

# 藻菌共生系统处理猪粪废水的研究

王海英 梅毅强 范琪 安达 韦嘉璐 刘柑杏

(中南民族大学 生命科学学院, 武陵山区特色资源植物种质保护与利用湖北省重点实验室, 武汉 430074)

**摘要** 通过适应猪粪废水芽孢杆菌的筛选,以 4 株芽孢杆菌分别与莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*) 构建共生系统.方法:通过对氨氮、总氮、总磷、化学需氧量的测定,研究藻菌共生系统产生协同作用高效率转化猪粪废水的条件.结果:与纯藻系统比较 4 个藻菌共生系统对猪粪废水的处理并未表现出优势;但添加 0.5 g/L 葡萄糖后 4 个藻菌共生系统的去除效率显著提升,*B. coagulans* BS32 和 *C. reinhardtii* 的共生系统的去除效率提高最明显;氨氮、总氮、总磷和化学需氧量的去除效率分别提高了 16.58% ,28.38% ,8.90%和 23.04%.同时添加 0.5 g/L 葡萄糖和芽孢萌发剂 100  $\mu\text{mol/L}$  丙氨酸后,藻菌共生系统对废水的去除效率进一步提高,*B. coagulans* BS32 和 *C. reinhardtii* 的共生系统对氨氮、总氮、总磷和化学需氧量的去除效率分别提高了 18.16% ,39.51% ,19.84%和 39.56%.结论:添加少量葡萄糖和微量丙氨酸可促进莱茵衣藻和芽孢杆菌共生系统对猪粪废水的有效转化.

**关键词** 藻菌共生系统;猪粪废水;丙氨酸;葡萄糖

中图分类号 X713 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2019)03-0366-06

DOI 10.12130/znmzk.20190309

引用格式 王海英,梅毅强,范琪,等.藻菌共生系统处理猪粪废水的研究[J].中南民族大学学报(自然科学版),2019,38(3):366-371.

WANG Haiying, MEI Yiqiang, FAN Qi, et al. Study on the treatment of piggery wastewater by algal-bacterial symbiotic system[J].Journal of South-Central University for Nationalities ( Natural Science Edition), 2019, 38(3):366-371.

## Study on the treatment of piggery wastewater by algal-bacterial symbiotic system

WANG Haiying, MEI Yiqiang, FAN Qi, AN Da, WEI Jialu, LIU Ganxing

(Hubei Provincial Key Laboratory for Protection and Application of Special Plant Germplasm in Wuling Area of China, College of Life Sciences, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Objective: To construct a symbiotic system with four strains of *Bacillus* sp. and *Chlamydomonas reinhardtii* and screen *Bacillus* sp. grown in piggery wastewater. Method: Through the measurement of ammonia nitrogen, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chemical oxygen demand (COD), the conditions for efficient transformation of piggery wastewater by the symbiotic system of algal bacteria were studied. Results: The four-algal symbiosis systems showed no advantage in the treatment of piggery wastewater compared with the one-algae system. However, after the addition of 0.5 g/L glucose, the removal efficiency of the four-algal system improved significantly, with the *B. coagulans* BS32 and *C. reinhardtii* system increased most obviously. Compared with the pure algae system, the removal efficiency of ammonia nitrogen, TN, TP and COD increased by 16.58%, 28.38%, 8.90%, and 23.04% respectively. Additionally, after adding 100  $\mu\text{mol/L}$  alanine as spore germinator into the symbiosis systems with 0.5 g/L glucose, the removal efficiency of

收稿日期 2018-05-03

作者简介 王海英(1974-),女,教授,博士,研究方向:微藻生物技术 E-mail: wanghaiying@mail.scuec.edu.cn,

基金项目 湖北省战略性新兴产业(支柱)产业人才培养计划(GJZ15001);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CTZ18001)

wastewater was further improved. The removal efficiencies of ammonia nitrogen, TN, TP, and COD increased by 18.16%, 39.51%, 19.84%, and 39.56% in the symbiosis system of *B. coagulans* BS32 and *C. reinhardtii*. It is shown that the addition of a small amount of glucose and trace amounts of alanine can enhance the effective transformation of piggery wastewater by the algal-bacterial symbiosis systems.

