

文章编号: 1000-5641(2018)06-0097-08

# 城市河道介体强化总氮削减的微生物群落结构分析

韩 静<sup>1,2</sup>, 许怡雯<sup>1,2</sup>, 何 岩<sup>1,2</sup>, 黄民生<sup>1,2</sup>

(1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241;  
2. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

**摘要:** 通过比较3种介体材料(生物炭、毛毡和无纺布)对城市河道总氮削减强化的效果, 发现经过84 d的运行, 相比空白组, 无纺布对总氮的削减强化效果最好, 削减率可提升23.4%; 其次是毛毡, 削减率可提升13.9%; 生物炭对总氮削减效果不佳. 在此基础上, 系统探究了不同介体强化组中的微生物多样性及结构分布特征, 表明与空白组相比, 无纺布组可以显著增加菌群多样性和丰富度, 而且与氮转化相关的变形菌门丰度明显高于毛毡组和生物炭组, 特别是一些典型的反硝化菌属 *Azospirillum*、*Thiobacillus* 和 *Azoarcus* 的丰度均显著高于其他实验组, 而与反硝化菌存在竞争关系的产甲烷菌属 *Syntrophorhabdus* 低于空白和生物炭组; 毛毡组的微生物菌群结构呈现出与无纺布相似的趋势, 但其中的反硝化菌属丰度均低于无纺布组; 生物炭组微生物群落组成与空白组最为相似, 推测无纺布介体材料具有较好的生物相容性, 更有利于挂膜, 从而促使反硝化菌属的生长. 综合比较, 无纺布介体材料更有利于对城市河道总氮的削减.

**关键词:** 介体材料; 城市河道; 总氮削减; 微生物作用

**中图分类号:** X522 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.06.012

## Analysis of microbial community composition from media used to strengthen total nitrogen removal from an urban river

HAN Jing<sup>1,2</sup>, XU Yi-wen<sup>1,2</sup>, HE Yan<sup>1,2</sup>, HUANG Min-sheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** We compared the removal rate of total nitrogen in urban rivers with three kinds of media (biochar, felt, and non-woven fabric). After 84 days in operation, it was found that non-woven fabric increased the removal rate of total nitrogen by 23.4% over the control group; felt increased the removal rate of total nitrogen by 13.9% over the control

收稿日期: 2018-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(41877477); 上海市自然科学基金(16ZR1408800); 上海市科技创新重点项目(18DZ1203806); 上海市浦江人才计划(16PJD023)

第一作者: 韩 静, 女, 硕士研究生, 研究方向为水环境治理与修复. E-mail: jhanecnu@sina.com.

通信作者: 何 岩, 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水环境治理与修复.

E-mail: yhe@des.ecnu.edu.cn.

group; and biochar had a poor effect on total nitrogen removal. The microbial diversity and community composition of different media-enhanced groups were then systematically explored; the results showed that non-woven fabric can significantly increase microbial diversity and abundance. Moreover, proteobacteria, which is related to nitrogen conversion, was found to be significantly higher in the non-woven fabric group than the felt and biochar groups, especially the abundance of denitrifying bacteria (*Azospirillum*, *Thiobacillus*, and *Azoarcus*). The abundance of methanogen, which is in competition with the denitrifying bacteria *Syntrophorhabdus*, was found to be lower in non-woven fabric than in the control and biochar groups. The microbial flora structure of the felt group showed a similar trend to that of the non-woven fabric group, but the abundance of denitrifying bacteria was lower. The microbial community composition of the biochar group was the most similar to that of the control group. It is speculated that non-woven fabric has better biocompatibility than other groups; this is beneficial for biofilm formation and thereby promotes the growth of denitrifying bacteria. In a comprehensive comparison, non-woven media materials are more conducive to the removal of total nitrogen in urban rivers.

