利用膜光生物反应器培养和预采收钝顶螺旋藻的条件

王雪飞[1,2]，任洪艳[*1,2]，阮文权[1,2]，徐 倩[1,2]

（1. 江南大学 环境与土木工程学院，江苏 无锡 214122；2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室，江苏 无锡 214122）

摘要：为降低钝顶螺旋藻培养和采收成本，利用膜光生物反应器（MPBR）进行钝顶螺旋藻培养和预采收的条件研究实验。实验结果表明：当生物量达到 1.8 g/L 时可进行微藻采收；初始藻液质量浓度为 1.828 g/L 时，MPBR 中最大体积浓缩系数为 2，最佳稀释率为 0.08 d^{-1}，藻产品质量浓度可达 3.319 g/L；获得 1 g 微藻生物量，MPBR 中可节约水、氮、磷的量分别为 0.301 L、0.248 g、0.053 g。与传统光生物反应器（PBR）相比，MPBR 能够降低微藻培养和采收的成本。

关键词：钝顶螺旋藻；培养；预采收；膜光生物反应器

中图分类号：X 172　**文章编号**：1673-1689(2019)07-0108-08　**DOI**：10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.07.015

Conditions Studies of *Spirulina platensis* Cultivation and Pre-Harvesting in a Membrane Photobioreactor

WANG Xuefei[1,2]，*REN Hongyan*[1,2]，*RUAN Wenquan*[1,2]，*XU Qian*[1,2]

（1. School of Environment and Civil Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

Abstract：In order to reduce costs in the *Spirulina platensis* culture and harvest process，a membrane photobioreactor（MPBR）was used for *Spirulina platensis* cultivation and pre-harvsting. The results showed when the biomass attained about 1.8 g/L，microalgae could be harvested. And when the initial algal biomass concentration was 1.828 g/L，the maximum volume concentration factor was 2 in MPBR. The optimum dilution rate was 0.08 d^{-1} and the concentration of biomass product was up to 3.319 g/L during the cultivation in MPBR. The amount of water saving，nitrogen saving and phosphorus saving were 0.301 L，0.248 g and 0.053 g respectively when per 1 g biomass product was harvested in MPBR. The costs of microalgae cultivation and harvesting could be reduced in MPBR compared with the traditional photobioreactor（PBR）.

Keywords：*Spirulina platensis*，cultivation，pre-harvsting，membrane photobioreactor

收稿日期：2016-03-03

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金项目（JUSRP51512）；高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助项目（20120093120011）。

* **通信作者**：任洪艳（1979—），女，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事能源微藻固碳方面的研究。E-mail：renhongyan@jiangnan.edu.cn

引用本文：王雪飞，任洪艳，阮文权，等. 利用膜光生物反应器培养和预采收钝顶螺旋藻的条件[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(07)：108-115.

微藻细胞富含蛋白质、脂质和多糖等,在食品、医药以及化工等方面应用越来越广泛[1-4]。螺旋藻是一种多细胞丝状蓝藻(*Blue Green Algae*),又称蓝细菌(*Cyanobacteria*),是微藻培养的典型藻种,具有生长速度快、不易被污染、营养物质丰富等特点[5]。

限制微藻大规模工业化利用的主要因素是藻产品成本较高,尤其是在微藻培养和采收方面[6-7]。微藻培养过程中,营养盐成本占微藻培养成本比重很大,其中碳源、氮源及磷源成本占微藻培养总成本的20%~30%[8];同时,微藻培养需要消耗大量的水资源。此外,藻细胞的采收问题也是限制微藻技术商业化应用的瓶颈之一。采收过程中存在微藻生物量偏低、藻水分离难度大、藻细胞不易收获等技术问题[9],这与微藻细胞微小、带负电荷、在水中处于稳定的悬浮状态、很难通过重力沉降实现固液分离[10]有关。因此,降低微藻培养过程中营养盐和水资源消耗,寻求高效率的微藻分离采收技术是当前亟需解决的问题。

