

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.24.002

# 藻菌共生系统处理污水的机制及其研究进展

张夏<sup>1,2</sup>, 胡惠秩<sup>1,3</sup>, 汪锐<sup>1</sup>, 陈乐言<sup>1</sup>, 万仁辉<sup>1</sup>

(1. 湖北大学 资源环境学院, 湖北 武汉 430062; 2. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510000; 3. 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062)

**摘要:** 藻菌共生系统是一种藻菌间的聚集形式,藻类光合作用为细菌提供O<sub>2</sub>,使得曝气需求降低,节省能源消耗,并具有回收资源的巨大潜力,因此在污水处理领域受到广泛关注。对藻菌间的相互作用机制及影响因素进行系统了解,有利于提高系统中污染物的转化及维持稳定运行。综合介绍了影响藻菌共生系统的典型因素,并从细菌群体感应的角度分析了藻菌的相互作用机制;同时,详细论述了藻菌的结合方式,着重讨论了藻菌共生系统在污水处理中的应用现状。此外,对藻菌共生系统应用于实际废水处理过程中存在的问题进行了分析,以期在复杂环境中建立高效、稳定的藻菌共生系统提供参考。

**关键词:** 藻菌共生系统; 藻菌颗粒污泥; 藻菌生物膜; 群体感应; 生物燃料电池

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0011-08

## Application and Development of Algal-Bacterial Symbiotic System in Wastewater Treatment

ZHANG Xia<sup>1,2</sup>, HU Hui-zhi<sup>1,3</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, CHEN Le-yan<sup>1</sup>, WAN Ren-hui<sup>1</sup>

(1. Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China;  
2. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510000, China; 3. Hubei Key Laboratory of  
Regional Development and Environmental Response, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Algal-bacterial symbiotic system is an aggregation form of algae and bacteria. Algae photosynthesis provides oxygen for bacteria, reduces aeration demand, saves energy consumption, and has great potential for resource recovery, which has attracted extensive attention in the field of wastewater treatment. Understanding the interaction mechanism and influencing factors between algae and bacteria is beneficial to improve the transformation of pollutants in the system and maintain stable operation of the system. The typical factors affecting the algal-bacterial symbiotic system are described comprehensively, and the interaction mechanism of algae and bacteria is analyzed from the perspective of bacterial quorum sensing. The combination mode of algae and bacteria is discussed in detail, and the application status of algal-bacterial symbiotic system in wastewater treatment is emphatically discussed. At the same time, the problems existing in the application of algal-bacterial symbiotic system to wastewater treatment were summarized, in order to provide theoretical guidance for the establishment of efficient and stable algal-bacterial symbiotic system in complex environmental system.

基金项目: 湖北省自然科学基金资助面上项目(2022CFB500)

通信作者: 胡惠秩 E-mail: huhuizhi@126.com

**Key words:** algal-bacterial symbiotic system; algal-bacterial granular sludge; algal-bacterial biofilm; quorum sensing; biofuel cell

为了降低温室气体的排放量,污水处理技术开始向低碳和碳回用技术方向发展。藻菌共生工艺是指含有叶绿体或叶绿素的藻类在光照下进行光合作用,吸收 $\text{CO}_2$ 并释放 $\text{O}_2$ ,同时去除水中的营养物质,而活性污泥含有的丰富细菌、真菌和原生生物利用藻类释放的 $\text{O}_2$ 降解有机物,从而实现对污水的处理。作为一种新型的水处理技术,该工艺不但解决了单独培养微藻产生的絮体较小、沉降性较差的问题,还通过生物汇碳、原位产氧等方式抵消 $\text{CO}_2$ 的排放,提高溶解氧的利用率,有望实现碳“零”排放。

目前,藻菌共生工艺受到越来越多的关注,但还存在一些需要解决的问题。例如,如何维持系统中藻类和细菌数量的合理比例,以实现协同生长;在脱离实验室理想条件下,系统是否可以长期稳定运行;出水中携带的藻细胞对水环境会造成影响等。因此,为了实现藻菌共生系统高效稳定的运行,有必要深入了解污水处理过程中藻类和细菌之间相互作用的机理。

## 1 藻菌共生系统原理及其影响因素

### 1.1 藻菌共生系统原理

藻类和细菌在自然环境下存在着互利共生、共栖和寄生关系<sup>[1-2]</sup>。藻-菌间的共生关系是藻类和细菌对彼此产物的利用,主要体现在 $\text{CO}_2$ 和 $\text{O}_2$ 在藻-菌间的循环流动。藻菌共生系统原理如图1所示。

