

文章编号:2095-7386(2022)01-0036-07

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2022.01.006

# 一株异养硝化细菌的分离鉴定及硝化性能分析

张笑迎, 张小萱, 陶瑞东, 曾仪维, 梅运军  
(武汉轻工大学, 化学与环境工程学院, 湖北 武汉, 430023)

**摘要:** 鉴于目前大量异养硝化细菌的分离报道中一些硝化菌存在硝化效率低、亚硝态氮累积严重等问题, 从武汉市某污水处理厂底泥中成功分离得到一株可高效去除氨氮的菌株 W-3。根据 16S rRNA 基因序列分析, 表明该菌株属于苍白杆菌属(*Ochrobactrum* sp.)。对该菌株进行了氨氮去除特性及氮转化途径的研究, 当  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的浓度为 106 mg/L 时, 氨氮去除率高达 98.55%, 主要转化为硝态氮, 亚硝态氮作为中间产物有极少量的累积, 总氮基本不变。此外, 通过培养条件优化实验, W-3 菌株在以醋酸钠为碳源、C/N=4、初始氨氮浓度为 53~106 mg/L、温度为 30℃、pH 值为 7.5~8.0、转速为 150 r/min 时硝化性能最佳, 生长情况最好。将 W-3 接种于实验室模拟活性污泥中, 发现该菌株在不同氨氮浓度条件下都具有良好的硝化性能, 高浓度氨氮环境下的去除速率反而更高, 达到约 4.4 mg/L/h。实验结果表明, *Ochrobactrum* sp. W-3 菌株具有优异的异养硝化特性, 在治理水体氨氮污染方面具备应用潜力。

**关键词:** 异养硝化细菌; 分离鉴定; 苍白杆菌属; 氨氮污染; 模拟活性污泥

**中图分类号:** X 172

**文献标识码:** A

## Isolation, identification of a heterotrophic nitrifying bacteria and its nitrification performance

ZHANG Xiao-ying, ZHANG Xiao-xuan, TAO Rui-dong, ZENG Yi-wei, MEI Yun-jun

(School of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** In view of the problems of low nitrification efficiency and serious nitrite accumulation in a large number of heterotrophic nitrifying bacteria, a strain W-3 which could efficiently remove ammonia nitrogen was successfully isolated from the bottom sludge of a sewage treatment plant in Wuhan. According to the 16S rRNA gene sequence analysis, it was shown that the strain belonged to the *Ochrobactrum* sp. The ammonia nitrogen removal characteristics and nitrogen conversion pathways of this strain were studied. When the concentration of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  was 106 mg/L, the ammonia removal efficiency was as high as 98.55%, which was mainly converted into nitrate nitrogen, with very little nitrite nitrogen as an intermediate product accumulated, and the total nitrogen was basically unchanged. In addition, through optimization experiments of culture conditions, when strain W-3 used sodium acetate as carbon source, C/N=4, initial ammonia nitrogen concentration was 53~106 mg/L, temperature 30℃, pH 7.5~8.0, rotation speed 150 r/min, the nitrification performance and the growth were the best. The strain was inoculated into laborato-

收稿日期:2022-01-08.

作者简介:张笑迎(1997-),女,硕士研究生,E-mail:936772623@qq.com.

通信作者:梅运军(1975-),男,教授,E-mail:meiyunjun\_2000@163.com.

基金项目:湖北高校省级教学研究项目(2020515).

ry simulated activated sludge, it was found that W-3 had good nitrification performance under different ammonia nitrogen concentration conditions, and the removal rate under high ammonia nitrogen environment was higher about 4.4 mg/L/h. Therefore, *Ochrobactrum* sp. W-3 has excellent heterotrophic nitrification characteristics and has application potential in the treatment of ammonia nitrogen pollution in water bodies.

**Key words:** heterotrophic nitrification bacteria; isolation and identification; *Ochrobactrum* sp.; ammonia nitrogen pollution; simulated activated sludge

## 1 引言

生活废水和工业污水中氮物质的排放是导致水体富营养化的重要因素。农村化粪池尾水和畜禽养殖业废水这类具有高耗氧、高氨氮特征的废水治理是近几年的热点问题<sup>[1]</sup>。生物处理技术主要借助微生物的脱氮作用, 操作简单、成本低廉、效果显著, 不会对环境造成二次污染, 相较于物理和化学脱氮技术有着很强的竞争力<sup>[2,3]</sup>。异养硝化细菌生命力强, 生长繁殖迅速, 利用氮化合物的种类及形态范围较广<sup>[4,5]</sup>。例如假单胞菌、枯草芽孢杆菌可利用水中几乎各种类型的氮源进行异养硝化作用, 如可利用脲、氨氮、铵盐等无机氮物质, 有机胺、尿素等有机氮物质。因此分析异养硝化细菌的降解途径是十分必要的<sup>[6,7]</sup>。

