

文章编号:1000-582X(2005)05-0130-06

# SUFR 系统中微生物菌群生态功能的试验分析\*

王丹云,罗固源,叶姜瑜,张瑞雪,季铁军,唐刚

(重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400030)

**摘要:**对螺旋升流式反应器(Spiral Up-Flow Reactor, SUFR)系统中微生物的数量分布以及与主要水质指标的相关性进行了试验研究,结果表明:SUFR系统中的微型动物种群较多,微生物生态系统稳定;系统中微生物的数量与营养盐的含量密切相关,其中总异养菌与COD的相关系数 $r$ 为0.949,有机磷细菌与TP的相关系数 $r$ 为0.815,亚硝化菌与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的相关系数 $r$ 为0.909,反硝化菌的数量和TN的相关系数 $r$ 为0.653。

**关键词:**螺旋升流式反应器;微生物;脱氮除磷微生物;数量分布;相关性

**中图分类号:**X703

**文献标识码:**A

在螺旋升流式反应器(Spiral Up-Flow Reactor, SUFR)<sup>[1]</sup>中水流以螺旋流升流方式行进,较好地形成了活塞流流态,反应器中基质浓度呈明显的梯度分布,从而显著提高了反应器中脱氮除磷的效果。笔者就SUFR脱氮除磷系统中主要微生物功能菌群(环境微生物生态关系)从生态学的角度进行了研究,为建立SUFR的细菌学指标体系提供相关数据。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验装置

SUFR试验装置系统的模式示意图如图1所示。厌氧反应器、缺氧反应器、好氧反应器均使用SUFR,用有机玻璃管制成,厌氧反应器内径0.13 m,高0.12 m,有效容积约16 L;缺氧反应器内径0.19 m,高0.85 m,有效容积约24 L;好氧反应器内径0.19 m,高1.6 m,有效容积约45 L。操作参数为:进水流量为9 L/h,缺氧至厌氧混合液回流为进水流量的150%,好氧至缺氧混合液回流量为200%~250%,污泥回流量为50%~80%,污泥龄 $\text{SRT}=20\text{ d}$ 。

厌上、厌中、厌下指厌氧反应器的上部、中部、下部取样,同理,缺上、缺中、缺下指缺氧反应器的上部、中

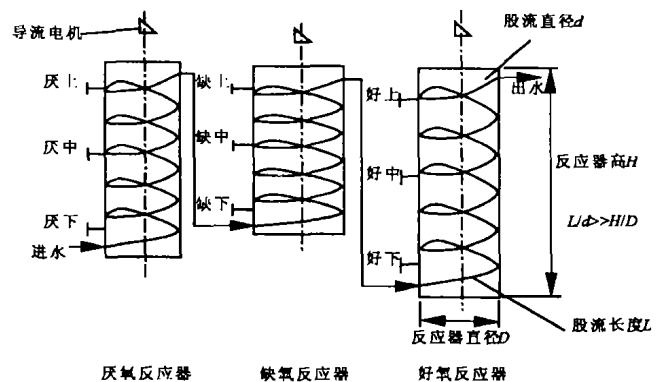


图1 螺旋升流式反应器模式示意图

部、下部取样,好上、好中、好下指好氧反应器的上部、中部、下部取样。

在SUFR中,螺旋流态利于流束之间的传质,相对固定的空间位置,利于形成微生物之间共生和互生的微生态系。

### 1.2 试验水质及分析方法

试验原水由本校学生区生活污水和自来水再加一定量的 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、奶粉、豆粉使其接近代表性的城市污水情况。其中生活污水的COD占总量的60%左右,试验原水水质如表1所示。

\* 收稿日期:2005-01-22

基金项目:国家自然科学基金(50378095)