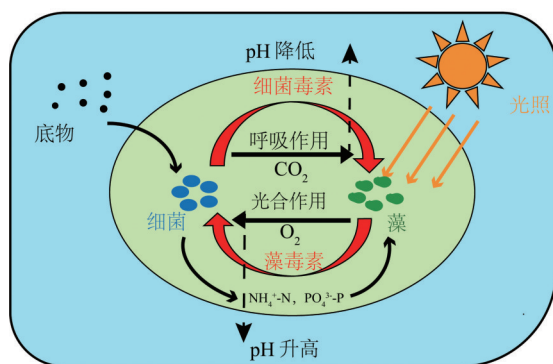


图1 藻菌共生系统原理

Fig.1 Principle of algal-bacterial symbiotic system

藻菌共生系统中微藻对细菌的促进作用主要体现在以下几个方面:①光合作用碳固定产生的碳

水化合物、脂质,以及微藻细胞分解产生的有机碳、氮磷营养物质均会促进细菌生长;②光合作用产生的 $\text{O}_2$ 可促进细菌分解有机物;③微藻可少量吸收水体中的重金属、抗生素等,减小对细菌的毒害作用;④微藻群是细菌的次生栖息地,细菌可附着在藻细胞外鞘表面生长而形成生物膜,在一定程度上保护细菌使其免受有害环境因素的影响。

细菌生长代谢对微藻的促进作用体现在:①细菌代谢分泌酶、糖肽类物质,利于蛋白质、多糖等大分子物质水解,加快系统内营养物质的循环,促进微藻生长;②细菌分解死亡的微藻细胞,产生的氮、磷等营养物可被微藻利用;③细菌代谢产生的生长素、B族维生素为微藻提供营养物质。藻类和细菌间的物质循环与能量流动加强了对污染物的吸附和降解作用,提高了污水处理的效率。

目前,对藻菌共生系统原理的阐述主要集中在宏观的物质交换层面,对于微观状态下共生系统对藻、菌的影响还不明确,如藻菌间结合的界面作用力及结合条件、微藻与细菌间代谢碳/氮/磷的通路、藻菌间相互作用的调控因子等。

### 1.2 藻菌共生系统的影响因素

#### 1.2.1 化学因素

污水中存在着铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )和亚硝态氮( $\text{NO}_2^--\text{N}$ )等多种形式的氮,而藻类会优先吸收 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 进行新陈代谢,当水体中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 被消耗完时, $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 会在硝酸盐还原酶和亚硝酸盐还原酶的作用下被还原为 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,继续被藻类利用<sup>[3]</sup>。

$\text{CO}_2$ 是藻类光合作用的必需物质,会改变系统的pH从而影响藻菌的生长:当输入 $\text{CO}_2$ 时,系统pH降低,过低的pH会阻碍藻类生物量的增长,影响污染物的去除<sup>[4]</sup>;随着光合作用的进行, $\text{CO}_2$ 被消耗并释放出 $\text{O}_2$ ,pH升高, $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 在碱性条件下(pH为9~11)易生成沉淀,但过高的pH会导致系统内细菌含量下降,影响脱氮效果。此外, $\text{CO}_2$ 还可以促进藻菌颗粒分泌胞外多糖(PS),使其结构更加紧密,有利于藻菌颗粒污泥的稳定和长期运行<sup>[5]</sup>。胞外蛋白(PN)是藻类和细菌在造粒过程中增加的主要胞外

聚合物(EPS),但添加  $\text{CO}_2$  对分泌 PN 并无显著影响<sup>[6]</sup>,并且经过  $\text{CO}_2$  强化的藻菌颗粒污泥对 COD 和磷的去除率明显升高,对 COD 的去除率从 81.2% 提高至 91.7%,对磷的去除率从 50.1% 提高至 72.3%<sup>[5]</sup>。当 EPS 分泌量增加时,PN 和 PS 含量也逐步增加。PN、PS 含量的改变,对真核生物的影响不显著,如其主要属小球藻的丰度可达 99%,而原核生物中  $\alpha$ -变形菌纲的相对丰度增加,此类细菌多为异养细菌,可以氧化有机物产生  $\text{CO}_2$ ,供给微藻使用。综上,PN、PS 对藻菌颗粒的最终形成及维持菌群结构稳定具有重要作用<sup>[7]</sup>。

### 1.2.2 物理因素

大多数藻类为自养生物,光照是其生长和繁殖的必要条件。光照周期和光照强度是重要的影响参数:光照周期影响藻细胞的分裂模式和生物活性,只有在适当的光/暗周期下,藻细胞才能完成物质代谢与光合产物的合成。根据藻类对光照强度的适应性,可将光照强度分为光限制区、光过渡区、光饱和区和光抑制区。在光限制区,藻类的生长速率随光照强度的增加而增快,当光强到达光饱和区时,强光会抑制光合色素的分解并使光合结构受到损坏,使藻类生长受到抑制。通常在较弱光 [ $<150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] 条件下,污泥的沉降性能、EPS 产量和氮磷去除效率均较好,而在较强光照条件下 [ $>300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ],污泥易形成颗粒,促进生物质增长<sup>[8]</sup>。

