

论述与研究

## 脱氮生物填料模块的快速启动及处理黑臭水体功效

李兴强<sup>1</sup>, Tirhaga Saeed<sup>2</sup>, 韦 甦<sup>1,3</sup>, Edgar Schicker<sup>2</sup>, 李 军<sup>3</sup>

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 埃尔朗根-纽伦堡大学 技术学院, 德国; 3. 浙江工业大学 环境学院, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:** 针对城市微污染水体, 构建了集聚聚氨酯生物填料、水生植物和底泥于一体的模块系统, 并对其快速启动和处理效果进行了分析。预先采用城镇污水处理厂活性污泥对聚氨酯生物填料进行浸没装填, 能实现处理模块的快速启动。通过分阶段的连续流运行处理黑臭水体,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  可以从 5~30 mg/L 降到 4~6 mg/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  从 5~9 mg/L 降到 0~0.5 mg/L, TN 从 5~10 mg/L 降到 0.5~2.0 mg/L, 去除率分别达 75%、97%、80%, 实现了同步硝化反硝化脱氮。水生植物在聚氨酯生物填料基质上生长正常, 底泥中的微型动物实现了污泥的减量。

**关键词:** 黑臭水体; 聚氨酯生物填料; 模块; 快速启动; 脱氮

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0001-05

### Rapid Start-up and Nitrogen Removal Efficiency of Biofilm Carrier Module for Treatment of Black and Odorous Water

LI Xing-qiang<sup>1</sup>, Tirhaga Saeed<sup>2</sup>, WEI Su<sup>1,3</sup>, Edgar Schicker<sup>2</sup>, LI Jun<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Technology College, Friedrich - Alexander University of Erlangen - Nürnberg, Germany; 3. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** A module system assembling polyurethane bio-carrier, aquatic plants and sediments was designed and built for treating slightly-polluted river water. The device could be started rapidly by loading the polyurethane bio-carrier with the activated sludge of municipal wastewater treatment plant in advance. Simultaneous nitrification and denitrification was achieved by processing black and odorous water in a way of phased continuous flow mode. The results indicated that  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN could be reduced from 5~30 mg/L, 5~9 mg/L and 5~10 mg/L to 4~6 mg/L, 0~0.5 mg/L and 0.5~2.0 mg/L respectively, and the removal rates could reach to 75%, 97% and 80%, respectively. The aquatic plants could grow in polyurethane bio-carrier. The microfauna in sediments attained sludge reduction.

**Key words:** black and odorous water; polyurethane bio-carrier; module; rapid start-up; nitrogen removal

随着我国经济的快速发展和城市化进程的不断推进,部分城市水体污染日益严重。由于城市水体多处于封闭或半封闭状态,环境承载能力较差,污染物浓度超标严重,出现了季节性或终年黑臭现象,造成河道、湖泊景观及生态环境问题日益凸显。

水体污染并黑臭的主要成因有:外源污染物排放、内源底泥释放、由水动力与水温等影响造成的溶解氧下降等<sup>[1]</sup>。城市黑臭水体的治理思路总体上以外源减排为基础,内源控制为前提,水质净化为手段,补水活水和生态恢复为保障。目前黑臭水体治理主要有物理、化学、生物生态技术等。物理、化学技术虽然被广泛运用,但实践表明仍有许多不足,尤其是在修复黑臭水体的同时不能提升水体自净能力,因此难以持续应用。生物生态治理技术主要利用生物(原生动、微生物、植物)的吸收转化等代谢活动来实现污染物的降解和转化,最终达到净化水体、恢复生态系统的目的,并具有经济、效果好、操作方便、无二次污染、美化环境等优点<sup>[2~4]</sup>。

脱氮除磷是水体治理的工作重点和研究热点。其中,水体中的磷可以通过物化方法快速去除,而氮往往依靠生物作用,亟需针对微污染水体开发一种快速高效的脱氮工艺。景观水体的污染治理更是给水体脱氮提出了景观协调、启动快速、设备简便、造价经济等要求。笔者针对城市微污染水体,提出一种基于生物填料的模块化水处理脱氮技术思路,并对其快速启动及处理效果进行了试验和分析。