作者简介:王丹云(1974-),女,江苏武进人,重庆大学讲师,主要从事水污染控制的研究。

表1 试验原水水质指标及分析方法 mg/L

指标	数值范围	数值平均值	分析方法
COD <sub>Cr</sub>	260~350	328	HACH-COD测定仪(美)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	3.2~6.6	5.4	钼锑抗分光光度法 过硫酸钾消解-
TP	5.2~7.5	6.5	钼锑抗分光光度法
NH <sub>3</sub> -N	27~36	32	纳氏试剂光度法 过硫酸钾氧化-
TN	35~55	46	紫外分光光度法
pH	6.8~7.2	7	PHS-3C型精密酸度计

### 1.3 微生物的培养与计数

1) 原生及后生动物的镜检与计数: 用光学显微镜对 SUFR 系统中的生物相进行观察和拍照, 采用显微镜直接计数法;

2) 异养细菌总数: 培养异养细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基<sup>[2]</sup>, 稀释度为  $10^3 \sim 10^4$ , 37 °C 培养 3~5 d, 重复数为 3, 平板法计数;

3) 有机磷细菌: 采用生理试验方法, 这类细菌往往可产生卵磷脂酶, 能使卵磷脂分解生成脂肪和水溶性的磷酸胆碱。当细菌被培养在蒙金娜培养基上时, 由于磷细菌能分解卵黄中的有机磷产生磷酸, 故在其菌落的周围可形成一个碳酸钙溶解区。观察菌落形态, 可初步从异养菌群中认定出磷细菌菌落。故采用蒙金娜基础培养基培养有机磷细菌<sup>[3]</sup>, 培养温度为 28 °C, 培养天数为 3~5 d, 重复数为 3;

4) 氮循环细菌: 利用鉴别培养基, 采用最大或然数 (most probable number, MPN) 法测定 SUFR 反应系统中各氮循环菌含量, 依据样品中各菌在一定条件下将各自底物分别转化为相应产物的概率, 来估计样品中各氮循环菌数。MPN 法测定的混合液中亚硝化、硝化、反硝化结果, 在某种意义上可反映整个反应系统中亚硝化、硝化、反硝化强度。

亚硝化菌: 采用改良斯蒂芬逊 (Stephenson) 培养基<sup>[3]</sup>, 多管发酵法培养基, 稀释度为  $10^2 \sim 10^7$ , 每个稀释度接种 3 管, 培养温度为 28 °C, 培养 14 d 后观察, MPN 法计数;

反硝化菌: 采用柠檬酸钠硝酸钾培养基<sup>[3]</sup>, 多管发酵法培养基, 稀释度为  $10^4 \sim 10^9$ , 重复数为 3, 28 °C 培养 14 d 后观察, 凡产气变浑浊的均为阳性, MPN 法计数。

## 2 试验结果

### 2.1 微型动物

从 SUFR 系统中取出活性污泥, 进行镜检, 仔细观察微型动物的体型、种类、主要指示性微型动物的数量及演替变化状况。

#### 2.1.1. 原生动物

SUFR 系统中原生动物生物相如图 2 所示:

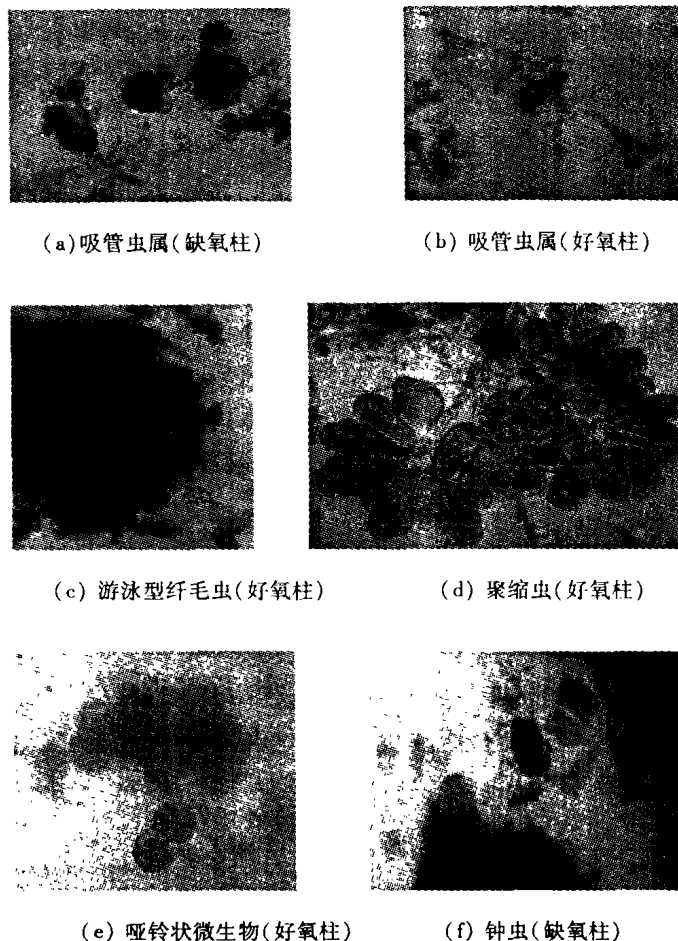
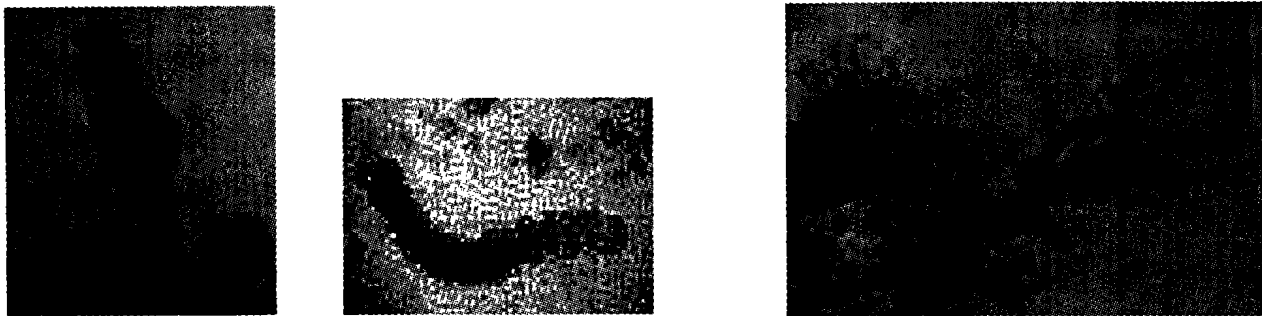


图2 SUFR系统中原生动物显微镜照片(放大倍数:100)

从图 2 可见: SUFR 系统中微生物活性较强, 种类较为丰富, 累枝虫、钟虫、盖纤虫、遁纤虫、聚缩虫、独缩虫等固着类纤毛虫数量多, 同时吸管虫属也少量出现, SUFR 系统中原生动物呈现多样化的趋势。从照片中也可见该系统中的污泥菌胶团絮凝形成了良好的颗粒, 这是由于细菌在生命活动中形成和分泌的多肽类物质、粘液物质等这些物质都有利于细菌间的黏附和胶联, 有利于污泥颗粒化<sup>[4]</sup>。且从图 2 见到颗粒污泥周围有大量的微型动物, 如钟虫。有报道称<sup>[5]</sup>, 钟虫等固着型原生动物的尾柄周围可以分泌有粘稠的物质, 许多尾柄交织粘集在一起和细菌凝聚成大的絮体。这些都有利于污泥形成颗粒, 从而获得很好的污泥沉降效果。

#### 2.1.2 后生动物

系统中后生动物也比较丰富, 如图 3 所示:



(a) 轮虫(好氧柱) (b) 红斑瓢体虫(好氧柱) (c) 线虫(缺氧柱)

