

罗 佳, 韩士群, 罗海荣, 等. 外加碳源对富营养化水体生物脱氮效果及细菌群落结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6): 1312-1317.

## 外加碳源对富营养化水体生物脱氮效果及细菌群落结构的影响

罗 佳<sup>1</sup>, 韩士群<sup>1</sup>, 罗海荣<sup>2</sup>, 严少华<sup>1</sup>, 宋 伟<sup>1</sup>, 周 庆<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省农业科学院六合动物基地, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 采用室内模拟试验的方法, 以甲醇、稻壳和木屑 3 种材料作为有机碳源, 通过在生物膜载体(秸秆炭化物)中添加有机碳源来提高对富营养化水体的净化效果。结果表明, 在秸秆炭化物中分别添加了甲醇、稻壳和木屑处理(ZT-JC、ZT-DK、ZT-MX)对富营养化水体中总氮的移除率比只添加生物膜载体处理(ZT)分别提高了 29.8%、14.3%、17.1%。另外, 添加碳源的 3 个处理的水体中硝化细菌数量和反硝化细菌数量均高于 ZT 处理。在净化处理 50 d 后, ZT-JC 处理水体中总有机碳(TOC)含量比对照(不添加载体材料和有机碳源处理)高了 26.5%, 表明液体碳源并不适合于富营养化水体的净化。PCR-DGGE 检测结果显示, 添加有机碳源处理的细菌多样性 Shannon-Wiener 指数和丰度均高于对照, 其中添加稻壳处理的反硝化细菌数量多样性 Shannon-Wiener 指数明显高于添加木屑处理, 表明稻壳比木屑更适合应用于富营养化水体的治理。

**关键词:** 碳源; 富营养化水体; 生物膜; 细菌群落结构

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2012)06-1312-06

## Effect of exogenous carbon resource on biological denitrification and bacterial community structure of eutrophic waters

LUO Jia<sup>1</sup>, HAN Shi-qun<sup>1</sup>, LUO Hai-rong<sup>2</sup>, YAN Shao-hua<sup>1</sup>, SONG Wei<sup>1</sup>, ZHOU Qing<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Luhe Animal Sciences Base, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Three carbon sources(methanol, rice hull, sawdust) were added into the biofilm carrier to improve nitrogen removal from the eutrophic waters by indoor simulation experiments. The results showed that the removal rate of total nitrogen by methanol (ZT-JC), rice hull (ZT-DK) and rice hull (ZT-MX) were 29.8%, 14.3%, 17.1% higher than that of control (ZT, no additional carbon sources), respectively. The numbers of nitrifying bacteria and denitrifying bacteria in the treatments with exogenous carbon sources were higher than that in ZT treatment. After fifty days of purification, total organic carbon content in ZT-JC treatment was 26.5% higher than that in control (no additional carbon sources and biofilm carrier), indicating that liquid carbon source was inappropriate for the purification of the eutrophic water. PCR-DGGE profile revealed that the diversity index of Shannon-Wiener and richness in the treatments of additional carbon sources were in-

creased, compared to that of control. The diversity index of Shannon-Wiener for the denitrifying bacteria in ZT-DK treatment was higher than that in ZT-MX treatment, indicating that the rice hull outperformed sawdust for the removal of nitrogen from eutrophic waters.

**Key words:** carbon resource; eutrophic water; biofilm; bacterial community structure

收稿日期: 2012-04-21

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07103-002)

作者简介: 罗 佳(1982-), 男, 江苏滨海人, 博士, 主要从事富营养化水体治理。(Tel) 025-84390241; (E-mail) luo\_jia\_428@163.com