**Keywords** microalgae and bacterial symbiosis system; piggery wastewater, L-alanine; glucose

畜禽养殖业规模化产生大量畜禽排泄物和各种废弃物,畜禽养殖污染成为继工业和生活垃圾污染后的第三大污染源<sup>[1]</sup>.微藻可吸收废水中无机氮和磷的营养物质,通过光合作用合成生物燃料、食物、药物和化学品的原料<sup>[2]</sup>,是低成本生产微藻生物物质的高度可持续性过程,被认为是解决能源与环境问题的理想技术<sup>[3]</sup>.

近年来研究藻菌共生系统处理废水较多,并取得一定的效果,认为它可作为废水二、三级处理的替代方法<sup>[4]</sup>.DE-BASHAN等<sup>[5]</sup>采用促进小球藻生长的巴西固氮螺组成藻菌联合体系,对城市污水中的氨氮、硝酸盐氮和磷的去除效率分别达到100%,15%和36%,显著高于纯藻系统. JI等<sup>[6]</sup>比较了两种藻菌共生系统对合成废水的处理,发现小球藻和地衣芽孢杆菌共生系统去除效果较好,化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)去除效率分别为86.55%、80.28%和88.95%;而铜绿微囊藻和地衣芽孢杆菌共生系统去除效率仅为65.62% COD,70.82% TDP和21.56% TDN. LIANG等<sup>[7,8]</sup>将地衣芽孢杆菌和 *C. vulgaris* 构建藻菌共生体系,藻与细菌的细胞密度比例为1:1时氨氮(NH<sub>3</sub>-N)去除效率提高至78%,且系统pH值的变化会极大影响系统对营养物的去除效率.这些研究说明藻菌共生系统对废水的转化效率不仅与系统中藻和菌的种类有关,且与藻菌共生系统的外部环境条件有关.

芽孢杆菌对碳系、氮系、磷系污染物具有较强的分解能力,可将氨离子转化为含氮物质,将磷转化为磷酸盐储存在细胞内<sup>[9]</sup>,对废水中的有机物有较强的转化能力,在废水处理中广泛使用<sup>[10]</sup>,前期研究发现小球藻、莱茵衣藻等绿藻对废水具有着良好的净化作用,生长速度快,处理废水周期短<sup>[11,12]</sup>.本文基于对适应猪粪废水生长的芽孢杆菌的筛选,与莱茵衣藻建立藻菌共生系统,考察该系统对猪粪废水的净化的加强,并通过添加少量葡萄糖和芽孢杆菌萌发剂丙氨酸,探讨促进藻菌共生系统产生协同作用达到猪粪废水高效率转化的条件.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料和仪器

菌种:蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus* YS, *Bacillus cereus* SLK)、凝结芽孢杆菌(*Bacillus coagulans* BS32, *Bacillus coagulans* BS33)、短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus* BSK9)、地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis* BL20368, *Bacillus licheniformis* ZCS, *Bacillus licheniformis* BS30)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*, *Bacillus subtilis* MA139, *Bacillus subtilis* R-179, *Bacillus subtilis* BS20, *Bacillus subtilis* C-3102, *Bacillus subtilis* BS24)由中南民族大学生命科学院生物工程实验室提供.藻种:莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii* FACHB-2217)由中国科学院水生生物研究所淡水藻种库提供. COD试剂(1.14538.00065和1.14539.00495,WTW,德国);C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>抗坏血酸(国药集团化学试剂);(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O(重庆北碚化学试剂厂).

消解装置(XJ-III,韶关市泰宏医疗器械);紫外可见分光光度计(752型,上海光谱仪器);全温摇床(QYC,上海新苗医疗器械);光学显微镜(Motic BA210,厦门麦克奥迪电气);水质分析仪(Photo Lab S6,德国WTW).

