

浅海养殖环境复合生态净化菌群的筛选 及其净化功能研究

李洪鹏^{1,2} 李秋芬^{2*} 张艳² 李筠¹

(¹中国海洋大学海洋生命学院, 青岛 266003)

(²农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘要 本研究由浅海网箱区富营养沉积物经多步富集和筛选获得高效复合生态净化菌群, 对浅海养殖区的有机物、氨氮和亚硝酸氮有明显去除效果。研究了不同条件对复合菌液去除养殖水体中氨氮、亚硝酸氮和有机物能力的影响, 并确定了最佳净化条件。结果表明, 复合菌添加量、葡萄糖添加量, 处理时间、温度、pH和盐度对复合菌的去除效果均有影响, 实验条件确定为复合菌的添加量为3%、处理时间为4 d、温度为 30 ± 2 °C、pH值为 8.1 ± 0.2 、葡萄糖添加量为2 g/L和盐度为 (30 ± 10) g/L时, 去除效果达到最佳, 此时氨氮、亚硝酸氮和溶解有机物的去除率可分别达到79.1%、85.2%和88.7%。

关键词 养殖环境 复合菌 生物修复 异养硝化菌

中图分类号 X520.322⁺5; S931.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2009)02-0046-08

Screening of eco-compound bacteria from coastal aquaculture environment and study on their purification ability

LI Hong-peng^{1,2} LI Qiu-fen^{2*} ZHANG Yan² LI Yun¹

(¹School of Marine Life Science, Ocean University of China, Qingdao 266003)

(²Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resource, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT In this study, a group of compound heterotrophic and nitrifying bacteria was enriched and screened from inshore aquaculture environment. And several influential factors for their purification ability were investigated. The experiment results showed that, the amount of added bacteria, glucose, temperature, pH and salinity all influenced their pollutant-removing rate. When the amount of added combination of bacteria was 3%, time of treatment was 4 days, at temperatures 30 ± 2 °C, pH 8.1 ± 0.2 , salinity of 30 ± 10 g/L and 2 g/L glucose was added, the purification effect was the best, resulting in a removal rate of 79.1% for ammonia, 85.2% for nitrite and 88.7% for COD, respectively. This study provided a theoretical basis for biore-

国家 863 探索项目(2006AA10Z414、2006AA10Z415)、海洋公益性行业科研专项经费项目(200805069)和山东省博士后科研资助项目(200601011)共同资助

* 通讯作者。E-mail: liqf@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85836341

收稿日期: 2008-04-26; 接受日期: 2008-07-21

作者简介: 李洪鹏(1982-)男, 硕士研究生, 主要从事海洋环境微生物研究, E-mail: lhp19820504@yahoo.com

mediation of inshore aquaculture environment by compound bacteria.

KEY WORDS Aquaculture environment Eco-compound bacteria Bioremediation
Heterotrophic nitrifying bacteria

近年来,我国海水养殖业逐渐走上高密度、规模化的发展道路。但同时也带来了很多的污染问题,大量粪便、分泌物、残饵及动植物残骸的积累,使养殖水体中的有机物、氨氮和亚硝酸氮等污染物的浓度日益增加,导致水质恶化,对养殖生物产生毒害作用(王志敏等 2006)。有些长期进行网箱养殖的区域,海水污浊不堪,底部污染物堆积不断增加,底栖生态系统功能严重退化(屈计宁等 1999),限制了海水养殖业的可持续发展。利用微生物来去除水体污染是一种常用手段,但许多重要的生化过程靠单种微生物不能完成或只能微弱地进行(陈曦等 2006),必须依靠两种或多种微生物共存,优化生化过程,才能将有害物质彻底转化为无害物质(王梦亮 2007)。周亮等(2005)利用从垃圾填埋场、土壤和活性污泥中筛选分离得到的复合菌对生活污水进行处理,表明复合菌对氨氮和 COD 的去除率最高可达到 72.38% 和 75.31%。因此,利用复合微生物菌群对去除水体过量氨氮、亚硝酸氮和有机物的研究具有重要意义。闫海等(2003)从对虾养殖底泥中筛选分离得到自养和异养除氮菌,研究表明,无论是对氨氮还是对亚硝酸氮的去除,筛选的异养微生物菌群都明显强于自养微生物菌群。邹桂香等(2007)从湖泊、池塘、河流等地泥中筛选分离得到化能异养杆菌,研究表明,其在高效降解有机物的同时又能高效去除氨氮。

