

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.07.010

榨菜废水异养硝化菌筛选与强化脱氮系统构建

杨静怡, 李宏远, 温宇惠, 刘同硕, 樊星, 周健
(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 针对高盐榨菜废水脱氮系统构建困难、脱氮效能较低的问题,开展榨菜废水异养硝化强化脱氮系统构建与效能研究。首先从榨菜废水脱氮系统中分离纯化出异养硝化菌株,系统分析其生理生化特性与脱氮性能,而后制备成异养硝化纯菌液,并考察菌液投加对系统构建、脱氮效能及途径的影响。试验结果表明:从榨菜废水处理系统中分离纯化的JZ18菌株为施氏假单胞菌(*Pseudomonas stutzeri*),属于异养硝化-好氧反硝化菌。该菌株可在温度为15~47℃、pH=5~9、盐度为10~70 g/L(以NaCl计)条件下生长,对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的降解速率分别为23.96和0.90 mg/(L·h)。投加纯菌液的反应器可在20 d内构建出异养硝化强化脱氮系统,系统的异养、自养硝化速率分别为8.45、3.14 mg/(L·h),好氧、缺氧反硝化速率分别为11.46、7.28 mg/(L·h),COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN平均去除率分别为94.65%、99.64%和98.80%。优势脱氮功能菌属包括盐单胞菌属(*Halomonas*)、弧菌属(*Vibrio*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、栖苏打菌属(*Nitricola*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、瘤胃解蛋白质菌属(*Proteiniclasticum*)、叶杆菌属(*Phyllobacteriaceae*)以及硝酸盐还原菌属(*Nitratireductor*)。该系统通过异养硝化、自养硝化、好氧反硝化以及缺氧反硝化等多路径协同脱氮作用,实现高效稳定的脱氮效能。

关键词: 异养硝化; 强化脱氮; 榨菜废水; 菌株筛选

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0065-07

Screening of Heterotrophic Nitrifying Bacteria and Construction of an Enhanced Nitrogen Removal System for Mustard Tuber Wastewater

YANG Jingyi, LI Hongyuan, WEN Yuhui, LIU Tongshuo, FAN Xing, ZHOU Jian
(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Considering the challenges and low efficiency in the construction of nitrogen removal system for high-salt mustard tuber wastewater, this study investigated the development and performance of an enhanced heterotrophic nitrification-denitrification system for such wastewater. A heterotrophic nitrifying bacterial strain was isolated and purified from the nitrogen removal system for mustard tuber wastewater, and its physiological and biochemical properties as well as nitrogen removal performance were systematically examined. The purified bacterial solution was then introduced into the reactor to study its effects on system construction, nitrogen removal efficiency and route. The results showed that the isolated strain JZ18, identified as *Pseudomonas stutzeri*, was a heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacterium, which could grow under temperatures ranging from 15 °C to 47 °C, pH between 5

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52370066)

通信作者: 周健 E-mail: zhoujian@126.com

and 9, and salinities of 10–70 g/L (calculated as NaCl). The degradation rates of COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ reached 23.96 mg/(L·h) and 0.90 mg/(L·h), respectively. By adding purified bacterial solution to the reactor, the enhanced heterotrophic nitrification system was constructed within 20 days. The system exhibited heterotrophic and autotrophic nitrification rates of 8.45 mg/(L·h) and 3.14 mg/(L·h), and aerobic and anoxic denitrification rates of 11.46 mg/(L·h) and 7.28 mg/(L·h), respectively. The average removal efficiencies of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN were 94.65%, 99.64% and 98.80%, respectively. Dominant denitrifying genera were *Halomonas*, *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Nitrincola*, *Flavobacterium*, *Proteiniclasticum*, *Phyllobacteriaceae*, and *Nitrateductor*. The system has achieved highly efficient and stable nitrogen removal effect through the synergistic action of multiple pathways, including heterotrophic nitrification, autotrophic nitrification, aerobic denitrification and anoxic denitrification.