**Keywords:** media; urban river; total nitrogen reduction; microbial action

## 0 前 言

河道黑臭是我国城市水环境污染的典型现象之一. 随着河道修复与治理工作的相继开展, 污染负荷得到大幅度削减, 黑臭现象逐步得到消除, 但氮营养盐累积问题却凸显且难以解决<sup>[1]</sup>. 当前黑臭河道治理过程中往往只关注氨氮的去除, 侧重于氨氮的硝化转化却忽视对总氮的去除导致总氮处于较高水平. 如果不加以重视, 将会引发从“黑臭”到“水华”新的环境问题. 因此, 如何有效的去除城市河道中的总氮是目前亟待解决的问题.

当前, 关于提高城市河道总氮去除率主要从硝化-反硝化耦合<sup>[2]</sup>, 优化曝气方式<sup>[3]</sup>, 硫、铁元素耦合强化反硝化进行总氮去除<sup>[4-5]</sup>以及异位处理<sup>[6]</sup>等方式实现; 也有一些人试图探讨新的氮去除途径, 如通过好氧反硝化强化氮营养盐去除<sup>[7]</sup>; 也有研究者采用新的缓释碳源材料<sup>[8]</sup>通过提高碳氮比 (C/N) 强化反硝化脱氮; 一些学者通过使用新的介体材料如生物沸石<sup>[9]</sup>、沸石复合菌剂<sup>[10]</sup>等降低上覆水总氮浓度. 本文尝试使用生物炭、毛毡和无纺布等介体材料, 利用其较大的比表面积, 通过吸附截留和促使生物膜的生成来强化对总氮的去除, 确定出优化的介体覆盖材料, 以期为提高总氮去除率的问题提供参考.

## 1 材料与方 法

本实验以取自里店浦的底泥为实验对象, 采用 PVC 柱状反应器作为实验装置, 实验装置内铺设不同介体材料, 在 84 d 运行期间内测试上覆水总氮浓度并计算削减率, 运行结束后采集介体材料上附着的生物膜进行高通量测试, 解析生物膜内的细菌结构及丰度的响应变化.

### 1.1 研究对象

本试验所需的河道底泥和上覆水均采集于上海市普陀区桃浦镇里店浦, 该河为上海市工业河的一条支流, 河水的水动力条件较差, 采样时已经过疏浚治理, 但仍然存在总氮含量超标的问题. 样品取回实验室后, 放在 4 °C 冰箱里冷藏备用. 底泥的基本理化性质: 含水率(62.1±3.2)%; TOC 含量(18.5±2.3) g/kg. 稻壳生物炭购自于上海满缘植材, 粒径为

3~10 mm, 超纯水清洗后备用。毛毡购自于宿迁市香轩花卉园艺公司, 无纺布购自于红叶无纺布, 材质为丙纶粘纤, 重量为 200 g/m<sup>2</sup>。上覆水基本水质指标见表 1, 里店浦地理位置图见图 1。

表 1 上覆水主要水质指标

Tab. 1 Main water quality indicators of overlying water

pH	DO/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	硝氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )
5~6	5.1~6.0	45.13~55.13	1.08~3.08	3.2~5.2	7.87~9.87