本课题组从浅海网箱养殖区富营养沉积底泥中富集筛选得到 1 个由十几种菌组成的复合生态净化菌群,其中含有异养硝化菌,对养殖水体中氨氮、亚硝酸氮和溶解有机物同时具有较强的去除能力。本文还研究了不同条件下复合菌对氨氮、亚硝酸氮和溶解有机物的去除规律,确定了复合菌处理养殖水体污染物的最适宜条件和操作工艺,为复合生态净化菌的培养和应用提供了较好的理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用复合菌取自象山港网箱鱼类养殖区富营养沉积环境。

有机物降解菌富集培养基采用 2216E 培养基,但以沉积物的海水浸出液代替陈海水。

硝化菌富集培养基参照闫海等(2003)、邹桂香等(2007)和侯颖等(2005)的配方并有所改进:以沉积物的海水浸出液代替蒸馏水,具体如下: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 2 g, MgSO_4 0.1 g, NaH_2PO_4 0.2 g, K_2HPO_4 0.5 g, CaCO_3 1 g, FeSO_4 0.1 g, 葡萄糖 0.3 g, NaCl 30 g, KNO_2 1 g, NH_4Cl 0.5 g, 酵母浸出膏 0.03 g, Fe_3PO_4 0.1 g, 沉积物海水浸出液 1 000 ml, pH 7.8。固体培养基则加入 2% 琼脂粉。

氨氮降解基础测试液和亚硝酸氮降解基础测试液配方参照闫海等(2003)和侯颖等(2005)的配方并有所改进,以沉积物的海水浸出液代替蒸馏水,具体如下:氨氮降解基础溶液为 200 mg/L NH_4Cl 海水溶液;亚硝酸氮降解基础溶液为 200 mg/L NaNO_2 海水溶液;有机物降解基础测试液采用黄海水产研究所小麦岛试验基地养殖废水。

1.2 测定方法

化学指标的测定均参照海洋监测规范(国家技术监督局 1998),氨氮的测定采用次溴酸盐氧化法;亚硝酸氮的测定采用盐酸萘乙二胺分光光度法;溶解有机物的测定采用碱性高锰酸钾法。

1.3 菌群富集与筛选

1.3.1 富集培养

于 2007 年 3 月初取 15 g 底泥分别加入 150 g 新配制的硝化菌和有机物降解菌富集培养基中,25 °C 下震荡培养 14 d,得初始富集液。分别移取 30 ml 初始富集液到 300 ml 新配制的富集培养基中,25 °C 下继续震荡

培养 14 d,再次移取,重复操作 60 d 余。以便分别逐渐增加硝化菌和有机物降解菌的比例,淘汰其他杂菌。30 d 后,硝化菌富集培养基中的葡萄糖含量提高为 5 g/L,以提高异养硝化菌浓度。

1.3.2 菌浓度测定

1 个周期结束时,取 1 ml 富集液用无菌生理盐水进行梯度稀释至 10^{-7} ,把 10^{-5} 、 10^{-6} 和 10^{-7} 稀释液用于涂平板,27 °C 培养箱中培养 7 d,菌落计数器下进行菌落计数。测定复合菌 3 月 1 日的富集初始菌浓度和 3 个月后的菌浓度。同时记录富集末期各平板上的不同菌落特征及数量比例,分别挑取典型菌落,纯化后接入斜面保存。

1.3.3 降解能力测定

每个周期结束时,从富集液中分别移取 30 ml,8 000 r/min 离心 10 min,弃上清液,将沉淀分别加入氨氮、亚硝酸氮和溶解有机物降解基础溶液中,每天测定氨氮、亚硝酸氮浓度和 COD 值,并计算去除率。

1.4 单因子影响实验

分别取两种富集液各 500 ml,混合后,4 000 r/min 离心 10 min 后,去上清液,将沉淀用 1 000 ml 无菌生理盐水悬浮,得 1 000 ml 菌液,用于以下实验的菌液量取。每个数据点做两个平行实验。

