

微藻培养及其应用于水处理的主要形式

刘伟¹, 潘杨^{1,2*}, 陈园¹

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215011;

2. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 江苏 苏州 215011)

摘要: 综述了微藻培养的主要环境因素有光照、混合程度、溶解氧、pH和温度等, 主要的营养条件有碳源、氮源及磷源, 培养涉及的主要参数(藻浓度、组成及种属、水力停留时间、有效水深、光合效率及光转化效率)及目前研究的主要反应器型式, 为微藻在污水处理中的应用提供参考。藻光合反应器的未来发展主要集中在反应器设计以及生物功能的强化。

关键词: 微藻; 光合生物反应器; 藻生物膜; 反应器型式

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)05-0044-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.05.012

Research progress of microalgae cultivation and its applications in wastewater treatment

LIU Wei¹, PAN Yang^{1,2*}, CHEN Yuan¹

(1. School of Environmental Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. Jiangsu Key Lab of Environmental Science & Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The main environmental factors of microalgae cultivation including light, mixability, dissolved oxygen, pH and temperature are reviewed. The main nutrient conditions such as carbon, nitrogen and phosphorus sources are also introduced. The major culture parameters (the concentration, composition and species of microalgae, and hydraulic retention time, effective depth, photosynthetic efficiency and light conversion efficiency) and the main types of reactors are also presented as references for application of microalgae in wastewater treatment. The future development of microalgae photosynthetic reactor is proposed as the reactor design and enhancement of biological function.

Key words: microalgae; photosynthetic bioreactor; algae membrane reactor; reactor types

藻类作为良好的可再生物质, 广泛存在于各种水体中^[1-2], 并以其世代时间短、生长速度快、产量大等特点, 受到众多研究者的广泛关注^[3-4]。而目前大部分污水厂在进行污水处理时不但消耗外部能量, 而且产生大量的温室气体^[5]。微藻是自养型光合微生物, 能够在光照下将吸收的温室气体 CO₂ 转变成有价值的脂质、碳水化合物、色素及蛋白质等, 其本身还可炼制生物酒精^[6], 其应用于污水处理, 不仅能实现污染物的去除, 还能实现资源和能源的回收。

1 微藻培养的条件

1.1 环境条件

1.1.1 光照

光照是光合自养型藻的主要外界能量输入, 是提高藻产量的主要限制因素^[7]。太阳辐射不同波长的光, 部分被微藻用于光合作用, 其他部分则转化成热能。蓝光(420~470 nm)和红光(650~680 nm)对藻

细胞的生长较为有利^[8]。在不同波长条件下, *Scenedesmus sp.* 的产量: 白光(包含红光和蓝光) > 红光 > 蓝光 > 绿光。光强影响藻体内的物质合成, 给雨生红球藻(*H. pluvialis*) 提供足够的光强后, 虾青素的合成量增加了3倍^[6]。光强上限和下限分别为光饱和点(light saturation point, LSP)、光照补偿点(light compensation point, LCP)。当光强小于LCP, 微生物表观上衰减; 等于LCP时, 微生物得以维持能量平衡; 介于LCP和LSP之间, 生物量才会增加^[1,9]。光强大于LSP会抑制微藻生长, 甚至导致光漂白现象^[10], 微藻在光照和黑暗交替的环境下生长不容易产生光闭塞现象, 交替频率增高, 藻产量也随之增加^[11]。

1.1.2 混合程度

良好的混合能够提高传质推动力, 保证营养物质的传输和代谢产物的释放^[12]。混合手段主要有转轮、空压机和泵。混合程度小, 则传质弱, 藻产量低; 混合度过大, 剪切力会破坏藻细胞^[13]。光合作

收稿日期: 2015-10-08; 修回日期: 2016-03-08

基金项目: 江苏省“333”学术带头人培养工程资助项目(331491201); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 环境工程江苏省重点专业类项目

作者简介: 刘伟(1987-), 男, 硕士生; 潘杨(1972-), 博士, 教授, 研究方向为废水生物脱氮除磷和地表水水质修复技术, 通讯联系人, 0512-68416711, panyang@mail.usts.edu.cn。