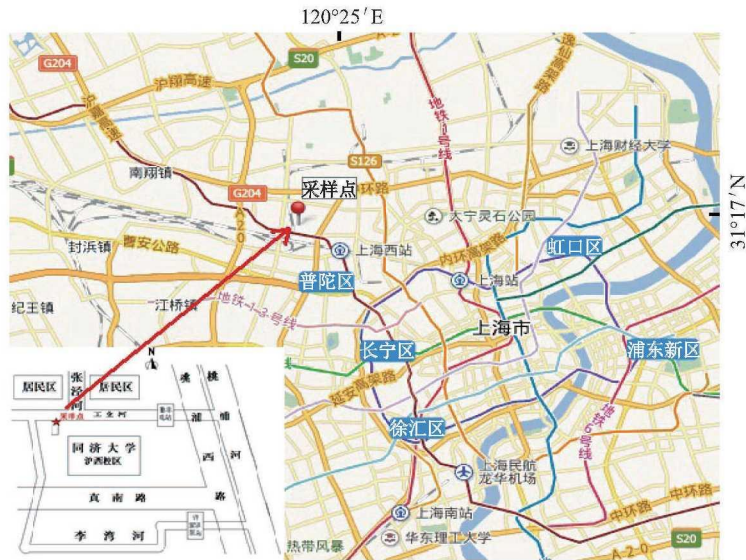


图 1 采样点地理位置图

Fig. 1 Location of the Lidianpu River and the sampling sites

### 1.2 试验装置

本试验采用的装置为自制的 PVC 柱状反应器, 内径 15 cm, 高度 60 cm。装置内盛放城市河道底泥, 介体材料与上覆水, 具体试验装置见图 2 所示。

将等量河道底泥放入不同柱子中, 上面分别铺设 3 种介体材料(生物炭、毛毡和无纺布), 最后采用虹吸方法缓慢注入采集的河水。生物炭的铺设厚度为 1 cm, 毛毡和无纺布都铺设一层, 上面用碎石压住防止浮起。为了获得介体材料的覆盖效果, 再设一个不覆盖任何材料的空白柱作为比较。每个柱子的底泥高为 12.5 cm, 上覆水高为 37.5 cm。试验均在室温下进行, 待稳定后每周取样测定上覆水总氮的含量, 以分析评价不同介体材料对河道底泥总氮削减的效果。

### 1.3 分析方法

上覆水总氮按标准方法<sup>[11]</sup>采用紫外分光光度仪测定。pH 值采用 pH 计测定, 上覆水溶解氧采用便携式溶解氧仪测定。

上覆水体总氮的削减率( $R$ )的计算方法是<sup>[12]</sup>

$$R = \frac{C_{N,i} - C_i}{C_{N,i}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中,  $C_i$  为取样时上覆水体总氮浓度(mg/L),  $C_{N,i}$  为取样时空白组上覆水体总氮浓度(mg/L),

$i$  为取样次数.

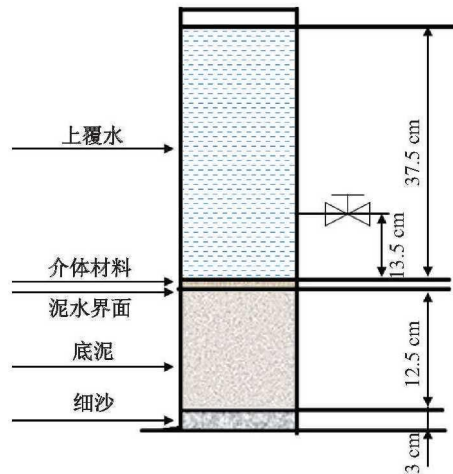


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental device

#### 1.4 高通量测序分析

各试验组经过 84 d 运行根据其稳定时的理化指标分析, 选取试验组中介体材料上附着的生物膜进行细菌通用引物的高通量测序分析, 以解析生物膜中细菌丰度及结构的响应变化. 所用引物见表 2. 所用的测序设备为 Illumina MiSeq2x300 bp 测序仪, 其采用可逆性末端边合成边测序技术; 不同水平下的群落组成和结构特征采用 STAMP 软件(版本 2.1.3)来分析组间差异, 多样性指数计算使用 Mothur 软件(版本 1.30.1); 计算各个样品 Shannon、Chao1、ACE 和 Simpson 指数.