1.4.1 复合菌液添加量对去除效果影响实验

分别取菌液 0、7.5、15.0、22.5 和 30 ml,离心去上清,将沉淀分别加入盛有 500 ml 氨氮降解基础测试液的锥形瓶中,每个浓度做两个平行样,2 d 后分别取降解液 10 ml,测定氨氮去除效果;另分别取菌液 0、7.5、15.0、22.5 和 30 ml,离心去上清,将沉淀分别加入盛有 500 ml 亚硝酸氮降解测试液的锥形瓶中,每个浓度做两个平行样,2 d 后分别取样 10 ml,测定亚硝酸氮去除效果;再分别取菌液 0、7.5、15.0、22.5 和 30 ml,离心去上清,将沉淀分别加入盛有 500 ml 有机物降解测试液的锥形瓶中,2 d 后分别取样 10 ml,测定有机物降解效果。

1.4.2 处理时间对去除效果影响实验

取菌液 5 ml,离心去上清,将沉淀加入 500 ml 氨氮降解基础测试液中,每天取样 10 ml 测定去除效果。亚硝酸氮和有机物去除实验的步骤同氨氮。

1.4.3 温度对去除效果影响实验

分别取菌液 5 ml,离心去上清,将沉淀分别加入盛有 500 ml 氨氮降解基础测试液的锥形瓶中,分别调节温度为 15、20、25、30 和 35 °C,4 d 后分别取样 10 ml 测定氨氮去除效果。亚硝酸氮和有机物去除实验的步骤同氨氮。

1.4.4 pH 对去除效果影响实验

分别取菌液 5 ml,离心去上清,将沉淀分别加入盛有 500 ml 氨氮降解基础测试液的锥形瓶中,分别调节 pH 值为 7.1、7.6、8.1、8.6 和 9.1,2 d 和 4 d 后,分别取样 10 ml 测定去除效果。亚硝酸氮和有机物去除实验的步骤同氨氮。

1.4.5 葡萄糖添加量对氨氮和亚硝酸氮去除效果影响实验

分别取菌液 5 ml,离心去上清,将沉淀分别加入盛有葡萄糖浓度分别为 0、1.0、2.0、3.0、4.0 和 5.0 g/L 的 500 ml 氨氮降解基础测试液的锥形瓶中,降解 4 d 后分别取样 10 ml 测定去除效果。亚硝酸氮去除实验的步骤同氨氮。

1.4.6 盐度对去除效果影响实验

分别取菌液 5 ml,离心去上清,将沉淀分别加入盛有 NaCl 浓度分别为 0、10、20、30、40、50、60 和 70 g/L 的 500 ml(蒸馏水配置的)氨氮降解基础测试液的锥形瓶中,降解 4 d 后分别取样 10 ml 测定去除效果。亚硝酸氮和有机物去除实验的步骤同氨氮。

1.5 最优化条件下的综合效果实验

在上述单因子试验基础上,取菌液 15 ml,离心去上清,将沉淀加入 500 ml 氨氮降解基础测试液中,添加

2 g/L葡萄糖,做两个平行样,调整温度为 30±2 ℃、pH 值为 8.1±0.2 时,每天分别取样 10ml 测定降解效果。亚硝酸氮和有机物去除实验的步骤同氨氮。

2 结果

2.1 富集与筛选

初期硝化菌培养基葡萄糖添加量为 0.3 g/L,经过 30 d 余的富集,复合菌对氨氮和亚硝酸氮的去除率分别由第 1 次转接时的 12%和 17%提高为第 3 次转接时的 18%(图 1a)和 23%(图 2a);后期将葡萄糖的添加量提高为 5 g/L 以后,经过将近 30d 余的富集,复合菌对氨氮和亚硝酸氮的去除率由第 5 次转接时的 32%(图 1b)和 45%(图 2b)提高为第 7 次转接时的 60%(图 1c)和 77.1%(图 2c)。同时,复合菌经过将近 90 d 的富集对有机物的降解率由第 1 次转接时的 65.2%(图 3a)提高为第 7 次转接时的 82.7%(图 3c)。