Keywords: heterotrophic nitrification; enhanced nitrogen removal; mustard tuber wastewater; strain screening

榨菜加工废水具有高盐度、高氮和高有机物浓度的典型特征。一方面,高盐度(>20 g/L,以NaCl计)会抑制传统生物脱氮系统中的自养硝化菌(氨氧化菌AOB、亚硝酸盐氧化菌NOB)活性^[1];另一方面,高浓度有机物不利于自养硝化菌的富集,导致高盐榨菜废水生物脱氮系统构建困难、脱氮效能低^[2]。

研究表明^[3–5],从海底沉积物、盐湖等环境中分离出的嗜/耐盐异养硝化菌株对高盐高有机物环境适应性较强,部分菌株在不含盐条件下甚至无法生长,如异养硝化菌芽孢杆菌属菌N31(*Bacillus* strain N31)、魔鬼弧菌SF16(*Vibrio diabolicus* SF16)、盐田盐单胞菌(*Halomonas campisalis*)分别适宜在盐度为30~40、10~50、200 g/L条件下生存。此外,部分异养硝化菌还兼具好氧反硝化功能,如托拉斯假单胞菌Y-11(*Pseudomonas tolaasii* strain Y-11)^[6]可实现高效同步硝化反硝化,总氮(TN)去除率达93%;而从高盐生物膜反应器中分离的蜡样芽孢杆菌GS-5(*Bacillus cereus* GS-5)对氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)及磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)的降解速率分别为2.62、2.69、1.16、0.42 mg/(L·h)。目前,对于异养硝化菌的研究多集中于单株功能菌的发现、鉴定及其在水处理中的应用,而在实际污水处理中的报道仍较少。

针对上述问题,以快速构建榨菜废水异养硝化系统并提升脱氮效能为目标,从榨菜废水处理系统中纯化异养硝化菌株,研究其生理生化特性和脱氮性能,而后筛选高效脱氮菌株制备纯菌液,重点考

察菌液投加对榨菜废水异养硝化强化脱氮系统构建、脱氮效能及途径的影响。结合16S rRNA高通量测序技术,探究构建系统的功能菌属及其微生物作用机制,旨在为榨菜废水高效脱氮提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

采用序批式生物膜反应器(有效容积为2 L),内设组合填料,填充密度为38%。反应器通过充氧泵经砂头进行曝气供氧,运行工况由时控开关调节;温度通过恒温带控制。

1.2 试验水质

榨菜废水强化脱氮系统构建试验所用废水取自某榨菜厂的加工废水,其水质参数如下:盐度为30 g/L, COD为(4 500±500) mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为(218±43) mg/L, TN为(289±57) mg/L, pH为5.0±0.2。

1.3 试验方法

1.3.1 榨菜废水中筛选异养硝化菌的特性研究

从榨菜废水处理试验反应器中筛选菌株,采用稀释涂布平板法和平板划线法进行分离纯化,将纯化后的单菌接种于已灭菌的基本培养基,在35℃、165 r/min摇床中振荡培养2 d,选取COD与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度显著下降的菌液;并对提纯菌种进行生理生化性能分析,包括菌落形态、革兰氏染色、乙酰甲基甲醇(V.P)试验、吲哚试验、甲基红试验、接触酶试验、氧化酶试验、硝酸盐还原试验、柠檬酸盐利用试验及淀粉水解试验等。此外,取5 mL处于对数生长期的菌液,采用异养硝化培养基进行脱氮能力测试。同时,探究分离菌株对环境的适应性,考察温度(5、

15、25、35、47℃)、pH(5、6、7、8、9)、盐度(10、30、50、70 g/L)对单菌生长的影响。试验用培养基组成见表1。

表 1 试验用培养基组成

Tab.1 Culture medium formula for test

项目	配方
基本培养基	氯化铵(NH ₄ Cl)为0.35 g/L,无水乙酸钠(CH ₃ COONa)为4.5 g/L,磷酸二氢钾(KH ₂ PO ₄)为0.05 g/L,NaCl为30 g/L,微量元素溶液为5 mL/L
异养硝化培养基	NH ₄ Cl为0.35 g/L,NaCl为10 g/L,CH ₃ COONa为4.5 g/L,KH ₂ PO ₄ 为0.05 g/L,微量元素溶液为5 mL/L,琼脂为20 g/L

