

不同填料生物膜微型动物物种多样性比较

朱荣芳¹, 胡小兵^{1,2}, 卢学成¹, 叶星³, 张新喜^{1,2}, 钟梅英¹

(1.安徽工业大学建筑工程学院,安徽马鞍山 243032;2.生物膜法水质净化及利用技术教育部工程研究中心,安徽马鞍山 243032;3.安徽工业大学能源与环境学院,安徽马鞍山 243002)

摘要:为了探究不同填料生物膜上微型动物物种多样性异同,研究采用3种填料(多面空心球、K3悬浮填料、煤焦粉)处理模拟生活污水时微型动物多样性指数变化规律及其与水处理效果的相关性。结果表明:生物膜中共出现微型动物57种,包括鞭毛虫7种、肉足虫5种、纤毛虫42种和微型后生动物3种;煤焦粉上以小型鞭毛虫为优势类群,多面空心球与K3悬浮填料上由小型鞭毛虫、游泳型纤毛虫和固着型纤毛虫交替构成优势类群;悬浮型填料、堆积型填料上微型动物多样性 H 分别呈“M”型、“前高后低”型变化;煤焦粉对COD、氨氮的去除效果较好且稳定,去除率分别为 $(87\pm 10)\%$ 、 $(92\pm 6)\%$;煤焦粉生物膜上微型动物多样性 H 、丰富度 R 与 NH_4^+-N 去除率有明显正相关($P<0.01$),均匀度 λ 与其显著负相关($P<0.05$);填料上微型动物物种多样性 H 逐渐降低,但变化规律呈现不同形式;固着型纤毛虫为煤焦粉填料对 NH_4^+-N 去除的指示微生物。

关键词:微型动物;物种多样性;填料;生物膜;污水处理

中图分类号:X 172 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-7872.2017.02.015

Comparison of Species Diversity of Microfauna in Biofilm Attached to Different Carriers

ZHU Rongfang¹, HU Xiaobing^{1,2}, LU Xuecheng¹, YE Xing³, ZHANG Xinxi^{1,2}, ZHONG Meiyong¹

(1. School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Ma' anshan 243032, China; 2. Engineering Research Center of Water Purification and Utilization Technology based on Biofilm Process, Ministry of Education, Ma' anshan 243032, China; 3. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma' anshan 243002, China)

Abstract: In order to explore the similarities and differences of the species diversity of microfauna in biofilm attached to different carriers, the variation of parameters related to microfauna on 3 types of carriers (multi-faceted hollow ball, K3 suspended filler and coke powder) and the correlations between diversity parameters of microfauna species and the performance of the reactors treating synthetic municipal wastewater were analyzed. Results indicate that, 57 species of microfauna are identified, including 7 species of flagellate, 5 species of sarcodina, 42 species of ciliate and 3 kinds of metazoan; On the coke powder, the small flagellates are the dominant group. However, on multi-faceted hollow ball and K3 suspension filler, the small flagellates, free swimming ciliates and sessile ciliates alternately become the dominant groups accompanying with the passage of time; The diversity index H of microfauna on suspended carriers varies with the shape of “M”, while the H of the stacking carrier varies with the shape of “from-high-to low”; The removal efficiencies of COD, NH_4^+-N of the reactors filled with coke powder are $(87\pm 10)\%$ and $(92\pm 6)\%$, respectively. The respective relationships of miniature animal diversity index (H), and richness index (R) with the removal efficiency of NH_4^+-N are also positively correlated ($P<0.01$); There is a significant

收稿日期:2017-02-15

基金项目:安徽省高校科学研究项目(KJ2013A059)

作者简介:朱荣芳(1992—),女,安徽宣州区人,硕士生,主要研究方向为水处理生物学。

通信作者:胡小兵(1966—),男,安徽泾县人,博士,副教授,主要研究方向为水处理生物学与污水生态处理。

negative correlation between the dominance index λ and the removal efficiency of NH_4^+-N ($P<0.05$); The species diversity index H of the population of microfauna in the biofilms decreases gradually, but the change rules of index H present different forms; Stalks ciliates are as NH_4^+-N indicator microorganisms of coke powder.

Key words: microfauna; species diversity; carrier; biofilm; wastewater treatment

生物膜法处理污水具有容积负荷高、抗冲击力强、效率高、操作稳定、产泥量少等特点^[1-2],是目前废水处理实用的工艺方法之一,已广泛应用于各类废水处理^[3-6]。填料是微生物的栖息场所,是生物膜法处理污水技术的基础^[7]。填料为各类微生物提供适宜的生长条件,食物链长,微生态系统复杂。填料生物膜是一个组成成分复杂、具有三维结构和信息传递系统的复杂微生物群体^[8]。