自养型硝化菌的生长全靠自给自足, 耗时长且单位时间内的细胞数量较少, 需氧量较大, 不能耐受恶劣环境。相比之下, 异养硝化细菌的生长和脱氮是同时进行的, 用时短, 效率高。它可以将含氮化合物转化成羟胺、(亚)硝酸盐等产物, 多数还能同时产生好氧反硝化作用, 直接实现一步到位的脱氮效果<sup>[8-10]</sup>。不仅如此, 它还可以降低水中 COD 的含量。异养硝化菌的出现, 扩大了自养硝化菌所不能处理的水质范围, 降低了运行成本, 优化了工艺脱氮操作。目前对异养硝化细菌的研究与应用较为广泛。*Microbacterium* sp. strain SFA13 附着于生物活性炭上可以有效去除地表水中的氨, 去除率为  $2.68 \pm 0.27 \sim 3.16 \pm 0.25$  mg  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{L}/\text{h}$ <sup>[11]</sup>; 郭万茹等人分离得到一株 *Bacillus subtilis* 并应用于处理实际黑臭水中, 2 d 后氨氮降解率达 61.49%<sup>[12]</sup>; 陈赵芳等分离得到具有硝化性能的 *Acinetobacter* sp. YY4, 将其投入化工废水的处理中, 36 h 的氨氮去除率达 95.79%<sup>[13]</sup>。同时, 自然界中的异养硝化作用也可以是多种菌协同完成的<sup>[14]</sup>。将 *T. pantotropha* 和其他具有相同性能的菌混合投放进实验室模拟的生活废水中, 硝化速率可达  $0.47 \sim 1.85$  N/m<sup>2</sup>/d<sup>[15]</sup>。处理氮化物废水是水处理研究的热门话题。异养硝化高效菌

株的分离丰富了硝化微生物的多样性, 对生物脱氮工艺的不断改进有着重要意义。

目前, 越来越多的异养硝化细菌被分离培养, 但一些异养硝化菌仍存在着硝化效率低、亚硝酸盐累积严重、无法耐受高氨氮环境的问题<sup>[16]</sup>。笔者从武汉市某污水处理厂底泥中分离得到一株可高效去除氨氮的异养硝化细菌, 将其命名为 *Ochrobactrum* sp. W-3, 并对该菌株的硝化性能和最佳硝化条件进行了分析, 通过实验室模拟活性污泥实验, 以期为该菌在今后的研究和可行性应用方面提供理论基础。

## 2 材料与方法

### 2.1 实验材料

#### 2.1.1 培养基

异养硝化培养基(每升): 0.5 g  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 5 g  $\text{CH}_3\text{COONa}$ , 50 mL 维氏盐溶液。调节培养基的 pH 值为 7.5 ~ 8.0。固体培养基(每升)需加入 20 g 琼脂粉。

维氏盐溶液(每升): 5 g  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 2.5 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 2.5 g  $\text{NaCl}$ , 0.05 g  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 0.05 g  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。

LB 肉汤培养基(每升): 10 g 胰蛋白胨, 5 g 酵母提取物, 5 g  $\text{NaCl}$ 。

使用所有培养基前均需在 115 °C 高压蒸汽灭菌锅中灭菌 30 min。

#### 2.1.2 实验仪器

主要实验仪器为 Eppendorf 5424 离心机、立式高压蒸汽灭菌锅 YXQ-LS-70A、752N 紫外分光光度计、722 型分光光度计、PHS-3C pH 计、超净工作台、THZ-98A 恒温振荡培养箱、PCR 仪、隔水式恒温培养箱。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 硝化细菌的富集

分别取 2 g 底泥样接入 4 瓶盛有 150 mL 的异养硝化培养基中, 放入恒温振荡培养箱(30 °C, 150 r/min)中作为富集液进行增殖培养。96 h 后, 分别取 1.5 mL 的富集液于 4 瓶新的异养硝化培养

基中,继续按照已设置好的条件进行振荡培养。为提高富集液中异养硝化细菌的数量,重复所述步骤 3 次。

### 2.2.2 菌株的分离与纯化

经过 3 次富集培养后,用纳氏试剂分光光度法检测异养硝化培养基中的氨氮去除情况,比较选出 4 瓶中去除率较高的一瓶样品进行梯度稀释,将稀释后的样品用稀释涂布及平板划线的方法进行分离纯化。取富集液 0.1 mL 稀释至  $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ ... $10^{-9}$  等梯度的浓度,分别取 0.1 mL 的  $10^{-6}$ 、 $10^{-7}$ 、 $10^{-8}$ 、 $10^{-9}$  浓度梯度的菌液涂布于异养硝化培养基固体平板上,至平板上没有液体流动时倒置放入 30 ℃ 的恒温培养箱中,待平板上长出菌斑,用接种针挑取具有代表性的菌落在培养皿中重复进行划线纯化操作。

### 2.2.3 菌株初筛

将 2.2.2 小节中分离纯化得到的菌株转接至盛有 100 mL 的异养硝化培养基中,在 30 ℃、150 r/min 下振荡培养 96 h 之后,对培养菌液进行取样后检测氨氮含量,将对比选择去除率最高的一株进行标号并用甘油保存以用于后续研究。