表 2 高通量测序及荧光定量所用引物

名称	引物	序列(5' → 3')	参考文献
细菌	341F	CCTACGGGAGGCAGCAG	[3]
	806R	GGACTACHVGGGTWTCTAAT	

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同介体对总氮去除性能研究

试验考察了所有试验柱上覆水总氮(TN)浓度随试验天数的变化情况, 其结果见图 3a. 可以看出各试验组(除生物炭组)初期上覆水 TN 浓度均呈现不同程度的上升趋势, 推断认为这是由于底泥所释放的大量氨氮来不及进行硝化-反硝化转化引起的, 到 28 d 降低到较低水平随后又逐渐升高, 推测可能是由于吸附在介体材料上的氨氮释放所引起的. 到试验结束时装置经过 84 d 的运行, 无任何介体材料的空白组 TN 浓度为 3.58 mg/L, 以毛毡作为介体覆盖材料的试验组 TN 浓度为 3.08 mg/L, 生物炭试验组的 TN 浓度为 4.29 mg/L, 无纺布试验组的 TN 浓度为 2.74 mg/L. 所有试验柱上覆水总氮的稳定值与去除率如图 3(b) 所示. 由图可以看出, 与实验结束时上覆水总氮都得到了一定程度的削减, 其中无纺布对总氮削减效果最为明显, 毛毡对总氮去除也有一定效果, 但与空白组差异不明显. 与空白组相比, 毛毡作为介体覆盖材料对上覆水 TN 削减率最高提升 13.9%, 生物炭对 TN 削减率降低 19.8%, 无纺布对上覆水 TN 削减率最高提升 23.4%. 这说明无纺布、毛毡作为介体材料可以实现对总氮的削减, 其中无纺布的效果大于毛毡, 可能的原因一方面是无纺布和毛毡表面形成了生物膜, 其中附着的微生物的活动对总氮削减起

到一定效果,另一方面无纺布和毛毡本身对总氮产生吸附作用,但无纺布吸附效果相对更好.生物炭则对总氮削减效果不佳,其原因可能是在实验过程中生物炭释放了本身含有的氮<sup>[13]</sup>.

对4个试验组上覆水总氮值进行单因素方差分析,结果表明3种介体覆盖组与空白组之间削减TN效果均有统计学意义( $p < 0.05$ ).

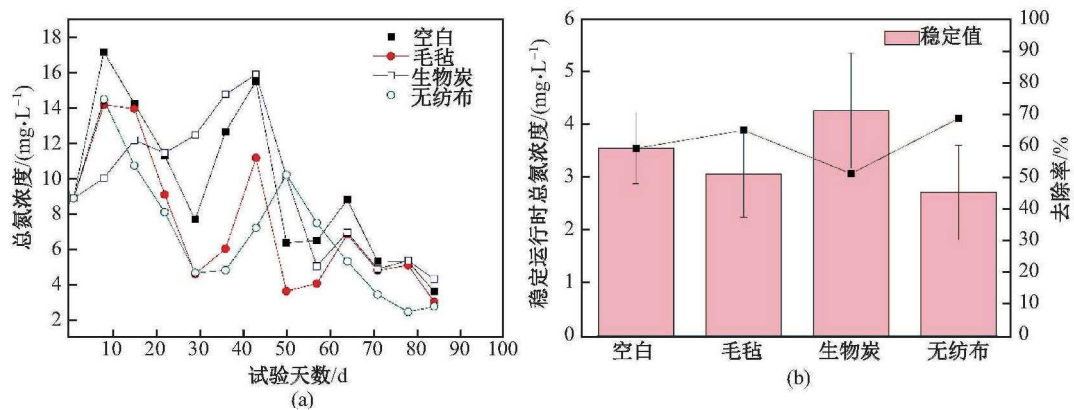


图3 城市河道3种介体对总氮强化去除的动态变化(a)和效能比较(b)

Fig. 3 Dynamic changes (a) and performance comparison (b) of total nitrogen removal with three kinds of media in urban rivers