废水处理中微型动物(包括原生动物和微型后生动物)处于微生态系统的高级营养级,它们通过捕食系统中的细菌、提高细菌群落活力而提高水处理效果,具有降低悬浮固体浓度和出水浊度、改善出水水质等作用^[5,9-10]。对生物膜中微型动物种类及其群落特点的研究有助于从微观角度阐述各微型动物之间的协作机制,揭示反应器处理污染物的作用机理,指示反应器的性能,指导反应系统宏观条件的控制^[11]。

目前,关于生物膜法的研究主要集中于净化效果的考察,生物膜中微型动物多样性值得深入研究^[12]。本文分析比较生物接触氧化反应器中3种典型填料载体上微型动物群落特点及其变化规律,探讨微型动物物种多样性特征指数与水处理效果参数间的关系,从而筛选生物膜污水处理指示微型动物,为生物接触氧化工艺运行控制提供生物学基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置与试验运行过程

试验装置为透明有机玻璃柱反应器,外形尺寸为 $\Phi 150\text{ mm}\times 2\ 000\text{ mm}$,有效体积为18.5 L。反应柱内部结构由下至上依次是承托层(由不同粒径的鹅卵石按级配由大到小依次堆成,高100 mm)和填料层(高525 mm)。承托板下固定微孔曝气头,由空气压缩机供氧,由供气管上转子流量计调节空气流量控制反应柱中曝气量。为了比较不同填料上微型动物物种多样性,研究中选取3种填料(多面空心球、K3悬浮填料与煤焦粉)为生物膜载体,其实物图及物理参数如表1所示。多面空心球材质为聚丙烯,球形由两个半球合成,每个半球由若干个半扇形叶片组成,上下叶片相互错开排列,内部空隙大,叶片表面比较光滑。K3悬浮填料材质为聚乙烯,圆柱状,内部有三层空心圆,被放射状隔片分成19个小孔的蜂窝状结构,有效地减弱水流扰动对内部生物膜的冲刷,同时能将大气泡切割成很小的气泡,有利于氧的传递。煤焦粉颗粒由过筛筛分,并经反复水洗去除粉状细小杂质而得到。

试验采用间歇式进出水方式,每天2周期,每周期12 h,反应柱达到稳定状态时,换水率100%。反应器中温度控制为17~30 ℃,溶解氧保持在2.65~4.78 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2 反应器挂膜启动与参数分析

采用排泥挂膜法进行挂膜启动。接种污泥取自安徽省马鞍山市某污水处理厂好氧池,污泥浓度(MLSS)为4 744.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验用水采用模拟生活污水:按 $m(\text{C}):m(\text{N}):m(\text{P})$ 为100:5:1的比例向自来水中投加葡萄糖、硫酸铵和磷酸二氢钾分别作为碳源、氮源和磷源,采用磷酸盐缓冲溶液调节进水pH值,原水水质见表2。

试验中 COD_Cr 、 NH_4^+-N 均采用国际标准方法(重铬酸钾法GB11914—1989、纳氏分光光度法GB7479—1987)测定,浊度采用浊度计(WGZ-800,上海昕瑞仪器仪表有限公司)测定;溶解氧使用便携式溶氧仪(SX716,上海三信仪表厂)进行测定;温度使用数字温度计(DTM-280LCD,北京宏海永昌技术开发中心)进

表1 反应器中填料的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of the carriers in the reactors

载体	实物图	粒径/mm	孔隙率/%	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$)
多面空心球		38	85	320
K3悬浮填料		$\Phi 25.4\times 10$	88	620
煤焦粉		2.76~4.75	36	769 763

行测定;pH使用数显pH计(pHS-25,上海精密科学仪器有限公司)进行测定;煤焦粉的比表面积和孔径使用比表面积及孔径分析仪(V-Sorb 2800MP,北京金埃谱科技有限公司)进行测定。

表2 原水水质

Tab. 2 Characteristics of raw water

指标	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	pH	浊度/NTU	温度/℃
最高值	961.55	58.22	8.05	38.81	29.3
最低值	560.32	26.56	6.88	0.50	17.8
平均值	673.81	38.93	7.84	8.71	23.4

1.3 微型动物镜检及多样性分析

自反应柱中取一定量填料(取多面空心球1个、K3悬浮填料3个、煤焦粉10 cm³)称量,用一定量的蒸馏水将填料上的生物膜冲洗干净,制备污泥混合液;用微量移液器吸取50 μL摇匀后的污泥混合液在显微镜下进行观察,对微型动物进行鉴别与计数(仅活体计数)。原生动动物鉴别到属或种,后生动物鉴别到类群^[13-14]。原生动物分为大型鞭毛虫(≥20 μm)、小型鞭毛虫(<20 μm)、肉足虫和纤毛虫。其中纤毛虫又分为菌食型纤毛虫(Bacterivorous ciliates)和肉食型纤毛虫(Carnivorous ciliates),并根据运动行为将菌食型纤毛虫又分为自由游泳型纤毛虫(Free-swimming ciliates)、匍匐型纤毛虫(Crawling ciliates)和固着型纤毛虫(Stalked ciliates)3类^[5,15]。