图3 SUFR系统中微型后生动物显微镜照片(放大倍数:100)

系统中出现的后生动物主要有旋轮虫属、轮虫属、猪吻轮虫、线虫和瓢体虫等。

通过显微镜对 SUFR 系统中的原生动物与后生动物进行观察计数的结果如表 2 所示。

2.2 主要微生物功能菌群分布

2.2.1 异养细菌总数及其分布

采用稀释平板计数法测定反应器运行稳定期污泥

中的异养细菌总数,见表 3。

结果表明,异养细菌总数量级在  $10^5 \sim 10^6$  之间,随水流方向在厌氧、缺氧和好氧单元都是逐渐降低趋势,但厌氧柱中部相对较少,好氧柱和缺氧柱中部相对较多。

2.2.2 有机磷细菌数及其分布

采用稀释平板计数法测定反应器运行稳定期污泥中的有机磷细菌数,见表 4。

表2 SUFR系统中微生物种群的镜检和计数结果

种类	原生动物					后生动物
	纤毛纲			鞭毛纲	肉足纲	
	固着类纤毛虫	游动型纤毛虫	吸管虫			
SUFR 系统中的数量	$8.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^5$	$2.5 \times 10^2 \sim 3.6 \times 10^3$	$4.5 \times 10^2 \sim 4.6 \times 10^4$	$0.3 \times 10^2 \sim 2.1 \times 10^2$	$0.7 \times 10^2 \sim 1.9 \times 10^2$	$3.0 \times 10^2 \sim 7.0 \times 10^2$

表3 SUFR各取样点异养细菌及其分布

取样点	个/mL								
	好上	好中	好下	缺上	缺中	缺下	厌上	厌中	厌下
数值范围	$2.4 \times 10^5 \sim 7.0 \times 10^5$	$5.8 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^6$	$3.1 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6 \sim 3.8 \times 10^6$	$2.5 \times 10^6 \sim 9.8 \times 10^6$	$1.4 \times 10^6 \sim 8.6 \times 10^6$	$4.1 \times 10^6 \sim 9.9 \times 10^6$	$3.9 \times 10^6 \sim 7.7 \times 10^6$	$5.3 \times 10^6 \sim 9.0 \times 10^6$
数值平均值	$4.8 \times 10^5$	$1.2 \times 10^6$	$9.1 \times 10^5$	$2.1 \times 10^6$	$3.3 \times 10^6$	$2.3 \times 10^6$	$5.0 \times 10^6$	$4.8 \times 10^6$	$7.4 \times 10^6$

说明:SUFR 进行统计分析的样本数为 15 个。

表4 SUFR各取样点有机磷细菌及其分布

取样点	个/mL								
	好上	好中	好下	缺上	缺中	缺下	厌上	厌中	厌下
数值范围	$7.50 \times 10^4 \sim 2.60 \times 10^5$	$3.25 \times 10^5 \sim 9.00 \times 10^5$	$1.5 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^6$	$2.25 \times 10^5 \sim 5.17 \times 10^6$	$1.00 \times 10^6 \sim 9.36 \times 10^6$	$3.00 \times 10^5 \sim 8.00 \times 10^6$	$5.00 \times 10^5 \sim 8.80 \times 10^6$	$1.63 \times 10^5 \sim 6.90 \times 10^6$	$1.25 \times 10^6 \sim 4.30 \times 10^6$
数值平均值	$1.77 \times 10^5$	$6.25 \times 10^5$	$5.02 \times 10^5$	$1.97 \times 10^6$	$2.94 \times 10^6$	$2.36 \times 10^6$	$2.94 \times 10^6$	$2.78 \times 10^6$	$3.84 \times 10^6$