### 1.2 藻种和菌种的培养

芽孢杆菌用牛肉膏蛋白胨培养基进行培养,主要成分:10 g/L 蛋白胨,10 g/L NaCl,3 g/L 牛肉膏,37 °C 恒温培养箱中200 r/min 培养24 h 即可.莱茵衣藻用TAP培养基进行培养,主要成分:2.42 g/L Tris base,10 mL/L TAP-salts 溶液(37.5 g/L NH<sub>4</sub>Cl,10 g/L MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,7 g/L CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O),1 mL/L 磷酸缓冲液(27 g/L K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>,18.5 g/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>),1 mL/L 微量金属元素[50 g/L Na<sub>2</sub>EDTA,22 g/L ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,5.06 g/L MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O,0.05 g/L CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O,11.4 g/L H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>,4.99 g/L FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,1.10 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O,1.61 g/L CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O,1.57 g/L CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O和16 g/L KOH],1 mL/L 冰醋酸.取对数生长期的莱茵衣藻接

种后在温度为 25 ℃ 3000 lux 的光照培养箱中培养.

### 1.3 猪粪废水预处理

畜禽猪粪废水取自华中农业大学养猪场.取适量的水稀释猪粪废水,静置 12 h 沉淀,取上清,以 10 g/L 壳聚糖为絮凝剂(体积比 6%),10 g/L 海藻酸钠(体积比 3%)为助凝剂进行絮凝处理后,上清液即为实验所需的畜禽猪粪废水,测定废水各指标的范围见表 1.实验时用自来水将其稀释至 COD 初始浓度约为 1000 mg/L,并高温灭菌,每组实验使用同一批废水.

表 1 猪场废水测定值

Tab.1 Determination of swine wastewater

指标	$\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
NH <sub>3</sub> -N	400~700
TN	600~1000
TP	200~400
COD	9000~11000

### 1.4 藻菌共生系统的构建

分别将培养至对数生长期的藻液和菌液取出,8000 r/min 离心 5 min 后,弃上清(避免培养基对水质测量的干扰),用经过稀释的灭菌畜禽猪粪废水重悬后,分别将莱茵衣藻(8.75×10<sup>6</sup>细胞/mL,体积比 10%)和芽孢杆菌(7.63×10<sup>8</sup>细胞/mL,体积比 1%)接入灭菌的畜禽猪粪废水中,光照 40~50 μmol/m<sup>2</sup>·s,25 ℃,150 r/min 摇床连续培养 5 d,取 10 mL 培养液 8000 r/min 离心 5 min 后,取上清作为样品进行水质检测.

### 1.5 水质的测定

#### 1.5.1 COD 试剂盒法测定

将 COD 试剂 A、COD 试剂 B 和水样按照量程内的试剂比例加入到 COD 消解管中,水样为样品经过 6000 r/min 离心 10 min 后的上清液,移取上清液 3 mL 于消解管中,消解装置中加热到 140 ℃ 消解 2 h 后,自然冷却到室温,将 COD 消解管放入水质分析仪中测量水样中 COD 含量.

#### 1.5.2 NH<sub>3</sub>-N, TN, TP 含量的测定

将样品 6000 r/min,离心 10 min 后,取上清液进行 NH<sub>3</sub>-N, TN, TP 含量的测定.监测方法依照水质测定国家标准方法:水质总氮的测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,GB/T 11894—1989;水中氨态氮采用标准测试方法,ASTM D1426—2003;水质总磷的测定采用钼酸铵分光光度法,GB/T 11893—1989.

### 1.6 数据分析

所有实验均进行至少 3 次平行实验,结果数据

使用 GraphPad prism 5.1 分析软件分析样本的差异显著性,采用 One way-ANOVA 分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 适宜在猪粪废水中生长的芽孢杆菌的筛选

14 株芽孢杆菌均为中南民族大学生物工程课题组筛选的益生菌.将 14 株芽孢杆菌培养于初始 COD 浓度 1000 mg/L 畜禽猪粪废水中,24 h 后以猪粪废水做参比,测得 600 nm 处的浊度如表 2 所示,得到生长较为明显的有蜡样芽孢杆菌 *B. cereus* YS, 凝结芽孢杆菌 *B. coagulans* BS32, 蜡样芽孢杆菌 *B. cereus* SLK 和短小芽孢杆菌 *B. pumilus* BSK9, 但浊度值仅为 0.4~0.5,说明芽孢杆菌对猪粪废水中复杂有机物的同化能力有限.筛选这 4 株菌为后续实验对象,与 *C.reinhardtii* CC-125 构成藻菌共生系统,研究这 4 个系统对畜禽猪粪废水中 NH<sub>3</sub>-N, TN, TP, COD 的去除效率.