### 1.2.3 生物因素

藻菌间的信号是一种实现群体行为、调控代谢功能的通信语言,目前在藻类和细菌间主要存在 3 种信号物质:①溶解性较差的脂质分子,能够在不依靠能量的情况下自由穿过生物膜,如细菌中的磷脂、磷脂酰乙醇胺、二硬脂酰基磷脂酰乙醇胺等,以及藻类中的甾醇、脂肪酸等。②某些结构保守的分子,如农杆菌自诱导剂(AAI)<sup>[9]</sup>可作为一种信号将膜结合的 TraR 蛋白释放到细胞质中,从而诱导 TraR 蛋白的二聚化。③细菌产生的信号分子和藻类产生的化感物质<sup>[9]</sup>。细菌间通过分泌并感知信号分子从而进行交流的现象被称作群体感应(Quorum sensing, QS)。研究表明,藻菌颗粒污泥也受 QS 的调控,藻类和细菌都可以接收信号分子并开始自聚集,从而发生相应的变化(见图 2)。藻菌颗粒污泥系统中主要存在 C6-HSL 和 3-oxo-C8-HSL 两种信

号分子,向藻菌颗粒系统内添加 AHLs 上清液会诱导内源 AHLs 释放,使颗粒污泥结构更紧密,呈现出较好的抗冲击能力,维持颗粒长期运行中的结构稳定。QS 对藻类的影响主要包括构建生态位、调控孢子的成熟与释放、营养物质的加工与转化、藻细胞的裂解,但加入信号分子后对藻菌共生系统具体的影响机制还不明确,还需要进一步研究。

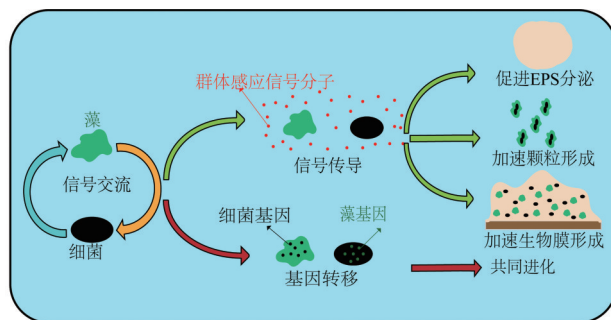


图2 藻菌间信号交流机制

Fig.2 Signal mechanism between algae and bacteria

藻-菌间的基因转移是指基因在相邻微生物之间的水平转移。原核生物间的基因转移主要存在转化、接合、转导三种形式,转化是指受体直接接受供体的 DNA 片段;接合是指以细菌菌毛为介质,将受体 DNA 片段传导给受体;转导是以噬菌体为载体完成基因转移。而真核生物间的基因转移机制更加复杂,此类研究较少。藻类中含有多个与细菌高度相似的基因,如硅藻的叶绿体基因、鞭毛藻 ycf16 和 ycf24 基因,从而推测细菌基因水平转移到藻中,细菌中也含有藻类特有基因,说明基因转移是藻类和细菌共同进化的结果(见图 2)。基因转移使藻菌间进行信号交流并促进藻菌的协同发展,提高藻菌共生系统的稳定性。

藻菌共生系统的影响因素众多,但研究主要集中在如何提高藻菌共生系统的处理效果上,而对藻菌共生系统快速形成及稳定运行的影响因素研究较少。因此,需确定影响藻菌共生系统形成的关键因素,使藻菌共生系统能够高效稳定运行。

### 1.3 藻菌结合方式

目前,藻菌共生系统主要有三种应用形式:悬浮态藻菌共生系统、固定化藻菌共生系统和藻菌生物膜系统。

悬浮态藻菌共生系统中细菌附着在藻细胞表面自由生长,主要包括高效藻类塘和藻菌颗粒污泥两种形式,目前的研究多集中在藻菌颗粒污泥上。



当藻类与颗粒污泥自动结合时,系统中会形成沉降性能较好的藻菌颗粒污泥。细菌有助于保护藻细胞免受浮游动物等捕食者的侵害,而藻细胞的裂解会为细菌生长提供更多的营养,有助于加速造粒过程。由于悬浮态藻菌颗粒体积较小且密度接近于水,易随出水流出,造成藻细胞的流失,影响系统的处理效果。未处理的藻细胞直接排放会影响当地水体水质,甚至造成二次污染,可选用过滤法或增添膜组件进行处理,但这会增加运行成本;此外,在藻菌颗粒污泥系统长期运行过程中,藻类易附着在反应器上生长,造成光遮挡,使藻类竞争力下降,数量减少。而微藻EPS的主要成分为PS,当微藻数量减少时系统内PS相对含量会减少,PN相对含量则会增加。并且,系统内对藻类生长有益的细菌种类有限,长期运行时可能导致系统内非目标菌种数增加,当有害细菌成为优势菌时就会导致系统崩溃。这时可能会出现主要功能菌群缺失,造成颗粒污泥的结构不稳定。这些都是藻菌颗粒污泥系统长期运行亟待解决的问题。