1.3.2 菌液投加异养硝化系统构建及效能研究

基于榨菜废水的水质特点,选择前期研究分离纯化出的对温度、盐度、pH适应能力较强,且具有良好异养硝化-好氧反硝化性能的菌株,经富集培养获得纯菌液,用于构建榨菜废水异养硝化强化脱氮系统。采用平行对照试验,设置投加菌液的试验组和不加菌液的对照组,考察菌液投加对系统构建及脱氮效能的影响。在温度为(30±2)℃、溶解氧(DO)为6 mg/L的条件下运行反应器,试验组在系统启动前3个运行周期(每周期48 h)的第1、3、5天投加菌液,之后将运行周期调整为8 h(瞬时进水-好氧8 h-瞬时排水);反应器以低盐度启动,排水比为0.15,通过周期性换水将盐度逐步提升至30 g/L。试验期间监测各反应器进出水中的COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN等指标。待系统稳定运行后,测定各反应器内COD与氮素浓度的周期性变化规律,并采集生物样品进行16S rRNA高通量测序,探究系统中微生物功能菌群结构,所用引物为338F(ACTCCTACGGGAGGCAGCAG)以及806R(GGAC-TACHVGGGTWTCTAAT)。

2 结果与讨论

2.1 筛选菌株的性质及脱氮性能

从榨菜废水生物处理系统中,共筛选纯化获得28种单菌株。经初步异养硝化-好氧反硝化能力测试,筛选出7种具有硝化功能的菌株,分别为JZ3、JZ10、JZ13、JZ16、JZ18、JZ20及JZ23,其脱氮能力测试结果见表2。

JZ16、JZ23的生长速度显著低于其他脱氮菌株,由表2可知,二者在无碳源时仍能去除NH₄⁺-N,表明其为自养硝化菌;而在JZ3、JZ10、JZ13、JZ18、

JZ20的单菌培养液出水中,均未检出高浓度的NO₂⁻-N和NO₃⁻-N,培养液中COD和NH₄⁺-N浓度均显著下降,且在无碳源时未表现出脱氮能力,初步判断这5种菌株具有异养硝化-好氧反硝化能力。

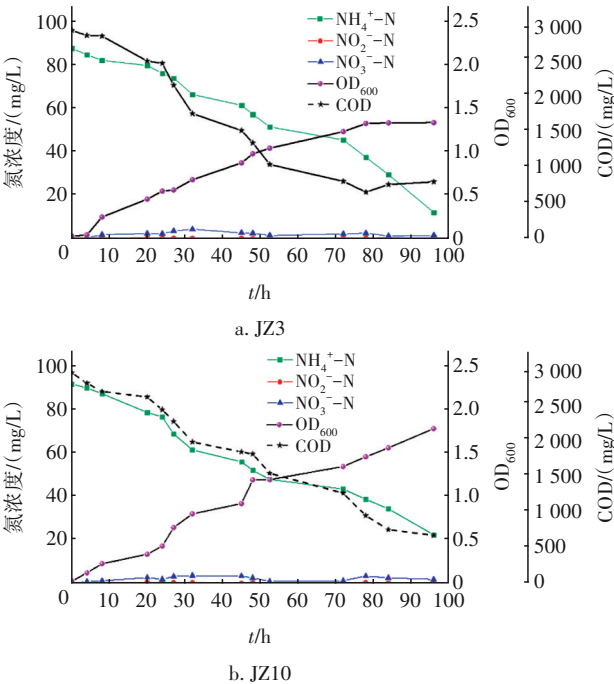
表 2 纯化菌株脱氮功能初步测定结果

Tab.2 Preliminary identification results of nitrogen removal function of purified strains

项目	添加碳源			未添加碳源	
	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	NH ₄ ⁺ -N	TN
JZ3	↓↓	↓↓	↓↓	→	→
JZ10	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	→	→
JZ13	↓↓	↓↓	↓↓	→	→
JZ16	→	↓	↓	↓	→
JZ18	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	→	→
JZ20	↓↓	↓↓	↓↓	→	→
JZ23	→	↓	↓	↓	→

注: ↓代表浓度下降,↓的个数代表下降程度,→代表下降不明显。

进一步对上述菌株进行生理生化特性分析,结果表明,所筛选的菌株JZ3、JZ10、JZ13、JZ18及JZ20均为杆状菌,革兰氏染色结果为阴性;V. P、甲基红试验结果均为阴性;接触酶、硝酸盐还原、柠檬酸盐利用、淀粉水解试验结果均为阳性;吲哚试验中仅JZ20呈阳性,其余为阴性;氧化酶试验仅JZ10为阴性,其余均为阳性。单菌的异养硝化-好氧反硝化能力测试结果见图1。其中,OD₆₀₀为波长600 nm处的光密度,常用于表征细菌生长状况。