根据冲洗蒸馏水体积,换算出单位体积泥水混合液中微型动物数量,再换算成微型动物的丰度,即单位填料上所生长微型动物个数;微型动物群落中主要种或类群的频度是指某物种或类群出现的样方数与调查样中总样方数之比。微生物多样性法是国际上广泛使用的评价微生物系统优劣程度的方法^[16]。本文采用Shannon-Wiener指数*H*、Margalef指数*R*、Pielou指数*J*、Simpson指数*λ*分别表征微型动物群落物种多样性、微型动物群落物种丰富度、微型动物群落均匀度、微型动物群落物种优势度^[17]。

2 试验结果与分析

2.1 微型动物群落结构及其物种多样性

2.1.1 生物膜中微型动物群落结构

试验启动运行至35 d后,3个反应柱中COD_{Cr}去除率均稳定达80%以上,氨氮去除率稳定达70%以上,镜检出现轮虫、线虫等微型后生动物且膜上微型动物种类和数量均较多,生物膜均已成熟^[18],反应器进入稳定运行期,开始进行正式试验。100 d的研究期内,3种填料生物膜上共鉴别出57种微型动物,其主要生态类型具体如表3所示。

表3 反应器中原生动物和微型后生动物群落组成

Tab. 3 Composition of protozoa and small metazoan communities in the reactors

生态类群	主要种属
匍匐型纤毛虫	有肋桶纤虫(<i>Aspidisca costata</i>)、盘状游仆虫(<i>Euplotes patella</i>)
固着型纤毛虫	八钟虫(<i>Vorticella octava</i>)、杯钟虫(<i>Vorticella cupifera</i>)、小口钟虫(<i>Vorticella microstoma</i>)、水虱间隙虫(<i>Intranstylum asellicola</i>)、树状聚缩虫(<i>Zoothamnium arbuscula</i>)、瓶累枝虫(<i>Epistylis urceolata</i>)、圆筒盖虫(<i>Opercularis cylindrata</i>)
游泳型纤毛虫	智利管叶虫(<i>Trachelophyllum chilense</i>)、弯豆形虫(<i>Colpidium campylum</i>)、梨形四膜虫(<i>Tetrahymena priiformis</i>)、前口瞬目虫(<i>Glaucoma frontata</i>)、尾草履虫(<i>Paramecium caudatum</i>)
肉食型纤毛虫	敏捷半眉虫(<i>Hemiophrys agilis</i>)、龙骨漫游虫(<i>Litonotus carinatus</i>)、薄漫游虫(<i>Litonotus lamella</i>)、固着足吸管虫(<i>Podophrya fixa</i>)、浮萍锤吸管虫(<i>Tokophrya lemnaeum</i>)
鞭毛虫	波豆虫属(<i>Bodo</i> sp.)
肉足虫	筒筒变虫(<i>Valkampfia Valkampfia</i>)、半圆表壳虫(<i>Arcella hemisphaerica</i>)、弯凸表壳虫(<i>Arcella gibbosa</i>)、球形砂壳虫(<i>Diffugia globulosa</i>)
微型后生动物	轮虫(Rotifer)、线虫(Nematode)

微型动物类群组成上,填料上出现种类最多的是纤毛虫(29~32种),其次是小型鞭毛虫(2~6种),然后是微型后生动物(2~3种)、有壳根足虫(1~3种),最少的是变形虫(0~1种)。3种填料上均出现的原生动物种属包括波豆虫属(*Bodo* sp.)、袋鞭藻属(*Peranema* sp.)、砂壳虫属(*Diffugia* sp.)、半眉虫属(*Hemiophrys* sp.)、漫游虫属(*Litonotus* sp.)、锤吸管虫属(*Tokophrya* sp.)、豆形虫属(*Colpidium* sp.)、四膜虫属(*Tetrahymena* sp.)、拟瞬目虫属(*Pseudoglaucoma* sp.)、瞬目虫(*Glaucoma* sp.)、钟虫属(*Vorticella* sp.)、间隙虫属(*Intranstylum* sp.)、聚缩虫属(*Zoothamnium* sp.)、累枝虫属(*Epistylis* sp.)、盖虫属(*Opercularis* sp.)等15个种属;均出现后生动物的包括轮虫(*Rotifer*)和线虫(*Nematode*)。有些特有种属只出现在一种填料上,如滴虫属(*Monas* sp.)、筒变虫属(*Vahlkampfia* sp.)、尖尾虫属(*Oxytricha* sp.)、楯纤虫属(*Aspidisca* sp.)只出现在多面空心球上;屋滴虫属(*Oikomonas* sp.)、喇叭虫属(*Stentor* sp.)只出现在K3填料上;后生水螨(*Hydracarina*)仅出现在煤焦粉上。