固定化藻菌共生系统是在悬浮态藻菌共生系统的基础上投加载体,使藻类和细菌固定在载体表面,提高单位面积的生物量,减少系统中悬浮态藻的数量。它能有效解决藻细胞易流失的问题,有利于微藻的收集,还能有效延缓藻类的分解、衰老和死亡。然而,直接投加载体时藻类的附着率较低,为了提高藻类的附着率需要对载体进行改性,如将发光材料涂在载体表面,使藻类向载体方向生长,以利于藻类的附着,还能在黑暗环境中补充光照,从而提高污染物的去除率。但是,现阶段固定化技

术并不成熟,改性载体成本较高,并且载体的存在对藻菌代谢的影响还不明确,可能会阻碍藻类的光合作用,限制其大规模使用。

藻菌生物膜系统是将惰性载体引入污水处理体系,利用藻菌定向吸附特性,在载体表面自动形成结构稳定的藻菌生物膜,最终达到净化污水的目的。藻菌生物膜可以缓解藻类随出水大量流失的问题,而且不需要复杂的固定化技术,成本较低。生物膜的正常老化脱落会促进新的生物膜形成,提高污水处理效率。但是生物膜的非自然脱落(如水体剪切力变大导致的脱落等),会使出水水质变差。因此,当生物膜进入老化期时需要进行反冲洗,以增强生物膜的稳定性。

## 2 藻菌共生系统的应用

### 2.1 藻菌共生系统对污染物的去除

#### 2.1.1 对氮、磷的去除

藻菌颗粒污泥具有较好的脱氮除磷能力,其去除方法主要包括微生物的同化作用、藻类的吸收和外界环境变化引起的去除3种。在藻菌共生系统中,微生物同化是藻菌颗粒污泥脱氮除磷的主要途径<sup>[10]</sup>。藻类光合作用产生 $O_2$ ,好氧细菌利用 $O_2$ 分解有机物产生 $CO_2$ ,并将含氮有机物转化成 $NH_4^+-N$ ,将含磷有机物转化成 $PO_4^{3-}-P$ ,藻类利用好氧细菌产物进行光合作用。外界环境变化去除氮、磷主要通过藻菌系统引起pH变化达到,由于藻类、细菌的代谢 $CO_2$ 被利用,系统内pH会升高至9左右,此时 $PO_4^{3-}-P$ 开始沉淀。

藻菌共生系统对污水中氮、磷的去除效果<sup>[2,8,11-15]</sup>见表1。

表1 藻菌共生系统对不同废水中氮、磷物质的去除效果

Tab.1 Removal effect of nitrogen and phosphorus from different wastewater by algal-bacterial symbiotic system

%

污水类型	藻+细菌	结合方式	实验条件	总氮去除率	总磷去除率
合成污水	<i>Oedogonium brevicinctum</i> +原生细菌	藻菌颗粒污泥	光照	45.5	31.4
合成污水	铜绿微囊藻+芽孢杆菌	藻菌颗粒污泥	光照、振荡	21.6(总溶解性氮TDN)	70.8(总溶解性磷TDP)
合成污水	混合藻+废水细菌	藻菌颗粒污泥	光照、曝气	60.4	83.7
合成污水	绿藻+原生细菌	藻菌生物膜	光照、曝气	69.9	94.8
养猪场废水	小球藻+原生细菌	藻菌颗粒污泥	光照、振荡	75.9	82.7
养殖废水	藻菌絮体	藻菌生物膜	光照、曝气	58.0	89.0
垃圾渗滤液	小球藻+原生细菌	藻菌生物膜	光照、曝气	69.3	100.0

通过对比不同运行方式,发现曝气对藻菌共生系统脱氮除磷的影响较大,尤其是磷的去除效果变

化显著,添加曝气过程的反应器对磷的去除率可达80%以上。但是藻菌共生系统受环境因素影响较

大,对污染物的去除效果不稳定,需要合理设计。例如,模拟辐流式二沉池设计藻菌共生生物膜反应器,在进水水质波动较大时仍能保持稳定的脱氮除磷效果,出水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和 COD 均能达到国标一级 A 标准,有望应用到污水处理厂中<sup>[11]</sup>。