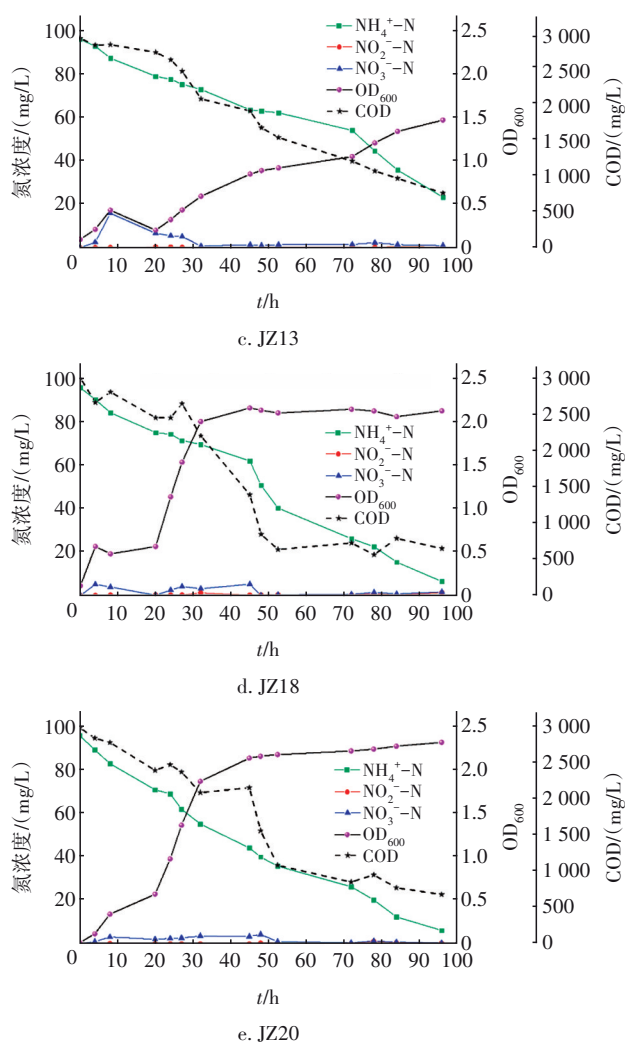


图1 菌株周期生长及氮素、COD逐时变化曲线

Fig.1 Cycle growth of strains and hourly change curves of nitrogen and COD

由图1可知,菌株JZ3、JZ10、JZ13、JZ18和JZ20分别在78.0、52.5、45.0、45.0和45.0h进入稳定生长期,对应 OD_{600} 依次为1.335、1.135、0.748、2.130和2.155。培养96h后,各体系的COD去除率分别为71.63%、77.83%、73.92%、78.28%和78.33%,COD降解速率分别为21.39、24.35、22.92、23.96和24.36 $mg/(L \cdot h)$; NH_4^+-N 去除率分别为86.12%、75.60%、75.81%、93.14%和93.20%, NH_4^+-N 降解速率分别为0.78、0.72、0.75、0.90和0.92 $mg/(L \cdot h)$ 。各体系中COD与 NH_4^+-N 浓度均持续同步下降,表明5种菌株均具有异养硝化能力,其中JZ18和JZ20的异养硝化效能尤为显著。

此外,各体系均未出现 $NO_2^- - N$ 积累。除JZ13在脱氮初期出现 $NO_3^- - N$ 的积累,其余菌株的 $NO_3^- - N$

峰值均在4~7 mg/L 之间,出水未检出 $NO_2^- - N$ 和 $NO_3^- - N$ 。整个培养过程中DO浓度始终高于1 mg/L ,表明5种菌株均具有好氧反硝化能力,可实现同步硝化反硝化脱氮。

由环境因子对菌株生长的影响结果可知:在温度方面,JZ13和JZ18表现出较强的温度适应性,可在15~47 $^{\circ}C$ 范围内生长;其他菌株适宜生长温度为25~47 $^{\circ}C$,对低温适应能力较差。在pH方面,5种菌株均能在pH为7~9范围生长,其中JZ18的适应范围更广(pH=5~9)。在盐度方面,JZ13仅能在盐度 ≤ 30 g/L条件下生长;JZ3、JZ10、JZ20在盐度 >50 g/L时生长速度下降;而JZ18对盐度适应能力较强,在10~70 g/L范围内均能良好生长。综上,JZ18菌株对温度、pH和盐度均表现出较强的适应能力。