## 2.2 微生物作用机制分析

### 2.2.1 菌群结构特征分析

本实验分别选取4个试验组(介体材料分别为毛毡、生物炭和无纺布以及空白组)来进行高通量测序分析.各试验组样品门水平下菌群相对丰度如图4所示.结果发现各试验组中细菌菌群主要以变形菌门(Proteobacteria)27.02%~56.37%、绿弯菌门(Chloroflexi)17.3%~19.94%、拟杆菌门(Bacteroidetes)7.53%~10.98%和厚壁菌门(Firmicutes)3.78%~15.52%为优势种群.总体来讲,与空白对照组相比,从能够反映水体污染程度的厚壁菌门(Firmicutes)<sup>[14]</sup>角度出发,运行结束后无纺布组样品中其相对丰度降低,主要是因为随着试验运行,总氮含量下降,污染逐渐削减同时水质得到一定程度改善从而对微生物菌群结构产生影响,毛毡试验组 Firmicutes 丰度显著增加,说明投入毛毡可以对总氮产生一定程度削减但同时也可能导致污染程度增加,生物炭组则无明显变化.与脱氮性能有关的变形菌门(Proteobacteria)<sup>[15-17]</sup>受不同介体材料影响变化不一,加入无纺布可以增大其丰度,投入毛毡和生物炭则降低其丰度;广谷菌门(Euryarchaeota)丰度在毛毡组中有显著增加,而其他两种材料对其影响不明显.试验组中的另外的优势种群 Bacteroidetes 和 Chloroflexi 投入介体材料对其影响不明显.

在属水平下对各试验组样品中微生物种群相似度及分层聚类分析如图5所示,细菌群落没有形成独立的分支,表明群落组成存在一定相似性<sup>[18]</sup>,其中生物炭组与空白组样本距离最为接近,无纺布组与空白组距离最远,毛毡则介于二者之间.样本距离接近说明生物炭组的微生物种群与空白组相似性最大,无纺布组微生物种群与空白差异最大.在样本距离最近的两组中 *Smithella*、*Ornatilinea*、*Meniscus*、*Longilinea* 和 *Caldisericum* 是优势种群.毛毡和无纺布作为介体可以降低互营菌 *Smithella*、产甲烷菌 *Syntrophorhabdus*<sup>[19]</sup>的丰度,生物炭却可以增加其丰度,说明投入生物炭可能促进它们的生长.由于产甲烷菌与反硝化菌存在难以共存的现象<sup>[20]</sup>,当产甲烷菌大量存在时可能会抑制反硝化菌的作用效果,导致生物炭对总氮脱除的效果不如无纺布和毛毡组.在无纺布组,出现了空白组没有的反硝化菌固氮螺菌属(*Azospirillum*)<sup>[21]</sup>和好氧反硝化菌硫杆菌属(*Thiobacillus*)<sup>[22-23]</sup>且丰度较高成为该系统新的优势种群,推测无纺布介体材

料具有较好的生物相容性, 更有利于挂膜, 可以为反硝化菌属提供良好的生境从而促使反硝化菌属的生长, 毛毡组也发现有这两种菌的存在, 其丰度比空白高却显著低于无纺布组, 同时毛毡组的甲烷丝菌属(*Methanothrix*)的丰度高于无纺布组. 综合理化指标和微生物分析认为无纺布对总氮的削减作用优于其他组可能是由于含有多种相对丰度较大的反硝化菌在其中发挥了作用.