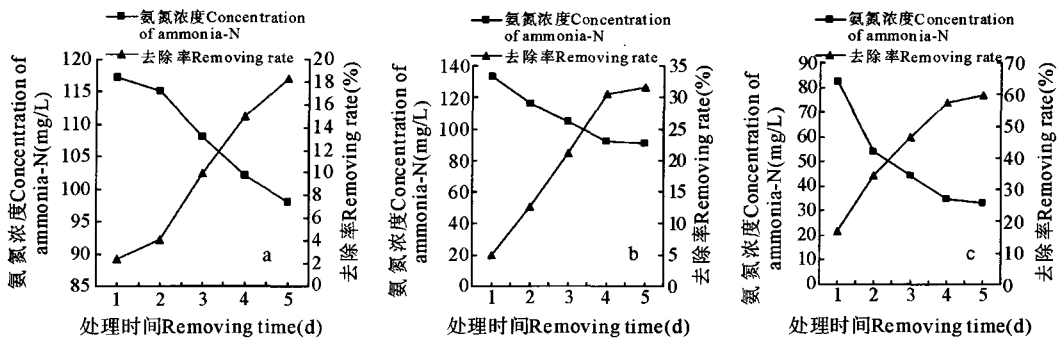


图 1 富集过程中复合菌对氨氮去除能力的变化

Fig. 1 The changes of NH₄⁺-N removing ability of compound bacteria during enrichment

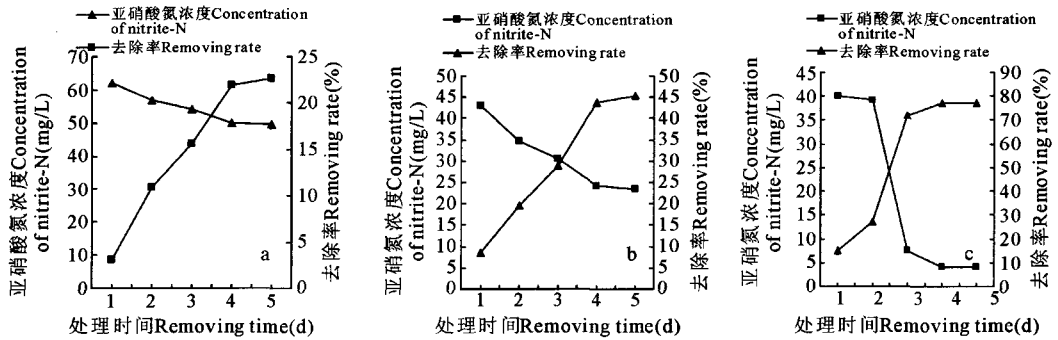


图 2 富集过程中复合菌对亚硝酸氮去除能力的变化

Fig. 2 The changes of NO₂⁻-N removing ability of compound bacteria during enrichment

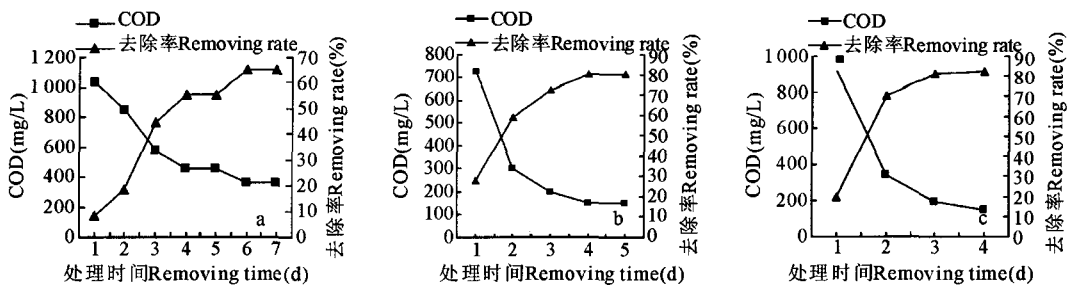


图 3 富集过程中复合菌对有机物降解能力的变化

Fig. 3 The changes of organic substance removing ability of compound bacteria during enrichment

另外,通过平板计数实验测得:复合菌在3月1日富集初始的浓度为 1.01×10^6 CUF/ml;90 d后,复合菌的浓度上升为 9.8×10^7 CUF/ml。同时观察到,2216E平板上主要由3种典型菌落组成:LE-1、LE-2和LE-3,硝化菌平板上有7种菌落,其中LX-1、LX-3、LX-5和LX-7占优势。这些菌的菌落特征及其数量比例见表1。

表1 复合菌群组成菌的菌落特征及其数量比例
Table1 Characteristics and ratio of bacteria in the combination