### 2.2.4 检测菌株的生长及脱氮能力

将 2.2.3 小节中氨氮去除率最高的一株菌株培养至稳定期,以 1% 的接种比例转接至盛有 100 mL 的异养硝化培养基中,在 30 ℃、150 r/min 下进行恒温振荡增殖培养,将未接种的培养基作为空白对照。接种后间隔 12 h 进行取样,测定培养液中的菌体细胞密度  $OD_{600}$  以及  $NH_4^+-N$ 、 $NO_2^--N$ 、 $NO_3^--N$  和 TN 的含量,分析其氮转化的途径。

### 2.2.5 细菌鉴定

收集 2.2.4 小节中所选择的氨氮去除率最高的一株细菌菌体用于提取细菌基因组的 DNA。以提取的 DNA 为模板,采用通用引物 341F (5'-CTACGGGMSGCAGCAG-3') 和 518R (5'-ATTACCGCGGCTGCTGG-3'),通过 PCR 聚合酶链反应扩增菌株的 16S rRNA。扩增产物经生工生物工程(上海)股份有限公司使用 Sanger 法完成测序。PCR 扩增体系为 2 × Hieff PCR MAster Mix (10 ul)、Primer-341F (1 ul)、Primer-518R (1 ul)、DNA (1 ul) 和 7 ul  $H_2O$ 。扩增程序依次为 94 ℃ 预变性 5 min—94 ℃ 变性 20 s—55 ℃ 复性 20 s—72 ℃ 延伸 30 s,循环 35 次,最后一次在 72 ℃ 延伸 10 min。将得到的序列与 GenBank 中的现有序列进行 BLAST 比对分析,比对结果通过 MEGA 7.0 构建系统发育树。

### 2.2.6 培养条件的优化

在上述实验接种和培养基培养的基础上,选择不同碳源(葡萄糖、醋酸钠、柠檬酸钠、蔗糖、淀粉)、不同 C/N(用最适碳源调节培养基的 C/N 分别为 1、2、3、4、8、12、16、20、24、28)、不同初始氨氮负荷(在最适碳源和最适 C/N 的基础上,调节培养基的初始氨氮浓度分别为 53 mg/L、106 mg/L、159 mg/L、212 mg/L)对细菌进行培养条件优化实验。上述处理均每间隔 24 h 进行一次取样,用以检测各培养条件下的氨氮去除情况。通过比较找到细菌的最适碳源、最适 C/N 和最适初始氨氮浓度。

### 2.2.7 实验室模拟活性污泥实验

在上述实验所得到的最适培养条件下,调节培养基的氨氮浓度分别为 54 mg/L、108 mg/L、216 mg/L、424 mg/L。取 1 mL 的目的菌株菌液转接于 LB 肉汤培养基中,振荡培养 48 h 后取样,再进行离心处理(20 238 g),去除上清液,将底质投入到不同氨氮浓度的培养基中,在 30 ℃、150 r/min 下进行恒温振荡培养。每隔 6 h 定量取样一次来检测各培养基中的氨氮含量。

## 2.3 分析方法

用分光光度计在 600 nm 处测量细菌的细胞密度,用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)检测  $NH_4^+-N$  的浓度,用盐酸 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法(GB/T 7493—1987)检测  $NO_2^--N$  的浓度,用紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)检测  $NO_3^--N$  的浓度,用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—89)检测 TN 的浓度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 细菌的筛选

将经稀释涂布平板法和平板划线法分离纯化得到的能够在异养硝化固体培养基上生长的 6 株细菌分别命名为 R-1、R-2、W-3、W-4、W-5、R-6。将筛选获得的 6 株细菌分别以 1% 的接种比例转接至盛有 100 mL 的异养硝化培养基中进行培养,并分别检验其氨氮去除能力(如图 1 所示)。通过图 1 可以看出,以未接种培养基作为空白对照,初筛得到的 6 株细菌均有一定的氨氮降解能力。当初始  $NH_4^+-N$  的浓度为 106 mg/L 时,R-2、W-3、W-4 菌株的氨氮降解能力较强,均达到 80% 以上,其中 W-3 的氨氮去除效率最高,达 98.55%。因此挑选 W-3 作为本实验的后续研究对象。

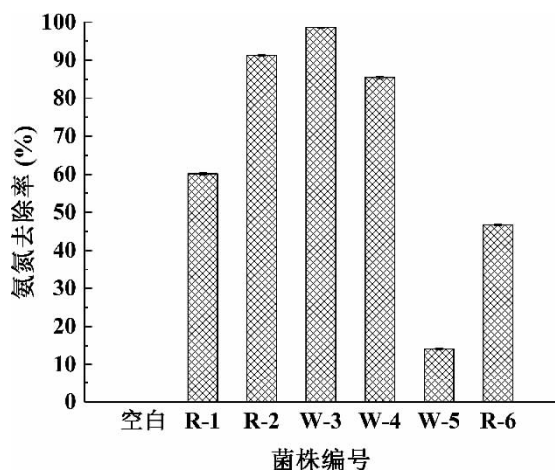


图1 初筛6株异养硝化细菌的氨氮去除率

### 3.2 细菌鉴定

W-3 的菌落形态特征如图2所示。W-3 在 LB 琼脂培养基上的菌斑圆润有光泽, 边缘规整, 中间略微凸起, 湿润且有黏性, 颜色为乳白色, 且不透明。革兰氏染色为阴性。

