

doi: 10.11920/xnmdzk.2021.02.007

# 小球藻—芽孢杆菌共生体系处理污水的研究

王华光<sup>1</sup>, 赵玥<sup>2,3</sup>, 谭炯<sup>2,3</sup>, 王文静<sup>4</sup>, 景连东<sup>2,3</sup>

(1. 山东德利环保工程有限公司, 山东 烟台 264000; 2. 西南民族大学化学与环境学院, 四川 成都 610041;  
3. 西南民族大学化学基础民委重点实验室, 四川 成都 610041; 4. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

**摘要:** 为提高微藻处理污水的效率, 将具有污水处理能力的小球藻, 与从垃圾渗滤液中分离的两株芽孢杆菌 SL1 和 SL2, 分别构建小球藻—芽孢杆菌的藻菌共生体系: 小球藻—芽孢杆菌 SL1 和小球藻—芽孢杆菌 SL2, 并将其应用于垃圾渗滤液配制污水的处理。结果显示, 小球藻能够适应于所配制的高营养盐污水; 芽孢杆菌 SL2 可以促进小球藻生长; 无菌的小球藻对 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 和 COD<sub>Cr</sub> 的去除效率分别为 45.7%、45.0%、37.9% 和 76.7%; 而小球藻—芽孢杆菌 SL1 对 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的去除效率分别为 92.0%、92.0% 和 81.3%; 小球藻—芽孢杆菌 SL2 对 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 和 COD<sub>Cr</sub> 的去除效率为 76.0%、72.0%、85.3% 和 94.3%。结果暗示, 小球藻—芽孢杆菌共生体系比单纯微藻能更好去除垃圾渗滤液所配制的污水中氮、磷和 COD<sub>Cr</sub>, 芽孢杆菌 SL2 可以促进小球藻的生长, 在污水处理行业具有一定的应用潜力。

**关键词:** 小球藻; 芽孢杆菌; 藻菌共生系统; 化学需氧量

中图分类号: X172; X703

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2021)02-0154-07

## Study on wastewater treatment by *Chlorella* – *Bacillus* symbiosis system

WANG Hua – guang<sup>1</sup>, ZHAO Yue<sup>2,3</sup>, TAN Jiong<sup>2,3</sup>, WANG Wen – jing<sup>4</sup>, JING Lian – dong<sup>2,3</sup>

(1. Yantai Deli Environmental Protection Company, Yantai 264000, China; 2. School of Chemistry and Environment, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 3. Key Laboratory of Basic Chemistry of the State Ethnic Commission, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 4. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

**Abstract:** Low efficiency of microalgae wastewater treatment limits its application and development. In this study, a green alga *Chlorella* sp. and two strains of *Bacillus* sp. SL1 and *Bacillus* sp. SL2 isolated from landfill leachate were set up to two symbiotic systems: *Chlorella* – *Bacillus* SL1 and *Chlorella* – *Bacillus* SL2. The two symbiotic systems were used to purify wastewater made from landfill leachate. The results showed that *Chlorella* could adapt to the wastewater with high nutrient, that *Bacillus* SL2 could promote the growth of *Chlorella*, that total nitrogen (TN), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand (COD<sub>Cr</sub>) were removed with 45.7%, 45.0%, 37.9% and 76.7% by *Chlorella* respectively, that the removal efficiency of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP was 92.0%, 92.0% and 81.3% by *Chlorella* – *Bacillus* SL1, respectively, and that the removal efficiency of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP and COD<sub>Cr</sub> by *Chlorella* – *Bacillus* SL2 was 76%, 72%, 85.3% and 93.7%, respectively. The present results indicates that *Chlorella* – *Bacillus* symbiotic systems have good removal efficiencies of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP and COD<sub>Cr</sub>, and *Chlorella* – *Bacillus* SL2 symbiotic system have potential application in the wastewater treatment.