藻菌共生系统可应用于沼液和水产养殖废水的处理,研究发现藻菌共生系统可有效减少沼液中的碳、氮、磷等污染物,提高净化效率,并且藻菌共同培养比单独培养对 COD 和总磷的去除效果更好<sup>[16]</sup>。此外,藻菌共生系统处理高浓度的沼液造价较低。

藻类系统去除污染物所需的水力停留时间较长,藻菌生物膜系统在 24 h 水力停留时间内对人工养殖废水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率为 69%<sup>[17]</sup>。而藻菌颗粒污泥工艺在水力停留时间 8 h 内,对水产养殖废水中  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和 COD 的平均去除率分别为 84.2% 和 64.8%,对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的去除率分别为 84.9%、70.8% 和 50.0%<sup>[18]</sup>,大大缩短了反应时间,提高了污染物的去除效率。

2.1.2 对重金属的去除

当前,去除重金属离子的方法主要包括化学沉淀法、离子交换法、电解法和吸附法。由于重金属离子对微生物具有持续的毒害作用,因此生物法在重金属去除方面应用较少。藻菌共生系统为了抵御重金属离子的毒害作用,会产生一种特有的“解毒”方式,为生物法去除重金属离子的应用提供了新的研究方向。

藻菌共生系统可通过吸附和富集作用去除水体中的重金属<sup>[19-24]</sup>(见表 2)。吸附作用是细菌和藻类分泌的 EPS 将重金属离子吸附在表面,并与氮、氧等离子形成络合物,最终将重金属离子去除。富集作用是指重金属离子进入藻细胞中与细胞器结合,使金属离子富集到藻类体内。重金属对藻菌共生系统也具有持续的毒害作用,但重金属进入藻细胞后会使藻细胞产生相应的抵御措施,如藻类自身会产生重金属配体(如草酸盐、磷酸衍生物等),将重金属转变成结合蛋白并存储在液泡中,以降低细胞内重金属的浓度,减少毒害作用。重金属还会刺激藻菌共生系统中 EPS 的分泌,保持系统中的生物活性,缓冲重金属带来的影响。此外,由于藻类吸收水中的  $\text{CO}_2$  并释放  $\text{O}_2$ ,使水环境中的 pH 升高,而重金属离子在碱性水体中易形成沉淀,从而以沉淀的

形式被去除。与好氧颗粒污泥相比,藻菌颗粒污泥对重金属的吸附效果更好。但是,高浓度的重金属会抑制酶的活性,从而抑制 EPS 的生成和微生物的生长,还会诱导产生活性氧物种而损伤细胞膜,进而造成 EPS 破裂并释放胞内成分。以 Cd 为例,低浓度(0.1、1 mg/gVSS)时会与溶解性微生物产物(SMP)结合形成保护屏障,促进 SMP 与松散结合 EPS(loosely bound EPS, LB-EPS)的分泌,对紧密结合 EPS(tightly bound EPS, TB-EPS)无明显影响;但高浓度(10 mg/gVSS)时会导致 SMP、LB-EPS、TB-EPS 含量出现不同程度的下降<sup>[25]</sup>。因此,高浓度的重金属会抑制细胞代谢,进而影响菌群活性。

表 2 藻菌共生系统对重金属离子的去除效果

Tab.2 Removal effect of heavy metal ions by algal-bacterial symbiotic system %

重金属	藻	细菌	结合方式	去除率
铜	小球藻	肺炎克雷伯菌	藻菌生物膜	78.1
铬	混合藻	活性污泥细菌	藻菌颗粒污泥	85.1
镍	小球藻	肺炎克雷伯菌	藻菌生物膜	70.0
锌	小球藻	光合细菌	藻菌生物膜	78.0
铬	混合藻	废水细菌	藻菌颗粒污泥	73.1
铬	小球藻	废水细菌	藻菌生物膜	80.0
铁	小球藻	废水细菌	固定化	94.0
镉	小球藻	废水细菌	固定化	100.0
锌	固定化栅藻	活性污泥细菌	藻菌颗粒污泥	95.0

值得注意的是,不同藻类对重金属的耐受值不同。例如,当  $\text{Cr}^{6+}>12\text{ mg/L}$  时,黑藻细胞生长受到抑制;当  $\text{Cr}^{6+}$  达到 10 mg/L 时,螺旋藻细胞就会死亡。因此,利用藻菌共生系统去除重金属时,需根据重金属浓度选择合适的藻类进行处理。

2.1.3 对难降解有机物的去除

降解有机物成分复杂、去除难度大,主要包括有机染料、抗生素等,常用的污水生物处理方法很难去除难降解有机物。藻菌共生系统由于藻类的加入,可通过静电力、分子力将难降解有机物吸附、沉积在藻类表面,然后在酶促反应的驱动下进行生物转化和生物积累。并且藻类会先对难降解有机物进行初级降解,随后被细菌继续利用;此外,还可以利用藻内含有的锰过氧化物酶、木质素过氧化物酶等,直接降解有机染料<sup>[26]</sup>。

