



移动扫码阅读

梁琚宇.藻菌共生系统在废水处理中的研究进展[J].能源环境保护,2021,35(2):14-18.

LIANG Junyu. The research progress of the algae-bacteria symbiotic system in wastewater treatment[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2): 14-18.

藻菌共生系统在废水处理中的研究进展

梁琚宇

(上海市环境科学研究院,上海 200233)

摘要:介绍了藻菌共生系统废水处理技术的主要类型,总结了影响藻菌共生系统运行稳定性和营养物质处理效果的主要因素,从氧气补充作用和资源回收潜力探讨了藻菌共生系统的应用潜力。分析认为:藻菌共生技术具有处理效率高、运行能耗低、剩余污泥量少和资源化潜力高等优势,但控制条件严格,对温度、光照等环境因素要求较高;为了更好地实现该技术的产业化,未来还需要进一步优化光生物反应器设计、藻类光能利用、工艺参数控制和微藻生物质的综合利用。

关键词:藻菌共生;废水处理;资源回收;生物反应器

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)02-0014-05

The research progress of the algae-bacteria symbiotic system in wastewater treatment

LIANG Junyu

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: The main types of wastewater treatment technologies with the algae-bacteria symbiotic system were introduced. The main factors affecting the stability of the alga-bacteria symbiotic system and the treatment effect of nutrient were summarized. The application potential of this system was discussed from the oxygen supplementation and resource recovery potential. The results show that the algae-bacteria symbiotic technology has the advantages of high treatment efficiency, low energy consumption, low excess sludge production and high resource potential, but it requires strict control conditions and environmental factors such as temperature and light. In order to realize the industrialization of this technology, it is necessary to further optimize the design of photo-bioreactors, the light energy utilization of algae, the control of process parameters and the comprehensive utilization of microalgae biomass.

Key Words: Algal-bacteria symbiosis; Wastewater treatment; Resource recovery; Bioreactor

0 引言

微藻和菌群的共生关系不仅是自然水体的净化基础,也在城市生活污水的处理工艺中发挥着重要作用^[1]。这种共生现象最早被发现于氧化塘处理废水的工艺过程中^[2],微藻通过光合作用释放氧气形成其与菌群的共生。直到1981年,研究人员在应用絮凝性藻菌系统对氮吸收的研究中正式提出藻菌共生体系^[3]。

微藻与菌群的共生具有多种结合形式,两者

的相互作用主要包括营养交换、信号传导和基因转移,其中营养交换被认为是最重要最常见的互动类型^[4]。大量研究发现利用这种共生协同作用可以提高工艺环节中氮、磷等营养物质的去除效率^[5],微藻可以促进废水中营养物质^[6]、重金属^[7]乃至病原体的去除,同时可以提供O₂作用于耗氧菌群使有机物质被氧化去除,并可利用菌群呼吸产生的CO₂^[8]。将这种共生关系应用于废水处理工艺有助于降低机械曝气带来的运行成本,并有研究发现在这个过程中一些有害污染物也可以

被氧化去除。此外,大量微藻生物质的产出也使得养分从废水中转移到微藻细胞中^[9]。进一步对微藻和菌群生物质的利用可以获得色素、脂质、肥料、饲料以及生物燃料等高附加值产物^[10]。因此,应用藻菌共生系统实现废水的资源化处理是近年来国内外的研究热点之一。

本文综述了目前藻菌共生系统的主要类型,以及影响藻菌共生稳定性和营养物质处理效率的因素,并进一步探讨了藻菌共生的应用优势和局限性。

1 藻菌共生系统的主要类型

目前在应用藻菌共生进行废水处理工艺的研究中,藻菌共生系统的主要构建形式包括悬浮藻菌系统、固定化藻菌系统和藻菌生物膜系统等^[11]。高效藻类塘(HRAP)是一种典型的应用了悬浮状态藻菌共生的污水处理系统,在获得稳定高效的污水处理效率的同时收获一定的生物质用于生物燃料的生产^[12-13]。固定化藻菌系统主要是为收获系统中的微藻等生物质。通过物理或化学手段将微藻和菌群固定化也可形成藻菌共生系统^[14]。通常应用海藻酸钙、卡拉胶、琼脂、聚丙烯酰胺、聚乙烯醇等材料作为载体物质,在一定程度上可以提高污水处理效果和生物量,但由于固定化成本较高,且有较大可能阻碍藻菌之间的气体和代谢产物的交换等因素,从而限制了固定化藻菌系统在污水处理中的广泛应用^[11,15]。