说明:SUFR 进行统计分析的样本数为 18 个。

结果表明,有机磷细菌数随水流方向在厌氧、缺氧和好氧单元都是逐渐降低趋势,和异养菌的趋势是一致的,数量级在  $10^4 \sim 10^6$  之间。

2.2.3 亚硝化菌数及其分布

采用 MPN 计数法测定反应器运行期不同日期的亚硝化菌的数量,见表 5。

表5 SUFR各取样点亚硝化菌及其分布 个/mL

取样点	好中	缺中	厌中
数值范围	$0 \sim 2.0 \times 10^3$	$0.9 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^3$	$0.7 \times 10^2 \sim 4.5 \times 10^3$
数值平均值	$6.1 \times 10^2$	$6.8 \times 10^2$	$1.2 \times 10^3$

说明:SUFR 进行统计分析的样本数为 12 个。

从表 5 中可以看出,亚硝化菌的数量级在  $10^2 \sim 10^3$  之间,说明亚硝化菌本身的增殖速度缓慢,世代时间长,亚硝化菌的数量随水流方向呈减少趋势。

硝化细菌的数量与硝化速率的高低与脱氮效果的好坏呈正相关关系。但硝化细菌的时间长,生长缓慢,而异养细菌却生长迅速,数量上远远超过硝化细菌。

### 2.2.4 反硝化菌数及其分布

采用 MPN 计数法测定出反应器各单元反硝化菌的数量,见表 6:

表 6 SUFR 各取样点水体中反硝化菌的分布 个/mL

取样点	好中	缺中	厌中
数值范围	$2.5 \times 10^3 \sim 9.0 \times 10^3$	$9.0 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^4$	$7.0 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^4$
数值平均值	$4.6 \times 10^3$	$3.2 \times 10^4$	$2.1 \times 10^4$

说明:SUFR 进行统计分析的样本数为 8 个。

分析其结果,反硝化菌的数量变化在数量级  $10^3 \sim 10^4$  之间,反硝化菌的生长繁殖也较缓慢,其原因与硝化菌、亚硝化菌生长不快,硝化受阻,影响反硝化聚磷菌的生长有关,因为反硝化聚磷菌必须通过硝化过程产生的硝酸盐做氧供体来除磷脱氮,硝化菌、亚硝化菌的繁殖好坏是反硝化聚磷菌存在与生长的首要条件。

## 3 试验结果分析

### 3.1 微生物的分布与食物链

通过对 SUFR 系统中的生物相观察和计数发现,累枝虫、钟虫、聚缩虫等固着类纤毛虫数量较多,而且还出现了轮虫、线虫等微型后生动物,系统中真核微生物呈现多样化的趋势,没有占绝对优势数量的微生物,见表 2。

在本课题组前期试验中<sup>[6]</sup>,通过对 SBR 反应系统中的生物相进行观察,发现在 SBR 反应系统中,微生物生态系统由固着类纤毛虫控制,其它类型的微生物数量较少,微生物种群呈现单一化的趋势,这样的微生物生态系统不能形成稳定的“生态金字塔”结构,在生态系统的功能和结构上是不稳定的。

SUFR 系统中可形成一个水生生态食物链:细菌→原生动物→后生动物。细菌的转化吸收使分散的 N、P 及有机物转变为颗粒状的有机体-菌体而进入食物链,原生动物捕食细菌,伴随 N、P 等物质含量的减少,后生动物大量繁殖,见表 2,因此,可以说 SUFR 系统中细菌发挥了转化吸收作用,物质正沿食物链流动,形成了一个具较强生态功能的、有利于污水处理的生态环境。

由于 SUFR 是一种具有接近理想活塞流态的反应器,在空间上沿反应器的轴向存在着浓度变化,这就有利于不同种类微生物在不同空间寻找其最适生态位,从而能够很好地生长繁殖。因物种多样化具有稳定生态系统的功能特征,种群丰富、结构完整的生态系统更能保持稳定性,具有较强的抗冲击负荷能力。故 SUFR