抗生素对藻类生长的影响与其浓度有关,在低浓度条件下,抗生素调节及诱导基因的表达可激活



蛋白酶,促进藻类的生长;而在高浓度条件下,抗生素作为毒物会抑制微藻的生长。例如,庆大霉素浓度为50~100 mg/L时,对鞭金藻细胞的生长具有促进作用,当庆大霉素浓度为1 000 mg/L时,对藻细胞生长具有明显的抑制作用<sup>[27]</sup>。研究表明,藻类对抗生素的耐受浓度远高于细菌,并且微藻群是细菌的次生栖息地,可在一定程度上保护细菌免受抗生素的影响。藻菌之间的共生关系还可以增强细菌的活性,提高系统对抗生素的耐受能力。目前,随着科技的进步,许多难降解的新污染物出现在污水中。鉴于藻菌共生系统对难降解有机物的去除机制,其在去除新污染物方面也具有较大潜力。

## 2.2 藻菌共生系统与多种反应器的联合

### 2.2.1 藻菌生物燃料电池

生物燃料电池产生的是可再生清洁能源。藻类是制作生物燃料电池具有发展前景的原材料之一,预先驯化的微生物可用于藻菌生物燃料电池。藻类衍生的生物燃料电池只需要阳光、CO<sub>2</sub>和水,就可以产生多种可再生能源产品。藻类在阴极室光照条件下进行光合作用产生O<sub>2</sub>,与H<sup>+</sup>结合生成水。细菌在阳极室遮光状态下氧化底物产生CO<sub>2</sub>和H<sup>+</sup>,并通过阳离子交换膜到达阴极室。藻菌生物燃料电池的功率输出与外部电路中的电阻和离子交换膜的渗透性有关<sup>[28]</sup>。藻菌生物燃料电池作为预处理工艺,可为污水的净化提供能量,并将阳极室产生的CO<sub>2</sub>引入阴极室,降低碳排放量。目前,藻菌生物燃料电池已被证明可以同时净化污水和发电,最高产能可达到(0.157±0.001) kJ/d<sup>[29]</sup>,但是藻菌生物燃料电池在大规模商业化方面还是存在很多问题,如藻菌生物燃料电池受季节变化影响、电池稳定性易受藻类生长周期影响等。

### 2.2.2 藻菌生物转盘

藻菌生物转盘可视为一种光生物反应器,需要提供适宜的光环境,利用生物转盘转动为藻菌共生系统提供O<sub>2</sub>和动力来源。该工艺无需曝气装置和混合装置,选用高脂藻作为藻种,既可以达到净化污水的效果,又可以通过回收高脂藻中的油脂达到资源回收的目的。然而,由于藻类的加入,需要选择透光性好的材料,减少光能损失,在一定程度上增加了材料成本。并且出水中悬浮的藻细胞很难在二沉池中去除,需选用过滤法或增添膜组件进行处理,增加运行成本。

### 2.2.3 藻菌膜生物反应器

膜生物反应器(MBR)是膜分离技术与生物处理技术相结合的污水处理工艺,以膜组件代替二沉池,保持系统内高浓度的活性污泥,提高处理效率。将藻菌共生系统与MBR工艺耦合,一方面由于MBR工艺的加入,解决了藻菌共生系统出水携带悬浮态藻细胞的问题,减少了藻细胞流失,还可回收藻类生物能源;另一方面,由于藻菌共生系统的加入,可进一步提高MBR工艺对氮、磷的去除率,减少曝气能耗。与传统MBR相比,适当的藻类比例将提高MBR的性能,接种比(藻类/活性污泥)为1:1的MBR系统对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率为97.7%,而不添加藻类的MBR系统对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率为90.8%<sup>[30]</sup>。然而,运行过程中,由于大颗粒物质的吸附使膜孔径变小甚至堵塞而产生膜污染,影响膜的分离特性,需要对膜组件定期清洗,限制了MBR工艺的大规模应用。一般认为藻细胞会加速膜污染,但研究发现,投加适当比例的藻细胞不但会提高污水处理效率还会缓解膜污染程度。膜污染可能是丝状菌过度生长所致,丝状菌会阻止絮状物颗粒的团聚,导致絮状物尺寸增加使微生物絮体形状和结构变得不规则,倾向于沉积在膜表面。藻细胞投加比例的不同会影响系统内溶解氧的变化,较高的溶解氧会抑制丝状菌的过度生长,从而起到缓解膜污染的效果。