通讯作者: 韩士群, (Tel) 025-84390241; (E-mail) shqunh@yahoo.com.cn

水体富营养化是指水体中营养物质(氮和磷)过量而造成的水质恶化,这已经成为当今国际重大水环境问题之一而引起世界各国的高度重视,目前中国也正在开展水体富营养化的研究及综合治理<sup>[1]</sup>。作为生物脱氮技术应用于水体污染治理的生物膜法,已受到国内外研究者的重视<sup>[2,4]</sup>。近年来,生物膜法以其处理效率高、耐冲击负荷、运行稳定及经济节能等优点在污水处理中得到了广泛应用,但是在湖泊水体净化中的应用相对较少。脱氮过程中常需要有机碳源作为电子供体<sup>[5]</sup>,一些外加碳源如甲醇、乙醇、乙酸、葡萄糖等<sup>[6-8]</sup>在污水处理中大量应用。但是,以此类液态有机物作为硝化反硝化碳源应用于湖泊大水面富营养化的治理存在着难度。由于湖泊水面积大,大量液体有机物很容易造成液体碳源的残留,而这些液体碳源大部分本身并不安全,会对水环境造成潜在的危险。此外,液态碳源还需要配备专门的碳源投加装置,成本和运行费用都较高。因此,各国研究者都在积极寻找适合大水体应用的碳源。近年来,越来越多的研究者选择固体有机物作为碳源去除污染水体中的氮素。封羽涛等<sup>[9]</sup>采用可降解聚合物 PCL 和 PBS 作为固体碳源去除低有机污染水体中的硝酸盐,其在聚合物表面能够形成反硝化生物膜,能有效地降低水体中的氮含量。曹文平等<sup>[10]</sup>将竹丝应用于景观水体生态修复,竹丝表面能较快形成生物膜,可以高效地移除水体中的氮。

我们试图利用先前筛选出的一种生物膜载体<sup>[4]</sup>,通过在生物膜载体中添加少量碳源来解决碳源供应问题。因此,本试验研究在生物膜载体中添加 3 种有机碳源(甲醇、稻壳、木屑)对富营养化水体中细菌群落结构及硝化细菌和反硝化细菌等脱氮微生物种群的影响,以期为治理湖泊水体富营养化提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

采用室内模拟试验的方法,在 70 cm×40 cm×45 cm 的周转箱中进行。在周转箱内壁安装一个潜水泵构成内循环。生物膜载体材料(秸秆炭化物)装于长、宽均为 35 cm、厚度为 2 cm 的无纺布袋中,其主要成分为稻壳等秸秆炭化后的产物,经过水洗处理,使样品中不含可溶性氮和磷。试验设置 5 个

处理,分别为不添加载体材料和有机碳源的处理(对照);添加秸秆炭化物(生物膜载体材料)[300 g(干重)]的处理(ZT);添加秸秆炭化物[300 g(干重)]及甲醇(100 mg/L)的处理(ZT-JC);添加秸秆炭化物及稻壳[300 g(干重),比例为 9:1]的处理(ZT-DK);添加秸秆炭化物及木屑[300 g(干重),比例为 9:1]的处理(ZT-MX)。每个处理设置 3 个重复,每个处理的周转箱中装 100 L 水,水取自江苏省农业科学院 2 号塘富营养化的自然水体,其总氮含量为 4.35 mg/L,总磷含量为 0.35 mg/L。

### 1.2 样品采集与测定

每间隔 10 d 取一次水样和生物膜载体,共取样 6 次。在净化处理第 0 d、10 d、20 d、30 d、40 d、50 d,分别取 100 ml 水样于 -20 ℃ 保存,测定水样中总氮、总磷、总有机物(TOC)含量。用剪刀剪取生物膜载体,挤压获得 10 ml 的水,于 4 ℃ 保存,分别测定生物膜载体中细菌、硝化细菌和反硝化细菌数量。在净化处理第 50 d 时,取出整个生物膜载体,挤压获得 100 ml 的水,用 0.22 μm 滤膜抽滤后,将细菌过滤在滤膜上,将滤膜保存于 -20 ℃,待提取 DNA,用 PCR-DGGE 分析生物膜载体中的细菌群落结构。水体中总氮和总磷采用流动分析仪(Auto Analyzer3)测定,总有机物采用 TOC 仪(MultiN/C 3100, Germany)测定;细菌数量采用平板计数法,培养基为牛肉膏蛋白胨培养基<sup>[11]</sup>;硝化细菌和反硝化细菌计数采用最大或然数(MPN)计数法<sup>[12]</sup>。