**Keywords:** *Chlorella*; *Bacillus*; algal – bacterial symbiotic system; chemical oxygen demand

收稿日期: 2021-01-13

作者简介: 王华光(1986-) 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 污水处理技术及应用. E-mail: 516147089@qq.com

通信作者: 景连东, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师. E-mail: schjld@swun.cn

基金项目: 自然科学基金青年基金资助(51609205); 西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2020NYB07)

微藻可以吸收污水中的营养物质,促进氮磷等元素循环,提高水体的pH和溶解氧<sup>[1-2]</sup>,降低营养盐的同时,微藻还可产出有价值的生物燃料的原料。因此有许多研究关注微藻在生活污水处理中的应用,其中小球藻是微藻的重要代表。微藻处理生活污水具有环境友好、成本低廉等优势,但是该技术面临处理效率低的问题<sup>[3]</sup>。

微藻细胞之间的微环境中常存在不易彻底分离或不易去除的细菌,它们与微藻之间存在着密切的物质和能量传递<sup>[4]</sup>。这些与藻类共生的细菌为微藻的生长提供了CO<sub>2</sub>和无机盐及其他微量元素;微藻则提供了有机营养物质促进菌的生长<sup>[5-6]</sup>。部分研究表明,藻-菌共生体系的构建可进一步实现污水营养物质的去除,微藻生物量的积累,废水净化及资源化利用效果明显<sup>[7-8]</sup>。

垃圾渗滤液具有水质复杂危害性大,氮(尤其是氨氮)、磷营养盐、有机物含量浓度超高等特点,是污水处理行业中的一个难点。为提高该类污水的处理效率,本研究构建了两组小球藻-芽孢杆菌共生体系,分析其在光培养反应器中生长情况及对污水内氮磷去除的影响。研究结果将为藻菌共生系统应用到规模化处理污水耦合小球藻生产提供理论数据和技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 细菌的分离鉴定

取某垃圾填埋场垃圾渗滤液,将渗滤液稀释后,在lysogeny broth平板培养基涂平板,16 h后分离菌株SL1和菌株SL2。对菌株SL1和SL2纯化培养后利用细菌DNA提取试剂盒(型号:DP302,品牌:TIANGEN, China)提取菌株SL1和SL2的总基因组。琼脂糖凝胶电泳对DNA进行检测后,切胶利用琼脂糖凝胶DNA回收试剂盒(增强型)(型号:DP219,品牌:TIANGEN, China)对提取的细菌基因组进行纯化。纯化后的DNA送至上海美吉生物医药科技有限公司对16S DNA引物(27F:5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3';1492R:

5'-GGTACCTTGTTACGACTT-3')进行双向测序。获得的序列在NCBI数据库进行BLAST比对,获取序列相似度较高菌株,随后将NCBI获得的序列相似度较高的菌株同SL1和SL2的序列在MEGA软件中进行序列比对。

### 1.2 微藻的培养

小球藻取自烟台市某城市污水处理厂活性污泥,经过富集后分离,培养液为f/2培养液,主要组分包括:NaNO<sub>3</sub> 75 mg L<sup>-1</sup>, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 5 mg L<sup>-1</sup>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O 20 mg L<sup>-1</sup>, Na<sub>2</sub>EDTA 4.36 mg L<sup>-1</sup>, FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 3.16 mg L<sup>-1</sup>, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 0.01 mg L<sup>-1</sup>, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.023 mg L<sup>-1</sup>, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.012 mg L<sup>-1</sup>, MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.18 mg L<sup>-1</sup>, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 0.07 mg L<sup>-1</sup>, 维生素B<sub>1</sub> 0.1 g L<sup>-1</sup>, 维生素B<sub>12</sub> 0.5 g L<sup>-1</sup>, 生物素 0.5 g L<sup>-1</sup>, 采用Whatman GF/C滤膜过滤后的1L海水作为溶剂配置小球藻培养液。维生素溶液通过0.22 μm滤膜进行过滤除菌。培养条件:25℃,光照:5 000 lux,光周期12 h:12 h。

### 1.3 小球藻-细菌共生体系的建立

污水培养液的配制:为避免其他颗粒物以及杂菌对本研究的干扰,取某垃圾填埋场渗滤液,经沉淀、滤纸过滤固体颗粒物后,120℃,20 min高温灭菌,备用10 L滤液做污水培养液,盐度为15‰。该污水具有垃圾渗滤液污染物浓度超高的特征,具体水质参数参见结果与讨论中各实验组初始浓度(第0天)。