PCR扩增产物经Promega PCR Purification Kit纯化后测序,获得菌株JZ3、JZ10、JZ13、JZ18和JZ20的片段长度分别为1426、1524、1437、1424和1439 bp。通过对各菌株的16S rRNA序列进行测定,得到部分碱基序列。将5种菌株的16S rRNA序列通过Blast程序与美国国家生物技术信息中心(NCBI) GenBank中的核酸序列数据库进行同源性比对(见表3),并使用MEGA5.0软件以Neighbor-Joining法建立系统进化发育树,采用Bootstrap方法评价分支聚类稳定性。

表3 纯化菌种与NCBI比对结果

Tab.3 Results of comparison between purified strains and NCBI

项目	最相似菌株	相似度/%
JZ3	<i>Pseudomonas stutzeri</i> strain ATCC 17588	99
JZ10	<i>Pseudomonas stutzeri</i> strain JN65	99
JZ13	<i>Pseudomonas stutzeri</i> strain CCUG 11256	99
JZ18	<i>Pseudomonas stutzeri</i> strain NBRC 14165	99
JZ20	<i>Pseudomonas stutzeri</i> strain W25	99

由表3可知,5种菌株经鉴定均为施氏假单胞菌(*Pseudomonas stutzeri*),属于假单胞菌属(*Pseudomonas*)和 γ -变形菌纲(*Gamma Proteobacteria*)。*Pseudomonas stutzeri*菌种内不同菌株间差异显著,应进一步进行划分,但其高度多样的表型特征使分类工作较难开展。本研究中分离出的5种菌株虽均鉴定为*Pseudomonas stutzeri*,但其菌落特征、脱氮性能、生理生化性能以及对温度、pH、盐度的适应范围均存在一定差异。

2.2 菌液投加榨菜废水异养硝化脱氮系统构建

综合考虑榨菜废水偏酸性、高盐度的水质特征,结合上述试验结果,可知从榨菜废水中分离纯化出的JZ18菌株表现出对温度、盐度、pH的良好适应能力,并具备优异的异养硝化-好氧反硝化性能。因此,进一步对JZ18进行富集培养,制备纯菌液,用于构建榨菜废水异养硝化脱氮系统。脱氮系统构建期间COD及氮浓度逐日变化曲线见图2。

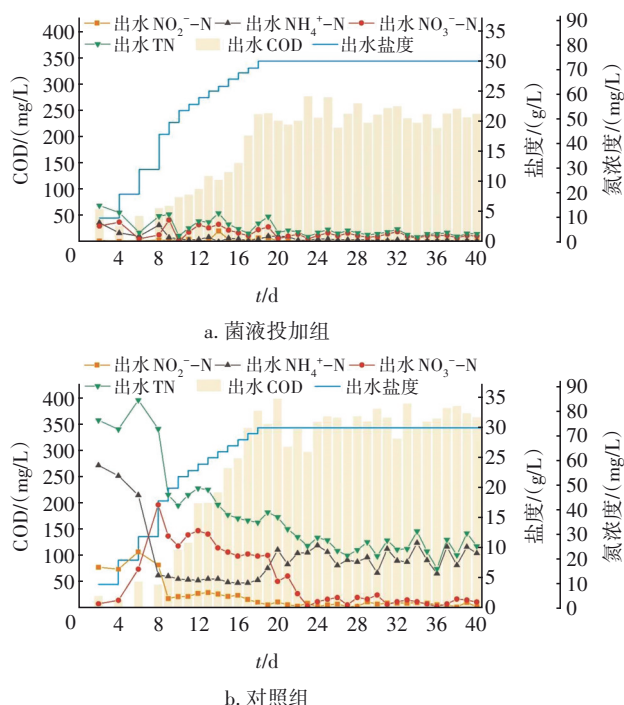


图2 脱氮系统构建期间COD及氮浓度逐日变化曲线

Fig.2 Daily change curves of COD and nitrogen concentration during construction of nitrogen removal system