将测得的 16S rRNA 基因序列上传至 GenBank 数据库进行 BLAST 比对分析, 结果表明 W-3 与苍白杆菌属相似度高达 98.46%, 通过与相似度较高的序列构建系统发育树 (如图3所示), 进一步揭示了 W-3 隶属于 *Ochrobactrum* sp.。



图2 W-3 在 LB 琼脂培养基上的菌落形态

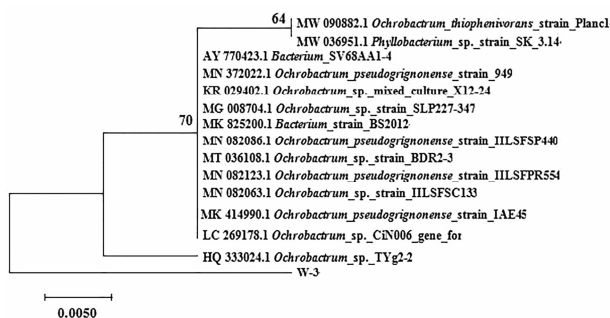


图3 菌株 W-3 基于 16S rRNA 基因序列同源性的系统发育树

### 3.3 W-3 的生长曲线及氨氮转化特性

将 W-3 纯化培养液按 1% 的接种比例转接于新鲜的盛有 100 mL 的异养硝化培养基中, 定时取样, 检测其中的光密度 ( $OD_{600}$ ) 以及不同形态的氮含量, 绘制出 W-3 的脱氮曲线以及生长曲线图。结果如图4所示, W-3 的生长呈现四个阶段——迟缓期、对数期、稳定期、衰亡期。菌株在接种后的 12 h 生长缓慢, 之后生长迅速并进入对数期, 84 h 时生长开始变得平稳, 108 h 时生物量达到峰值 1.588, 之后便开始进入衰亡期。由此看出菌株 W-3 的生长能力旺盛, 培养时间较短。

分析图5可知, 初始浓度为 104.94 mg/L 的  $NH_4^+ - N$  在前 72 h 迅速降解至 22.59 mg/L, 去除率达 78.47%, 平均去除速率为 1.14 mg/L/h, 可见氨氮的去除主要发生于对数生长期。这个现象与张培玉等人研究得出的异养硝化菌脱氮作用主要发生在对数期的结论基本一致<sup>[17]</sup>。最终氨氮剩余 1.47 mg/L, 去除率高达 98.60%。进入稳定期后  $NH_4^+ - N$  的去除速率较之前有所下降,  $NO_3^- - N$  作为硝化终产物其含量不断上升, 最终含量为 98.26 mg/L。  $NO_2^- - N$  作为中间产物只有极少量存在于培养基中。TN 含量基本不变。这说明 W-3 具有优异的硝化性能, 以氨氮为起始反应物, 先转化为亚硝态氮, 该形态停留时间短, 最终转化为硝态氮。