通过生物膜构建藻菌共生系统是目前较受欢迎的一种方法,相比其它藻菌共生系统,藻菌生物膜系统的自我遮蔽效应较少,同时便于收获生物质^[16],但生物膜藻菌共生系统的形成和运行稳定的控制条件要求较高,共生关系较为复杂,其机理研究目前不是很透彻^[17],因而并没有得到大规模的应用。此外,藻菌共生 SBR 反应器也是一种较为流行的藻菌结合方式,其结合了传统 SBR 反应器和藻菌共生两者各自的优势,系统构建相对简单、控制方式较为灵活。将微藻引入 SBR 反应器中的微生物群落中,通过驯化形成一种新型的光生物反应器,这种反应器在营养物质的去除和生物质收获方面具有更好的表现,并能有效减少曝气能耗和碳排放^[18]。

2 藻菌共生系统的影响因素

国内外关于藻菌共生系统进行废水处理的研

究已经有较长的历史,在不同的工艺条件下运行,藻菌共生系统的自身稳定性、对废水中营养物质的去除效率及菌群的多样性组成存在较大的差异。目前广泛关注的影响因素主要以曝气强度、微藻接种比、水力停留时间、光照条件和污泥形态等因素为主。

2.1 曝气强度

曝气强度不仅会影响溶解氧的含量,同时对于藻菌共生系统维持稳定状态也具有重要的作用,适当的曝气过程可以提高废水污染物去除效率并能缩短水力停留时间,但高强度的曝气抑制了微藻生物量积累对营养物质的吸收,且对于微藻和菌群之间的平衡也有着不利影响^[19]。

2.2 微藻接种比

微藻的接种比会影响营养物质的去除和污泥沉降性能^[20],研究发现使用混合蓝绿藻接种,接种比例为 1:5,运行 10 天时氮和磷的去除效率最高可达 $91\% \pm 7\%$ 和 $93.5\% \pm 2.5\%$,不同接种比下微生物的群落组成也有较大的差异。而在限制曝气的条件下,则发现接种比例为 1:3 时可以得到良好的氮去除效率^[19]。

2.3 水力停留时间

水力停留时间对于藻菌共生系统中微藻的生长速度具有一定的调节作用。研究发现高水力停留时间(4 d)和低食微比($0.15 \text{ kg BOD}_5/\text{kg MLSS} \cdot \text{d}$)的条件下有助于形成稳定的藻菌共生系统,且悬浮态的微藻较少^[21],而在绿藻形成的藻菌共生系统中,总氮的去除效率随 HRT 的增大而升高^[22]。此外,水力停留时间对系统碳分配的影响也会干涉微藻的脂质和碳水化合物的积累过程^[23]。

2.4 光照条件

微藻的生长和代谢与光照条件直接相关,光照强度、光照周期和光照品质对藻菌共生系统的营养物质去除、藻类生长、生物活性具有显著的影响^[24]。在达到光饱和点之前,微藻的生长速率通常与光照强度成正比^[25],适当的光照强度和光暗周期有助于微藻对氮磷营养物质的去除、生物质的积累以及光能的利用^[26-27]。

2.5 接种污泥的形态

接种污泥的形态也是一种重要的影响因素,絮状污泥和颗粒污泥会形成差异明显的藻菌共生系统,使用颗粒污泥作为微藻的固定材料,在 2 L 的反应器中以高曝气强度(6 L/min)和长曝气时

间(355 min)条件运行获得了最高的总氮去除效率^[28],这与使用悬浮活性污泥形成的藻菌共生系统的运行效果完全不同^[19],研究表明微藻会降低颗粒污泥的沉降性能,同时抑制功能菌群的增殖,进而导致氮磷去除效率的下降^[29]。