菌种编号 No. of strains	菌落特征 Colony characteristic	原始菌量 Counts of the original culture ($\times 10^6$ CFU/ml)	占菌落总数比例 Percentages in the total colonies (%)
LX-1	扁平中凹有多层圆环,微黄半透明黏稠,边缘光滑	80	43.2
LX-3	扁平,中凹陷,黄色,不透明,黏稠,边缘光滑	11	5.94
LX-5	隆起,乳突状,白色,不透明,黏稠,边缘光滑	12	6.49
LX-7	半球形,乳黄色,半透明,发亮,黏稠油珠状	82	44.3
LE-1	扁平,中心色深,白色略带黄,边缘不规则,黏稠	500	51.0
LE-2	扁平,橘黄色,中心色深,边缘光滑,黏稠	200	20.4
LE-3	突起水珠状,浅黄白色,发亮,不粘,边缘光滑	280	28.6

2.2 单因子对去除效果的影响

2.2.1 复合菌液添加量对去除效果的影响

如图4所示,菌液添加量 $<3\%$ 时,对3种污染物的去除率均随添加量的增加而提高;添加量为 3% 时,去除率均接近最高,氨氮、亚硝酸氮和COD分别达到 50.2% 、 51.1% 和 52.1% ;添加量 $>4.5\%$ 时,去除率反而随添加量的增加呈缓慢下降趋势。

2.2.2 处理时间对去除效果的影响

如图5所示,处理时间 <4 d时,对3种污染物的去除率均随处理时间的增加而迅速提高;处理时间为4 d时,去除率接近最高,氨氮、亚硝酸氮和COD分别达到 52.3% 、 77.0% 和 74.1% ;4 d $<$ 处理时间 <7 d时,去除率随处理时间的增加却呈缓慢上升趋势。

2.2.3 温度对去除效果的影响

如图6所示, $15\text{ }^\circ\text{C}<$ 处理温度 $<30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,去除率随处理温度的增加而迅速提高;处理温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,去除率最高,氨氮、亚硝酸氮和COD分别达到 50.4% 、 72.3% 和 80.6% ;30 $^\circ\text{C}<$ 处理温度 $<35\text{ }^\circ\text{C}$ 时,去除率随处理温度的增加呈下降趋势。

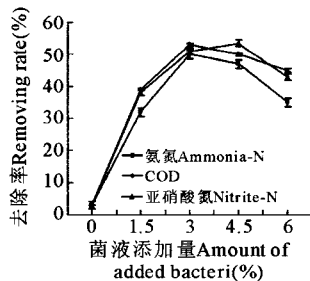


图4 复合菌添加量对去除效果的影响
Fig.4 The effects of the bacteria quantity on the pollutants removing ability of the bacteria

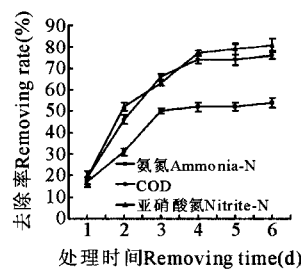


图5 处理时间对去除效果的影响
Fig.5 The effects of treating time on the pollutants removing ability of the bacteria

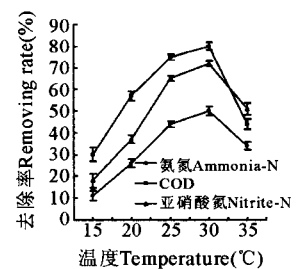


图6 温度对去除效果的影响
Fig.6 The effects of temperature to the pollutants removing ability of the bacteria

2.2.4 pH值对去除效果的影响

如图7a所示,处理2d,pH <8.1 时,去除率随pH值的增加而提高;pH为8.1时,去除率最高,氨氮、亚硝酸氮和COD分别达到 52.6% 、 62.3% 和 65.3% ;8.1 $<$ pH <9.1 时,去除率随pH的增加呈下降趋势。如图7b所示,处理4d时,pH较低的实验组的去除率仍很低,pH=8.1时,去除率与作用2d时相差不大;8.1 $<$ pH <9.1 时,氨氮、亚硝酸氮的去除率较处理2d时有较大提高,而有机物去除率与处理2d时相比变化不大。