生物膜上微型动物种数从多到少的填料依次为:多面空心球(44种)、煤焦粉(37种)、K3悬浮填料(34种)。多面空心球上物种数最多,观察到草履虫(*Paramecium* sp.)、钟虫(*Vorticella* sp.)、间隙虫(*Intranstylum* sp.)、累枝虫(*Epistylis* sp.)、盖虫(*Opercularis* sp.)、楯纤虫(*Aspidisca* sp.)、游仆虫(*Euplotes* sp.)以及轮虫(*Rotifer*)、线虫(*Nematode*)等,生物膜内生态系统完善,群落结构稳定,这与李袁琴等^[19]研究结果一致。

总之,3种填料上微生物群落丰富,存在可以捕食细菌和吞噬有机颗粒的鞭毛虫、肉足虫、纤毛虫等原生动物和轮虫、线虫等微型后生动物,基本上覆盖污水生态系统微型动物营养结构的各个营养级水平^[1],这种复杂营养结构可提高系统的稳定性。

2.1.2 微型动物优势类群结构变化

运行过程中,生物膜上微型动物优势(丰度、频度均占优势)种属变化如表4所示。

表4 研究期间3种填料上微型动物优势种变化

Tab. 4 Shift of dominant species of microfauna in 3 types of carriers during the study period

运行时间/d	多面空心球	K3悬浮填料	煤焦粉
1~14	龙骨漫游虫(<i>L. carinatus</i>)	杯钟虫(<i>V. cupifera</i>)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)
15~28	龙骨漫游虫(<i>L. carinatus</i>)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)
29~42	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)
43~56	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	三角袋鞭藻(<i>P. trichophorum</i>)
57~70	圆筒盖虫(<i>O. cylindrata</i>)	苔藓拟瞬目虫(<i>P. musorum</i>)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)
71~84	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)
85~98	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)	波豆虫(<i>Bodo</i> sp.)

由表4可知,多面空心球、K3悬浮填料上微型动物优势种属均为纤毛虫与鞭毛虫交替出现。多面空心球上微型动物优势种在第1~28 d为龙骨漫游虫(*L. carinatus*),而第29~56 d变为波豆虫(*Bodo* sp.),可能是生物膜上微型动物对温度变化(从28℃降至23℃)敏感所致;第57~70 d优势种为圆筒盖虫(*O. cylindrata*);第71~98 d由于生物膜厚度增加、老化脱落使反应器中混合液变得浑浊,优势种又变为波豆虫(*Bodo* sp.);K3悬浮填料上微型动物优势种为杯钟虫(*V. cupifera*)、波豆虫(*Bodo* sp.)、苔藓拟瞬目虫(*P. musorum*)、波豆虫(*Bodo* sp.)。悬浮型填料上微型动物优势类群由鞭毛虫、游泳型纤毛虫、固着型纤毛虫交替变化,优势种多变、动态稳定,可能原因是:1)孔隙率较大且氧传质效果好易于原生动物附着生长;2)实验用水为模拟生活污水,其中不存在微型动物生长抑制物质^[7]。

由于煤焦粉颗粒微孔孔径小(2.07~164.62 nm)、孔隙率低(36%)、块状堆积型易堵塞板结,反应柱中生物膜氧传质不充分,溶解氧不足,以细菌、藻类等为食的线虫大量繁殖并破坏生物膜,导致生物膜损坏、松散脱落。使得煤焦粉填料上优势类群一直为鞭毛虫(波豆虫),优势种(丰富度达46.89%)地位较为突出。

2.1.3 微型动物多样性变化规律

微型动物群落物种多样性能够表征生物群落和生态结构的复杂性,体现群落的结构类型、发展阶段、稳定性和生境差异,具有重要的生态学意义^[20]。3种填料生物膜上附着生长的微型动物群落物种多样性变化如图1所示。

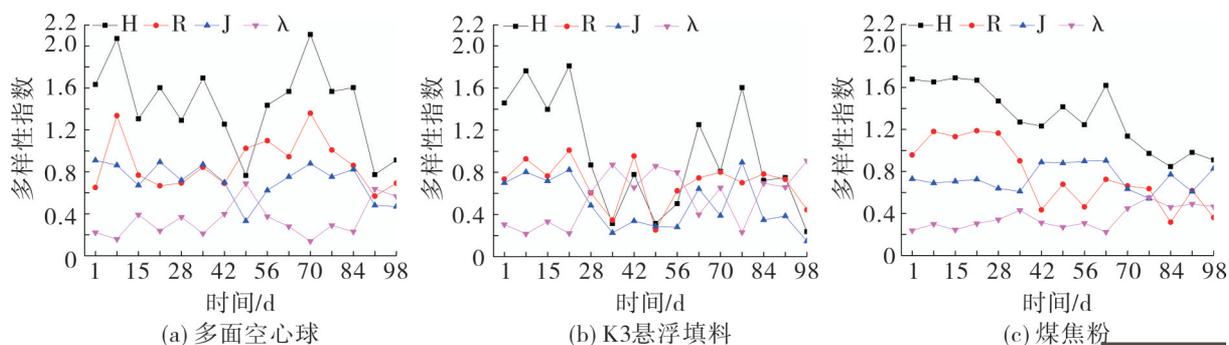


图1 系统运行期间3种填料生物膜上微型动物群落物种多样性

Fig. 1 Species diversity of microfauna community in biofilm on 3 types of carriers during system operation