可形成较为复杂而稳定的微生态系统,不易因环境条件和生态因子的暂时改变而破坏已建立的微生物种间的生态平衡。

### 3.2 SUFR 系统中微生物分布与环境因素

螺旋升流式反应器对 COD、 $PO_4^{3-} - P$ 、TP、 $NH_3 - N$ 、TN 的去除结果见表 7。

表 7 螺旋升流式反应器脱氮除磷系统对 COD、氮、磷的去除效果 mg/L

指标	COD	$PO_4^{3-} - P$	TP	$NH_3 - N$	TN
进水	260~350	3.2~6.6	5.2~7.5	27~36	35~55
出水	8~18	0.02~0.10	0.06~0.14	0.1~0.34	3.28~7.84
去除率 %	95.3~97.4	98.7~99.7	97.7~99.0	98.9~99.5	78.8~93.6

#### 3.2.1 异养细菌总数与 COD 的关系

SUFR 系统中异养细菌总数与 COD 的相关性如图 4 所示:

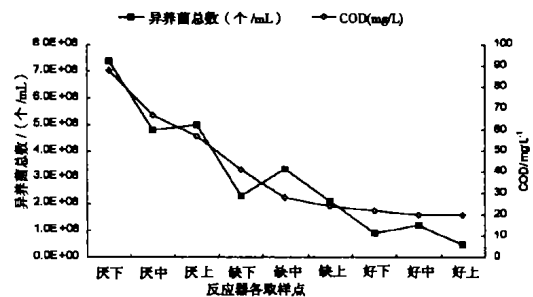


图 4 异养菌与 COD 之间的关系

从图 4 中可以看出,总异养菌和 COD 的相关性明显,相关系数  $r$  为 0.949。这说明总异养菌和 COD 都可以作为衡量水质的指标,在一定水体中,总异养菌数量越多,水质越差,水体受污染程度越高,或者说污水处理效果越差。总异养菌的多少,一定程度上反映了水体中有机物的分解强度。

#### 3.2.2 有机磷细菌与 TP 的相关性

磷是控制水体污染的关键元素之一,它的存在形式、含量和转化速率对生态系统生物群落的结构和功能起着重要作用,磷细菌对磷化合物的分解能力推动着水体中磷的循环,磷细菌的数量与含磷化合物的含量密切相关,如图 5 所示:

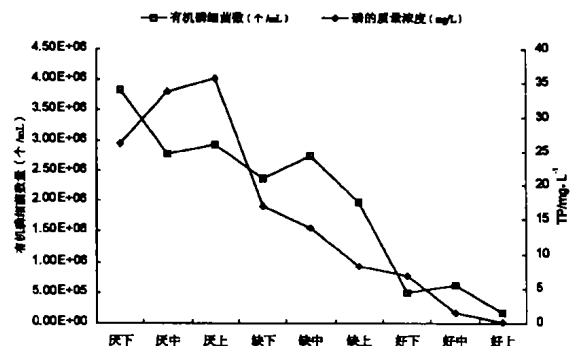


图 5 有机磷细菌与 TP 之间的关系

由图5得知,有机磷细菌与TP的相关系数  $r = 0.815$ ,因此,磷细菌的数量可以作为反应器中磷含量的指标。

### 3.2.3 亚硝化菌与 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的相关性

硝化细菌与  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的相关性如图6所示:

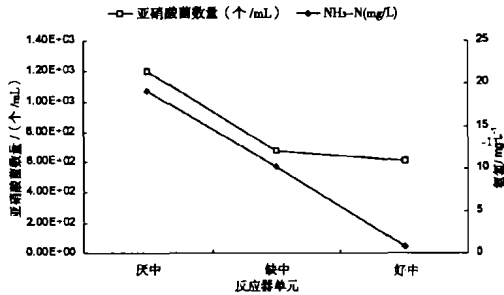


图6 亚硝化菌与氨氮之间的关系

从图6中可以看出,亚硝化菌和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的相关性明显,相关系数  $r$  为 0.909。亚硝化菌的数量随水流方向呈减少趋势,说明水中可利用的氨氮逐渐减少,证明该反应器具备较高的去除氨氮的能力,氨氮去除率达 98.9% ~ 99.5%。