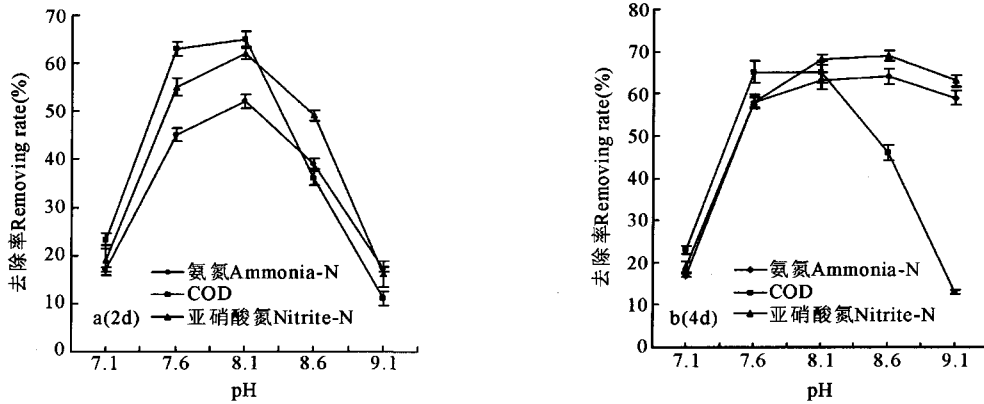


图 7 pH 对去除效果的影响

Fig. 7 The effects of pH on the pollutants removing ability of the bacteria (in 2 days and 4 days)

2.2.5 葡萄糖添加量对氨氮、亚硝酸氮去除效果的影响

如图 8 所示,葡萄糖添加量 < 2 g/L 时,去除率随添加量的增加而提高;添加量为 2 g/L 时,去除率接近最高,氨氮、亚硝酸氮分别为 64.1% 和 82.2%;葡萄糖添加量在 2~4 g/L 的范围内,去除率变化不明显。

2.2.6 盐度对去除效果的影响

如图 9 所示,NaCl 添加量 < 20 g/L 时,去除率随添加量的增加而提高;添加量为 20~40 g/L 时,去除率最高,氨氮、亚硝酸氮和 COD 分别达到 60%、70% 和 70% 左右;40 g/L < NaCl 添加量 < 70 g/L 时,去除率随添加量的增加呈下降趋势。

2.3 最优化条件下的综合效果

在复合菌的添加量为 3%,处理时间为 4 d,温度为 30±2 °C,pH 值为 8.1±0.2,葡萄糖添加量为 2g/L,盐度为 3%的条件下,去除效果最佳。如图 10 所示,处理时间 < 4 d 时,去除率随处理时间的增加而提高;处理时间为 4 d 时,去除率达到最高,氨氮、亚硝酸氮和 COD 分别达到 79.1%、85.2% 和 88.7%;处理时间多于 4 d 时,去除率不再增加。

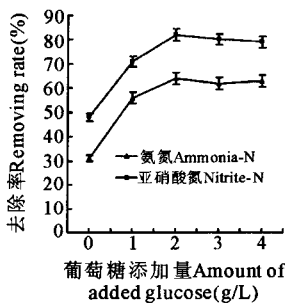


图 8 葡萄糖添加量对去除效果的影响
Fig. 8 The effects of glucose quantity on the pollutants removing ability of the bacteria

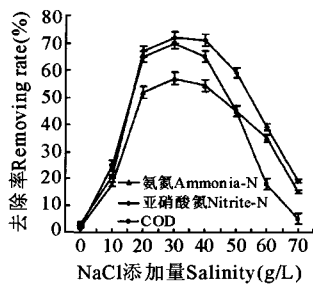


图 9 盐度对去除效果的影响
Fig. 9 The effects of salinity on the pollutants removing ability of the bacteria

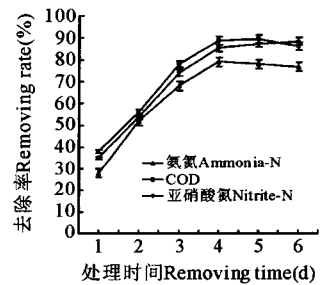


图 10 最优化条件下的综合效果
Fig. 10 The pollutants removing rate of the bacteria at the optimum condition

3 讨论

3.1 关于异养硝化细菌

取自香山港网箱养殖区的自然环境样品通过富集驯化,可以促进适宜微生物之间的协作,提高对环境的适应能力和对污染物的去除能力(冯 树 2001)。它们之间的关系是长时间进化过程中形成的,不是人为几种