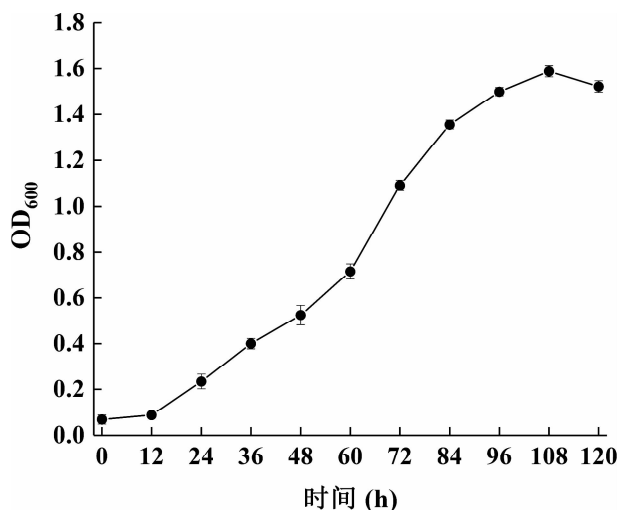


图4 W-3 的生长曲线

### 3.4 W-3 异养硝化能力的优化

#### 3.4.1 最适碳源

碳源是微生物生长必不可少的能源之一, 不同的碳源对微生物的生长发育及代谢有着不同程度的影响, 不同的微生物对不同碳源的利用能力也大不

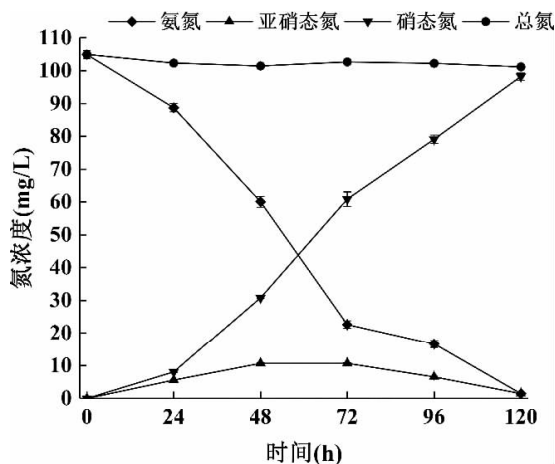


图5 W-3 的氨氮转化特性

相同<sup>[18]</sup>,因此,细菌的脱氮效果也会因为碳源种类的不同而异。图6和图7显示了W-3在不同碳源环境下的生长情况差异和氨氮去除能力。取W-3纯化细菌液,按照1%的接种比例,分别转接进以醋酸钠、葡萄糖、柠檬酸钠、淀粉、蔗糖(含碳量相等)为单一碳源配制的异养硝化培养基中,在30℃、150 r/min下恒温振荡增殖培养5 d,每间隔一定时间进行取样,用以测定OD<sub>600</sub>和氨氮含量。

如图6和图7所示,可用于维持异养硝化细菌生长的碳源类型非常多,但可被异养硝化细菌用于硝化的碳源类型却受到了一定限制<sup>[18]</sup>。在以蔗糖为碳源的培养基中,W-3的生长活性被抑制,最终氨氮去除率只有22.73%。以淀粉为碳源时,W-3的生长状况虽比蔗糖要好,但明显迟缓期较长,最终去除率仅为25.76%。而以醋酸钠为碳源时,W-3的生长活性以及硝化性能均最好,氨氮去除率可达98.48%,其次是葡萄糖和柠檬酸钠,去除率分别达到了86.00%和68.66%。

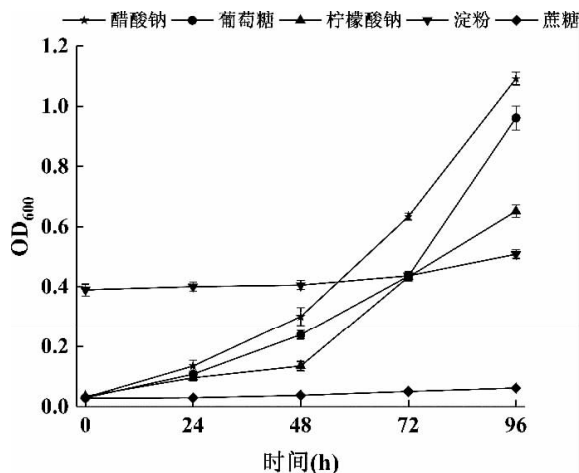


图6 碳源对 W-3 生长情况的影响

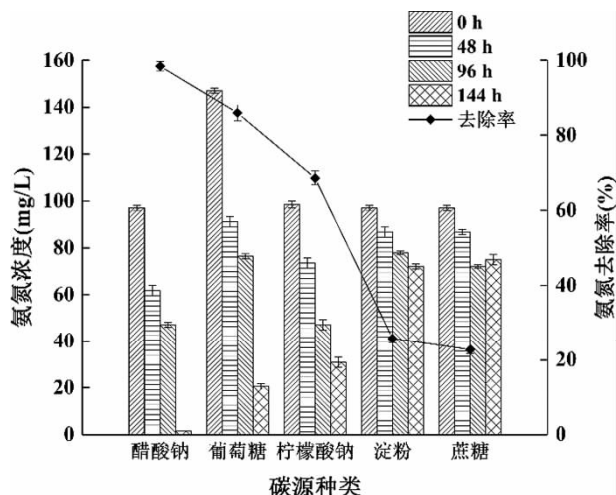


图7 碳源对 W-3 硝化性能的影响

因此得出菌株W-3的最优碳源为醋酸钠。小分子碳源更容易被W-3吸收利用,更有利于硝化作用,因此在处理实际水样时,可以通过外加小分子碳源来提高污泥的异养硝化性能和生长活性。

### 3.4.2 最适 C/N

由于W-3为异养型,足够的碳源可以促进其快速生长,更好发挥硝化作用,因此探究一定范围内C/N对W-3硝化性能的影响十分必要。通过调整醋酸钠在异养硝化培养基中的含量来调整C/N,W-3纯化细菌液的接种量为1%,在30℃、150 r/min下进行恒温振荡培养,定时取样来检测细菌的生长情况与硝化性能。

通过图8和图9可以看出,在低碳源条件下(C/N=1~4),该菌株的生长活性和硝化能力并未受到抑制。当C/N=1时,氨氮去除率仍有80.15%,上升至4时氨氮的降解能力最好,最终去除率达到98.56%,此时OD<sub>600</sub>值为1.396。随着C/N从4增加到12,菌株仍保持较好的生长状态,氨氮去除率相对稳定,均在90%以上。而随着C/N继续提高,W-3的生长活性明显减缓,且氨氮去除率也明显降低,维持在60%左右。这可能是由于碳源量“供过于求”,导致细菌代谢不平衡,有机物质在水体中的浓度过高、分解不及时,导致微生物活动减弱,并且降低了硝化效率。由此可见,当C/N在2~12时,菌株生长快且脱氮效果显著,氨氮去除率都在90%以上。