### 3.2.4 反硝化菌与 $\text{NO}_2 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 、TN 的相关性

反硝化细菌是将  $\text{NO}_3 - \text{N}$  还原成  $\text{NO}_2 - \text{N}$  并进一步还原成  $\text{N}_2$  的过程,SUFR 系统中反硝化菌与  $\text{NO}_2 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 、TN 的相关性如图7~9所示:

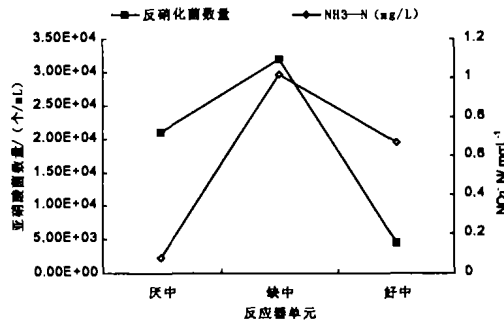


图7 反硝化菌与  $\text{NO}_2 - \text{N}$  之间的关系

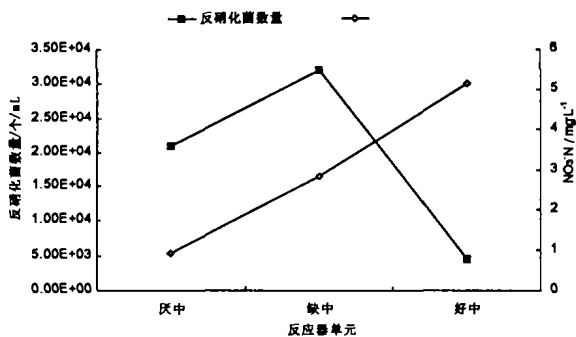


图8 反硝化菌与  $\text{NO}_3 - \text{N}$  之间的关系

图7、图8显示,反硝化菌的数量和  $\text{NO}_2 - \text{N}$ 、

$\text{NO}_3 - \text{N}$  的含量相关系数  $r$  分别为 0.261、-0.641,这说明反硝化菌数量和反应器中亚硝酸氮、硝酸氮含量相关性不大,但在厌氧单元和缺氧单元,反硝化菌数量和亚硝酸氮、硝酸氮含量的变化趋势是一致的,在好氧单元,反硝化菌数量和亚硝酸氮含量的变化趋势也是一致的,和硝酸氮含量的变化趋势恰好相反。

图9显示,反硝化菌的数量和TN有一定相关性,相关系数  $r$  为 0.653。

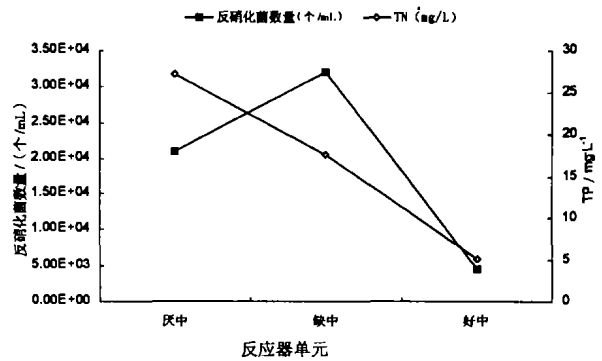


图9 反硝化菌与 TN 之间的关系

## 4 结论

1) SUFR 系统中微生物活性较强,种类较为丰富,累枝虫、钟虫、聚缩虫等固着类纤毛虫数量较多,而且还出现了轮虫、线虫等微型后生动物,系统中真核微生物呈现多样化的趋势,没有占绝对优势数量的微生物。