藻细胞的收集:在无菌室内离心收集对数期小球藻,离心力5 000 g,时间15 min,温度4℃。

细菌的收集:利用无菌LB平板培养基(胰蛋白胨10 g,酵母提取物5 g,NaCl 10 g,琼脂20 g,去离子水950 mL)对细菌进行划线培养,30℃,培养12 h。挑取单菌落加入100 mL LB液体培养基内(胰蛋白胨10 g,酵母提取物5 g,NaCl 10 g,去离子水980 mL)培养30℃,24 h后,5 000 g,15 min,4℃条件下分别离心收集芽孢杆菌细胞。

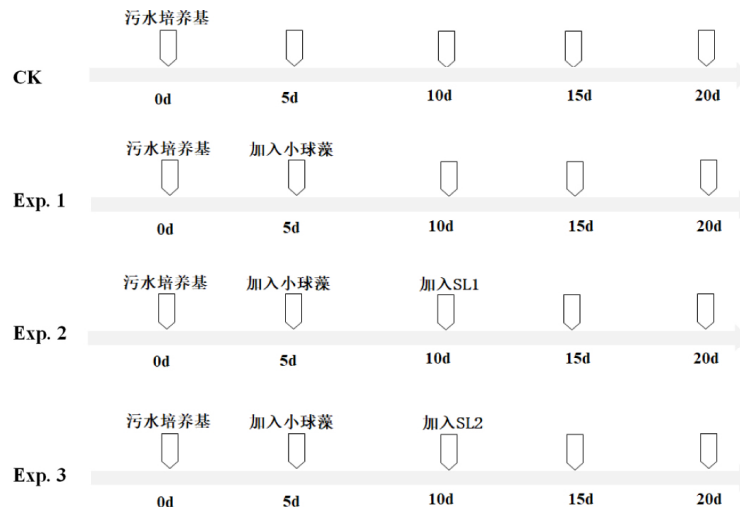


图 1 实验设计

Fig. 1 Experiment design

实验设置(图 1): 实验室以 1L 玻璃烧杯作为培养装置, 未加藻菌的污水培养液为对照组(CK), 分别设置三组实验组 Exp. 1, Exp. 2 和 Exp. 3. Exp. 1 加入小球藻(浓度:  $1 \times 10^6$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ); Exp. 2 加入小球藻(浓度:  $1 \times 10^6$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ) 和细菌 SL1(浓度:  $1 \times 10^7$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ); Exp. 3 加入小球藻(浓度:  $1 \times 10^6$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ) 和细菌 SL1(浓度:  $1 \times 10^7$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ). 对照组及实验室分别设置三个生物学重复. 每隔 5 天取样, 去除藻、菌细胞后, 测定无藻培养液的总氮(TN), 氨态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ), 总磷(TP) 和化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ) 浓度.

#### 1.4 测定指标及方法

##### 1.4.1 微藻计数方法

藻细胞计数采用视野法, 计数前充分搅匀藻细胞培养液, 取 0.1 mL 样品注入浮游植物计数框内, 在 400 倍的 Olympus BX23 型光学显微镜下计数 100 个视野, 每个样本重复计数 3 次.

##### 1.4.2 细菌计数方法

细菌计数采用 4',6'-二脒基-2-苯基吲哚染色法. 取 1 mL 搅拌均匀后的藻细胞培养液至离心管, 加入 2mL 4',6'-二脒基-2-苯基吲哚染色法染料后, 遮光染色 10 min. 将染好的藻液过滤至黑色

0.2 Millipore(GTBP02500, Millipore) 上. 滤干后, 将滤膜取出, 展平至载玻片上, 调节荧光聚焦显微镜(FluoroView FV1000, Japan) 中与 4',6'-二脒基-2-苯基吲哚对应的荧光光源后, 即可在 100 倍油镜下观计数察 400 个细胞.