## 1 材料和方法

### 1.1 脱氮生物填料模块的构建

针对大型或一体化水体处理设备投资大、运行管理要求高、与环境不太协调等问题,以简便、高效、可重复利用为原则,提出了一种模块化的脱氮处理方案,如图1所示。

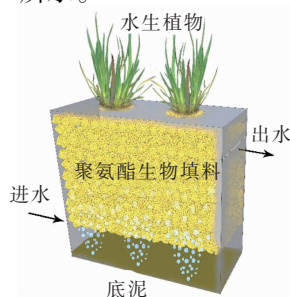


图1 脱氮模块示意

Fig.1 Schematic diagram of nitrogen removal module

按方案构建的试验装置由水生植物、聚氨酯生物填料和底泥组成,长为70 cm、宽为30 cm、高为60 cm(含10 cm超高),有效容积为105 L,分上、下两部分。其中,上部装填生物填料,装填率约为70%,并在顶部开孔用于栽植水生植物;底部利用污水处理厂脱水泥饼作为模拟底泥(厚度约为5 cm),并投放少量红虫,起到软化、消解底泥的作用,在底泥表面均匀布置曝气头进行微曝气。

生物填料选用聚氨酯填料,它是一种多孔悬浮填料,与其他填料相比具有较高的比表面积,可达到 $1\,000 \sim 5\,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,孔隙率在90%以上,不仅有利于水中物质的传递与扩散,对增大反应器内微生物量和提高处理效果也是非常有益的<sup>[5]</sup>。另外,聚氨酯填料的密度一般都小于水,大量此种填料可形成人工浮岛,可在其上种植适宜景观及水质改善的水生植物;其次,该填料质轻易运输,将其置于河道中用于长效处理后,还可回收至污水处理厂进行生物再生利用。该装置的设计实现了水生植物、脱氮处理填料以及底泥的模块化拼接,可根据实际需求进行现场景观协调以及处理体量的调整。

### 1.2 运行方法

依据运行方式不同,将试验装置运行分为三个阶段,具体操作条件如表1所示。第I阶段为快速启动-稳定阶段,主要研究装置的启动和处理稳定性;第II阶段为负荷提升阶段,主要研究装置的处理能力;第III阶段为快速处理阶段,重点研究装置的高负荷适应能力。运行过程中监测进出水DO、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总氮及正磷酸盐的含量。

表1 试验装置在不同阶段的运行条件

Tab.1 Operating conditions of module at different phases

阶段	运行天数/d	进水流量/ ( $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ )	HRT/h	NLR/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )
I	67	6.5	16	7.4 ~ 14.8
II	26	9.5	11	10.8 ~ 21.7
III	29	20	5	22.8 ~ 45.7

注: 运行方式为连续流,控制曝气量为 $10 \text{ L/min}$ 。

### 1.3 填料装填与进水水质

聚氨酯填料的初期生物装填在污水处理厂好氧池中进行,采用完全浸没曝气的方法接触24 h,取出后再自然风干,这有利于微生物的附着和运输。装填后的填料孔隙中附着了大量活性污泥(如图2所

示)。

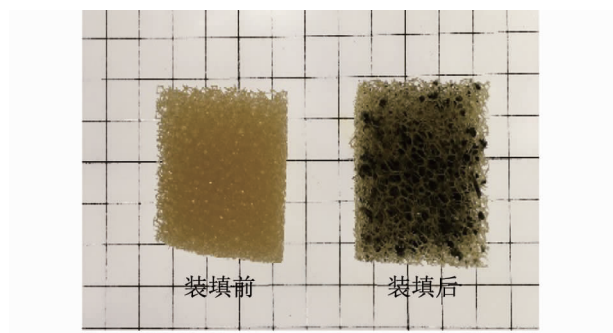


图2 装填前后的聚氨酯填料对比

Fig. 2 Polyurethane carrier without and with sludge loading

装置进水采用人工配水,含10%的生活污水(COD约为150 mg/L,氨氮约为40 mg/L),其余采用实验室分析纯药品配制(模拟被外源污染的地表水体,且有微臭),其水质如下:COD<sub>Mn</sub>为5~30 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为5~9 mg/L, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P为1.0~1.5 mg/L, TN基本为5~10 mg/L。