2) SUFR 中异养细菌总数和 COD 的相关性明显,细菌总数和 COD 都可以作为衡量水质的指标。

3) 磷细菌的数量与含磷化合物的含量密切相关,因此,磷细菌的数量可以作为反应器中磷含量的指标。

4) 亚硝化菌和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的相关性明显,相关系数  $r$  为 0.909;反硝化菌的数量和反应器中氮的含量有一定的正相关性。

### 参考文献:

- [1] 罗固源,豆俊峰,吉芳英,等.螺旋升流式反应器脱氮除磷效果及其特性的研究[J].环境科学学报,2004,24(1): 15-19.
- [2] 范秀荣.微生物学实验[M].北京:人民教育出版社,1987.
- [3] 陈绍铭,郑福寿.水生微生物学实验法(上)[M].北京:海洋出版社,1985.
- [4] 罗固源,罗富金,豆俊峰,等.螺旋升流式反应器系统中污泥特性[J].重庆大学学报(自然科学版),2003,26(10): 112-115.
- [5] 李军,杨秀山,彭永臻.微生物与水处理工程实验[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [6] 罗固源,豆俊峰,支银芳.螺旋升流式反应器与SBR生物除磷系统的比较研究[J].重庆环境科学,2003,25(8): 1-3.

## Test Analysis of Ecosystem on Functional Groups of Microorganism in Spiral Up – flow Reactor System

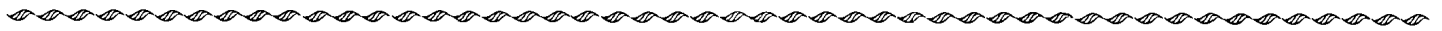
WANG Dan-yun, LUO Gu-yuan, YE Jiang-yu, ZHANG Rui-xue, JI Tie-jun, TANG Gang

(College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The test of functional groups of microorganisms in Spiral Up – flow Reactor System and the correlation between microorganisms in the water and the main environmental factors are studied. The results show that the diversity of microorganisms population in the SUFR system is complex and the bio – community formed in the SUFR system is stable. The close relations between abundance of bacteria and nutrients are found. The correlation between heterotrophic bacteria and COD is 0.949. The correlation between organic phosphate bacteria and TP is 0.815. The correlation between nitrosobacteria and  $\text{NH}_3 - \text{N}$  is 0.909. The correlation between disnitrifier bacteria and TN is 0.653.

**Key words:** Spiral Up – Flow Reactor; microecosystem; microorganisms of nitrogen and phosphors removal; quantitative distribution; correlation

(编辑 姚 飞)



(上接第129页)

## Stability Analysis of Drill-String in Directional Drilling

ZHANG Xiao-q<sup>1</sup>, YANG Zi-lin<sup>2</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>, CAI Ping<sup>1</sup>, LIANG Long-bi<sup>3</sup>

(1. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400042, China;

2. Eastern Sichuan Drilling Tool and Well Control Company of Southwest Oil and

Gas Branch Company, Chongqing 401237, China; 3. Research Institute of Gas Transportation Technology of Southwest Oil and Gas Branch Company, Chengdu 610215, China)

**Abstract:** In deviated deep hole directional drilling operation, drill collar and heavy drill pipe are used to provide enough weight on bit in order that penetration of rock can be conducted and drill-string stability can be maintained. However, as a result, this practice usually puts overloaded torque and tension force on the drill-string and hence results in early fatigue failure of drill-string. Based on the elastic deformation and stability analysis of the bottom hole assembly of drill-string, a discussion on the critical condition to keep drill-string in stabilization and the planning criterion to determine bottom hole assembly is presented. Optimized planning of BHA can be achieved by making the drill pipe partially work in compression state, which may considerably reduce the torque and tension force on the drill-string with the weight reduction of drill collar, and therefore reduce the failure possibility of drill – string.

**Key words:** deviated directional drilling; drill-string in compression; bottom hole assembly planning; stability analysis

(编辑 姚 飞)