##### 1.4.3 水化学参数测定

TN,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , TP 和  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的测定参考《水和废水监测分析方法(第四版)》<sup>[9]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 芽孢杆菌的鉴定

将获得的 SL1 和 SL2 序列上传至 NCBI, 与现有细菌序列进行 Blast 比对. NCBI 数据库下载相近序列, 利用 Mega 7.0 进行比对, 结果如图 2 所示, SL1 和 SL2 均隶属于 Firmicutes 门; Bacilli 纲; Bacillales 目; Bacillaceae 科; Bacillus 属. 其中 SL1 与 *Bacillus aryabhatai* (HQ242766.1) 和 *Bacillus megaterium* (KU179342.1) 潜在相似度均很高, 相似度 99.86%, SL2 与 *Bacillus subterraneus* (MT125847.1) 的相似度最高, 相似度 99.68%.

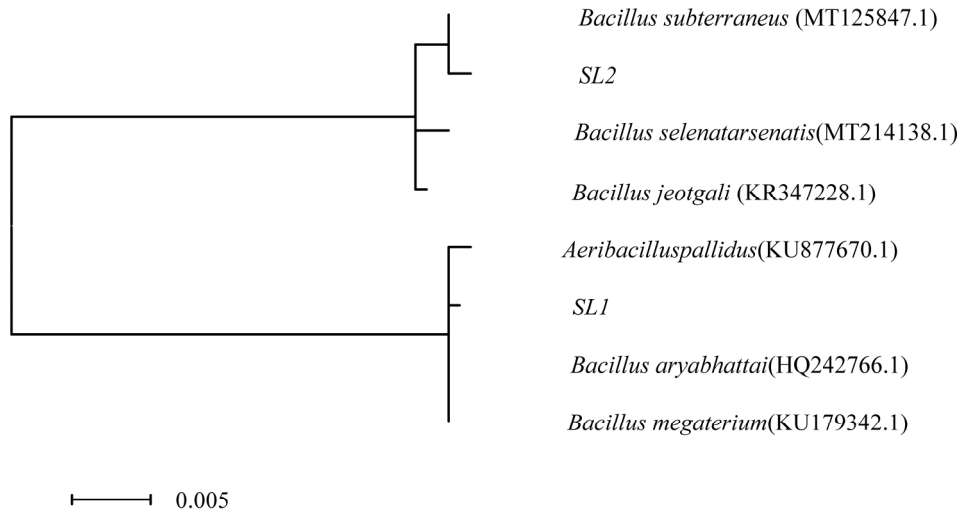


图 2 最大似然法分析系统发育

Fig. 2 Molecular phylogenetic analysis by Maximum Likelihood method

2.2 处理体系中小球藻的生物量

小球藻在不同处理组细胞密度均有所增加(图 3)。小球藻在实验室开始后第 5 天加入至培养液中, 初始细胞密度为  $1 \times 10^6$  cells  $\text{mL}^{-1}$  的小球藻随着培养时间的延长, 小球藻密度增加; 第 10 天在 Exp. 2 和 Exp. 3 中加入芽孢杆菌 SL1 和 SL2 后, 小球藻的生长发生明显差异。小球藻密度在 Exp. 1 中保持着对数期的持续增长; 小球藻与 SL1 共存的 Exp. 2 中, 小球藻的细胞密度相对于 Exp. 1, 细胞密度下降。加入 SL3 的 Exp. 3 中, 小球藻的细胞密度相对于 Exp. 1, 细胞密度上升。上述结果说明小球藻能够在实验所用的含

有超高营养盐和有机质的垃圾渗滤液中生长; 小球藻与芽孢杆菌相互作用较为复杂, 与纯小球藻处理组相比, 芽孢杆菌 SL1 对于小球藻的生长具有抑制作用, 芽孢杆菌 SL2 对于小球藻的生长具有促进作用。

小球藻是一种细胞结构简单, 生长繁殖快的微生物, 细胞内的蛋白质、脂肪和碳水化合物含量都很高, 又有多种维生素, 可食用和作为养殖鱼类饵料<sup>[10-11]</sup>。利用污水内的营养物质培养微藻, 同时小球藻对水中 C、N、P 等物质的同化作用<sup>[12-13]</sup>, 实现了高营养污水的净化。利用污水对小球藻进行大规模培养, 对于实现资源再利用具有重要意义。