目前微藻培养系统的两种主要类型是开放式跑道池和封闭式光生物反应器(photobioreactor,PBR)[11]。传统的PBR没有固液分离功能,反应器中的水力停留时间(hydraulic retention time,HRT)和微藻停留时间(microalgae retention time,MRT)是相同的,获得的生物质浓度较低,给后续采收过程带来很大的难度。为解决这个问题,可在膜光生物反应器(membrane photobioreactor,MPBR)模式下培养微藻。MPBR是微藻培养和采收的一种全新的方法,它将光生物反应器同过滤器相耦合,进而将HRT和MRT分开,实现固液分离[12]。且膜过滤操作简单,在微藻培养和采收方面的应用越来越多,Su[13]等人在MPBR中利用电厂污水培养栅藻;Bilad[14]等人利用浸没式微滤膜采收微藻生物质;同时MPBR中过滤液可以再循环用作微藻培养液[15]。此外通过膜的过滤作用,提高藻产品生物量浓度,在采收过程中无需使用助凝剂和絮凝剂等化学药品。

作者选取钝顶螺旋藻作为培养对象,在PBR和MPBR中进行培养和预采收,考察不同初始藻密度和稀释率下螺旋藻的生长及其对营养盐消耗利用情况,比较得出MPBR在提高藻产品质量浓度,节约水资源,节约营养盐等方面的有效性,为规模化高密度培养和预采收微藻提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

藻种:采用钝顶螺旋藻,编号FACHB-901,购自中科院水生生物研究所淡水藻种库。

培养基:采用的改良的Zarrouk培养基配方[16],见表1、表2。

表1 改良的Zarrouk培养基

Table 1 Modified Zarrouk medium

试剂	质量浓度/(g/L)	试剂	质量浓度/(g/L)
NaCl	1.00	$NaNO_3$	2.50
K_2HPO_4	0.50	K_2SO_4	1.00
Na-EDTA	0.08	$MgSO_4·7H_2O$	0.20
$FeSO_4·7H_2O$	0.01	$NaHCO_3$	18
$CaCl_2$	0.40	A_5	1.00 mL

表2 微量元素储备液A_5

Table 2 Trace element stock solution A_5

试剂	质量浓度/(g/L)	试剂	质量浓度/(g/L)
H_3BO_3	2.86	$MnCl_2$	1.81
$ZnSO_4·7H_2O$	0.22	$CuSO_4·5H_2O$	0.08
$(NH_4)6Mo_2O_{24}$	0.02		

1.2 实验装置

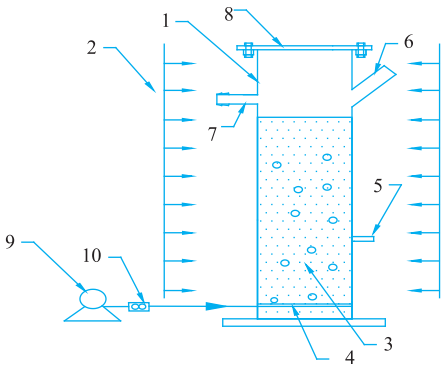
采用光生物反应器(PBR)作为钝顶螺旋藻的培养容器,实验装置见图1。反应器为中空柱体,由有机玻璃制成,壁厚6 mm,内径144 mm,总高575 mm,有效容积为7.4 L,微藻培养时放置于GXZ-380B光照培养箱中。

膜光生物反应器(MPBR)实验装置见图2。膜组件为PVDF微滤膜,孔径1 μm,膜面积为0.025 m^2。将膜组件放入过滤槽中,一端与蠕动泵相连,对藻液进行抽滤、浓缩。

1.3 实验设置

考察钝顶螺旋藻在PBR中生物量的变化,将培养至对数期的藻种接入PBR中,使其初始光密度值约为0.5,于光强3 000 Lux、温度(30±1)℃、光周期16/8(day/night)条件下培养。在培养期间利用空气泵以曝气的方式向PBR中不间断通入空气,气速为1.63 L/min,气体流量采用转子流量计控制。每天测培养初始和结束时测定硝态氮、磷酸盐和溶解性无机碳浓度等指标,初步确定微藻在PBR中生物量变