由图1可见,填料上微型动物群落多样性 H 变化有2种形式:1)“M”型,即“高一低—高一低”型波动,如多面空心球(图1(a))、K3悬浮填料(图1(b));2)“前高后低”型波动,如煤焦粉填料(图1(c))。

“M”型波动的多面空心球上,微型动物群落物种多样性 H 在稳定运行初期(第1~35 d内)为 1.600 ± 0.288 ,系统中微型动物生态群落处于相对稳定状态,固着型纤毛虫、匍匐型纤毛虫和游泳型纤毛虫共存、竞争,并在一定范围内此消彼长。微型动物物种数基本上保持为6~7种,各物种数量分布均匀,数量较稳定,优势种地位不突出(见表5)。微型动物群落物种丰富度 R 基本稳定在 0.827 ± 0.259 ,均匀度 J 稳定为 0.822 ± 0.100 ,优势度 λ 为 0.265 ± 0.093 。这种相对稳定状态主要得利于多面空心球外观多面、比表面积大能充分满足气液交换条件的结构特点^[21]。第35~49 d中 H 急剧下降55%,这是由于微型动物数量稍增(R 升高21%)、鞭毛虫的优势种属地位突出(λ 增加了2.3倍)、均匀度降低(J 下降62%)而造成的;第49~70 d,由于微型动物数量和种类都有所增加(R 上升32%, J 上升了约1.6倍),优势种属地位下降(λ 下降了80%)造成 H 急剧上升;第70 d后,鞭毛虫数量突增(λ 逐步增加),微型动物总丰度变化较大,各物种数量分布较不均匀, J 、 λ 波动较大导致 H 急剧下降。鞭毛虫成为绝对优势种的主要原因是进水 COD_c 浓度升高了 $188.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (见图2(a)中第51~77 d),微生物因代谢所受营养的限制有所降低,较低等的异养鞭毛虫较为敏感而迅速增殖^[22]。总体来看,多面空心球上微型动物群落处于稳定的动态平衡状态。

表5 微型动物群落物种多样性特征指数间的Pearson相关性

Tab. 5 Pearson correlation between the different indexes of microfauna communities

	多面空心球			K3悬浮填料			煤焦粉		
	H	R	J	H	R	J	H	R	J
R	0.605*			0.745**			0.831**		
J	0.912**	0.237		0.978**	0.614*		0.289	-0.222	
λ	-0.973**	-0.425	-0.975**	-0.996**	-0.713**	-0.986**	-0.896**	-0.532*	-0.647**

注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

K3悬浮填料上微型动物群落物种多样性 H 在初期(1~21 d)较大(1.607 ± 0.210), R 为 0.860 ± 0.131 , J 为 0.761 ± 0.061 , λ 为 0.268 ± 0.059 ,微型动物群落相对稳定;第21~35 d急速下降83%;第35~77 d波动上升;第77~98 d又波动下降,整体呈现出“M”型变化。其中第28~63 d,微型动物总丰度变化波动较大(R 波动上升),苔藓拟瞬目虫(*P. musorum*)丰度增加(λ 升高),各物种数目分布较不均匀(J 降低)导致 H 出现较大波动。波豆虫(*Bodo* sp.)、苔藓拟瞬目虫(*P. musorum*)优势种属地位较突出,打破了前期游泳型纤毛虫、固着型纤毛虫相对稳定平衡,这与进水 COD_c 浓度平均偏高(见图2(a))有一定关系。K3悬浮填料 H 波动比多面空心球大,这是由于K3悬浮填料丰度(挂膜后)接近于水,可在曝气气泡作用下均匀混合,反应器运行时处于悬浮流化状态,增加了相互撞击^[23],使附着填料生长的生物膜中各类型微型动物比例失衡、各物种数目分布不均匀。因此,微型动物群落物种多样性 H 较低、群落处于非稳定状态。

煤焦粉生物膜上微型动物群落物种多样性 H 整体呈现“前高后低”的变化趋势。在稳定运行初期(第1~21 d) H 、 R 、 J 、 λ 分别稳定为 1.672 ± 0.016 , 1.114 ± 0.107 , 0.712 ± 0.019 , 0.271 ± 0.036 。高温促进煤焦粉内部微孔的形成^[24],使煤焦粉颗粒表面粗糙度大、有大量孔隙结构,为微生物附着提供充足空间,使得微型动物群落处