由图2可知,投加菌液对高盐榨菜废水强化脱氮系统的启动时间与脱氮效能影响显著。在菌液投加组中,反应器运行第1~6天(每周期为48 h),出水氮浓度逐渐降低,且系统内未出现 NO_2^- -N和 NO_3^- -N积累。这是由于嗜盐JZ18纯菌液的投加,使系统微生物菌群能够快速适应高盐与高有机物环境,盐度未对微生物活性产生明显抑制;第7~19天,试验组虽不再投加菌液,但已投加的菌种在系统中得到富集增殖,随着盐度提升,出水浓度出现小幅波动,但脱氮效能仍保持较高水平;第20~40天,盐度稳定在30 g/L,系统出水浓度趋于稳定,表现出良好的运行稳定性。相比之下,对照组反应器在第1~22天,出水 NH_4^+ -N和TN浓度下降缓慢,其间出现

NO_2^- -N和 NO_3^- -N积累,表明脱氮功能菌群富集速度较慢;第23~40天,系统虽趋于稳定,但污染物去除率较低。

以上结果表明:投加菌液的试验组反应器在20 d内成功构建出异养硝化-好氧反硝化脱氮系统,接种菌株对榨菜废水适应性良好,系统脱氮高效稳定;而未投加菌液的对照组对异养硝化-好氧反硝化菌群富集速度较慢,系统脱氮效能较低。在系统稳定运行期间,试验组的COD、 NH_4^+ -N和TN平均去除率分别为94.65%、99.64%和98.80%,较对照组分别高出2.58%、9.12%和7.74%。

2.3 构建的强化脱氮系统脱氮路径

图3为脱氮系统稳定运行期间COD及氮浓度周期变化曲线。

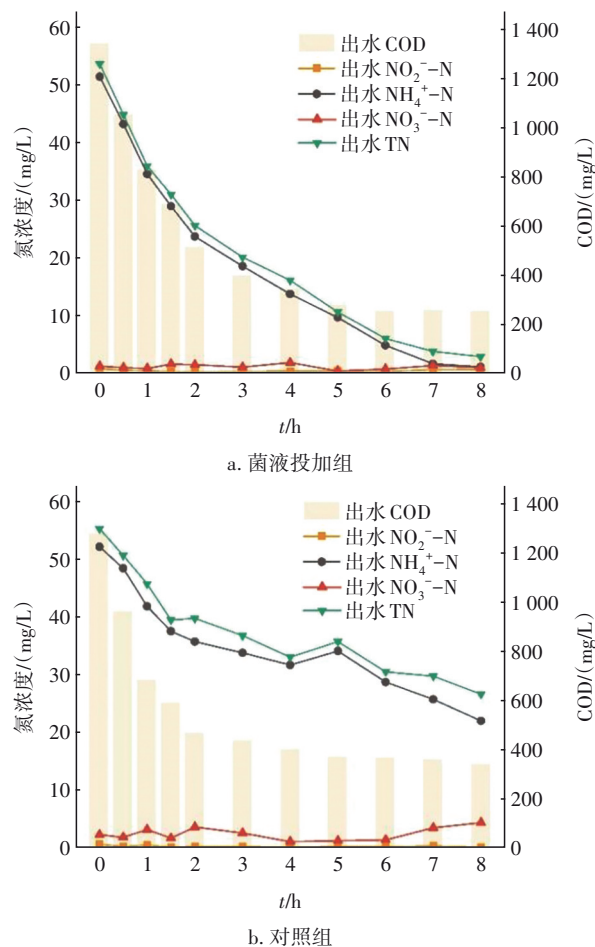


图3 脱氮系统稳定运行期间COD及氮浓度周期变化曲线

Fig.3 Variation curves of COD and nitrogen concentrations over a cycle during stable operation of nitrogen removal system

由图3可知,菌液投加对高盐废水生物脱氮路

径影响显著。菌液投加组和对照组的COD降解速率分别为215.10和180.80 mg/(L·h), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降解速率分别为8.45和3.73 mg/(L·h),表明菌液投加系统的COD及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降解速率均高于对照组。

表4为两组系统硝化与反硝化速率的对比。可知,菌液投加系统的脱氮过程由多种脱氮途径协同完成:硝化以异养硝化为主、自养硝化为辅;反硝化则以好氧反硝化为主、缺氧反硝化为辅。由于高效富集了脱氮功能菌群,菌液投加系统的脱氮速率显著高于对照组;而对照组系统因功能菌群富集能力较弱,表现出较低的脱氮效能。

表4 两组系统硝化与反硝化速率对比

Tab.4 Comparison of nitrification and denitrification rates between two groups mg/(L·h)