分析表明,有机碳源的量对微生物的生长和代谢都起着重要作用。碳源量不足时,没有足够的电子流提供能源,也就没有足够的能量促使细菌生长,硝化作用的效果也将随着菌株的生长变差而降

低<sup>[19]</sup>。在实际废水的处理中,通常高 C/N 会造成出水 COD 过高,影响水质,所以在实际应用中要考虑选取最合适、最经济的 C/N<sup>[20]</sup>。如图, C/N = 4 已可满足 W-3 对硝化反应的要求。

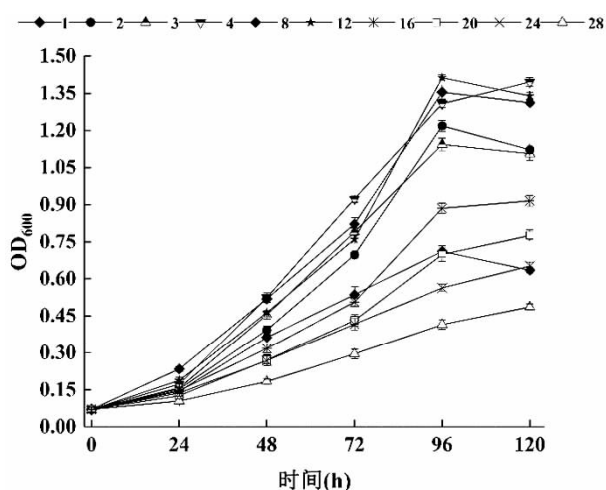


图 8 C/N 对 W-3 生长情况的影响

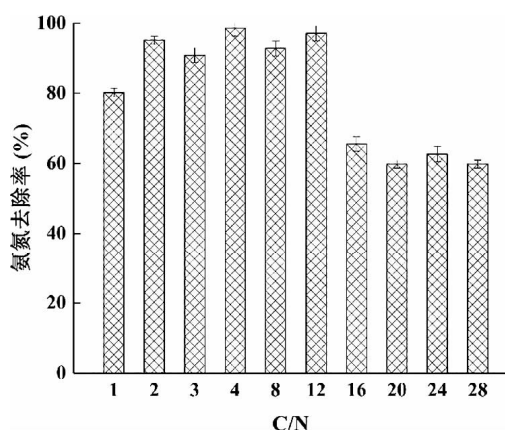


图 9 C/N 对 W-3 硝化性能的影响

### 3.4.3 最适初始氨氮浓度

根据上述实验中已知的最适碳源和 C/N,在不改变接种量和其他培养条件的情况下分别调节异养硝化培养基中初始  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的浓度为 53 mg/L、106 mg/L、159 mg/L、212 mg/L。结果如图 10 和图 11 所示。

菌株 W-3 在 53 ~ 212 mg  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{L}$  的条件下均可正常生长,并保持一定的硝化能力。其中当初始  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的浓度为 106 mg/L 时,氨氮去除率最高,约为 97.78%。当氨氮含量持续上升,氨氮转化效率开始逐渐降低,初始氨氮含量为 212 mg/L 时,  $\text{OD}_{600}$  值并未明显降低 (1.044),但是氨氮去除率迅速降至 60.60%,说明初始氨氮浓度过高可能会对 W-3 的硝化过程有一定程度的影响。但是,从菌株

生长速率保持增加的趋势上来看,如果延长处理时间,氨氮去除率可能仍会增加。结果表明, W-3 能够适应比较广泛的氨氮浓度范围,较高的氨氮去除速率和增长速率使得 W-3 在水污染治理中具有潜在的应用价值。