## 3 结语

藻菌共生系统在去除污染物的前提下,可实现约77%的温室气体减排,已逐渐发展成结合生物学、环境保护和能源节约的综合技术。然而,藻菌共生系统依然存在一些问题需要解决:①部分藻菌共生系统出水会携带一定量脱落的藻类,对出水水质造成影响;②系统中会滋生一些有害细菌,破坏藻细胞的细胞壁,最终导致藻细胞的死亡,影响系统稳定;③藻菌共生系统在大规模实际应用时,受光照、温度等环境因素的影响,如何在多变的自然条件下实现藻菌共生系统的稳定运行是亟需解决的问题。

针对出水携带藻细胞的问题,通过与膜工艺结合,对出水进行处理,收集流失的藻细胞,保持生物浓度;针对系统内有害细菌的滋生,在培养初期对加入细菌进行筛选,投加有益菌,避免有害菌的

过度繁殖;要实现藻菌共生系统在多变环境下的稳定运行,一方面需通过多次试验提高系统稳定性来抵抗环境因素的不利影响,另一方面应尽量避免环境的突然改变,影响系统处理效果。

目前,关于藻菌共生系统的影响因素及处理效果等研究较多,而藻-菌间的作用机理、维持藻菌结构长期稳定和藻菌共生系统如何快速启动还需进一步研究。藻-菌在环境影响下具有多变的作用关系,导致藻-菌间广泛存在多种信息交流机制,并在藻菌各种生理特性中发挥重要作用。因此,在未来的研究中,有必要分析多种信号间的响应机制,探究不同信号机制间是否具有协同或抑制机制,有望进一步深化藻菌共生系统的形成机理。此外,还需明确外源添加信号分子的调控策略对藻菌及有害微生物的影响,能否通过信号传递确保优势藻与优势菌的地位,优化藻菌共生系统,提高污水处理效率。藻类是一种具有高回收价值的生物质资源,在去除污染物的同时进行生物质资源回收的研究,有望实现经济价值和实用价值的双达标。在疫情影响下,污水中个人医药护理品等新型难降解有机物浓度增加,藻菌共生系统对难降解有机物的高耐受度,也为此类废水的去除提供了新的方向。

#### 参考文献:

- [ 1 ] SEMAHA P, LEI Z F, ZHAO Z W, *et al.* Comparison between conventional bacterial and algal-bacterial aerobic granular sludge systems in the treatment of saline wastewater [J]. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 2020, 14(8): 84-89.
- [ 2 ] JI X Y, JIANG M Q, ZHANG J B, *et al.* The interactions of algae-bacteria symbiotic system and its effects on nutrients removal from synthetic wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 44-50.
- [ 3 ] 王荣昌,程霞,曾旭. 污水处理中菌藻共生系统去除污染物机理及其应用进展[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(1): 13-22.  
WANG Rongchang, CHENG Xia, ZENG Xu. Mechanisms and applications of bacterial-algal symbiotic systems for pollutant removal from wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 13-22(in Chinese).
- [ 4 ] LIANG Z J, 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): 1383-1389.
- [ 5 ] JI B, LIU C. CO<sub>2</sub> improves the microalgal-bacterial granular sludge towards carbon-negative wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2022, 208: 117865.
- [ 6 ] SUN P, LIU C, LI A, *et al.* Using carbon dioxide-added microalgal-bacterial granular sludge for carbon-neutral municipal wastewater treatment under outdoor conditions: performance, granule characteristics and environmental sustainability [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 848: 157657.
- [ 7 ] 周利超. 菌藻共生颗粒污泥的培养及EPS在其过程中的作用机制[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.  
ZHOU Lichao. Culture of Symbiotic Granular Sludge from Bacteria and Algae and the Mechanism of EPS in the Process [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020 (in Chinese).
- [ 8 ] ZHANG B, GUO Y, LENS P N L, *et al.* Effect of light intensity on the characteristics of algal-bacterial granular sludge and the role of N-acyl-homoserine lactone in the granulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 372-383.
- [ 9 ] ZHOU J, LÜ Y H, RICHLIN M L, *et al.* Quorum sensing is a language of chemical signals and plays an ecological role in algal-bacterial interactions [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2016, 35(2): 81-105.
- [ 10 ] JI B, ZHANG M, GU J, *et al.* A self-sustaining synergetic microalgal-bacterial granular sludge process towards energy-efficient and environmentally sustainable municipal wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2020, 179: 115884.
- [ 11 ] 王晓纪,黄以林,蒋甜,等. 固定化藻菌共生生物膜反应器脱氮除磷效果评价[J]. *净水技术*, 2019, 38(1): 83-88,114.  
WANG Xiaoji, HUANG Yilin, JIANG Tian, *et al.* Effect evaluation of immobilized algae-bacteria symbiotic biofilm reactor on denitrification and phosphorus removal[J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(1): 83-88,114(in Chinese).
- [ 12 ] TANG C C, TIAN Y, HE Z W, *et al.* Performance and mechanism of a novel algal-bacterial symbiosis system based on sequencing batch suspended biofilm reactor treating domestic wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 265: 422-431.