#### 1.4 分析方法

COD<sub>Mn</sub>:酸性高锰酸盐指数法;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:纳氏试剂分光光度法;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N:重氮耦合分光光度法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:氨基磺酸紫外分光光度法;TN:碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P:钼酸铵分光光度法;DO:WTW Multi 3410手持数字多参数计。

## 2 结果与讨论

将装填后的聚氨酯填料置于试验装置中,上部栽种菖蒲,下部用污水处理厂出厂泥饼铺填,并用配制污水快速启动,在开始的几天内装置就能达到较好的处理效果。

### 2.1 污染物去除和DO变化

#### 2.1.1 对COD<sub>Mn</sub>的去除

三个运行阶段进出水COD<sub>Mn</sub>的变化见图3。

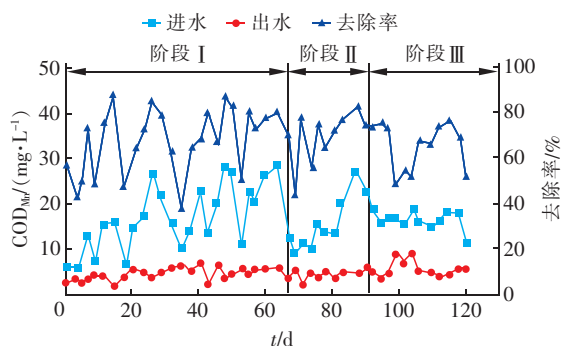


图3 对COD<sub>Mn</sub>的去除

Fig. 3 Removal of COD<sub>Mn</sub> at different phases

该装置启动迅速,而且运行稳定,具有较强的抗负荷冲击能力,出水COD<sub>Mn</sub>可降至4~6 mg/L以下,平均去除率在75%以上。聚氨酯填料为微生物生长提供了稳定接触面和较长的生长时间,形成了与低负荷环境相适应的生物降解群落。由于该填料孔隙率高,附着生物量大,所以在后期负荷提高后仍有较强的处理能力。

#### 2.1.2 对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TN的去除

该装置对氨氮的降解效果十分显著,而且在不同阶段基本一致,出水氨氮低至0~0.5 mg/L。但出水TN浓度随着运行条件的变化而变化,在第I阶段,装置在20 d时就具有了TN去除能力(见图4),说明聚氨酯生物填料上的生物膜具有同步硝化反硝化能力。

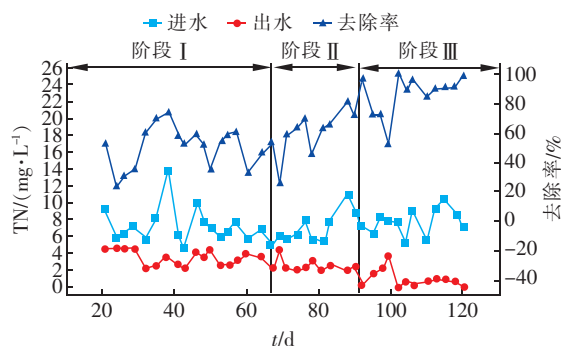


图4 对总氮的去除

Fig. 4 Removal of TN at different phases

聚氨酯填料具有较高的附着生物量,随着生物量的增长,水中DO向生物膜内扩散的阻力增加,最终形成好氧-缺氧-厌氧分层构造,为进行同步硝化反硝化创造了条件<sup>[6~8]</sup>。这与吕鑑<sup>[9]</sup>、马金霞<sup>[5]</sup>等人的研究结果相一致。另外,随着负荷的增加, TN去除率呈上升趋势,在第III阶段尤为明显,平均去除率超过了80%,说明运行过程中DO的控制对TN的去除有一定影响。由于氨氮的去除需要好氧环境,水中溶解氧低会抑制硝化菌的活性,但即使是在第III阶段氨氮的去除效果还是非常理想的(曝气量还可以降低)。分析认为,在相同的曝气量下,当负荷较大时会消耗更多的DO,使得生物膜中溶解氧的梯度进一步降低,有利于生物膜内厌氧层的加厚,进一步提高反硝化效果<sup>[10]</sup>。