用产生氧气(O_2),去除或减少产物 O_2 将促进光合作用^[14]。混合程度显著影响系统微藻对光能的获取。混合使光照面上的微藻不断更新,使系统中微藻处于光照与黑暗的交替状态,有利于光合作用。

1.1.3 溶解氧、pH及温度

光合作用是产氧过程,产物积累会减缓反应的进行,所以溶解氧(DO)不宜过高。藻的最适pH(7~9)因种属而异,实验室条件下常采用8.2~8.7^[5],生化处理后的出水pH通常接近中性,一般不作pH调节。pH影响藻的生长速率,而藻的生长会使pH升高,这种情况下可用富含 CO_2 的气体进行调节。温度对藻影响较大,小试培养温度通常为25~30℃,户外应用试验一般不进行控制,夏天需采取遮阳措施,防止温度过高,又可减少水分蒸发及防止光闭塞现象。

1.2 营养条件

1.2.1 碳源

藻有4种营养型:专性光合自养型、光合异养型、兼养型和异养型。 CO_2 是光合自养型微藻主要的碳源。Chiu等^[15]用 CO_2 体积分数为2%、10%和25%的气体曝气进行混合培养,证明了 CO_2 体积分数为2%时最佳。故自养型微藻应主要用来对污水二级处理出水中的营养元素进行深度处理。兼养型藻既能光合作用,又能利用有机物。异养型藻能够利用多种不同的碳源,产量比其他营养型高,但有机碳源浓度过高会抑制藻的生长^[16]。

1.2.2 氮源和磷源

微藻的主要营养元素要属氮(N)和磷(P),吸收的摩尔比为 $N:P=11:1\sim 18:1$ 。其次还有一些钠(Na)、钾(K)、镁(Mg)、钙(Ca)、硫(S)、铁(Fe)及微量元素等。微藻培养基质最佳碳氮磷摩尔比(C:N:P)为59:9:1^[17],水体中氮主要有硝态氮、亚硝态氮、氨氮及尿素等。藻类利用氮源的先后顺序为:氨氮>尿素>硝酸盐>亚硝酸盐。高氨氮废水需要稀释后才能用于藻的培养,Hsieh等^[18]用不同尿素浓度的Walne's培养基培养*Chlorella sp.*,发现藻浓度与初始尿素浓度呈正相关,最佳尿素含量为0.2 g/L,而单位质量微生物中的脂质含量与培养基中尿素含量呈负相关,这主要是由于藻细胞物质合成特性决定的,它能够根据环境的变化来改变自身的合成代谢途径。尿素浓度高时,藻直接利用解离出来的铵根离子合成蛋白质,而不会以脂质的形式进行能源的囤积。若以硝态氮为氮源,藻的脂质含量将提高。

藻的培养过程中,总磷(TP)浓度需求并不高,低浓度(>0.1 mg/L)照样可以生长。*Desmodesmus sp.* EJ9-6在TP含量为1(I)、2.5(II)、4.5(III) mg/L的厌氧消化液稀释液中表现出对磷良好的去除,在4 d内I和II中的磷基本为0,III中去除率达到51.24%。微藻在不同水质条件下除磷能力不同,从经过生物滤池及养鱼池处理的出水、经过升流式厌氧污泥床(UASB)反应器处理的食物加工废水、CAS工艺处理后的猪粪废水和物理处理后的化工废水中去除磷的效率分别为88.6%、53.7%、44.6%和18.7%^[19]。

2 微藻培养系统涉及的主要参数

微藻生长系统的主要生物参数有生物浓度、组成及种属;设计参数有水力停留时间(HRT)、水深、藻浓度;主要系统特性参数包括光合效率(PE)及光转化效率。

藻浓度过高易造成对光的竞争,通常为200~300 mg/L,当达到50 mg/L时就已呈现深绿色^[20]。藻细胞的组成主要有脂质、蛋白质、叶绿素a等,其含量和相对比例受生长环境的营养条件影响,不同种属也各有不同,这也决定了藻后续资源化的价值高低。对于纯培养条件下种属单一,开放系统中的种属往往不单一,特定的环境条件会使系统产生优势种属,混合培养下的某些藻之间还会存在一定的协同作用^[21]。