于稳定平衡状态;中期(第21~63 d)略降后升,第21 d后 J 和 λ 波动不大, R 下降使得 H 波动降低,说明生物膜上微型动物多样性 H 的整体下降趋势是由微型动物数量减少导致的。这是由于煤焦粉作为填料板结堵塞,反应器中氧传质不足形成大量厌氧区块,微型动物数量受限。 H 在后期(第63~98 d)降低至平稳。

3个系统中微型动物物种多样性特征指数 H 、丰富度 R 、均匀度 J 与优势度 λ (图1)间的Pearson相关性分析结果(表5)可知,多面空心球、K3悬浮填料生物膜上微型动物物种多样性指数 H 与均匀度 J ($P<0.1$)的相关性大于其与丰富度 R ($P<0.1$)相关性,说明物种均匀度对多样性指数 H 贡献更大;而煤焦粉则相反,物种丰富度 R 对多样性指数 H 贡献更大。

总之,悬浮型填料上微型动物多样性 H 整体呈“M”型波动,多面空心球上微型动物多样性最高但有较大波动,K3悬浮填料则波动也较大,而堆积型煤焦粉填料上 H 呈“前高后低”型变化,比较稳定。

2.2 微型动物多样性对处理效果的影响

2.2.1 不同填料反应器的水处理效果

3种填料生物膜反应器对污水中 COD_{Cr} 、 NH_4^+-N 的去除效果如图2所示。

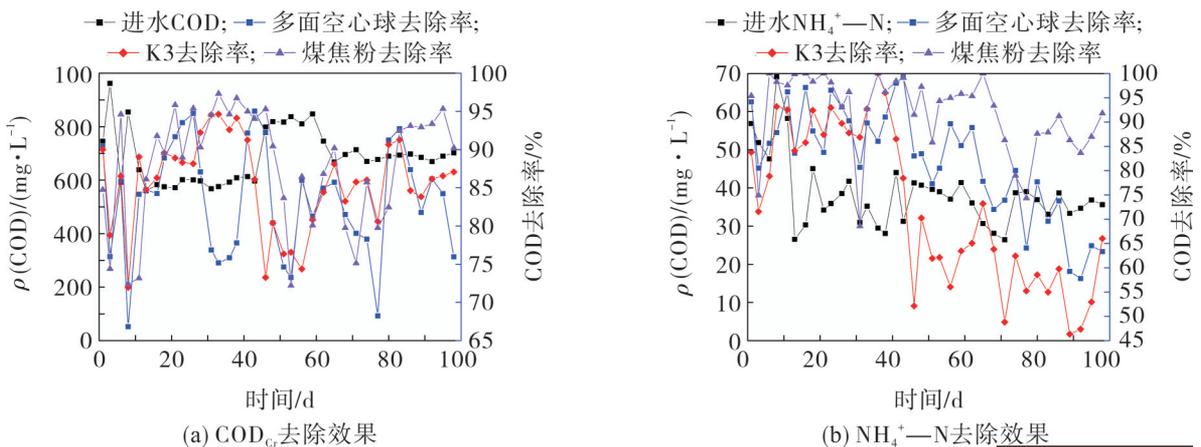


图2 3种填料对 COD_{Cr} 和 NH_4^+-N 的去除效果

Fig. 2 Removal effect of 3 types of carriers on COD_{Cr} and NH_4^+-N

K3悬浮填料、煤焦粉、多面空心球对 COD_{Cr} 的去除率分别为 $(87\pm 5)\%$ 、 $(87\pm 10)\%$ 、 $(83\pm 8)\%$,K3悬浮填料去除效果较好且稳定。3种填料反应器对 COD_{Cr} 去除率略高于普通生物膜处理工艺^[25-26],如前所述,这是由于生物膜中群落结构丰富多样,鞭毛虫、纤毛虫等原生动物种类数量丰富,线虫、轮虫等微型后生动物也出现较多,它们构成了复杂多样的食物链、食物网,形成稳定的微生态结构,有利于反应器中有机污染物得以快速高效氧化分解。

对 NH_4^+-N 的去除,3种填料均呈现稳定波动、逐渐下降趋势。这是由于系统运行后期(第80 d后)温度下降了 $5\sim 7\text{ }^\circ\text{C}$,温度降低影响微生物代谢及细胞转运外源营养物质进入细胞的能力^[27]。煤焦粉对 NH_4^+-N 的去除率为 $(92\pm 6)\%$,去除效果最好且最稳定;多面空心球次之,其去除率为 $(81\pm 13)\%$;K3悬浮填料中 NH_4^+-N 去除效果 $(74\pm 17)\%$ 最低且不稳定,受温度影响较大。