表 2 猪粪废水中芽孢杆菌的浊度

Tab.2 Turbidity of *Bacillus* piggery wastewater flora

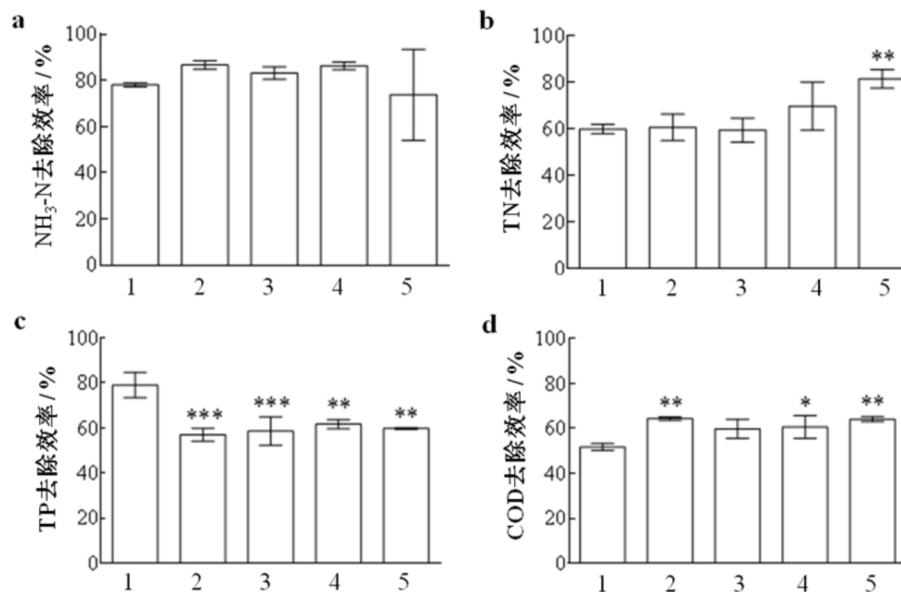
编号	菌种名称	OD <sub>600</sub> ( $\bar{x} \pm s$ )
1	<i>Bacillus cereus</i> YS	0.472±0.038
2	<i>Bacillus cereus</i> SLK	0.423±0.039
3	<i>Bacillus coagulans</i> BS33	0.112±0.001
4	<i>Bacillus pumilus</i> BSK9	0.434±0.012
5	<i>Bacillus subtilis</i>	0.053±0.002
6	<i>Bacillus licheniformis</i> BL20368	0.178±0.024
7	<i>Bacillus licheniformis</i> ZCS	0.070±0.009
8	<i>Bacillus coagulans</i> BS32	0.463±0.0045
9	<i>Bacillus subtilis</i> MA139	0.064±0.0035
10	<i>Bacillus subtilis</i> R-179	0.158±0.007
11	<i>Bacillus subtilis</i> BS20	0.056±0.0045
12	<i>Bacillus licheniformis</i> BS30	0.180±0.0275
13	<i>Bacillus subtilis</i> C-3102	0.055±0.0115
14	<i>Bacillus subtilis</i> BS24	0.037±0.004

### 2.2 藻菌共生系统对猪粪废水水质的去除效果

图 1 为 4 个藻菌共生系统在高浓度畜禽猪粪废水中各指标的去除效率,以纯藻系统作为对照.图 1a 显示 3 个藻菌共生系统对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效率的提升并不显著,而凝结芽孢杆菌 *B. coagulans* BS32 和 *C.reinhardtii* CC-125 共生系统对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效率比纯藻系统降低了 16.07%;图 1b 中 *B. coagulans* BS32 与 *C.reinhardtii* CC-125 共生系统对 TN 的去除效果显著( $P < 0.01$ ),比纯藻系统提高了 22.66%,而其他三组系统对 TN 的去除较差;图 1c 显示 4 个藻菌共生系统与纯藻系统相比,对 TP 的去除效果均降低约 20%;图 1d 中 4 株藻菌共生系统对 COD 的去除有促进,但未表现出显著的去效果.综上所述

述,藻菌共生系统对初始 COD 浓度 1000 mg/L 的畜禽猪粪废水中对各指标的去除效率并未表现出明显

的优势.