HRT的选择主要取决于参与反应的生物量多少及反应速率的快慢。HRT的设定与培养系统的结构及培养形式有密切关系,与不同藻属的特性也有很大关系,基本在0.6~10 d^[1,22],在膜反应器和生物膜反应器中可取较小值,去除碳和氮比去除磷需要更高的HRT。

深度主要受微生物浓度和混合影响。光照要透过水面照射到水下,则水的浊度不能太高,这就要求微生物浓度不能太高。为了让系统中微生物浓度足够,提高光转化速率,设计者必须选择恰当的深度。反应池深度基本在30 cm左右。

光合效率是藻类利用的光能与系统输入光能的百分比,主要受光照面积、透射深度和藻的浓度影响,通常在1%~11%。光转化效率是转化为生物量的那部分光能与系统接收光能总量之比,单位为g/kW^[3]。

3 微藻用于污水处理的主要形式

微藻培养系统有开放式和封闭式,按藻的生长

状态可分为悬浮生长型和附着生长型,培养系统的类型主要取决于被培养微藻的种类及想获取的目标产物。

3.1 悬浮生长型

开放式池塘及光生物反应器(photo bioreactor, PBR)是 2 种主要的悬浮培养形式。培养池的开放使得系统易受污染和其他微生物的入侵,如浮游动物。这虽对纯培养不利,但对于污水的生态处理是大有裨益的。

开放式池塘主要是跑道式池(race way ponds, RWPs)(图 1),是实践中最常用的形式。其水深大

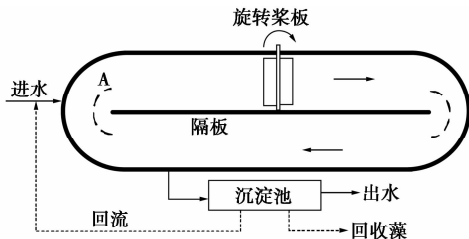


图 1 跑道式藻培养池示意图

约 30 cm^[23],最大生物浓度 100 ~ 8 100 mg/L^[24]。光合效率在 1% ~ 4%,产率为 10.36 mg/(L·d)。PBR 结构形式有立方体和柱状或管状,大高径比能提高光照面体比(反应器光照面积与其有效容积之比)。为减少混合能耗和提高反应器效能,可在反应器中增设挡板改变体系中的流态。

3.2 附着生长型

目前比较常用的附着介质是纤维束,这种材质有利于微生物的附着,成本较低,其较大的比表面积能够大大增加吸附量。Gao 等^[25]在藻生物膜-膜光生物反应器(biofilm membrane photobioreactor, BMPBR)中用这种填料来培养藻,初始接种干藻重 40 mg/L, HRT = 2 h,其藻产量 0.072 g/(L·d),是相同条件下膜光生物反应器(membrane photobioreactor, MPBR)的 1.44 倍。附着介质的材质不一(表 1),形式也多样,有平板的、成束的、球状的等。此外,跑马场(折流板)反应器壁也可为藻类生长提供附着点。

表 1 不同藻生物膜光生物反应器(BMPBR)

生物膜系统	藻属	附着介质	培养条件	产量
垂直单板 BMPBR ^[10]	<i>S. obliquus</i> , <i>Botryococcus braunii</i> SAG 30.81	醋酸/硝酸纤维素膜 (以玻璃为固定板,滤 纸夹层)	人工海水,2% CO ₂ ,30℃,冷荧光 灯(日光),户内	5.2 g/(m ² ·d);日光:50 ~ 80 g/(m ² ·d);PE:10.8% ~17.3%
水平板 BMPBR ^[25]	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Pseudanabaena sp.</i> , <i>Scenedesmus acutus</i> 为优势藻属的混合种群	以钢筋为骨架的混 凝土板	污水二级处理出水,日光,平均光 照 1.57 MJ/(m ² ·d)	12.21 g/(m ² ·d)
旋转 BMPBR ^[26]	<i>Chlorella vulgaris</i> (UTEX#265)	棉管织物	11 ~ 35℃,转速 50 r/min,日光, HRT = 14 d	垂直旋转:11.36 g/(m ² ·d), 三角旋转:5.72 g/(m ² ·d)
填料 BMPBR ^[1]	<i>C. sorokiniana</i> strain211/8k	发泡玻璃珠	混合培养,36 W/840 荧光灯	—
板式 BMPBR ^[27]	市政污水厂二沉淀池表面的自 然藻群	砂纸打磨过的 PVC 板	污水二级处理的模拟出水,定轨 振荡器振速 100 r/min,25℃,体积分 数 2% CO ₂ ,光照 40 mmol/(m ² ·s ¹)	2.1 ~ 7.7 g/(m ² ·d)

