底部集水池,沉淀后经出水管排出,测定进、出水水质。

生物滴滤池中 3 层填料的尺寸分别为:上层、中层 16 cm×17 cm×15 cm,下层 16 cm×17 cm×30 cm。生物滴滤池各部分高度如表 1 所示。

1.2 实验用水及水质

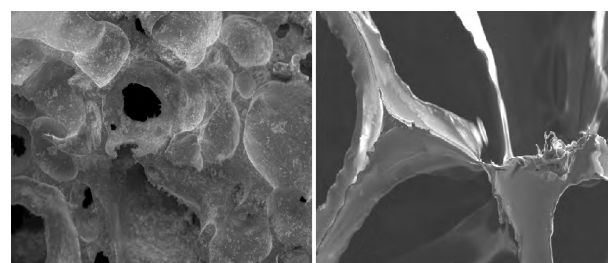
实验用水取自西安建筑科技大学校园污水管网,经孔径为 2 mm 的钢丝网过滤预处理后进入水箱。实验用水水质见表 2。

1.3 实验填料

实验选用 2 种填料进行对比研究,一种是产自山西的黑色浮石,另一种是产自浙江杭州的蓝色聚氨酯,填料参数见表 3。图 2 为浮石和聚氨酯放大 100 倍时的扫描电镜照片。

表 3 填料参数
Table 3 The parameters of pickings

填料	粒径/mm	孔隙率/%	装填空隙率/%	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
浮石	6~12,12~20	68	54	0.58
聚氨酯	25,50	≥ 90	80	23.30



(a) 浮石

(b) 聚氨酯

图 2 填料的扫描电镜照片

Fig. 2 The SEM of packings

1.4 测定与分析方法

COD 采用重铬酸钾法测定; NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法测定;TN 采用过硫酸钾氧化—分光光度法测定;TP 采用钼锑抗分光光度法测定;pH 采用 PHS-3C 型精密酸度计测定。

2 结果与分析

2.1 不同填料的静态吸附实验

静态吸附实验所用填料均为破碎后的浮石、聚氨酯。分别称取浮石 13 份(每份 5 g)、聚氨酯 13 份(每份 1 g),置于 26 个 250 mL 的具塞锥形瓶中,加入 200 mL 配水,于 150 r/min、15 °C 进行静态吸附。实验用水的 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 平均值分别为 407、34.1、6.2 mg/L。

实验开始后,在设定时间点取样测 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度,计算吸附量(见式(1))。当吸附量几乎不随时间变化时,即认为吸附达到平衡,绘制吸附量随时间的变化曲线,结果见图 3。

$$q_t = (c_0 - c_t)V/W \quad (1)$$

式中: q_t 为 t 时刻污染物的吸附量,mg/g; c_0 为污染物初始质量浓度,mg/L; c_t 为吸附 t 时刻后污染物质量浓度,mg/L; V 为溶液体积,L; W 为填料用量,g。

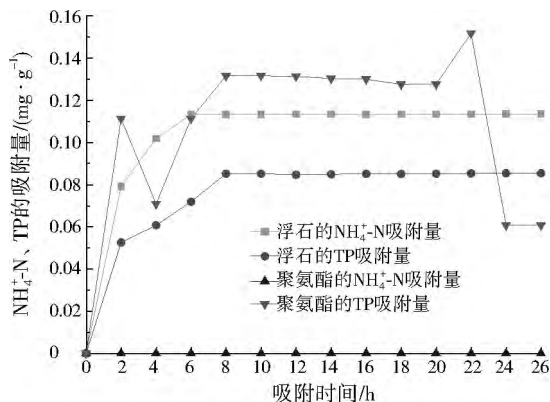


图 3 不同填料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的吸附情况

Fig. 3 Absorption of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP on different pickings

由图 3 可知,填料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的吸附速率(聚氨酯对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附除外)刚开始较快,此后则趋于平缓,直至吸附达到平衡。其中,浮石填料吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 达到平衡大概需 6 h,平衡吸附量约为 0.11~