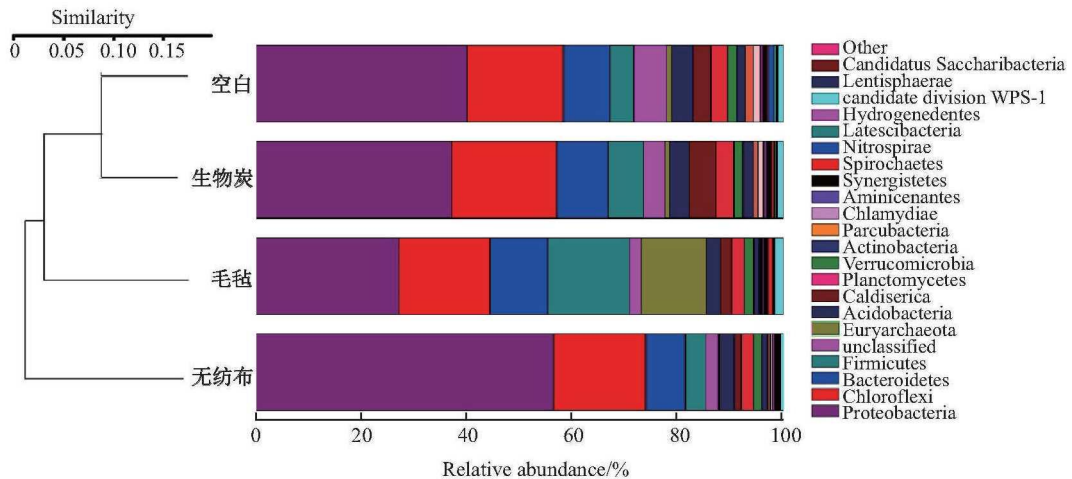


图4 不同介体强化组细菌门水平群落组成分布特征

Fig. 4 Bacterial community composition at the phylum level in different kinds of media

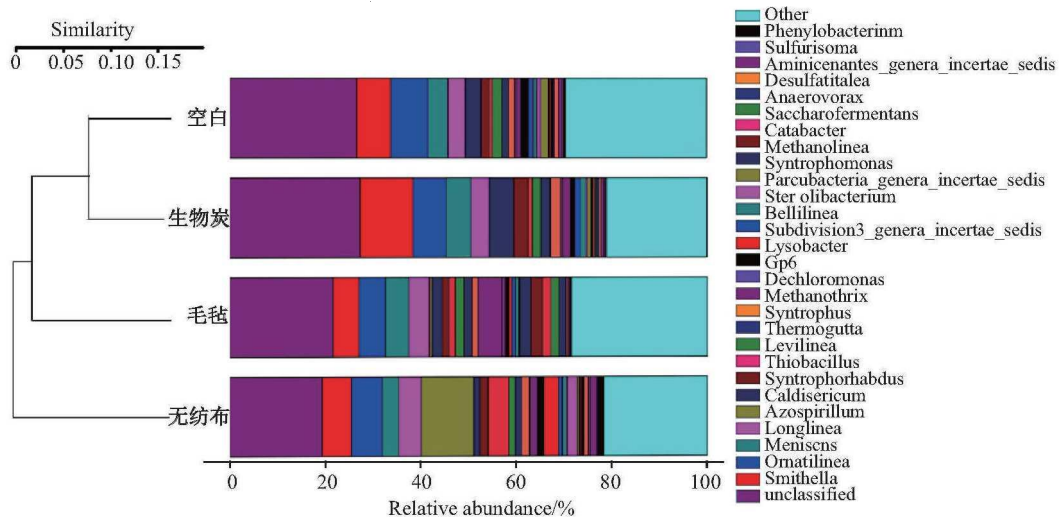


图5 不同介体强化组细菌属水平群落组成分布特征

Fig. 5 Bacterial community composition at the gene level in different kinds of media

### 2.2.2 菌群多样性分析

使用 Alpha 多样性分析来探讨不同介体材料对微生物多样性和丰度的影响, 样本中的丰富度指数 Chao、ACE 和多样性指数 Simpson/Shannon 结果见表 3. 由表中可以看出, 与空白组相比, 加入 3 种介体材料都可以提高物种丰富度, 说明加入介体材料可以促进一些微生物生长从而使系统中微生物物种数量增加, 其中无纺布物种数增加最多, 其次是毛毡和生物炭. Simpson 和 Shannon 指数显示, 加入介体材料会使微生物多样性增加, 微生物多样性无纺布 > 毛毡 > 生物炭, 说明无纺布作为介体材料不仅可以增加系统中微生物物种数量, 还可以增加微生物多样

性. ACE 指数发生变化表明加入介体材料后, 微生物均匀度有不同程度的增加<sup>[24]</sup>, 其中无纺布组增加程度最大. 综合这些指数来看, 以无纺布作为介体时, 可以增加菌群多样性和丰富度.