菌简单混合所能模拟的,因此,本文在菌群筛选时,采取了从养殖环境选取原生态菌群,经富集和驯化得到天然复合菌,而没有经人工分离、纯化后,再次组合。

Mike等(1997)和Keller等(2002)指出含氮有机物在异养微生物的作用下经多肽和氨基酸降解成氨,在亚硝化和硝化细菌等自养微生物的作用下,氨氮经亚硝酸被氧化成硝酸。在异养微生物作用下,氨也可以用来合成蛋白质(茆健强等 2006)。对于硝酸盐的去除,一方面可以由部分微生物吸收利用,另一方面,在厌氧条件下反硝化细菌可以将硝酸盐还原成氮气脱离水体(谭佑铭等 2003)。Ludwig等(1993)报道了某些细菌不仅能够异养硝化氨氮,而且可以对硝酸盐进行反硝化脱氮(冯树等 2001)。van Niel等(1993)研究了异养和自养微生物对氨氮的硝化比例发现,在高碳氮比下,异养球硫细菌的硝化能力远比欧洲亚硝化单胞菌的硝化能力强,周亮等(2005)也发现在高碳氮比下异养硝化作用所具有的优势更加明显。从微生物的繁殖能力和对氨氮及亚硝酸氮的去除能力两方面比较,异养微生物菌群的效果都明显高于自养微生物菌群(郭文艳等 1999)。本文的硝化菌富集过程中,也发现当葡萄糖的含量由0.3g/L提高到5g/L时,增大C/N时,硝化效果有很大提高,这说明富集的混合硝化菌中有一定数量的异养硝化菌,它们对葡萄糖的含量有非常灵敏的反应(徐敏等 2007),当添加更多的葡萄糖时,异养硝化菌得以迅速繁殖,并逐步占据了主导地位。

国内在培养硝化细菌方面进行了不懈的努力与探索,但传统的污水净化工艺中起硝化作用的细菌大多是适用于淡水的自养菌且生长缓慢(林钦等 1998),不适用于高浓度有机物的海水养殖水体。天然的养殖环境中具有硝化作用的异养菌含量通常不大(孟萍平等 1997)。而本文富集、筛选的含有异养硝化菌的复合菌群克服了上述缺点,其构成菌属化能异养菌(邹桂香等 2007),在提高异养硝化细菌培养浓度及其对高有机物含量养殖水体的硝化效果方面有所突破。若加入到海水养殖水体中,能够以有机物为碳源进行生长繁殖,迅速提高菌体浓度,在降解有机物的同时大量去除氨氮和亚硝酸氮。这一特征在污染水体处理工程中也有广阔的应用前景,可使现有工艺流程中有机物的分解和氨氮、亚硝酸氮的去除同步完成,有利于减少工程面积,缩短污染物净化时间,节省大量费用。并为原生态复合菌在废水处理中的应用提供了科学依据。

3.2 单因子对去除效果的影响

混合菌液添加量在3%的范围内时,符合微生物的快速增长(计新丽 2000)要求,有利于菌群的迅速发展与更新,同时避免细胞死亡导致污染物重回水体。硝化和亚硝化细菌是中温生长菌,温度高于35℃,会对菌群的酶系产生破坏作用;若温度低于10℃,细菌的生长及硝化作用则显著减慢(冯树等 2001),亚硝化细菌能承受的最高温度为40℃(贾晓平 1997)。同时,亚硝化和硝化是耗碱过程(闫海等 2003),其耐碱性pH极限值为9(林荣根 1996)。实验中发现降解4d且 $8.1 < \text{pH} < 9.1$ 时,氨氮、亚硝酸氮的去除率与作用2d时相比有较大提高。这是因为pH值为9不太适合亚硝化和硝化作用(邢华 2003),但随着菌体使pH值不断下降(邹桂香等 2007),进入了 8.1 ± 0.2 的范围之内。葡萄糖降解过程中产酸(王丽丽等 2004),所以添加量不宜超过2g/L。另外,发现盐度在20~40之间时,复合菌对污染物的去除率较大,这说明复合菌具有较宽的盐度适应范围并对高盐量有一定的耐受力,能适用于海水养殖水体的净化。

通过优化各种生长条件,复合菌对有机物和氨氮、亚硝酸氮的去除能力得到了进一步提高。在实际应用过程,还需要对复合菌的组成和生长条件进一步优化调整,不断增大复合菌的适应范围,提高其污染物去除能力。这将是微生物制剂在未来养殖业中应用的一大发展方向。