0.12 mg/g;聚氨酯填料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 基本没有吸附效果。浮石填料吸附 TP 达到平衡大概需 8 h,平衡吸附量约为 0.08~0.09 mg/g;聚氨酯填料对 TP 的吸附效果不太稳定,达到平衡大概也需 8 h,平衡吸附量为 0.13 mg/g。

2.2 不同填料的碳化细菌挂膜特性比较

采用逐渐增大水力负荷的方法对填料进行挂膜研究。几天后填料上开始出现肉眼可见的黄色膜状物质,当生物滴滤池出水 COD<100 mg/L,出水水质稳定时,则认为该工况下挂膜成功。

由图 4 可知,装填了粒径为 6~12、12~20 mm 浮石的生物滴滤池分别从第 6 天与第 10 天开始 COD 去除率趋于稳定,此后随着水力负荷的加大,两者对 COD 的去除率大都维持在 70%~85%。浮石填料生物滴滤池的抗冲击负荷能力较强,随着水力负荷的增加,出水 COD 浓度变化不大,且小粒径填料的 COD 去除效果相对更好,当水力负荷从 $0.73 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 逐渐增加到 $1.45 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,挂膜成功后除个别情况外,出水 COD 质量浓度基本稳定在 50~150 mg/L。

由图 5 可知,粒径为 25、50 mm 的聚氨酯均能在第 9 天挂膜成功,此 2 种粒径填料对 COD 的去除率大多维持在 60%~80%,随着反应的运行,由于填料表面生物膜会脱落(出水中含有黄色絮状生物膜),故 COD 去除率有所波动。挂膜成功后,除个别情况外,聚氨酯填料生物滴滤池的出水 COD 基本稳定在 80~150 mg/L,大粒径填料对 COD 的去除效果总体略好。但随着水力负荷的增加,当水力负荷增加到 $1.19 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水 COD 浓度明显升高,说明聚氨酯填料的抗水力负荷冲击能力较弱。

2.3 不同填料的硝化细菌挂膜特性比较

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除情况可以从宏观上反映挂膜阶段硝化细菌的生长状况,所以研究硝化细菌的挂膜效果具有重要意义。

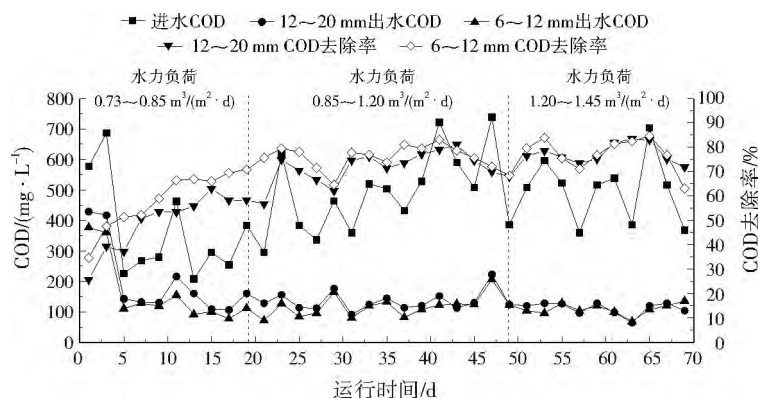


图 4 不同粒径浮石填料对 COD 的去除率比较

Fig. 4 COD removal rate of pumice packing with different particle sizes in the trickling filter

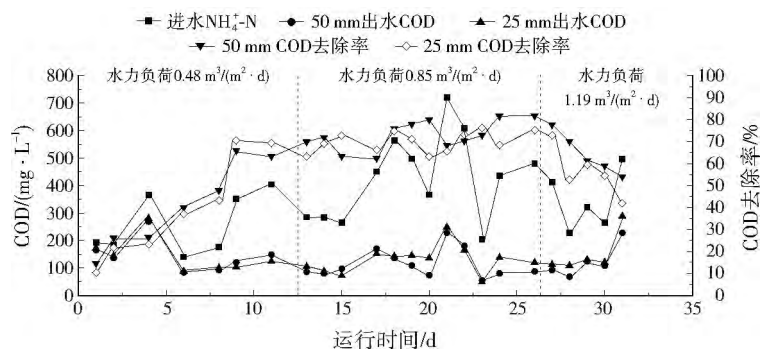


图5 不同粒径聚氨酯填料对COD的去除率比较

Fig. 5 COD removal rate of polyurethane packing with different particle sizes in the trickling filter