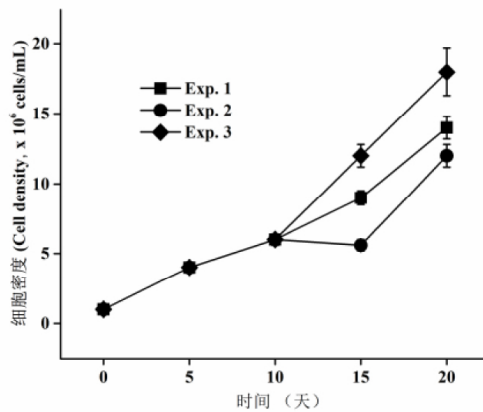


图 3 小球藻密度的变化

Fig. 3 Cell density of Chlorella in the cultures

### 2.3 处理体系脱氮效果

TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在不同的处理组中发生了显著的变化(图4). 各实验组中, TN 初始浓度(第0天)为 2.34 g/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  初始浓度为 300 mg/L. 处理 20 天后, 对照组中 TN 下降至 2.24 g/L, 去除率仅 4%; 在 Exp. 1 中, TN 下降至 1.24 g/L, 去除率为 45.7%; 在 Exp. 2 中, TN 下降至 0.18 g/L, 去除率为 92%; 在 Exp. 3 中 TN 下降至 0.56 g/L, 降解率为 76%. 处理 20 天后, 对照组中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  下降到了 280 mg/L, 去除率仅 6%; 在 Exp. 1 中下降至 165 mg/L, 去除率为 45%; 在 Exp. 2 中下降至 24 mg/L, 去除率为 92%; 在 Exp. 3 中下降

至 84 mg/L, 去除率为 72%.

郑逸等<sup>[14]</sup>研究发现小球藻在高盐条件下对 TN 的去除率仅为 29%. 本研究也再次显示, 单纯的小球藻处理体系对氮的去除率不高. 而小球藻和芽孢杆菌共生可提高对 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率. 本研究显示与单纯小球藻体系相比, 小球藻和芽孢杆菌 SL1、SL2 的共生体系均提高了对 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率. 而且小球藻 - SL1 共生体系更优于小球藻 - SL2 体系. Ji 等的研究也表明, 小球藻(*C. vulgaris*) 和地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*) 共生体系对 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除可分别达到 88.82%、84.98%<sup>[15]</sup>.

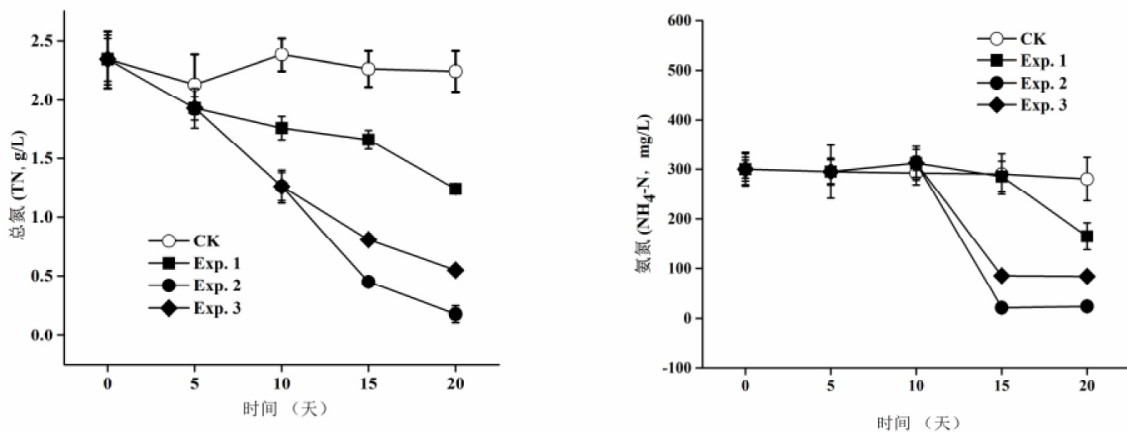


图4 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在不同处理组中的浓度变化

Fig. 4 TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentration in each treatment