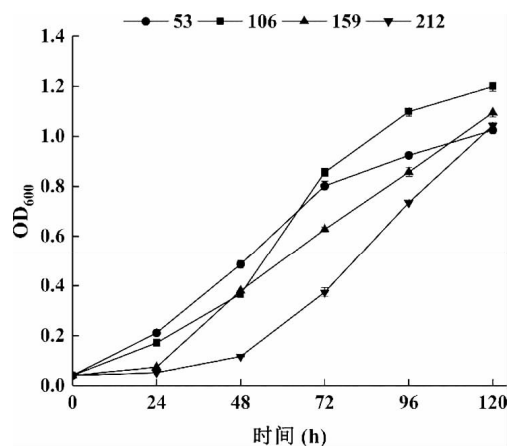


图 10 初始氨氮浓度对 W-3 生长情况的影响

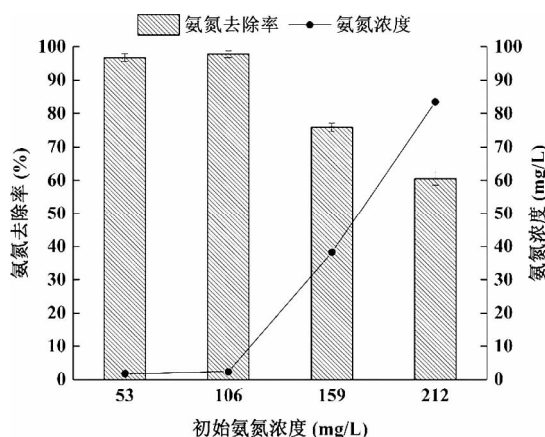


图 11 初始氨氮浓度对 W-3 硝化性能的影响

### 3.5 实验室模拟活性污泥实验

在上述实验中, W-3 在不同培养条件下均能保持一定的硝化活性,具有处理高氨氮废水的潜在应用能力。为了更好地将 W-3 与实际污水处理相结合,笔者在实验室模拟了水体高氨氮污染实验。将目的菌株 W-3 转接于 LB 培养基中进行富集培养,得到一定的生物量后取样进行离心处理,取底质投加到一定氨氮浓度的培养基中,来模拟不同氨氮废水的处理<sup>[21]</sup>。

如图 12 所示, W-3 在不同氨氮浓度条件下均具有良好的硝化性能。在高浓度氨氮环境下 ( $\text{NH}_4^+ - \text{N} = 424.58 \text{ mg/L}$ ), W-3 的去除速率反而更高,约为 4.4 mg/L/h,但是所需的时间也更长。因此可以增大投放的生物量,从而缩短处理时间。

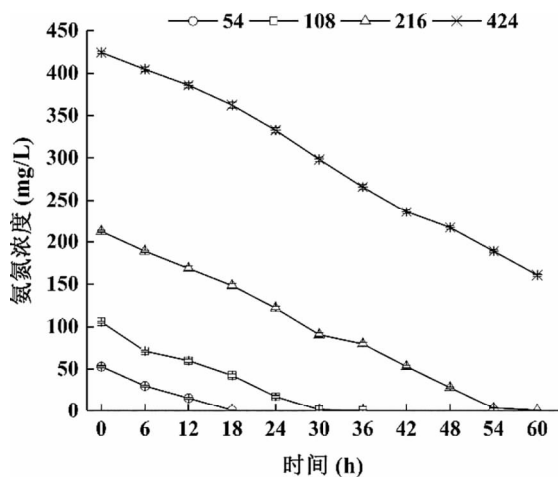


图 12 模拟活性污泥实验中的氨氮降解能力

## 4 结论

从武汉市某污水处理厂底泥中成功分离了一株能高效去除氨氮的菌株 *Ochrobactrum* sp. W-3。其氮转化途径为  $\text{NH}_4^+ - \text{N} \rightarrow \text{NO}_2^- - \text{N} \rightarrow \text{NO}_3^- - \text{N}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  作为中间代谢产物,停留时间短,只有极少量存在,最终几乎全部转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,总氮含量基本不变。与其他研究者发现的菌株相比,W-3 在低 C/N 下仍能生长和发挥硝化性能,其需要的有机物碳源的量较少,且能适应高浓度的氨氮环境,具有很大的工程应用价值。本研究结果为异养硝化细菌 W-3 在治理氮污染废水中的实际应用提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] Guo X S, Liu Z H, Chen M, et al. Decentralized wastewater treatment technologies and management in Chinese villages [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(6): 929-936.
- [2] 王春萍, 郭宏宇, 霍玉珠, 等. 天津滨海湿地一株高效异养硝化细菌的分离鉴定及脱氮特性 [J]. *天津师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 41(6): 1-8.
- [3] 闫志英, 廖银章, 李旭东, 等. 新型废水生物脱氮的微生物学研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(2): 292-296.
- [4] 应之悦, 翁国永, 陈建军, 等. 硝化细菌群的富集及其去除城镇寡营养河道中氨氮污染的应用 [J]. *微生物学通报*, 2022, 49(1): 14-24.
- [5] Padhi S K, Tripathy S, Mohanty S, et al. Aerobic and heterotrophic nitrogen removal by *Enterobacter cloacae* CF-S27 with efficient utilization of hydroxylamine [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 232: 285-296.
- [6] 罗胜南, 尚润东, 靳永胜. 我国微生物法去除氨氮研究进展 [J]. *生物技术进展*, 2017, 7(2): 155-160.
- [7] 黄海洪, 贺莉, 类延菊, 等. 一株芽孢杆菌在低氮源浓度培养基中的生长与氨氮去除特性 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(1): 183-192.
- [8] 何霞, 吕剑, 何义亮, 等. 异养硝化机理的研究进展 [J]. *微生物学报*, 2006, 46(5): 844-847.
- [9] 吕其军, 施永生. 同步硝化反硝化脱氮技术 [J]. *昆明理工大学学报*, 2003, 28(6): 91-95.
- [10] Yang J R, Wang Y, Chen H, et al. Ammonium removal characteristics of an acid-resistant bacterium *Acinetobacter* sp. JR1 from pharmaceutical wastewater capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 274: 56-64.
- [11] Zhang D Y, Li W G, Huang X F, et al. Removal of ammonium in surface water at low temperature by a newly isolated *Microbacterium* sp. strain SFA 13 [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 137: 147-152.
- [12] 郭万茹, 崔康平, 郭志, 等. 高效异养硝化菌的分离鉴定及硝化特性 [C]// 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(三). 北京:《工业建筑》杂志社有限公司, 2020: 353-359.
- [13] 陈赵芳, 尹立红, 浦跃朴, 等. 一株异养硝化菌的筛选及其脱氮条件 [J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2007, 37(3): 486-490.
- [14] 呼婷婷. 两株异养硝化菌的复合及其脱氮性能研究 [J]. *环境工程*, 2016, 34: 367-377.
- [15] Ahmad NUD, Xu H Y, Chen L P, et al. Enhanced biological nutrient removal by the alliance of a heterotrophic nitrifying strain with a nitrogen removing ecosystem [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2008, 20(2): 216-223.
- [16] 陈佗. 一株异养硝化细菌的筛选鉴定及硝化性能研究 [J]. *西部皮革*, 2019, 41(08): 156-159.