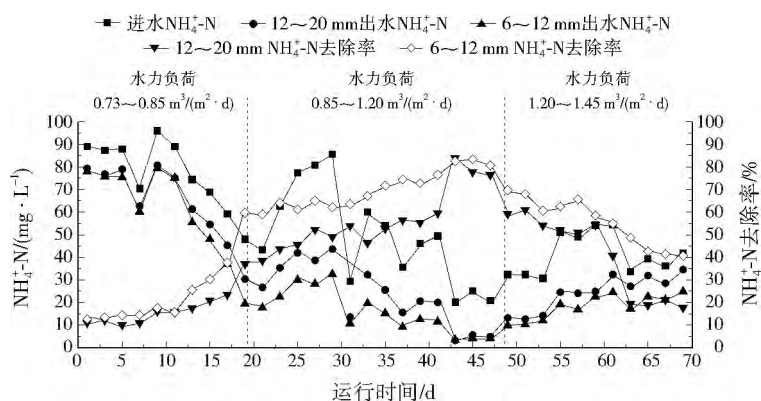


图6 不同粒径浮石填料的NH₄⁺-N去除率比较

Fig. 6 NH₄⁺-N removal rate of pumice packing with different particle sizes in the trickling filter

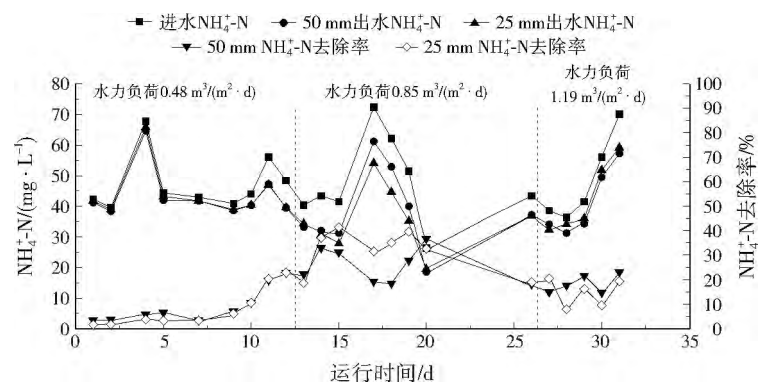


图7 不同粒径聚氨酯填料的NH₄⁺-N去除率比较

Fig. 7 NH₄⁺-N removal rate of polyurethane packing with different particle sizes in the trickling filter

挂膜初期,生物滴滤池内NH₄⁺-N去除率很低,随着时间的推移,硝化细菌在填料上不断富集、生长繁殖,从而对NH₄⁺-N产生一定的去除效果。由图6可知,粒径为6~12 mm的浮石在生物滴滤池内挂膜优势明显,20 d左右对NH₄⁺-N的去除率就可以达到60%左右,随后去除率波动在60%~80%;12~20 mm的浮石生物滴滤池挂膜成功后对NH₄⁺-N的去除大都在50%~60%。挂膜成功后,随着水力负荷的不断增加,出水NH₄⁺-N浓度先降低后升高,当水力负荷在0.85 m³/(m²·d)时,NH₄⁺-N的去除效果相对较好,随着水力负荷继续增加,出水NH₄⁺-N

浓度开始上升,去除率下降。

由图7可知,聚氨酯填料生物滴滤池对NH₄⁺-N的去除效果始终较差,去除率仅为10%~40%。当水力负荷为0.85 m³/(m²·d)时,NH₄⁺-N去除效果最好,去除率可达到40%左右。