项目	硝化/反硝化类型	硝化/反硝化速率
菌液投加脱氮系统	异养硝化	8.45
	自养硝化	3.14
	好氧反硝化	11.46
	缺氧反硝化	7.28
对照脱氮系统	异养硝化	3.37
	自养硝化	4.17
	好氧反硝化	7.13
	缺氧反硝化	6.52

对构建成功且稳定运行的菌液投加组和对照组中的生物样品进行16S rRNA高通量测序,以分析菌液投加对系统微生物菌群结构的影响。在门水平和属水平上的微生物菌群结构见图4。

由图4(a)可知,菌液投加组与对照组中的优势菌门主要有变形菌门(Proteobacteria,相对丰度分别为59.52%和60.84%)、拟杆菌门(Bacteroidetes,20.84%、12.62%)、绿弯菌门(Chloroflexi,1.05%、9.75%)、放线菌门(Actinobacteria,2.22%、5.25%)和厚壁菌门(Firmicutes,15.56%、2.74%)。有研究表明^[7],厚壁菌门内存在多种具有脱氮功能的菌种。

由图4(b)可知,在属水平上,两组系统间的微生物群落结构存在显著差异。菌液投加组的脱氮功能优势菌属主要包括异养硝化-好氧反硝化功能菌属:盐单胞菌属(*Halomonas*,16.17%)^[8]、假单胞菌属(*Pseudomonas*,3.42%)^[9]、弧菌属(*Vibrio*,1.40%)^[5],以及反硝化功能菌属:黄杆菌属(*Flavobacterium*,6.86%)、栖苏打菌属(*Nitrincola*,4.96%)、瘤胃解蛋白质菌属(*Proteiniclasticum*,4.41%)、叶杆菌属

(*Phyllobacteriaceae*,3.45%)和硝酸盐还原菌属(*Nitratireductor*,1.96%)。而对照组的优势功能菌属主要为*Halomonas*(1.77%),以及反硝化菌属——河床菌门菌属(*Zixibacteria*,4.61%)。以上结果表明,菌液投加组反应器中脱氮功能菌属的种类和丰度均显著高于对照组,且投加的*Pseudomonas*在系统中已成为稳定的优势菌属。

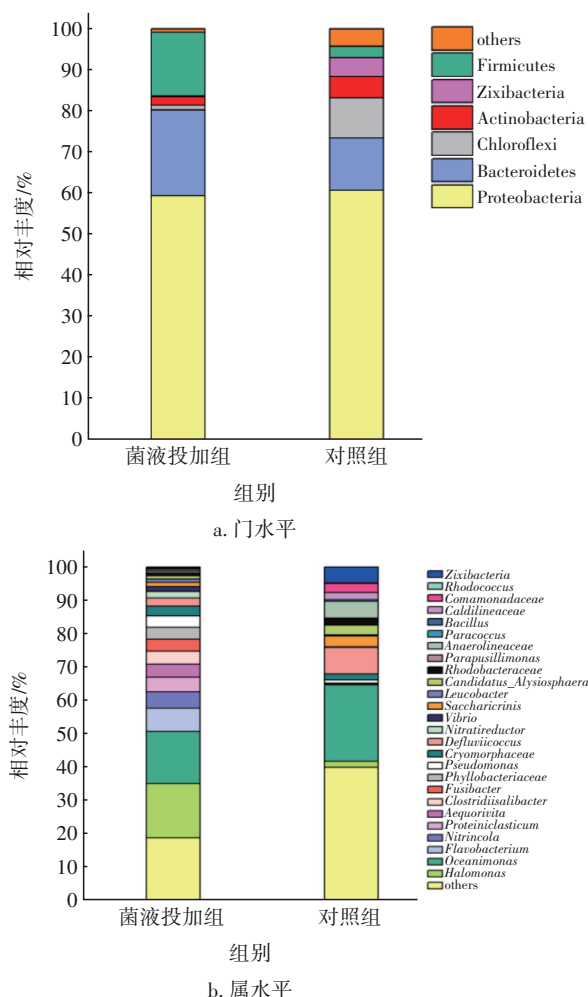


图4 菌液投加组与对照组微生物菌群结构

Fig.4 Composition of microbial community in bacteria solution addition group and control group