(下转第 76 页)

- [6] 杨静,陈亮,冯卓. 国际农业垄断资本对发展中国家粮食安全影响的分析——兼对保障中国粮食安全的思考[J]. 中国农村经济,2017,33(04):75-87.
- [7] 李小云,肖瑾. 新南南合作的兴起:中国作为路径[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2017,37(05):1-12.
- [8] 李贺,徐玉波. 中国—WFP 开展南南合作现状、存在问题和政策建议[J]. 世界农业,2016,38(05):64-67.
- [9] Dirlik, A. The Bandung legacy and the People's Republic of China in the perspective of global modernity [J]. Inter-Asia Cultural Studies, 2015,16(04):615-630.
- [10] Gray K, Gills B. South-South Cooperation and the rise of the global south [J]. Third world quarterly, 2016(04):557-574.
- [11] UNCTAD. World Investment Report 2015 [R]. United Nations Publication, 2015.
- [12] 于浩森. 完善农业多边南南合作项目管理研究[J]. 世界农业,2014,36(10):62-64.
- [13] 高伟东. 世界粮农组织—中国南南合作计划已使亚非 7 万多人直接受益 [EB/OL]. (2019-11-21) [2021-05-30]. [http://paper.ce.cn/jjrb/html/2019-11/27/content\\_406875.htm](http://paper.ce.cn/jjrb/html/2019-11/27/content_406875.htm).
- [14] 朱月季,高贵现,周德翼. 中非农业合作模式研究[J]. 经济纵横,2015,31(01):114-118.
- [15] 王胜文. 中国援助非洲基础设施建设的经验与展望[J]. 国际经济合作,2012,28(12):7-9.
- [16] 王妍蕾,刘晴. OECD 十年发展援助情况演变[J]. 烟台大学学报(哲学社会科学版),2013,26(04):109-114.
- [17] Abebaw D, Haile M. G. The impact of cooperatives on agricultural technology adoption: Empirical evidence from Ethiopia [J]. Food Policy, 2013,38(01):82-91.
- [18] Aslan A, McCarthy N. Adoption and intensity of adoption of conservation farming practices in Zambia [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2014,187(04):72-86.
- [19] FAO. 中国—粮农组织南南合作项目在马达加斯加示范杂交水稻种植取得初步成功 [EB/OL]. (2020-04-23) [2021-05-30]. <https://www.fao.org/china/news/detail/zh/c/1274794/>.
- [20] 国家国际发展合作署. 40 载“授人以渔”援助打造非洲水稻之乡 [EB/OL]. (2021-10-13) [2021-10-26]. [http://www.cidca.gov.cn/2021-10/13/c\\_1211402479.htm](http://www.cidca.gov.cn/2021-10/13/c_1211402479.htm).
- [21] 韩长赋. 推动中非农业合作再上新台阶 [EB/OL]. (2018-09-02) [2021-10-26]. [http://www.gov.cn/xinwen/2018-09/02/content\\_5318531.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2018-09/02/content_5318531.htm).

(上接第 42 页)

- [17] 张培玉,曲洋,于德爽,等. 菌株 qy37 的异养硝化/好氧反硝化机制比较及氨氮加速降解特性研究[J]. 环境科学,2010,31(8):1819-1826.
- [18] 潘丹,黄巧云,陈雯莉. 两株异养硝化细菌的分离鉴定及其脱氮性质[J]. 微生物学报,2011,51(10):1382-1389.
- [19] 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.
- [20] 赵丹,于德爽,李津,等. 菌株 ZD8 的分离鉴定及其异养硝化和缺氧/好氧反硝化特性研究[J]. 环境科学学报,2013,33(11):3007-3016.
- [21] 杨宗政,王鑫,庞金钊,等. 异养硝化菌的分离及其强化活性污泥脱氮效果[J]. 中国给水排水,2006,22(21):67-70.