除此之外,污泥停留时间、底物浓度、碱度、温度等因素也会对藻菌共生系统中生物量增长和营养物质的去除也存在一定的影响^[30]。综上所述,藻菌共生系统的稳定性和功能性与多种工艺参数密切相关,因此需要严格控制特定的条件,才能促使这一技术获得良好的废水净化和营养物质去除性能。

3 藻菌共生系统的应用潜力

3.1 氧气补充作用

藻菌共生系统中微藻的一个重要作用即是通过微藻光合产氧补充系统中的溶解氧浓度。微藻在充足的光照下可以释放出大量的氧气,在管状生物反应器中其产氧速率最高可以达到 $10 \text{ g O}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[31],在溪流中昼夜溶解氧饱和度的变化与水体中的丝状藻生物量的相关性高达 64%^[32],这表明微藻生物活动是水体溶解氧的重要来源之一。在膜生物反应器中,光照强度(以量子通量密度计,PPFD)为 $135 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,小球藻浓度为 35.21 mg/L 时,特定产氧速率(SO-PR)可达 $17.31 \text{ mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{MLSS} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[33]。有研究计算了浓度为 $6 \times 10^6 \sim 7 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的两种微藻在 $(50 \pm 5) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光强下持续光照 20 min,溶解氧浓度升高 3.2 mg/L ,绿藻(*Chlorella vulgaris*)和蓝藻(*Microcystis aeruginosa*)的 SOPR 分别为 $(42 \pm 1) \text{ fmol O}_2 \cdot \text{cell}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(49 \pm 2) \text{ fmol O}_2 \cdot \text{cell}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[34],较低微藻浓度即可产生足量的氧气进而改变体系中溶解氧的浓度。

因此,在不使用机械或混合曝气的情况下,藻菌共生系统中的微藻光合产氧具有满足处理系统对溶解氧需求的潜力,从而减少废水处理过程中的能量需求^[35]。研究发现在一定的条件下微藻的光合作用可以提供系统 74% 的溶解氧,有效减少曝气需求并能形成沉降性能良好的污泥^[36]。在低曝气强度下(0.2 L/min)藻菌共生系统的氮磷去除效率可能高于单一活性污泥系统在高曝气强度下(0.4 L/min)的氮磷去除效率^[19],不但降低了能耗而且系统废水处理性能得以提高。甚至在

没有机械曝气的情况下,仅利用藻菌共生系统中的微藻产氧亦可将废水中的 81%~85% 的 NH_4^+-N 通过硝化作用转化为 NO_3^--N ^[37]。

3.2 资源回收潜力

藻菌共生系统的另一个应用优势是利用微藻生物质能实现对污水中氮磷等营养物质的富集,进一步对微藻生物质的利用可以实现资源回收。农业中氮肥主要是通过哈伯-博世法生产,不仅耗能巨大且会排放大量的 CO_2 ^[38],而磷肥主要来源于磷矿的开采,意味着目前磷元素获取方式是不可持续的^[39]。目前污水中的氮磷元素也被广泛认为是具有回收价值的^[40],而利用富含氮磷的污水进行微藻培养实现养分回收,要比传统的吹脱法和沉淀法具有明显的成本优势^[41]。获得的微藻生物质可以用作能源生产原料,例如进行微藻制氢、脂质提取和微生物燃料电池^[42],微藻中的粗蛋白、氨基酸、碳水化合物等也可以被提取并加以利用^[43-44]。因此,相比传统污水处理工艺,藻菌共生系统对污水的资源回收潜力更高并具有广阔的前景。

4 结论与展望

藻菌共生技术是一种具有潜力的废水资源化处理技术,相比传统废水处理工艺,其具有处理效率高、运行能耗低、剩余污泥量少和资源化潜力高等综合优势,但目前受制于其复杂严格的工艺控制条件,以及对温度、光照等环境因素要求较高,短期内仍然难以实现产业化应用。未来在废水资源化处理的趋势下,需从光生物反应器的设计、藻类光能利用率的提高、反应系统运行状态的控制和微藻生物质的综合利用等方面进一步深入研究,才能促使这一技术实现真正的资源化。

参考文献

- [1] ZHANG T, SHAO M F, YE L. 454 pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants [J]. Isme Journal, 2012, 6 (6): 1137-1147.
- [2] OSWALD W J, GOTAAS H B. Photosynthesis in sewage treatment [J]. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1957, 122: 73-105.
- [3] NAMBIAR K R, BOKIL S D. Luxury uptake of nitrogen in flocculating algal-bacterial system [J]. Water Research, 1981, 15 (6): 667-669.
- [4] KOUZUMA A, WATANABE K. Exploring the potential of algae/bacteria interactions [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2015, 33: 125-129.