### 1.3 PCR-DGGE 检测

利用 PCR-DGGE 技术<sup>[13]</sup>,通过水体 DNA 试剂盒(Omega)提取水体中细菌 DNA,经过 PCR 扩增后(PCR 引物为 PRBA338 上游引物:5'-ACTC-CTACGGGAGGCAGCAG-3'和 PRUN518 下游引物:5'-ATTACCGCGGCTGCTGG-3',在 PRBA338 上游引物的 5'端添加 GC 夹子:5'-CGCCCGCCGCGCGGCGCGGGCGGGCGGGGGCACGGGGGG-3'),采用 D-Code 突变检测系统(Bio-Rad)对样品进行 DGGE 分析。所用的聚丙烯酰胺凝胶浓度为 8%,变性梯度为 40%~60%,80 V、恒温 60 ℃、1×TAE 中电泳 16 h,银染后扫描。

所得图像用 Bio Rad Quantity One 4.6.3 软件进行处理。通过 Bio Rad Quantity One 软件系统将 DGGE 条带转换成数字信息,即香浓-威纳多样性指数( $H$ )、丰度( $S$ )、均匀度指数( $E_H$ ),并比较各个样

品的多样性<sup>[14]</sup>。

#### 1.4 数据分析与统计

试验数据统计分析使用 SPSS 13.0 软件,采用一维方差分析和单因变量多因素方差分析进行比较,比较方法为 Duncan's 和 Tamhane's T2 检测,采用 Quantity One 分析软件(Bio-Rad)分析样品 DGGE 电泳条带。

## 2 结果

### 2.1 外加碳源对水体的净化效果

每隔 10 d 对在生物膜载体中添加不同有机碳源的水体进行监测,水体的总氮、总磷和总有机物含量变化见表 1。净化第 10 d 时的结果显示,与对照相比,各处理水体中总氮和总磷含量无显著性差异( $P>0.05$ ),而净化 20 d 后各个处理水体中总氮移除效果明显提高( $P<0.05$ )。经过 50 d 的净化,对照水体中总氮含量从 4.35 mg/L 下降到 3.95 mg/L,总氮去除率为 9.2%;ZT 处理水体中总氮含量从 4.35 mg/L 下降到 2.95 mg/L,总氮去除率为 32.2%;添加碳源的各个处理(ZT-JC、ZT-DK 和 ZT-MX)水体中总氮均从 4.35 mg/L 分别下降到 2.53 mg/L、2.75 mg/L 和 2.71 mg/L,比 ZT 处理的去除率(32.2%)分别提高了 29.8%、14.3% 和 17.1%。但净化第 50 d 时各个处理水体中总磷去除效果不明显,各个处理间差异均不显著( $P>0.05$ )。经过 50 d 的净化,对照水体中总有机物含量从 53.29 mg/L 下降至 44.75 mg/L,下降了 16.0%;ZT 处理水体中总有机物含量下降了 57.1%,ZT-JC、ZT-DK 和 ZT-MX 处理水体中总有机物分别下降了 52.6%、36.3% 和 45.6%。试验结果还表明,液体碳源甲醇的添加容易造成水体中总有机物含量的增加,即使经过 50 d 的净化处理,总有机物虽然下降 52.6%,ZT-JC 处理水体中总有机物含量仍为 60.92 mg/L,显著高于对照水体中总有机物含量( $P<0.05$ ),而固体碳源的添加未造成水体中总有机物含量的增加。

### 2.2 外加碳源对水体中细菌数量的影响

测定生物膜表面水体中细菌数量,结果(图 1)显示,与对照相比,净化前 20 d 各个处理的细菌数量无显著性变化,第 30 d 时,ZT、ZT-JC、ZT-DK 和 ZT-MX 处理的细菌数量快速增加。30 d 后,ZT 处理的细菌数量趋于稳定,但 ZT-JC、ZT-DK 和 ZT-MX 处理的细菌数量持续增加。经过 50 d 的净化,ZT 处