- [13] WANG L, ADDY M, COBB K, *et al.* Interaction of *Chlorella vulgaris* and bacteria when co-cultivated in anaerobically digested swine manure [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320(Part A): 124250.
- [14] MICHELS M H A, VASKOSKA M, VERMUË M H, *et al.* Growth of *Tetraselmis suecica* in a tubular photobioreactor on wastewater from a fish farm [J]. *Water Research*, 2014, 65: 290–296.
- [15] KHANZADA Z T. Phosphorus removal from landfill leachate by microalgae [J]. *Biotechnology Reports*, 2020, 25: e00419.
- [16] LI D, LIU R Q, CUI X Y, *et al.* Co-culture of bacteria and microalgae for treatment of high concentration biogas slurry [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 41: 102014.
- [17] BARNHARST T, RAJENDRAN A, HU B. Bioremediation of synthetic intensive aquaculture wastewater by a novel feed-grade composite biofilm [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 126: 131–142.
- [18] FAN S Q, JI B, HASAN H A, *et al.* Microalgal-bacterial granular sludge process for non-aerated aquaculture wastewater treatment [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2021, 44: 1733–1739.
- [19] MAKUT B B, DAS D, GOSWAMI G. Production of microbial biomass feedstock via co-cultivation of microalgae-bacteria consortium coupled with effective wastewater treatment: a sustainable approach [J]. *Algal Research*, 2019, 37: 228–239.
- [20] YANG X J, ZHAO Z W, VAN NGUYEN B, *et al.* Cr(VI) bioremediation by active algal-bacterial aerobic granular sludge: importance of microbial viability, contribution of microalgae and fractionation of loaded Cr [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 418: 126342.
- [21] GARCÍA D, DE GODOS I, DOMÍNGUEZ C, *et al.* A systematic comparison of the potential of microalgae-bacteria and purple phototrophic bacteria consortia for the treatment of piggery wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 276: 18–27.
- [22] YANG X J, ZHAO Z W, YU Y, *et al.* Enhanced biosorption of Cr(VI) from synthetic wastewater using algal-bacterial aerobic granular sludge: batch experiments, kinetics and mechanisms [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 251: 117323.
- [23] EL-SHEEKH M M, METWALLY A, ALLAM N G, *et al.* Effect of algal cell immobilization technique on sequencing batch reactors for sewage wastewater treatment [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2017, 11(5): 603–611.
- [24] GARCÍA D, POSADAS E, GRAJEDA C, *et al.* Comparative evaluation of piggery wastewater treatment in algal-bacterial photobioreactors under indoor and outdoor conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245(Part A): 483–490.
- [25] XU Q X, LI X M, DING R R, *et al.* Understanding and mitigating the toxicity of cadmium to the anaerobic fermentation of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2017, 124: 269–279.
- [26] YANG J, GAO T G, ZHANG Y R, *et al.* Degradation of the phenolic  $\beta$ -ether lignin model dimer and dyes by dye-decolorizing peroxidase from *Bacillus amyloliquefaciens* [J]. *Biotechnology Letters*, 2019, 41(8): 1015–1021.
- [27] 黄振华, 刘晓娟, 胡章喜, 等. 湛江等鞭金藻对抗生素的反应及无菌化培养 [J]. *生态科学*, 2007, 26(2): 120–121, 125.
- HUANG Zhenhua, LIU Xiaojuan, HU Zhangxi, *et al.* Effects of antibiotics on the growth of *Isochrysis zhanjiangensis* and axenic culture [J]. *Ecological Science*, 2007, 26(2): 120–121, 125(in Chinese).
- [28] LEONG J X, DAUD W R W, GHASEMI M, *et al.* Ion exchange membranes as separators in microbial fuel cells for bioenergy conversion: a comprehensive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28: 575–587.
- [29] LUO S, SAMPARA P S S, HE Z. Effective algal harvesting by using mesh membrane for enhanced energy recovery in an innovative integrated photobioelectrochemical system [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 253: 33–40.
- [30] SUN L, TIAN Y, ZHANG J, *et al.* Wastewater treatment and membrane fouling with algal-activated sludge culture in a novel membrane bioreactor: influence of inoculation ratios [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 343: 455–459.

作者简介:张夏(1999–),女,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,主要研究方向为污水生物处理。

E-mail: zhangxia777999@163.com

收稿日期:2022-07-19

修回日期:2022-12-28

(编辑:丁彩娟)