- [5] BRENNER K, YOU L, ARNOLD F H. Engineering microbial consortia: A new frontier in synthetic biology [J]. Trends in Biotechnology, 2008, 26 (9): 483-489.
- [6] MUOZ R, KILLNER C, GUIEYSSE B, et al. Photosynthetically oxygenated salicylate biodegradation in a continuous stirred tank photobioreactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, 87 (6): 797-803.
- [7] Tamagnini, Paula, Santos. Effects of heavy metals on *Cyanobacteria* sp. CCY 0110 growth, extracellular polymeric substances (EPS) production, ultrastructure and protein profiles [J]. Journal of Proteomics, 2015, 120 (29): 75-94.
- [8] DERRY L A, JACOBSEN S B. The chemical evolution of Precambrian seawater: Evidence from REEs in banded iron formations [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1990, 54 (11): 2965-2977.
- [9] CAI T, PARK S Y, LI Y. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 19 (1): 360-369.
- [10] QUIJANO G, ARCILA J S, BUITRÓN G. Microalgal-bacterial aggregates: Applications and perspectives for wastewater treatment [J]. Biotechnology Advances, 2017, 35 (6): 772-781.
- [11] 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.
- [12] CRAGGS R J, HEUBECK S, LUNDQUIST T J, et al. Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds [J]. Water Science & Technology, 2011, 63 (4): 660-665.
- [13] PARK J B K, CRAGGS R J, SHILTON A N, et al. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (1): 35-42.
- [14] 严清, 高旭, 彭绪亚. 固定化菌藻系统对污水处理厂出水的深度处理 [J]. 环境工程学报, 2012, 6 (10): 3629-3634.
- [15] 王秀. 藻菌共生化床光生物反应器处理高浓度有机废水的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2009: 6-8.
- [16] CHRISTENSON L B, SIMS R C. Rotating algal biofilm reactor and spool harvester for wastewater treatment with biofuels by-products [J]. Biotechnology & Bioengineering, 2012, 109 (7): 1674-1684.
- [17] KESAANO M, SIMS R C. Algal biofilm based technology for wastewater treatment [J]. Algal Research, 2014, 5 (1): 231-240.
- [18] ZAMBRANO J, KRUSTOK I, NEHRENHEIM E, et al. A simple model for algae - bacteria interaction in photo - bioreactors [J]. Algal Research, 2016, 19: 155-161.
- [19] TANG C C, WEI Z, YU T, et al. Effect of aeration rate on performance and stability of algal-bacterial symbiosis system to treat domestic wastewater in sequencing batch reactors [J]. Bioresource Technology, 2016, 222: 156-164.
- [20] SU Y, MENNERICH A, URBAN B. Synergistic cooperation between wastewater - born algae and activated sludge for wastewater treatment: influence of algae and sludge inoculation ratios [J]. Bioresource Technology, 2012, 105 (2): 67-73.
- [21] MEDINA M, NEIS U. Symbiotic algal bacterial wastewater treatment: Effect of food to microorganism ratio and hydraulic retention time on the process performance [J]. Water Science & Technology, 2007, 55 (11): 165.
- [22] GUTZEIT G, LORCH D, WEBER A, et al. Biofloculent algal - bacterial biomass improves low - cost wastewater treatment [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2005, 52 (12): 9.
- [23] FERRO L, GOJKOVIC Z, MUOZ R, et al. Growth performance and nutrient removal of a *Chlorella vulgaris*-*Rhizobium* sp. co-culture during mixotrophic feed-batch cultivation in synthetic wastewater [J]. Algal Research, 2019, 44: 101690.
- [24] FANSHENG MENG, LIMENG XI, DONGFANG LIU, et al. Effects of light intensity on oxygen distribution, lipid production and biological community of algal - bacterial granules in photo-sequencing batch reactors [J]. Bioresource technology, 2019, 272: 473-481.
- [25] WILLIAMS P J L B, LAURENS L M L. Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics [J]. Energy & Environmental Science, 2010, 3 (5): 554-590.
- [26] LI Y, ZHOU W, HU B, et al. Effect of light intensity on algal biomass accumulation and biodiesel production for mixotrophic strains *Chlorella kessleri* and *Chlorella protothecoide* cultivated in highly concentrated municipal wastewater [J]. Biotechnology & Bioengineering, 2012, 109 (9): 2222-2229.
- [27] ELEONORA S, DIANA S, MARIO G G, et al. Adjusted light and dark cycles can optimize photosynthetic efficiency in algae growing in photobioreactors [J]. PloS One, 2012, 7 (6): e38975.
- [28] LIN L, FAN H, LIU Y, et al. Development of algae-bacteria granular consortia in photo - sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2017, 232: 64-71.
- [29] HUANG W, LI B, ZHANG C, et al. Effect of algae growth on aerobic granulation and nutrients removal from synthetic wastewater by using sequencing batch reactors [J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 187-192.
- [30] CERVANTES-GAXIOLA M E, HERNÁNDEZ-CALDERÓN O M, RUBIO-CASTRO E, et al. In silico study of the microalgaebacteria symbiotic system in a stagnant pond [J]. Computers & Chemical Engineering, 2020, 135: 106740.
- [31] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae [J]. Biotechnology Advances, 2007, 25 (3): 294-306.
- [32] MORGAN A M, ROYER T V, DAVID M B, et al. Relationships among nutrients, chlorophyll-a, and dissolved oxygen in agricultural streams in Illinois [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35 (4): 1110-1117.
- [33] NAJM Y, JEONG S, LEIKNES T. Nutrient utilization and oxygen production by *Chlorella vulgaris* in a hybrid membrane bioreactor and algal membrane photobioreactor system [J].