理的细菌数量从  $3.8 \times 10^5$  CFU/ml 增加到  $8.68 \times 10^7$  CFU/ml,而 ZT-JC、ZT-DK 和 ZT-MX 处理的细菌数量分别增加到  $2.3 \times 10^8$  CFU/ml、 $2.4 \times 10^8$  CFU/ml 和  $2.6 \times 10^8$  CFU/ml。表明,添加生物膜载体材料和有机碳源的水体中细菌数量高于只添加生物膜载体材料水体中细菌数量。

### 2.3 外加碳源对水体硝化细菌和反硝化细菌数量的影响

利用 MPN 计数法测定不同处理生物膜载体表面水体中硝化细菌和反硝化细菌的数量,结果(图 2、图 3)显示,各处理生物膜载体表面水体中硝化细菌和反硝化细菌数量均随净化天数的增加而逐渐增加,净化 30 d 后,各个处理水体中硝化细菌和反硝化细菌数量均出现显著性差异( $P<0.05$ ),其中添加生物膜载体和碳源的 3 个处理的反硝化细菌数量显著高于只添加生物膜载体(ZT)处理( $P<0.05$ )。净化第 50 d 时,添加生物膜载体处理(ZT)的硝化细菌和反硝化细菌数量均显著高于对照( $P<0.05$ ),添加生物膜载体和碳源处理(ZT-JC、ZT-DK、ZT-MX)水体中硝化细菌和反硝化细菌数量显著高于只添加生物膜载体(ZT)( $P<0.05$ ),表明添加生物膜载体和碳源能显著提高水体中硝化细菌和反硝化细菌数量。

### 2.4 外加碳源对水体细菌群落结构的影响

将水体 DNA 试剂盒(Omega)提取出的 DNA 进行 PCR 扩增,经检测扩增产物片段大小为 230 bp,证实为 16S rDNA V3 区特异性片段。通过 DGGE 技术分别将各个处理的 PCR 产物分离为若干条带,结果(图 4)显示,不同处理样品的 16S rDNA V3 区 PCR 产物出现的带型均有一定的差别。对 DGGE 图谱进行初步统计发现:各个处理的样品都可以分离出不同的条带,在 DGGE 图谱中电泳条带数目、强度和迁移率均存在一定的差异。利用软件 Quantity One (Quantity One 4.6.3, Bio-Rad,  $p<0.05$ ) 将 DGGE 图谱转换为数字模式,并计算各个样品的 Shannon-Wiener 指数、丰度( $S$ )和均匀度指数( $E_H$ ),结果(表 2)显示,对照的条带有 27 条,ZT 处理的条带增加到了 36 条,ZT-JL、ZT-DK、ZT-MX 处理的条带数均高于 ZT 处理。添加生物膜载体和有机碳源处理的细菌多样性 Shannon-Wiener 指数和丰度均明显高于对照,表明添加生物膜载体和碳源能够提高水体中细菌群落的多样性。添加生物膜载体和木屑

处理(ZT-MX)的 Shannon-Wiener 指数低于只添加 源用于富营养化水体的治理。  
生物膜载体(ZT)处理,表明木屑不合作为有机碳

表 1 水体中总氮、总磷、总有机碳含量的变化

Table 1 The contents of total nitrogen, total phosphorus, and total organic carbon in the water