#### 2.1.3 进出水DO变化

在10 L/min的曝气条件下,进水DO基本为零,曝气提供的氧一部分用于微生物的呼吸作用,一



部分溶解在水体里,第Ⅰ、Ⅱ阶段的出水 DO 在 5 mg/L 以上,即使第Ⅲ阶段最终出水 DO 也都在 3 mg/L 以上(见图 5)。在第Ⅲ阶段加大进水负荷之后,出水 DO 浓度明显下降,这一方面说明第Ⅰ、Ⅱ阶段的曝气量可以适当降低,另一方面也说明了负荷增加后,水体中 DO 消耗快,总体溶解氧水平下降,这对同步硝化反硝化有明显的促进作用。

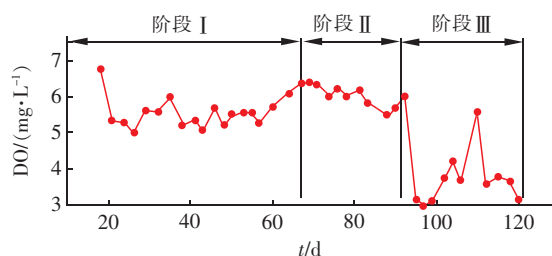


图 5 DO 的变化

Fig. 5 Change of DO in effluent at different phases

## 2.2 底泥的变化

在整个试验过程中装置没有排泥操作,但底泥的量增加并不明显。经分析,聚氨酯填料的多孔结构和高孔隙率非常有利于生物膜的附着和生长,其本身结构也可以很好地抵抗水力剪切作用,致使沉降污泥较少。另外投放的红虫生长状态良好(见图 6),在一定程度上消解了部分污泥。所以将该装置用于水体治理修复,不会造成剩余污泥积累问题。



图 6 底泥的形态

Fig. 6 Speciation of sediment

试验中还观察到填料层底部生长了大量微生物的填料会沉至底泥表面,经过一段时间的消解,聚氨酯生物填料减重后会重新上浮。这说明填料模块与底泥之间存在功能相互协调、互补的作用,在一定程度上缓解了填料因堵塞而失去过滤截留的能力。

## 2.3 植物的生长

装置在顶部选种了菖蒲,它是对水质改善非常有益的水生植物之一。图 7 为运行 30 d 后的试验装置,可知填料为植物提供了良好的基质,其长势良好。由于植物本身对水体中的污染物具有一定的吸收作用,其根系附近营造的小环境及吸附在根系、杆上的微生物对污染物也有降解作用,最终与底部的物化、生化处理构成一个小的生态系统。在装置顶部栽种不同植物不仅可以提高水体净化效果,还可以美化环境,在实际应用中具有一定的优势。



图 7 运行 30 d 后的试验装置

Fig. 7 Situation of module after 30 days operation

## 2.4 处理工艺评价

① 快速启动。将聚氨酯填料浸没在污水处理厂好氧池中进行生物装填,操作简便,且装填后的填料能够迅速发挥作用,启动时间极短。

② 同步硝化反硝化。附着在聚氨酯填料上的生物膜形成好氧-缺氧-厌氧分层构造,为进行同步硝化反硝化创造了条件,能够实现对 TN 的高效去除。

③ 模块化设计。该装置针对微污染水体进行模块化设计,实现了景观生态、功能微生物及原生微生物的功能对接,还可根据实际需求进行现场景观协调及处理体量的调整,具有较强的工程实用性。

④ 填料的防堵塞。模块化设计,载体微生物、植物和底泥的协同,缓解了填料的堵塞。上向流造成填料层底部生物膜增长快,当增至比水重时,会沉入底泥区,经微型动物减量后再重新回到填料层。