1) CC-125; 2) CC-125 with YS; 3) CC-125 with SLK; 4) CC-125 with BSK9; 5) CC-125 with BS32

与纯藻系统相比, \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$

图1 藻菌共生系统对猪粪废水水质的去除效率

Fig.1 Removal efficiency of piggery wastewater by microalgae and bacteria symbiosis systems

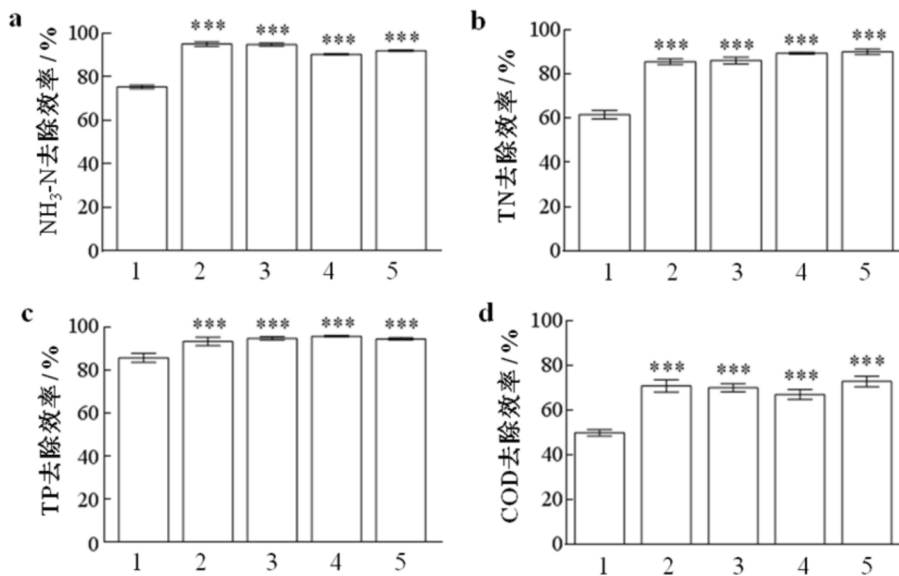
### 2.3 添加葡萄糖藻菌共生系统对猪粪废水的去除效果

与纯藻系统相比,芽孢杆菌与莱茵衣藻共生系统未表现出对畜禽猪粪废水净化的优势,是由于芽孢杆菌在猪粪废水中的生长受限.在猪粪废水中添加 0.5 g/L 葡萄糖促进芽孢杆菌在处理过程中的生长,以积累菌体并发挥芽孢杆菌分解复杂污染物的作用,结果见图 2.图 2a 中,添加 0.5 g/L 葡萄糖显著提高了 NH<sub>3</sub>-N 去除效率 ( $P < 0.001$ ),藻菌共生系统对 NH<sub>3</sub>-N 去除效率均有不同程度的提高,其中 *B. cereus* YS 和 *C. reinhardtii* 共生系统对 NH<sub>3</sub>-N 去除效果最显著,去除效率提高了 19.63%;图 2b 显示所有藻菌共生系统与纯藻系统相比,对 TN 的去除效率均有不同程度的提高,其中 *B. coagulans* BS32 和 *C. reinhardtii* 共生系统对 TN 的去除效率提高最为明显,提高了 28.4%;图 3c 显示各共生系统对 TP 的去除效果相较于纯莱茵衣藻均有提高,约为 10%;图 3c 为 COD 的去除效率,添加葡萄糖后藻菌共生系统显著提高 ( $P < 0.001$ ),其中 *B. coagulans* BS32 及 *B. cereus* YS 分别和 *C. reinhardtii* 组成的共生系统对 COD 的去除效率的提高均达到 20% 以上.综上添加 0.5 g/L 葡萄糖显著促进了废水污染的去除效果,其中 *B. coagulans* BS32 和 *C. reinhardtii* 共生系统各指

标的去除效率提高最为显著,添加少量葡萄糖有效促进了藻菌共生系统对畜禽猪粪废水的净化.