4 藻类的收获

系统中藻量会不断地增长,过大的藻密度使其对营养物的竞争加剧,代谢有害产物浓度也会升高,不利于系统的高效率运行,所以要进行藻的收获,之所以称之为收获,主要是因为其将被资源化。这类类似于活性污泥系统要排除剩余污泥。藻收获主要有以下几个措施:①向藻混合液中投加絮凝剂,然后进行沉淀;②离心脱水^[23];③膜技术。

投加絮凝剂不仅会产生较多的固体,还会使回流水对藻培养系统产生不利影响。藻生物膜系统的藻相对较密实,沉降性能好,可以直接将附着介质去

除进行机械剥离,脱水能量需求仅为开放式池塘的 1%^[28]。膜组件与光合反应器的组合型式有内置式和外置式。膜技术的使用,使藻的收获变得更加方便,获得的藻所含杂质少,使用价值更高,膜主要分为微滤膜、纳滤膜、超滤膜,膜主要有以下优点:①不需投加任何化学物质,实现良好的固液分离^[25,28];②能够在长期内稳定运行;③与其他工艺组合方式灵活多样。

5 结语

微藻用于污水处理,不仅实现污染物的去除,还能获得资源和能源的回收,更是利用太阳能的有效

手段,有利于污水处理的节能和碳减排。未来发展主要集中在:①培养系统结构上的改善,以提高内部的混合度,提高反应器效能;②藻属的选择、混合种属之间及藻与活性污泥之间相互协同作用,以利于反应的快速进行。针对微藻后续资源化系统及设备的研发应作为一项综合性的系统工程,如此可形成较为完整的产业链。