参 考 文 献

- 王志敏,张文香. 2006. 在循环养殖系统中添加微生态制剂去除氨氮和亚硝酸氮的试验. 水产科学, 4: 28~31
- 王丽丽,赵林. 2004. 不同碳源及其碳氮比对反硝化过程的影响. 环境保护科学, 1: 45~47
- 王梦亮,王京伟. 2007. 脱氮微生物对养殖水体有机氮去除作用的研究. 水处理技术, 6: 17~19
- 计新丽. 2000. 海水养殖自身污染机制及其对环境的影响. 海洋环境科学, 19(4): 66~71
- 冯本秀,赖子尼. 2005. 固定化微生物技术去除水体中氨氮的研究进展. 广东化工, 10: 22~25
- 冯树,周樱桥,张忠泽. 2001. 微生物混合培养及其应用. 微生物学通报, 28(3): 92~95

- 朱亮,金贤.2005.复合菌群处理城市污染水体的试验研究.水资源保护,3:56~59
- 邢华,高会平.2003.纯化硝化细菌制品降解养殖水体亚硝酸氮的应用试验.中国水产,12:86~89
- 闫海,林毅雄.2003.海水微生物菌群去除氨氮和亚硝酸氮的研究.环境污染治理技术与设备,4(11):44~47
- 杨波,杨志恒.2007.亚硝化细菌处理氨氮废水的研究.武汉理工大学学报,3:69~74
- 邹桂香,刘利.2007.微生物复合菌对废水中氮和有机物的去除转化研究.南华大学学报(自然科学版),21(2):79~82
- 陈曦,崔莉凤.2006.温度和pH值对厌氧氨氧化微生物活性的影响分析.北京工商大学学报,3:32~35
- 孟萍平,李科林.1997.有效微生物群对生活污水中有机物的降解能力研究.中南林学院学报,4:55~59
- 周亮,朱冠友.2005.菌群降解生活污水中污染物的研究.中山大学学报(自然科学版),44(增刊):206~208
- 屈计宁,金志刚,何群彪.1999.高效硝化细菌的富集技术研究.同济大学学报,27(3):251~254
- 林荣根.1996.海水富营养化水平评价方法浅析.海洋环境科学,15(2):28~30
- 林钦.1998.我国海水网箱养殖环境氮磷负荷量的评估.华南师范大学学报(自然科学版),增刊:36~46
- 蒯健强,周国勤.2006.复合微生物制剂改善池塘水环境效果试验.水产养殖,1:112~117
- 侯颖,孙军德.2005.养殖水体中高效氨氮降解菌的分离与鉴定.水产科学,24(10):22~24
- 徐敏,牛越.2007.几种理化因子对海洋硝化细菌去除氨氮效果的影响.微生物学杂志,5:85~89
- 贾晓平.1997.我国沿海水域的主要污染问题及其对海水增养殖的影响.中国水产科学,4(4):78~82
- 郭文艳,任翱.1999.硝化细菌在氨氮深度处理中的应用研究.上海环境科学,9:97~101
- 韩家波.1999.海水养殖与近海水域污染研究进展.水产科学,18(4):40~43
- 谭佑铭,罗启芳,王琳.2003.固定化反硝化菌对富营养化水体脱氮的试验研究.中国卫生工程学,2(2):65~68
- Conley, D. J., Stoneberg, A., and Cayman, R. 1997. Sediment-water nutrient fluxes in the Gulf Finland, Baltic sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45: 591~598
- Mike, S. M. J., Susanne, L., and Gerard, M. 1997. Novel principles in the microbial conversion of nitrogen compounds. *Antonie van Leeuwenhoek*, 71:75~93
- Keller, J., Yuan, Z., and Blackall, L. L. 2002. Integrating process engineering and microbiology tools to advance activated sludge wastewater treatment research and development. *Reviews in Environmental Sci. & Biotechnol*, 1:83~97
- Ludwig, W., Mittenhuber, G., and Friedrich, C. G. 1993. Transfer of *Thiosphaera paatotropha* to *Paracoccus denitrificans*. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 43:363~367
- Van Niel, E. W. J., Arts, P. A. M., and Wesselink, B. J. 1993. Competition between heterotrophic and autotrophic nitrifiers for ammonia in chemostat cultures. *FEMS Microbiol. Ecol.* 102:109~118