### 2.4 处理体系除磷效果

与生源要素氮属于开放式循环不同, 磷的循环属于封闭式循环. 需要在污水处理系统的后端通过沉淀、絮凝、过膜等手段将藻菌共生体及其碎片与水分离, 进而达到去除磷的目的. 因此本研究中所测定的 TP 也仅指的是将处理体系中藻菌去除后液体中溶解的总磷. 随着培养时间的延长, 不同处理组中 TP 均出现了明显下降(图5). 对照组经过 20 天的处理, TP 从初始浓度(第0天) 116 mg/L 下降到 98 mg/L, 去除率

为 15.6%; Exp. 1 处理组下降至 72 mg/L, 去除率为 37.9%; Exp. 2 处理组下降至 22 mg/L, 去除率为 81.3%; Exp. 3 处理组下降至 17 mg/L, 去除率为 85.3%. 已有研究明, 小球藻与芽孢杆菌共生体系可以有效地吸收活性磷<sup>[15]</sup>. 本研究中发现, 即使小球藻在 Exp. 1 组中的生物量高于 Exp. 2 组, 该组对溶解态 TP 的去除率却并不理想. 这说明, 藻菌共生体系对磷的去除效率远高于藻单独存在时.

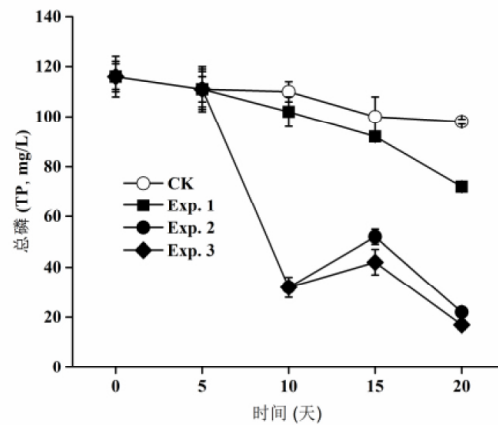


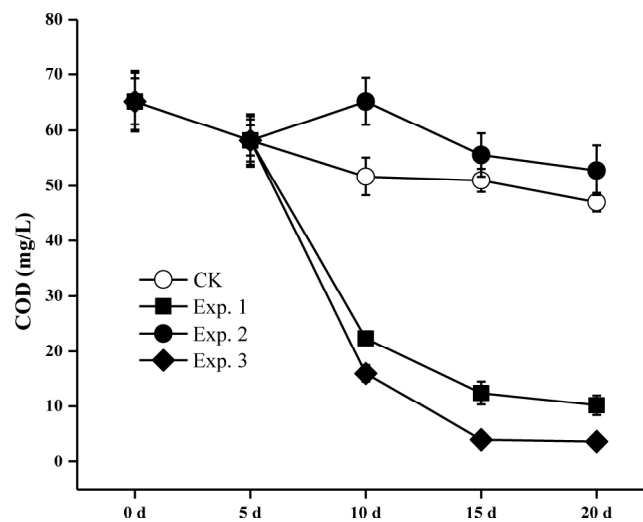
图 5 TP 在不同处理组中的浓度变化

Fig. 5 TP concentration in each treatment

## 2.5 处理体系降解化学需氧量效果

随着处理时间的推进,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  在对照组中从初始浓度 65.2 g/L (第 0 天) 下降到 51 g/L (第 20 天), 降解率为 21.8% (图 6)。但是, 在 Exp. 1 中下降至 10.2 g/L, 去除效率为 76.7%; 在 Exp. 3 中下降至 3.7 g/L, 降解效率为 94.3%。与结果预期不相符合的是, Exp. 2 组 COD 去除不明显, 可能是由藻类凋亡释放部分溶解性有机质进入水中导致(图 3)。与本实验结果类似, Gupta 等分离的细菌 *Bacillus* sp. ISTVK 对污水

$\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除率可达到 92% 的<sup>[16]</sup>; Church 等的研究表明藻菌共生体系可显著提高去除污水中的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的效率<sup>[17]</sup>; Ji 等的研究中 *C. vulgaris* 和 *Bacillus licheniformis* 共生体系对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除率可达到 82.25%<sup>[15]</sup>。结合本实验研究结果, 小球藻、小球藻和芽孢杆菌的共生体系对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  均具有较好的降解效果。