参考文献

- [1] Zhu J Y, Rong J F, Zong B N. Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel[J]. Chinese J Catalysis, 2013, 34: 80 - 100.
- [2] Chen G Y, Zhao L, Qi Y. Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review [J]. Appl Energ, 2015, 137: 282 - 291.
- [3] Havlik I, Lindner P, Scheper T, et al. On-line monitoring of large cultivations of microalgae and cyanobacteria[J]. Trends Biotechnol, 2013, 31(7): 406 - 414.
- [4] Tan J, Nik-Sulaiman N M, Tan R R, et al. A hybrid life cycle optimization model for different microalgae cultivation systems[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 299 - 302.
- [5] Kyung D, Kim M, Chang J, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant[J]. J Cleaner Production, 2015, 95: 117 - 123.
- [6] Markou G, Nerantzis E. Microalgae for high-value compounds and biofuels production: A review with focus on cultivation under stress conditions[J]. Biotechnol Adv, 2013, 31: 1532 - 1542.
- [7] Gette-Bouvarot M, Mermillod-Blondin F, Lemoine D, et al. The potential control of benthic biofilm growth by macrophytes—A mesocosm approach[J]. Ecol Eng, 2015, 75: 178 - 186.
- [8] Michael C, Del Ninno M, Gross M, et al. Use of wavelength-selective optical light filters for enhanced microalgal growth in different algal cultivation systems[J]. Bioresour Technol, 2015, 179: 473 - 482.
- [9] Boelee N C, Temmink H, Janssen M, et al. Balancing the organic load and light supply in symbiotic microalgal-bacterial biofilm reactors treating synthetic municipal wastewater[J]. Ecol Eng, 2014, 64: 213 - 221.
- [10] Liu T Z, Wang J F, Hu Q, et al. Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production[J]. Bioresour Technol, 2013, 127: 216 - 222.
- [11] Liao Q, Li L, Chen R, et al. A novel photobioreactor generating the light/dark cycle to improve microalgae cultivation[J]. Bioresour Technol, 2014, 161: 186 - 191.
- [12] Chen C Y, Yeh K L, Chang H Y, et al. Strategies to improve oil/lipid production of microalgae in outdoor cultivation using vertical tubular-type photobioreactors[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 2755 - 2758.
- [13] Han F, Pei H Y, Hu W R, et al. Optimization and lipid production enhancement of microalgae culture by efficiently changing the conditions along with the growth-state [J]. Energy Convers Manage, 2015, 90: 315 - 322.
- [14] Bernstein H C, Kesaano M, Moll K, et al. Direct measurement and characterization of active photosynthesis zones inside wastewater re-mediating and biofuel producing microalgal biofilm[J]. Bioresour Technol, 2014, 156: 206 - 215.
- [15] Chiu S Y, Kao C Y, Huang T T, et al. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. Cultures[J]. Bioresour Technol, 2011, 2: 9135 - 9142.
- [16] Azma M, Mohamed M S, Mohamad R, et al. Improvement of medium composition for heterotrophic cultivation of green microalgae, *Tetraselmis suecica*, using response surface methodology [J]. Biochem Eng J, 2011, 53: 187 - 195.
- [17] Ji M K, Abou-Shanab R A I, Kim S H, et al. Cultivation of microalgae species in tertiary municipal wastewater supplemented with CO₂ for nutrient removal and biomass production [J]. Ecol Eng, 2013, 58: 142 - 148.
- [18] Hsieh C H, Wu W T. Cultivation of microalgae for oil production with a cultivation strategy of urea limitation[J]. Bioresour Technol, 2009, 100: 3921 - 3926.
- [19] Van Den Hende S, Carré E, Cocaud E, et al. Treatment of industrial wastewaters by microalgal bacterial flocs in sequencing batch reactors [J]. Bioresour Technol, 2014, 161: 245 - 254.
- [20] Hidaka T, Inoue K, Suzuki Y, et al. Growth and anaerobic digestion characteristics of microalgae cultivated using various types of sewage[J]. Bioresour Technol, 2014, 170: 83 - 89.
- [21] Cho D H, Ramanan R, Heo J, et al. Enhancing microalgal biomass productivity by engineering a microalgal-bacterial community[J]. Bioresour Technol, 2015, 175: 578 - 585.
- [22] Valigore J M, Gostomski P A, Wareham D G, et al. Effects of hydraulic and solids retention times on productivity and settleability of microbial (microalgal-bacterial) biomass grown on primary treated wastewater as a biofuel feedstock [J]. Water Res, 2012, 46: 2957 - 2964.
- [23] Schoepp N G, Stewart R L, Sun V, et al. System and method for research-scale outdoor production of microalgae and cyanobacteria [J]. Bioresour Technol, 2014, 166: 273 - 281.
- [24] Rosenberg J N, Mathias A, Korth K, et al. Microalgal biomass production and carbon dioxide sequestration from an integrated ethanol biorefinery in Iowa: A technical appraisal and economic feasibility evaluation [J]. Biomass Bioenerg, 2011, 35: 3865 - 3876.
- [25] Gao F, Yang Z H, Li C, et al. Concentrated microalgae cultivation in treated sewage by membrane photobioreactor operated in batch flow mode [J]. Bioresour Technol, 2014, 167: 441 - 446.
- [26] Gross M, Wen Z Y. Yearlong evaluation of performance and durability of a pilot-scale Revolving Algal Biofilm (RAB) cultivation system [J]. Bioresour Technol, 2014, 171: 50 - 58.
- [27] Boelee N C, Temmink H, Janssen M, et al. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilm [J]. Water Res, 2011, 45: 5925 - 5933.
- [28] Boulêtreau S, Charcosset J Y, Gamby J, et al. Rotating disk electrodes to assess river biofilm thickness and elasticity [J]. Water Res, 2011, 45: 1347 - 1357. ■