2.2.2 微型动物物种多样性与水处理效果相关性分析

原生动物中的纤毛虫是生态系统中的重要功能类群,数量多、分布广,能有利于胶体、有机物的絮凝,促进活性污泥絮体或生物膜的形成;能通过捕食减少包括病原体在内的游离细菌,降低悬浮固体浓度、BOD,改善处理出水水质^[13-15]。对3种填料上群落物种多样性指数(H, R, J, λ)与水质参数之间相关性进行分析,相关性系数如图3所示。

由图3可见,煤焦粉填料上肉食型纤毛虫丰度与 NH_4^+-N 去除率之间存在显著相关性,主要种类为节累枝虫($r=0.597, P<0.05$)、树状聚缩虫($r=0.563, P<0.05$)、浸渍锤吸管虫($r=0.563, P<0.05$)、球形砂壳虫($r=0.506, P<0.05$)。肉食型纤毛虫丰度可作为煤焦粉填料反应器中 NH_4^+-N 去除效果的指示微生物。多面空心球反应器中,游泳型纤毛虫丰度与 NH_4^+-N 去除率呈显著负相关($r=-0.577, P<0.05$),主要种类为龙骨漫游虫($r=0.576, P<0.05$)、扭曲管叶虫($r=0.563, P<0.05$)、敏捷半眉虫($r=0.563, P<0.05$)、薄漫游虫($r=0.563, P<0.05$)、

尾波豆虫($r=0.536, P<0.05$)、钝漫游虫($r=0.522, P<0.05$)、有肋楯纤虫($r=0.522, P<0.05$)。K3 悬浮填料反应器中,固着型纤毛虫丰度与进水 NH_4^+-N 显著正相关,主要种类有薄漫游虫($r=0.563, P<0.05$)、浮萍锤吸管虫($r=0.563, P<0.05$)、春盖果虫($r=0.563, P<0.05$)、集盖虫($r=0.563, P<0.05$)、微盘盖虫($r=0.555, P<0.05$)、杯钟虫($r=0.529, P<0.05$)、扩张钟虫($r=0.528, P<0.05$)。

总体上看,微型动物多样性(H, R, J, λ)与 COD_Cr 、 NH_4^+-N 去除率间具有一定的相关性,以微型动物多样性指数来预测指示水处理效果的结果并不非常理想^[28],但煤焦粉生物膜上微型动物多样性特征指数(H, R, J, λ)与 NH_4^+-N 去除率的相关性比其它2种填料显著,其中 NH_4^+-N 去除率与多样性 H ($r=0.688, P<0.01$)、丰富度 R ($r=0.631, P<0.01$)显著正相关,与优势度 λ ($r=-0.617, P<0.05$)之间显著负相关(见图3)。因此,煤焦粉反应器中微型动物群落物种多样性特征指数多样性 H 、丰富度 R 、优势度 λ 可以作为 NH_4^+-N 去除效果指标参数。

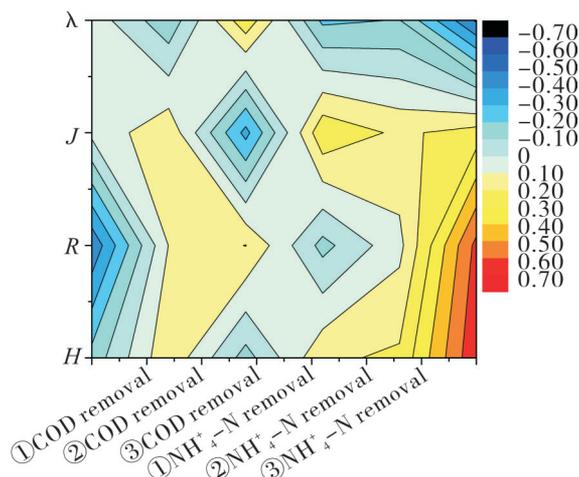


图3 微型动物物种多样性与水处理效果相关性分布
Fig. 3 Distribution of correlation between species diversity of microfauna and water treatment effect

3 结 论

1) 多面空心球、K3 悬浮填料和煤焦粉3种填料上共鉴别出57种原生动物和微型后生动物,其中包括7种小型鞭毛虫、1种变形虫、4种有壳根足虫,42种纤毛虫和3种微型后生动物。多面空心球上微型动物物种数最多(44种)且生态系统稳定。

2) 多面空心球、K3 悬浮填料上微型动物群落结构由小型鞭毛虫、游泳型纤毛虫和固着型纤毛虫交替构成共优势类群;煤焦粉上以小型鞭毛虫为优势类群,优势地位较突出。

3) 3种填料上微型动物群落物种多样性 H 、丰富度 R 、均匀度 J 和优势度 λ 都较为稳定,但变化规律不同。多面空心球、K3 悬浮填料上物种多样性 H 整体呈“M”型波动,物种均匀度对多样性指数 H 贡献更大;而堆积型煤焦粉填料上 H 则呈“前高后低”型变化,物种丰富度 R 对多样性指数 H 贡献更大。