表 3 各试验组微生物丰富度和多样性

样本名称	Shannon指数	ACE指数	Chao1指数	Simpson
空白组	6.673 093	58 201.724 2	31 434.424 94	0.007 804
毛毡组	6.251 760	64 280.128 7	33 984.331 44	0.009 003
生物炭组	6.291 225	62 804.313 9	32 652.224 69	0.013 037
无纺布组	5.920 693	70 806.397 4	35 626.747 59	0.020 489

基于操作单元 OTU 下不同试验组中的共有与独有微生物种群与组间差异性用维恩图来表示(图 6). 在 0.05 距离处, 4 个实验组的共有物种有 247 种, 其中相对丰度较大的有 *Smithella*、*Ornatilinea*、*Meniscus*、*Longilinea*、*Caldisericum*、*Syntrophorhabdus*、*Levilinea*、*Thermogutta*、*Syntrophus* 等, 空白组与毛毡组共有的物种有 8 种, 空白组与生物炭组共有的物种为 33 种, 毛毡组与无纺布组共有的物种为 9 种. 有 12 种是 3 个介体材料组中共有的物种但在空白组中不存在, 其中丰度较大的有 *Fusibacter*、*Azoacus*、*Methylosarcina*、*Ruminococcus*、*Anaerobacter*、*Propionisimonas*、*Pelotomaculum*、*Mesotoga*、*Spartobacteria*、*genera\_incertae\_sedis* 等. 好氧反硝化菌属 *Azoarcus*<sup>[25-26]</sup> 在无纺布中的丰度高于剩余两个处理组. 无纺布组独有的物种数为 24 种, 生物炭组独有的物种数为 39 种. 从独有的物种数目来看, 3 个试验组数目差异不明显但与空白有显著差异, 说明介体材料所构成的生境中微生物存在一定相似, 但无纺布组与空白组差异最大, 结合物种分析, 差异可能体现在物种丰度和种类上.

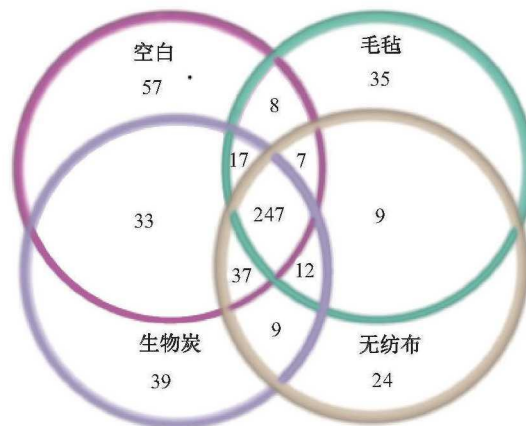


图 6 不同介体材料下微生物菌种数量的变化及对比

Fig. 6 Changes and comparison of microbial populations in different kinds of media

### 3 结 论

本试验使用 3 种介体材料(生物炭、毛毡和无纺布)探究了不同介体材料对上覆水总氮削减效果的影响. 研究表明, 在运行时间 84 d 内, 无纺布对总氮削减效果最为良好, 削减率可提升 23.4%, 其次是毛毡, 削减率可提升 13.9%.

通过探究不同介体强化组中的微生物多样性及结构分布特征, 发现 3 种介体材料微生物以变形菌门、绿弯菌门、拟杆菌门、厚壁菌门为优势种群. 与空白组相比, 无纺布组可以显著增加菌群多样性和丰富度, 而且与氮转化相关的变形菌门的丰度显著高于毛毡组和生物炭组, 特

别是其中的反硝化菌属 *Azospirillum*、*Thiobacillus*和*Azoarcus* 的丰度均显著高于其他实验组,而与反硝化菌存在竞争关系的产甲烷菌属 *Syntrophorhabdus* 则低于空白和生物炭组,生物炭组 *Syntrophorhabdus* 丰度明显增大可能促进该种微生物生长. 毛毡组的微生物菌群结构与无纺布存在一定相似,但其中的反硝化菌属的丰度低于无纺布组;生物炭组微生物群落组成与空白组最为相似. 推测无纺布介体材料因为具有较好的生物相容性,更有利于挂膜,从而促使反硝化菌属的生长. 综合比较来看,介体材料无纺布更有利于对城市河道总氮的削减.