研究进一步表明,投加异养硝化菌液可显著提高系统中脱氮功能菌的多样性,这与Marazioti等^[10]的研究结果一致。异养硝化过程的代谢产物可为其他异养脱氮功能菌提供生长底物,从而促进多种脱氮菌属共同生长。在投加菌液的试验组生物样品中,AOB和NOB的丰度均处于较低水平(<0.05%),说明该系统中硝化作用主要由异养硝化菌完成,反硝化过程则由好氧与缺氧反硝化菌共同实现。综

上,菌液投加对高盐榨菜废水生物脱氮系统的微生物种群结构影响显著,投加特定功能菌种是高盐榨菜废水脱氮系统快速构建及效能提升的有效途径。

3 结论

① 从系统中分离纯化优选出的JZ18菌株,经鉴定为异养硝化-好氧反硝化菌 *Pseudomonas stutzeri*。该菌株对环境适应能力强,可在温度为15~47℃、pH为5~9、盐度为10~70 g/L条件下生长,对COD和 NH_4^+-N 的降解速率分别为23.96和0.90 mg/(L·h)。

② 菌液投加对高盐榨菜废水脱氮系统的构建影响显著。投加菌液不仅缩短了系统启动时间,而且提升了处理效能。构建的系统在稳定运行期间,COD、 NH_4^+-N 以及TN的平均去除率分别为94.65%、99.64%和98.80%;异养硝化速率与自养硝化速率分别为8.45和3.14 mg/(L·h),好氧反硝化速率以及缺氧反硝化速率分别为11.46和7.28 mg/(L·h)。

③ 在投加菌液构建的强化脱氮系统中,优势脱氮功能菌属主要包括 *Halomonas*、*Vibrio*、*Pseudomonas*、*Flavobacterium*、*Proteiniclasticum*、*Phyllobacteriaceae*、*Nitrincola* 和 *Nitratireductor*。该系统通过异养硝化、自养硝化、好氧反硝化及缺氧反硝化等多种脱氮途径协同作用,实现高效脱氮。

参考文献:

- [1] GONZALEZ-SILVA B M, JONASSEN K R, BAKKE I, et al. Nitrification at different salinities: biofilm community composition and physiological plasticity [J]. Water Research, 2016, 95: 48-58.
- [2] HE H, CHEN Y, LI X, et al. Influence of salinity on microorganisms in activated sludge processes: a review [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 119: 520-527.
- [3] LIU Y, AI G M, MIAO L L, et al. *Marinobacter* strain NNA5, a newly isolated and highly efficient aerobic denitrifier with zero N_2O emission [J]. Bioresource Technology, 2016, 206: 9-15.
- [4] 辛玉峰, 曲晓华, 袁梦冬, 等. 一株异养硝化-反硝化不动杆菌的分离鉴定及脱氮活性[J]. 微生物学报, 2011, 51(12): 1646-1654.
XIN Y F, QU X H, YUAN M D, et al. Isolation and identification of a heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying *Acinetobacter* sp. YF14 and its denitrification activity [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2011, 51(12): 1646-1654 (in Chinese).
- [5] DUAN J M, FANG H D, SU B, et al. Characterization of a halophilic heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium and its application on treatment of saline wastewater [J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 421-428.
- [6] HE T, LI Z, SUN Q, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by *Pseudomonas tolaasii* Y-11 without nitrite accumulation during nitrogen conversion [J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 493-499.
- [7] BODINE P, KOMM B S. Evidence that conditionally immortalized human osteoblasts express an osteocalcin receptor [J]. BONE, 1999, 25(5): 535-543.
- [8] GUO Y, ZHOU X M, LI Y G, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by a novel *Halomonas campisalis* [J]. Biotechnology Letters, 2013, 35(12): 2045-2049.
- [9] LI C, YANG J, WANG X, et al. Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a phosphate accumulating bacterium *Pseudomonas stutzeri* YG-24 [J]. Bioresource Technology, 2015, 182: 18-25.
- [10] MARAZIOTI C, KORNAROS M, LYBERATOS G. Kinetic modeling of a mixed culture of *Pseudomonas Denitrificans* and *Bacillus subtilis* under aerobic and anoxic operating conditions [J]. Water Research, 2003, 37(6): 1239-1251.

作者简介: 杨静怡(1997—), 女, 江西上饶人, 硕士, 主要研究方向为废水处理理论与技术。

E-mail: yangjingyi1015@126.com

收稿日期: 2022-11-12

修回日期: 2022-12-30

(编辑: 沈靖怡)