图 6  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  在不同处理组中的浓度变化Fig. 6  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  concentration in each treatment

### 3 结论

本研究提供了一套从垃圾渗滤液中分离芽孢杆菌到构建藻-菌共生系统,进而处理垃圾渗滤液污水的技术思路.得到如下结论:

(1) 小球藻能够在垃圾渗滤液所制得的污水中生长;

(2) 本研究获得的两株芽孢杆菌均提升了藻-菌共生体系对于 TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TP 的去除率;

(3) 分离获得的 SL2 菌株还可以促进小球藻的生长,促进污水中 COD<sub>Cr</sub> 的降解,在污水处理行业具有一定的应用潜力.

#### 参考文献

- [1] CAMPOS J L, VALENZUELA - HEREDIA D, PEDROUSO A, et al. Greenhouse gases emissions from wastewater treatment plants: minimization, treatment and prevention [J]. *Journal of Chemistry*, 2016, 1: 1 - 12.
- [2] MOLAZADEH M, AHMADZADEH H, POURIANFAR H R, et al. The use of microalgae for coupling wastewater treatment with CO<sub>2</sub> biofixation [J]. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2019, 7: 42.
- [3] LENG L, WEI L, XIONG Q, et al. Use of microalgae based technology for the removal of antibiotics from wastewater: A review [J]. *Chemosphere*, 2020, 238: 1 - 14.
- [4] RAMANAN R, KIM B H, CHO D H, et al. Algae - bacteria interactions: Evolution, ecology and emerging applications [J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34: 14 - 29.
- [5] HIGGINSBT, GENNITY I, FITZGERALD P S, et al. Algal - bacterial synergy in treatment of winery wastewater [J]. *Npj Clean Water*, 2018, 1: 6.
- [6] YAO S, LYU S, AN Y, et al. Microalgae - bacteria symbiosis in microalgal growth and biofuel production: a review [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2019, 126: 359 - 368.
- [7] PERERA I A, ABINANDAN S, SUBASHCHANDRABOSE S R, et al. Advances in the technologies for studying consortia of bacteria and cyanobacteria/microalgae in wastewaters [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2019, 39: 709 - 731.
- [8] 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]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(3): 366 - 371.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2009: 211 - 212.
- [10] ASHOKKUMAR V, CHEN W H, KAMYAB H, et al. Cultivation of microalgae *Chlorella* sp. in municipal sewage for biofuel production and utilization of biochar derived from residue for the conversion of hematite iron ore (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) to iron (Fe) - Integrated algal biorefinery [J]. *Energy*, 2019, 189: 116 - 128.
- [11] MA X, ZHENG H, ADDY M, et al. Cultivation of *Chlorella vulgaris* in wastewater with waste glycerol: Strategies for improving nutrients removal and enhancing lipid production [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 207: 252 - 261.
- [12] KIM H C, CHOI W J, CHAE A N, et al. Evaluating integrated strategies for robust treatment of high saline piggery wastewater [J]. *Water Research*, 2016, 89: 222 - 231.
- [13] LUO L, HE H, YANG C, et al. Nutrient removal and lipid production by *Coelastraea* sp. in anaerobically and aerobically treated swine wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 135 - 141.
- [14] 郑逸, 刘宪斌, 褚强. 盐度对小球藻生长胁迫及氮磷利用影响 [J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(11): 31 - 39.
- [15] JI X, LI H, ZHANG J, et al. The collaborative effect of *Chlorella vulgaris* - *Bacillus licheniformis* consortia on the treatment of municipal water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365: 483 - 493.
- [16] GUPTA A AND THAKUR I S. Study of optimization of wastewater contaminant removal along with extracellular polymeric substances (EPS) production by a thermotolerant *Bacillus* sp. ISTVK1 isolated from heat shocked sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 213: 21 - 30.
- [17] CHURCH J, RYU H, SADMANI AHMA, et al. Multiscale investigation of a symbiotic microalgal - integrated fixed film activated sludge (MAIFAS) process for nutrient removal and photo - oxygenation [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 128 - 138.

(责任编辑: 李建忠, 付强, 张阳, 和力新, 罗敏; 英文编辑: 周序林, 郑玉才)