### 2.4 藻菌共生系统添加葡萄糖和丙氨酸处理猪粪废水

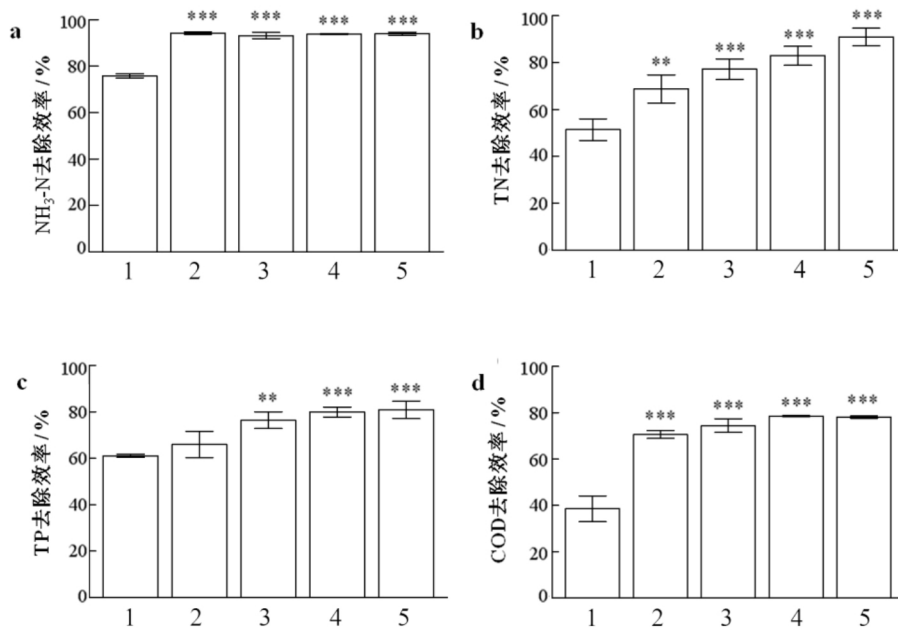
芽孢杆菌在营养不充足的情况下会形成芽孢进入休眠,而 L-丙氨酸具有促进芽孢的萌发<sup>[14]</sup>,实验同时添加少量丙氨酸和葡萄糖到猪粪废水中,藻菌共生系统对畜禽猪粪废水的处理效果结果见图 4.由图 4 可见:与相同条件下的纯藻系统相比,各共生系统较纯莱茵衣藻对 NH<sub>3</sub>-N 去除效率增长了约 18%;*B. coagulans* BS32 和 *C. reinhardtii* 共生系统对 TN 的去除效率较显著 ( $P < 0.001$ ),较纯莱茵衣藻去除效率显著提高了 39.5%;藻菌共生系统对 TP 去除效率也显著提高 ( $P < 0.001$ ),其中 *B. coagulans* BS32 和 *C. reinhardtii* 共生系统提高最显著,较纯莱茵衣藻提高了 19.84%;各共生系统对 COD 去除效率提高显著,均达到约 80%,但 4 个系统对 COD 的去除效率差异并不明显.综上,同时添加丙氨酸和葡萄糖较单独添加葡萄糖对废水污染的去除效率显著提高.其中 *B. coagulans* BS32 和 *C. reinhardtii* 共生系统各指标的去除效率提高最为显著,说明微量丙氨酸和葡萄糖可显著促进废水中污染物的去除效率.



1) CC-125; 2) CC-125 with YS; 3) CC-125 with SLK; 4) CC-125 with BSK9; 5) CC-125 with BS32  
与纯藻系统相比, \*\*\* $P < 0.01$

图 2 添加葡萄糖藻菌共生系统对猪粪废水水质的去除效率

Fig.2 Removal efficiency of piggy wastewater by microalgae and bacteria symbiosis systems added with glucose



1) CC-125; 2) CC-125 with YS; 3) CC-125 with SLK; 4) CC-125 with BSK9; 5) CC-125 with BS32  
与纯藻系统相比, \*\* $P < 0.01$ , \*\*\* $P < 0.001$

图 3 4 株藻菌共生系统与纯莱茵衣藻对添加葡萄糖和丙氨酸的猪粪废水的去除效率

Fig.3 Removal efficiency of piggy wastewater containing glucose and alanine by four strains of microalgae and bacteria symbiosis system with *C.reinhardtii*