4) 3种填料反应器稳定运行时水处理效果均较好,K3 悬浮填料、煤焦粉 COD_Cr 去除率分别为(87±5)%、(87±10)%,去除效果较好且稳定;煤焦粉对 NH_4^+-N 的去除效果最好且稳定,去除率为(92±6)%。

5) 多面空心球、K3 悬浮填料、煤焦粉分别以肉食型纤毛虫、游泳型纤毛虫、固着型纤毛虫作为去除效果指示微生物。煤焦粉反应器中微型动物群落物种多样性特征指数 H 、 R 、 λ 可作为 NH_4^+-N 去除率指示参数。

参考文献:

- [1] 胡学伟,李姝,荣焯,等.不同EPS组成生物膜对 Cu^{2+} 吸附的研究[J].中国环境科学,2014,34(7):1749-1753.
- [2] 简放陵,李琼,周显宏,等.曝气生物滤池不同填料处理河道污水的效果[J].生态环境学报,2009,18(4):1218-1222.
- [3] HADJIEV D, DIMITROV D, MARTINOV M, et al. Enhancement of the biofilm formation on polymeric supports by surface conditioning[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007, 40(4):840-848.
- [4] HU X B, WANG Z, XU K, et al. Biofilm regeneration on carriers in MBBR used for vitamin C wastewater treatment[J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2013, 67(6):1310-1317.
- [5] SANTOS L A D, FERREIRA V, PEREIRA M O, et al. Relationship between protozoan and metazoan communities and operation and performance parameters in a textile sewage activated sludge system[J]. European Journal of Protistology, 2014, 50(4):319-328.
- [6] 安燕,陶文亮,赵文聪,等.改性水处理用生物填料性能的研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2009,26(6):134-137.
- [7] 朱洁,东刘成,陈洪斌,等.不同填料类型污染源水生物预处理的比较[J].中国环境科学,2012,32(3):447-453.
- [8] STOODLEY P, SAUER K, DAVIES D G, et al. Biofilms as complex differentiated communities[J]. Annual Review of Microbiology, 2002, 56(3):187-209.
- [9] 陈声贵,许木启.原生动物的作用[J].生态学杂志,2002,21(3):47-51.

- [10] 李探微,彭永臻,朱晓. 活性污泥中原生动物的特征和作用[J]. 给水排水, 2001, 27(4):24-27.
- [11] 温沁雪,施汉昌,陈志强. 生物膜微环境和传质现象研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(6):1-5.
- [12] 吴春笃,张波,李海燕. 生物接触氧化工艺用填料的生物膜特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2008, 29(1):74-77.
- [13] 马放,扬基先,魏利,等. 环境微生物图谱[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2010.
- [14] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等. 微型生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1990.
- [15] DUBBER D, GRAY N F. Enumeration of protozoan ciliates in activated sludge: determination of replicate number using probability[J]. Water Research, 2009, 43(14):3443-3452.
- [16] FAITH D P. Global biodiversity assessment: integrating global and local values and human dimensions[J]. Global Environmental Change, 2005, 15(1):5-8.
- [17] 许晴,张放,许中旗,等. Simpson指数和Shannon-Wiener指数若干特征的分析及“稀释效应”[J]. 草业科学, 2011, 28(4):527-531.
- [18] 廖榆敏,汤兵,陈秋雯. 移动床生物反应器启动特性研究进展[J]. 水处理技术, 2011, 37(2):5-8.
- [19] 李袁琴,唐奕,梁进,等. 多面空心球载体新型生物转笼处理生活污水性能研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2):496-500.
- [20] 张立敏,陈斌,李正跃. 应用中性理论分析局域群落中的物种多样性及稳定性[J]. 生态学报, 2010, 30(6):1556-1563.
- [21] 刘旭阳,杜茂安,范振强,等. 污水处理曝气生物滤池填料性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(11):1835-1839.
- [22] 李凤超,曹卫荣,康现江. 自由生活的异养鞭毛虫多样性及生态功能[J]. 生态学报, 2009, 29(9):5023-5029.
- [23] JIN L, ONG S L, NG H Y. Fouling control mechanism by suspended biofilm carriers addition in submerged ceramic membrane bioreactors[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 427(1):250-258.
- [24] 丁文川,曾晓岚,王永芳,等. 生物炭载体的表面特征和挂膜性能研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(9):1451-1455.
- [25] WANG X J, XIA S Q, CHEN L, et al. Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(4):824-828.
- [26] 张波,吴春笃,李海燕,等. 不同营养配比下生物膜特性的试验研究[J]. 水处理技术, 2008, 34(11):47-49.
- [27] 朱兆亮,曹相生,孟雪征,等. 上向流好气滤池冬季挂膜启动及运行参数探讨[J]. 环境工程学报, 2009, 3(2):215-218.
- [28] 李军,赵琦,聂梅生,等. 淹没式生物膜法除磷生物膜特性研究[J]. 给水排水, 2002, 28(4):23-26.

责任编辑:丁吉海