由前面的静态吸附实验可知,浮石对NH₄⁺-N具有一定的吸附性,使得硝化细菌更容易在浮石表面生长,也使得生物滴滤池更耐受水力冲击负荷^[12]。童君等^[13]认为,影响生物滴滤池NH₄⁺-N去除效果的首要因素是液相与生物膜相之间的NH₄⁺-N传质速率,而非单位体积填料上的硝化细菌活性。由于

聚氨酯填料单个体积较大,产生的装填空隙率较大,对污水的阻力小,污水流经填料时在其表面的停留时间较短,其中的污染物还来不及传质到生物膜中被硝化细菌分解就已经从池底部流出,故污染物去除率偏低。

2.4 不同填料在各条件下的氮、磷去除效果比较

由图 8 可知,当水力负荷分别为 $0.85 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,浮石填料生物滴滤池对 TN、TP 的去除效果均最好,去除率分别为 45.58%、38.44%。过大或过小的水力负荷均不利于 TN、TP 的去除。由图 8 还可知,聚氨酯填料生物滴滤池的 TN、TP 去除率均很低。这可能是由于聚氨酯在池中的装填空隙率较大,使池内部通风效果较好^[14],池内水相的溶解氧含量较高,不利于反硝化脱氮反应的进行;另一方面,通过对填料上生物膜的电镜观察结果可知,聚氨酯填料上的生物膜量较少,挂膜效果不好, NH_4^+-N 的去除率较低,不利于后续的反硝化反应,从而影响到 TN 的去除。

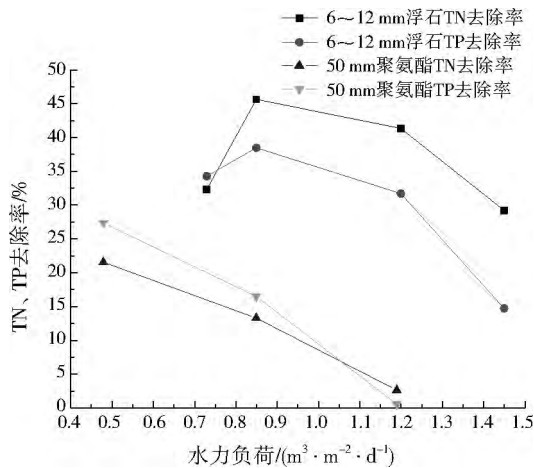


图 8 不同水力负荷下的 TN、TP 去除率比较

Fig. 8 TN and TP removal of trickling filter under different hydraulic loading

该实验是在冬季运行的,平均室温为 14°C 左右,生物滴滤池内温度与室温的温差为 3°C 左右,而同步硝化反硝化脱氮的最佳温度在 $20 \sim 28^\circ\text{C}$ ^[15],因此池内 TN 的去除效果不佳也可能是受到温度的影响。

2.5 不同填料的表层生物量比较

根据生物滴滤池的特性,滤池中的微生物主要集中在填料表层^[16]。实验时,对填料表层的生物膜采用超声波剥落^[17]:首先用蒸馏水冲洗掉填料表层的杂质,然后取一定体积的填料置于水中,经超声后测量脱落于蒸馏水中生物膜的 COD,以表征生物量的多少,结果见图 9。

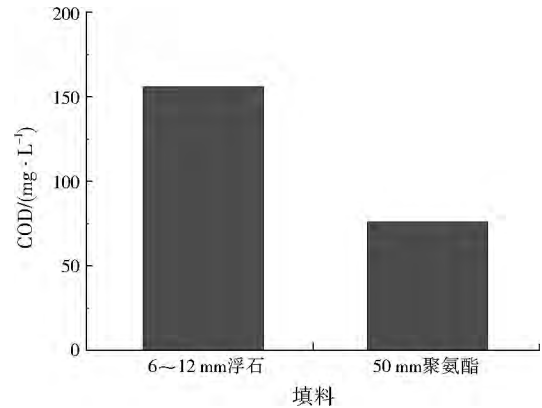


图 9 不同填料的表层生物量比较

Fig. 9 The surface bio-film quantity of different pickings

由图 9 可知,浮石在挂膜生物量上占优势,聚氨酯的比表面积虽然比浮石大很多,但是浮石微孔居多,微生物易附着在其表面,而聚氨酯填料的孔径较大,都在 $2 \sim 7 \text{ mm}$,污水流经时停留时间较短,使得微生物不易附着其上。