- Bioresource Technology, 2017, 237: 64-71.
- [34] TANG T, FADAEI H, HU Z. Rapid evaluation of algal and cyanobacterial activities through specific oxygen production rate measurement [J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 439-445.
- [35] A S F M, B S H, A N W, et al. Integrating micro-algae into wastewater treatment: A review [J]. Science of The Total Environment, 2021, 7521: 142-168.
- [36] WANG M, YANG H, ERGAS S J, et al. A novel shortcut nitrogen removal process using an algal-bacterial consortium in a photo-sequencing batch reactor (PSBR) [J]. Water Research, 2015, 87: 38-48.
- [37] N. G A I, KARYA, AND, et al. Photo-oxygenation to support nitrification in an algal - bacterial consortium treating artificial wastewater [J]. Bioresource Technology, 2013, 134: 244-250.
- [38] PECCIA J, HAZNEDAROGLU B, GUTIERREZ J, et al. Nitrogen supply is an important driver of sustainable microalgae biofuel production [J]. Trends in Biotechnology, 2013, 31 (3): 134-138.
- [39] CORDELL D, DRANGERT J O, WHITE S. The story of phosphorus: global food security and food for thought [J]. Global Environmental Change, 2009, 19 (2): 292-305.
- [40] BARBERA E, BERTUCCO A, KUMAR S. Nutrients recovery and recycling in algae processing for biofuels production [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 28-42.
- [41] FRANCISCA M S, JOSÉ C M P. Nutrient recovery from wastewaters by microalgae and its potential application as bio-char [J]. Bioresource Technology, 2018, 267: 725-731.
- [42] JOHNSON I, GIRLIAN S, TRIPATHY B K, et al. Algal - bacterial symbiosis and its application in wastewater treatment [M]. Netherlands: Elsevier, 2020: 341-372.
- [43] PRIYADARSHANI I, RATH B. Commercial and industrial applications of micro algae - A review [J]. J Algal Biomass Utiln, 2012, 3 (4): 89-100.
- [44] MIŠURCOVÁ L, BUŇKA F, VÁVRA A J, et al. Amino acid composition of algal products and its contribution to RDI [J]. Food Chemistry, 2014, 151 (4): 120-125.