指 标	处 理	净化天数(d)					
		0	10	20	30	40	50
总氮 (mg/L)	对照	4.35±0.25a	4.32±0.14a	4.25±0.12a	4.16±0.15a	4.07±0.22a	3.95±0.21a
	ZT	4.35±0.25a	4.17±0.12a	3.79±0.18bc	3.46±0.19b	3.28±0.11b	2.95±0.19b
	ZT-JC	4.35±0.25a	4.11±0.09a	3.47±0.20c	3.10±0.19c	2.89±0.20c	2.53±0.18d
	ZT-DK	4.35±0.25a	4.19±0.17a	3.85±0.21b	3.27±0.20bc	3.05±0.18bc	2.75±0.15c
	ZT-MX	4.35±0.25a	4.11±0.11a	3.98±0.19b	3.56±0.18b	3.12±0.19c	2.71±0.13d
总磷 (mg/L)	对照	0.35±0.02a	0.34±0.01a	0.32±0.02a	0.33±0.02a	0.31±0.02a	0.30±0.03a
	ZT	0.35±0.02a	0.32±0.02a	0.31±0.02a	0.32±0.02a	0.31±0.02a	0.29±0.02a
	ZT-JC	0.35±0.02a	0.36±0.02a	0.33±0.03a	0.28±0.02bc	0.29±0.02a	0.30±0.02a
	ZT-DK	0.35±0.02a	0.33±0.03a	0.34±0.02a	0.33±0.02a	0.31±0.03a	0.32±0.01a
	ZT-MX	0.35±0.02a	0.35±0.03a	0.30±0.02a	0.31±0.02ab	0.30±0.02a	0.31±0.02a
总有机碳 (mg/L)	对照	53.29±4.12a	49.8±3.82a	50.16±2.87b	47.37±3.98c	45.25±4.02c	44.75±3.19c
	ZT	53.29±4.12a	45.13±4.18a	40.28±3.19a	33.65±2.19a	28.15±2.98a	22.85±2.76a
	ZT-JC	128.63±7.38b	110.18±6.38b	94.28±8.21c	85.54±7.61d	73.87±6.26d	60.92±5.16d
	ZT-DK	53.29±4.12a	48.16±4.71a	45.43±3.67a	42.17±2.91bc	37.28±4.51b	33.94±2.76b
	ZT-MX	53.29±4.12a	46.42±4.53a	43.92±4.12a	39.64±3.65b	35.31±3.17b	28.98±2.18b

对照:不添加载体材料和有机碳源处理;ZT:添加秸秆炭化物处理;ZT-JC:添加秸秆炭化物和甲醇处理;ZT-DK:添加秸秆炭化物和稻壳处理;ZT-MX:添加秸秆炭化物和木屑处理。同一指标同一列中不同小写字母表示差异达0.05 显著水平。

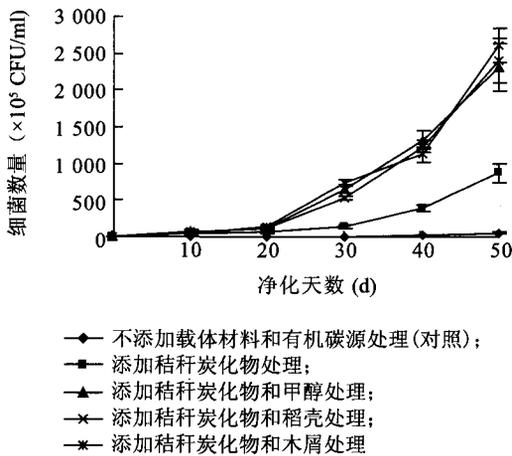


图 1 水体中细菌数量的变化  
Fig. 1 The changes of the number of bacteria in the water

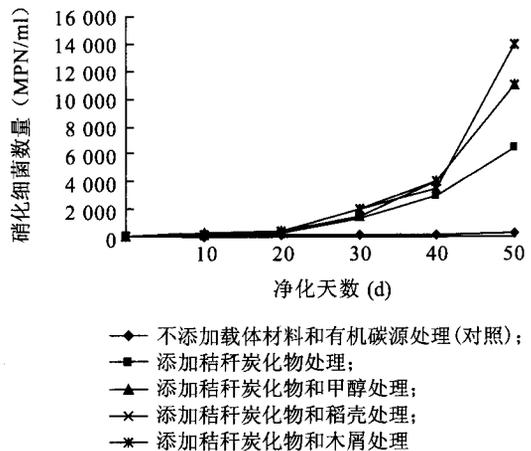


图 2 水体中硝化细菌数量的变化  
Fig. 2 The changes of the number of nitrifying bacteria in the water