### 3 结语

本文筛选出 4 株能够在猪粪废水中生长的芽孢杆菌 (*Bacillus cereus* YS, *Bacillus cereus* SLK,

*Bacillus pumilus* BSK9, *Bacillus coagulans* BS32) ,并分别与 *C.reinhardtii* CC-125 构成藻菌共生系统对猪粪废水进行处理. 在原始猪粪废水中 4 个藻菌共生系统对  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN, TP, COD 的去除效率未表现出优势; 添加 0.5 g/L 葡萄糖后, 藻菌共生系统的净化效果均优于纯藻系统, *B. coagulans* BS32 和 *C.*

*reinhardtii* CC-125 共生系统的去除效率提高最为显著,对  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN, TP, COD 的去除效率较纯藻系统相比分别提升了 16.58%, 28.38%, 8.90%, 23.04%。猪粪废水中同时添加 0.5 g/L 葡萄糖和 100  $\mu\text{mol/L}$  丙氨酸后,4 个藻菌共生系统对污染物质的去除效率进一步提高,其中 *B.coagulans* BS32 和 *C.reinhardtii* CC-125 共生系统的去除效果提升较显著,对  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN, TP, COD 的去除效率较纯藻系统分别提升了 18.16%, 39.51%, 19.84% 和 39.56%, 故添加葡萄糖和丙氨酸可以有效促进藻菌发挥协同作用,提高对猪粪废水的处理效率,有助于藻菌共生系统对畜禽猪粪废水的净化。

#### 参 考 文 献

- [1] 朱红艳,张雅萍. 畜禽养殖业环境污染与治理[J]. 中国畜禽种业, 2016, 12(11): 50-50.
- [2] MAEDA Y, YOSHINO T, MATSUNAGA T, et al. Marine microalgae for production of biofuels and chemicals [J]. Curr Opin Biotech, 2018, 50: 111-120.
- [3] KANG Z, KIM B H, RAMANAN R, et al. A cost analysis of microalgal biomass and biodiesel production in open raceways treating municipal wastewater and under optimum light wavelength [J]. J Microbiol Biotechnol, 2015, 1(25): 109-118.
- [4] GONÇALVES A L, PIRES J C M, SIMÕES M. Wastewater polishing by consortia of *Chlorella vulgaris* and activated sludge native bacteria [J]. J Clean Prod, 2016, 133: 348-357.
- [5] BASHAN Y, DE-BASHAN L E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth a critical assessment-Chapter Two [J]. Adv Agron, 2010, 108(10): 77-136.
- [6] JI X, JIANG M, ZHANG J, et al. The interactions of algae-bacteria symbiotic system and its effects on nutrients removal from synthetic wastewater [J]. Bioresour Technol, 2018, 247: 44-50.
- [7] LIANG Z, LIU Y, GE F, et al. A pH-dependent enhancement effect of co-cultured *Bacillus licheniformis* on nutrient removal by *Chlorella vulgaris* [J]. Ecol Eng, 2015, 75: 258-263.
- [8] LIANG Z, LIU Y, GE F, et al. Efficiency assessment and pH effect in removing nitrogen and phosphorus by algae-bacteria combined system of *Chlorella vulgaris* and *Bacillus licheniformis* [J]. Chemosphere, 2013, 92(10): 1838-1889.
- [9] YAO S, NI J, MA T, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low temperature by a newly isolated bacterium, *Acinetobacter* sp. HA2 [J]. Bioresource Technol, 2013, 139: 80-86.
- [10] LU M, ZHANG Z Z, WU X J, et al. Biodegradation of decabromodiphenyl ether (BDE-209) by a metal resistant strain, *Bacillus cereus* JP12 [J]. Bioresour Technol, 2013, 139(13): 80-86.
- [11] 王海英,牟晓庆. 城市废水培养富油蛋白小球藻的研究[J].中南民族大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 38-41.
- [12] QI F, XU Y, YU Y, et al. Enhancing growth of *Chlamydomonas reinhardtii* and nutrient removal in diluted primary piggery wastewater by elevated  $\text{CO}_2$  supply [J]. Water Sci Technol, 2017, 75(10): 2281-2290.
- [13] GOUNINA-ALLOUANE R, BROUSSOLLE V, CARLIN F. Influence of the sporulation temperature on the impact of the nutrients inosine and L-alanine on *Bacillus cereus* spore germination [J]. Food Microbiol, 2008, 25(1): 202-206.

(责任编辑 刘钊)