3 结 论

(1) 浮石填料在生物滴滤池内的挂膜效果更好,挂膜成功后对 COD、 NH_4^+-N 均有较好的去除效果,去除率大都分别达到 $70\% \sim 85\%$ 、 $60\% \sim 80\%$,且小粒径比大粒径浮石的去除效果更佳。聚氨酯填料在第 9 天挂膜成功,大粒径聚氨酯填料对 COD 的去除效果略好于小粒径聚氨酯填料,挂膜成功后两者对 COD 的去除率均可以达到 $60\% \sim 80\%$,而对 NH_4^+-N 的去除效果较差,去除率仅达到 $10\% \sim 40\%$ 。

(2) 浮石填料生物滴滤池对 TN、TP 的去除率较好,当水力负荷为 $0.85 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, TN、TP 去除率分别为 45.58%、38.44%,而聚氨酯填料生物滴滤池对 TN、TP 的去除率较低。

(3) 浮石在挂膜生物量上占优势,聚氨酯的孔径较大,污水流经时停留时间较短,使得微生物不易附着其上。

参考文献:

- [1] 董启荣. 生物滴滤池研究现状及前景展望[J]. 环境科技, 2009, 22(2): 62-65.
- [2] 孟德良, 刘建广. 污水处理厂的能耗与能量的回收利用[J]. 给水排水, 2002, 28(4): 18-20.
- [3] 高廷耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [4] 余浩. 水解池—滴滤池—人工湿地处理农村生活污水研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [5] 余珍. 低能耗生物滴滤池技术的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.

(下转第 68 页)

表2 污泥培养前后硝化细菌计数
Table 2 The count of nitrifying bacteria in sludge

项目	稀释度						细菌数量/(cfu·mL ⁻¹)
	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	
重复数		3	3	3	3	3	3
亚硝酸盐菌阳性管数	培养前	2	0	0	0	0	9.0×10
	1号反应器	3	3	3	3	0	2.5×10 ⁶
	2号反应器	3	3	3	3	2	2.0×10 ⁶
硝酸盐菌阳性管数	培养前	3	2	0	0	0	9.5×10 ²
	1号反应器	3	3	3	1	0	4.5×10 ⁴
	2号反应器	3	3	3	3	1	7.5×10 ⁴
空白对照		0	0	0	0	0	0

明,两种培养方式下,末期微生物均以杆菌、球菌为主。

(3) 全自养时,培养后亚硝酸盐细菌和硝酸盐细菌个数分别达到了 2.5×10^6 、 4.5×10^4 cfu/mL,分别是培养前的 27.8×10^3 、47.4 倍。COD:N=1.7:1.0 时,反应器中相应值为 2.0×10^6 、 7.5×10^4 cfu/mL,分别是培养前的 22.2×10^3 、78.9 倍。培养后两者亚硝酸盐细菌和硝酸盐细菌处于同一数量级上。

参考文献:

- [1] 李谷,黄正,范玮,等.硝化细菌富集方法的研究[J].淡水渔业,2000,30(9):36-38.
- [2] 楼洪森,杨云龙,方明亮.高效低温硝化细菌培养方法的研究[J].工业水处理,2013,33(2):42-44.
- [3] 屈计宁,金志刚,何群彪,等.高效硝化细菌的富集技术研究[J].同济大学学报:自然科学版,1999(3):351-354.
- [4] 陆洪省,王厚伟.活性污泥中高效硝化细菌的分离与初步鉴定[J].安全与环境工程,2013,20(1):60-62.
- [5] 蒋进元,陈梅娟,赵鑫,等.好氧活性污泥中自养硝化细菌分离方法研究[J].环境工程学报,2010,4(12):2653-2656.
- [6] HU J,LI D,TAO Y,et al. Effect of acetate on nitrite oxidation in mixed-population biofilms[J]. Journal of Bioscience and Bio-engineering,2008,106(6):580-586.
- [7] LU H,OEHMEN A,VIRDIS B,et al. Obtaining highly enriched cultures of *Candidatus Accumulibacter* phosphates through alternating carbon sources[J]. Water Research,2006,40(20):3838-3848.
- [8] HANAKI K,WANTAWIN C,OHGAKI S. Effects of the activity of heterotrophs on nitrification in a suspended-growth reactor[J]. Water Research,1990,24(3):289-296.
- [9] 张子健,吴伟伟,王建龙.全自养硝化污泥的颗粒化过程研究[J].环境科学,2010,31(1):140-146.
- [10] 金志刚,屈计宁,何群彪.硝化细菌富集技术分析及其方法研究[J].上海环境科学,1998,17(8):16-19.
- [11] 江惜卿.微波密封消解法快速测定 COD 技术应用研究[J].环境,2006(S2):28-29.
- [12] 王家玲.环境微生物学实验[M].北京:高等教育出版社,1988.
- [13] 马放.污染控制微生物学实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.
- [14] 陈金声,史家梁,徐亚同.硝化速率测定和硝化细菌计数考察

- 脱氮效果的应用[J].上海环境科学,1996,15(3):18-20.
- [15] 陈捷音.水中亚硝化细菌和硝化细菌检测方法的探讨[J].环境监测管理与技术,2007,9(3):49-51.
- [16] 刘冰,侯春芳,付保荣.硝化细菌 MPN-Griess 检测方法的改进[J].现代仪器,2006,12(4):44-45.
- [17] 倪红,熊哲,张珊,等.多孔陶粒固定化微生物效果及扫描电镜观察[J].湖北大学学报:自然科学版,2011,33(2):182-186.
- [18] 杨红艳,龙秀娟,李清华.硝化细菌富集培养及处理富营养化水体应用研究[J].环境保护科学,2007,33(6):50-52.

编辑:陈泽军 (修改稿收到日期:2014-05-06)

(上接第 63 页)

- [6] OGA T,SUTHERSAN S,GANCZARZYK J J. Some properties of aerobic biofilms[J]. Environ. Technol.,1991,12(5):431-440.
- [7] 白永刚.滴滤池—人工湿地技术处理农村生活污水应用研究[D].南京:东南大学,2005.
- [8] 杨敏.有机废水低能耗分散式生物处理技术的研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [9] ECKENFELDER W W. Industrial water pollution control [M]. New York:McGraw-Hill,1966.
- [10] GROMIEC M J,MALINA J F. Performance of plastic medium in trickling filters[J]. Water Reserch,1972,6(11):1321-1332.
- [11] HOWELL J A,ATKINSON B. Sloughing of microbial film in trickling filters[J]. Water Reserch,1976,10(4):307-315.
- [12] SHENG B H,GANG X,HAI N K. The performance of BAF using natural zeolite as filter media under conditions of low temperature and ammonium shock load[J]. J. Hazard. Mater.,2007,143(1/2):291-295.
- [13] 童君,吴志超,张新颖,等.自然通风沸石生物滴滤池脱氮机理[J].环境科学研究,2010,23(11):1436-1440.
- [14] 刘硕,吕缙,黄赞芳. BAF 同步硝化反硝化影响因素研究[C]//2010 年水处理新技术新工艺及给(污)水厂运行管理高级研讨会论文集.北京:冶金工业出版社,2010:123-129.
- [15] 章胜红,陈季华,孙志国.曝气生物滤池废水深度处理同步硝化反硝化机理及影响因素[J].东华大学学报,2007,33(1):125-129.
- [16] 李方,杨波,田晴,等.滤层高度对升流式曝气生物滤池硝化性能的影响[J].水处理技术,2008,34(10):46-49.
- [17] 朱小彪,徐春华,高宝玉,等.曝气生物滤池生物量和生物活性的实验研究[J].环境科学学报,2007,27(7):1135-1140.

编辑:卜岩枫 (修改稿收到日期:2013-12-18)