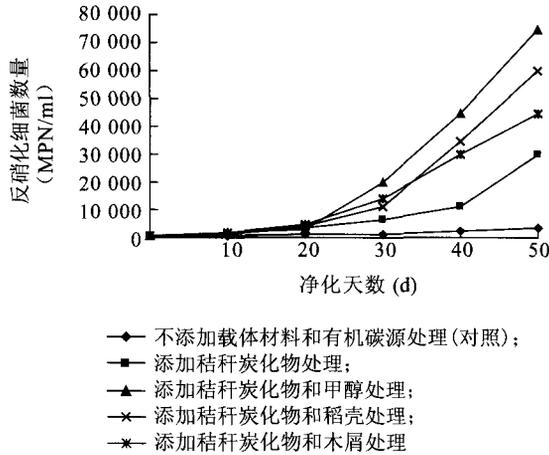
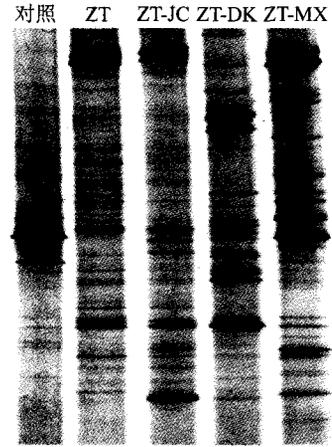


图 3 水体中反硝化细菌数量的变化

Fig. 3 The changes of number of denitrifying bacteria in the water



对照: 不添加载体材料和有机碳源处理; ZT: 添加秸秆炭化物处理; ZT-JC: 添加秸秆炭化物和甲醇处理; ZT-DK: 添加秸秆炭化物和稻壳处理; ZT-MX: 添加秸秆炭化物和木屑处理。

图 4 16S rDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 图谱

Fig. 4 DGGE profile of amplified 16S rDNA V3 fragments from water samples

表 2 不同处理细菌的多样性 Shannon-Wiener 指数、丰度和均匀度指数

Table 2 Shannon-Wiener index, richness and evenness index of the bacterial population with different treatments

项 目	对照	ZT	ZT-JC	ZT-DK	ZT-MX
丰度	27	36	38	42	39
Shannon-Wiener 指数	2.814	3.318	3.379	3.398	3.270
均匀度指数	0.854	0.940	0.891	0.891	0.893

对照: 不添加载体材料和有机碳源处理; ZT: 添加秸秆炭化物处理; ZT-JC: 添加秸秆炭化物和甲醇处理; ZT-DK: 添加秸秆炭化物和稻壳处理; ZT-MX: 添加秸秆炭化物和木屑处理。

### 3 讨论

碳源是在微生物生长过程中为微生物提供碳素和能量来源的物质,是影响反硝化细菌活性的重要因素之一。反硝化菌以亚硝酸盐或硝酸盐作为电子受体,将水体中有机物作为碳源充当电子供体,通过同化和异化作用将含氮污染物转化为有机氮化合物和气态氮。在低碳氮比条件下,水体中反硝化过程受到抑制,并导致 NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 3 种温室气体的大量产生<sup>[15]</sup>。贾文林等<sup>[16]</sup>研究发现碳氮比对水体化学需氧量的去除影响不大,但氮的去除率随着碳氮比的增大而逐渐升高。在富营养化水体中添加有机碳源,是水体生物脱氮的一种重要方法,但在实际应用中必须考虑过量添加碳源所带来的有机物污染。甲醇作为一个有机碳源,在污水处理中被广泛应用<sup>[17]</sup>,甲醇残留在污水处理中是可控的,并不会

造成水体二次污染,但在湖泊中由于水体容积大、交换量大以及甲醇残留无法处理等问题而无法应用。本试验中甲醇的添加使水体的总有机物含量由 53.29 mg/L 提高到 128.63 mg/L,净化第 50 d 时添加甲醇处理水体中总有机物含量比添加稻壳和木屑处理的高了 1 倍。表明,甲醇不适合在富营养化湖泊水体中应用。

生物脱氮主要依靠微生物的硝化和反硝化作用使水体的含氮污染物转化为氮气,微生物在此过程中起关键性作用,但是水体富营养化对微生物群落结构和种群数量均产生了严重破坏。Katleen 等<sup>[18]</sup>对 4 个不同营养水平浅水湖泊中微生物种群多样性的研究表明,随着湖泊营养水平的改变,水体中细菌的群落结构发生明显变化。冯胜等<sup>[19]</sup>研究表明,随着水体生态环境的恶化,微生物多样性的下降,导致水体生态系统脆弱化。生物膜载体材料