⑤ 物化、生化和生态的结合。采用聚氨酯填料能够对水体中的 SS 进行截留;其孔隙中附着的微生物通过生化作用可以有效降低 COD 和氮浓度;顶部种植的植物不仅对水体有净化作用,还能美化环

境。通过该模块化处理装置构成的小型生态系统实现了物化、生化和生态处理技术的有效结合。

### 3 结论

利用聚氨酯生物填料为主,结合水生植物和底泥构建的处理模块,具有启动快、运行稳定、环境亲和性强等特点,并能够实现对黑臭水体的有效处理,对COD、氨氮和TN的去除率分别可以达到75%、97%、80%,实现了同步硝化反硝化脱氮;出水富氧程度较好,水体清澈无味。水生植物能够在聚氨酯生物填料形成的基质上正常生长,底泥中的微型动物在一定程度上缓解了填料堵塞,且实现了污泥减量。模块化设计协调了物化、生化和生态的功效,还可以根据实际需求进行合理调整。

### 参考文献:

- [1] 王旭,王永刚,孙长虹,等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报,2016,27(4): 1331-1340.  
Wang Xu, Wang Yonggang, Sun Changhong, *et al.* Formation mechanism and assessment method for urban black and odorous water body: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1331-1340 (in Chinese).
- [2] 廖伟伶,黄健盛,丁健刚,等. 我国黑臭水体污染与修复技术研究现状[J]. 长江科学院院报,2017,34(11):153-158.  
Liao Weiling, Huang Jiansheng, Ding Jiangang, *et al.* Study on pollution status and remediation technologies of malodorous black water body in China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(11):153-158(in Chinese).
- [3] 张列宇,王浩,李国文,等. 城市黑臭水体治理技术及其发展趋势[J]. 环境保护,2017,13(5):62-65.  
Zhang Lieyu, Wang Hao, Li Guowen, *et al.* Management technology and development trend for urban black and odorous water body [J]. Environmental Protection, 2017, 13(5):62-65(in Chinese).
- [4] 倪永炯,李军,韦甦,等. 城市小型景观水体水质控制生态工程案例[J]. 中国给水排水,2017,33(12):40-44.  
Ni Yongjiong, Li Jun, Wei Su, *et al.* Cases of ecological project for water quality protection in small urban landscape water bodies [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12):40-44(in Chinese).
- [5] 马金霞,张堃,傅大放,等. 聚氨酯填料复合式动态膜

反应器脱氮性能研究[J]. 环境工程,2014,11(1):42-45.

- Ma Jinxia, Zhang Kun, Fu Dafang, *et al.* Study on nitrogen removal performance of hybrid dynamic membrane bioreactor with polyurethane carrier materials[J]. Environmental Engineering, 2014, 11(1):42-45 (in Chinese).
- [6] Chu L B, Wang J L. Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed bio-film reactor for treating wastewater with a low C/N ratio [J]. Chemosphere, 2010, 83(1):63-68.
- [7] Lim J W, Seng C E, Lim P E, *et al.* Nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactor using polyurethane-foam cubes of various sizes as carrier materials [J]. Bioresour Technol, 2011, 102(21):9876-9883.
- [8] Chen Y, Wang L, Ma F, *et al.* Tracking composition of microbial communities for simultaneous nitrification and denitrification in polyurethane foam [J]. Water Sci Technol, 2014, 69(9):1788-1797.
- [9] 吕鑑,刘硕,廖日红,等. 聚氨酯填料型曝气生物滤池(BAF)同步硝化反硝化[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(8):1253-1257.  
Lü Jian, Liu Shuo, Liao Rihong, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification in polyurethane filler - BAF [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(8):1253-1257(in Chinese).
- [10] Ahmad M, Liu S T, Mahmood N, *et al.* Effects of porous carrier size on biofilm development, microbial distribution and nitrogen removal in microaerobic bioreactors [J]. Bioresour Technol, 2017, 234:360-369.



作者简介:李兴强(1993-),男,浙江台州人,硕士研究生,研究方向为水污染控制。

E-mail:67657788@qq.com

收稿日期:2018-04-10