### [参 考 文 献]

- [1] 何岩,沈叔云,黄民生,等. 城市黑臭河道底泥内源氮硝化-反硝化作用研究[J]. 生态环境学报, 2012(6): 1166-1170.
- [2] 于令芹. A/O 短程硝化反硝化耦合污泥水解脱氮性能研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2009.
- [3] 李志洪. 曝气扰动模式对黑臭河道底泥内源营养盐行为的影响作用及氮转化功能菌群响应规律研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [4] 李文超. 曝气扰动下城市黑臭河道底泥内源硫、铁行为与氮循环耦合作用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [5] 付炳炳,潘建新,马景德,等. 采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除[J]. 环境科学, 2018, 7: 3262-3270.
- [6] 黄子贤. 沉水植物对陆域水产养殖污染削减效应研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- [7] 王弘宇,马放,苏俊峰,等. 好氧反硝化菌株的鉴定及其反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1548-1552.
- [8] 王润众,郝瑞霞,赵文莉. 新型缓释碳源的制备及其性能[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 81-87.
- [9] ZHANG C, ZHU M Y, ZENG G M, et al. Active capping technology: A new environmental remediation of contaminated sediment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(5): 4370-4386.
- [10] ZHOU Z M, HUANG T L, YUAN B L, et al. Remediation of nitrogen-contaminated sediment using bioactive, thin-layer capping with biozeolite[J]. Soil & Sediment Contamination, 2016, 25(1): 89-100.
- [11] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 254-257.
- [12] 黄华山,杨志敏,周真明,等. 净水厂污泥覆盖控制底泥氮磷释放效果[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 347-351.
- [13] 刘青松,赵丽芳. 热解温度对生物炭表面性质及释放氮磷的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 164-169.
- [14] 姚丽平. 城市黑臭河道底泥微生物群落结构对人工曝气的响应特征及机理研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [15] 闫媛,黎力,王亚宜,等. 采用高通量测序分析全程自养脱氮(CANON)系统不同脱氮效能下的微生物群落结构[J]. 北京工业大学学报, 2015, 10: 1485-1492.
- [16] ZOU Y, LIN M X, XIONG W G, et al. Metagenomic insights into the effect of oxytetracycline on microbial structures, functions and functional genes in sediment denitrification[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 161: 85-91.
- [17] ZHANG K Y, GU J, WANG X J, et al. Variations in the denitrifying microbial community and functional genes during mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of cattlemanure[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 501-508.
- [18] WEI G, LI M, LI F, et al. Distinct distribution patterns of prokaryotes between sediment and water in the Yellow River estuary[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2016, 100(22): 9683-9697.
- [19] 覃千山. 基于宏基因组的未培养互营降解菌'*Candidatus Smithella cisternae*'的生物信息学研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [20] 孙寓姣,左剑恶,陈莉莉,等. 同时产甲烷反硝化颗粒污泥中微生物群落结构[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 41-41.
- [21] GAO F, LI Z W, CHANG Q B, et al. Effect of florfenicol on performance and microbial community of a sequencing batch biofilm reactor treating mariculture wastewater[J]. Environmental Technology, 2018, 39(3): 363-372.
- [22] 王薇,蔡祖聪,钟文辉,等. 好氧反硝化菌的研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2618-2625.
- [23] PAN J X, MA J D, WU H Z, et al. Simultaneous removal of thiocyanate and nitrogen from wastewater by autotrophic denitrification process[J]. Bioresource Technology, 2018, 267: 30-37.
- [24] 陈晶,张敏特,陈萍,等. 菌剂强化潜流湿地总氮总磷去除及功能菌特性[J]. 环境化学, 2015, 34(12): 2268-2274.
- [25] 方晶晶,马传明,刘存富. 反硝化细菌研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S1): 206-210, 264.
- [26] ZHANG R C, XU X J, CHEN C, et al. Interactions of functional bacteria and their contributions to the performance in integrated autotrophic and heterotrophic denitrification[J]. Water Research, 2018, 143: 355-366.

(责任编辑:李 艺)