可以在水体中为微生物提供能量和栖息场所,重新构建微生物群落结构的多样性,从而有利于提高水体自身的净化能力。研究结果表明水体中细菌多样性的增加与氮的去除呈显著相关,随着细菌多样性的提高水体中氮的浓度降低<sup>[4]</sup>。本试验在生物膜载体中添加少量碳源比未添加碳源的处理提高了水体中硝化细菌和反硝化细菌数量及细菌群落结构多样性。另外,固体碳源稻壳和木屑对水体净化效果两者间无显著差异,但添加稻壳处理的细菌数量、反硝化细菌数量和细菌群落结构多样性指数明显高于添加木屑处理。邵留等<sup>[20]</sup>研究结果表明,木屑含有大量木质素,碳源释放缓慢,易造成反硝化速度受阻。因此,在实际应用中可以采用稻壳作为反硝化的碳源,来净化富营养化水体。

#### 参考文献:

- [1] 胡正峰,张磊,邱勤,等. 温度条件对溇溪河藻类生长的影响[J]. 江苏农业科学,2010(2):384-386.
- [2] LIANG Z W, HAN Z Y, YANG S Y, et al. A control strategy of partial nitrification in a fixed bed biofilm reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 710-715.
- [3] 陆红,晁建颖,张毅敏,等. 人工介质富集附着生物对富营养化水体的净化作用[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3): 76-81.
- [4] 罗佳,韩士群,宋伟,等. 生物膜载体对富营养化水体细菌群落结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(5): 1016-1020.
- [5] KELLER P K. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND) [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 36(6): 61-68.
- [6] HAMAZAH Z, GHARARAH A. Biological denitrification of high nitrate water: influence of type of carbon source and nitrate loading [J]. *J Environ Sci Health*, 1996, 31(7): 1651-1668.
- [7] MOHSENI B A, ELLIOTT D J, MOMENY M A. Denitrification of groundwater using acetic acid as a carbon source [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 40(2): 53-59.
- [8] 朱萍萍,李平,吴锦华,等. SBR生物脱氮过程中N<sub>2</sub>O释放的影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(9): 18-21.
- [9] 封羽涛,吴为中. 可降解聚合物PCL/PBS在低有机污染水中固相反硝化脱氮效果比较[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6-7): 1127-1132.
- [10] 曹文平,谭水成. 竹丝生物膜反应器修复校园景观水体的实验研究[J]. 环境工程学报, 2010, 7(4): 1585-1590.
- [11] 沈萍,范秀容,李广武. 微生物学实验[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [12] 张光亚,陈美慈,闵航,等. 设施栽培土壤氧化亚氮释放及硝化、反硝化细菌数量的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 239-243.
- [13] 罗佳,蒋小芳,孟琳,等. 不同堆肥原料的有机无机复合肥对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 97-106.
- [14] LUO H F, QI H Y, ZHANG H X. Assessment of the bacterial diversity in fenvalerate-treated soil [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2004, 20: 509-515.
- [15] 董黎明,汪苹,刘俊女. 碳氮比对废水好氧脱氮中含氮气态产物的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6G): 5-9.
- [16] 贾文林,吴娟,武爱国,等. 碳氮比对人工湿地污水处理效果的影响[J]. 环境工程学报, 2010, 4(4): 767-770.
- [17] 付昆明,曹相生,孟雪征,等. 污水反硝化过程中亚硝酸盐的积累规律[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1660-1664.
- [18] KATLEEN V G, TOM V, NELE V. Characterization of bacterial communities in four freshwater lakes differing in nutrient load and food web structure [J]. *FEMS Microbial Ecol*, 2005, 53: 205-220.
- [19] 冯胜,秦伯强,高光. 细菌群落结构对水体富营养化的响应[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1823-1829.
- [20] 邵留,徐祖信,金伟,等. 农业废物反硝化固体碳源的优选[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5): 748-754.

(责任编辑:袁伟)