化和营养盐消耗情况,为后期实验选取合适的生物量进行培养和采收提供参考。实验设置 3 组平行样,结果取平均值。



1.光生物反应器;2.光源;3.藻液;4.微孔曝气管;5.取样口;6.进样口;7.出气口;8.法兰;9.空气泵;10.气体流量计

图 1　光生物反应器实验装置

Fig. 1　Schematic illustration of PBR

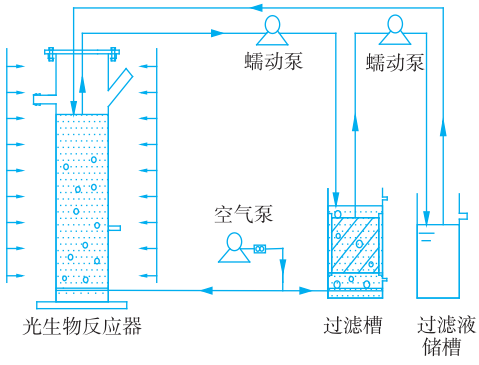


图 2　膜光生物反应器实验装置

Fig. 2　Schematic illustration of MPBR

考察 PBR 中不同稀释率和生物量对钝顶螺旋藻生长和预采收的影响,根据初步确定的钝顶螺旋藻在 PBR 中生物量的变化情况,选择不同生长时期的螺旋藻进行研究。实验采用半连续操作,稀释率分别选取 D=0.05、0.08、0.10、0.13 d^{-1}。每天采收一定体积的藻液作为藻产品，同时加入相同体积的 Zarrouk 培养基,维持 PBR 中藻液体积不变,不同稀释率下每天采收藻液和补加 Zarrouk 培养基的体积见表 3。每天测定采收藻产品的 OD_{560} 值。光强、温度等培养条件同上。实验设置 3 组平行样,结果取平均值。

表 3　不同稀释率下 PBR 中每天采收藻液和补加 Zarrouk 培养基的体积

Table 3　Volumes of harvesting algae suspension and Zarrouk medium during different dilution rates in PBR every day

稀释率/d^{-1}	采收藻液体积/mL	补加培养基体积/mL
0.05	370	370
0.08	592	592
0.10	740	740
0.13	962	962

考察利用 MPBR 培养和预采收钝顶螺旋藻,根据 PBR 实验结果,选择合适的生物量进行实验。将膜组件安装在过滤槽中,利用蠕动泵将反应器中藻液抽至过滤槽中，通过膜组件对其进行过滤浓缩。蠕动泵转速设置为 100 r/min,每 5 分钟测量抽得的过滤液体积,过滤槽中浓藻液体积,计算膜通量和体积浓缩系数,确定一定藻质量浓度下适宜的体积浓缩系数。MPBR 不同稀释率对螺旋藻生长和预采收的影响实验中,采用半连续操作,稀释率分别选取 D=0.08、0.10、0.13 d^{-1}。通过膜组件的过滤作用,实现藻液浓缩得到藻产品,同时将过滤液循环至光生物反应器中重复利用。每天对藻产品进行采收,同时利用一定体积的去离子水代替 Zarrouk 培养基补加至光生物反应器中,维持反应器中藻液体积不变,不同稀释率下每天采收藻液、过滤液,藻产品和补加去离子水的体积见表 4。每天测定反应器中藻液、藻产品 OD_{560} 值,计算得生物量质量浓度;培养初始每天取藻液 30 mL，测定培养初始和结束时反应器中藻液 pH 值、硝态氮和磷酸盐浓度。光强、温度等培养条件同上。实验设置 3 组平行样,结果取平均值。

1.4　指标测定及计算方法

生物量质量浓度:通过已知干质量钝顶螺旋藻液在 560 nm 下的光密度值，做生物量质量浓度与 OD_{560} 的相关性曲线,通过每天测定螺旋藻液 OD_{560},计算生物量质量浓度[17]。

pH 值：使用 Delta 320 型数字式酸度计(Mettler-Toledo,德国)测定。

硝态氮质量浓度:采用紫外分光光度法测定[18]。

磷酸盐质量浓度：采用钼锑抗分光光度法测定[18]。

表 4　不同稀释率下 MPBR 中每天采收藻液、获得过滤液,藻产品体积和补加去离子水的体积

Table 4　Volumes of harvesting algae suspension, penetrant, algae product and added deionized water every day during different dilution rates in MPBR

稀释率/d^{-1}	采收藻液体积/mL	过滤液体积/mL	藻产品体积/mL	补加去离子水体积/mL
0.08	592	296	296	326
0.10	740	370	370	400
0.13	962	481	481	511

溶解性无机碳浓度:采用酸碱指示剂滴定法[19]。

稀释率:每天加入至反应器中 Zarrouk 培养基的体积与反应器中培养基总体积之比即为稀释率(dilution rate,D),计算公式:

$$D=\frac{V_{in}}{V} \quad (1)$$

式中:D 为稀释率(d^{-1});V_{in} 为 PBR 中每天加入新鲜 Zarrouk 培养基的体积 (L/d);V 为 PBR 中培养基总体积(7.4 L)。

膜通量:

$$J=\frac{Q}{A} \quad (2)$$

式中:J 为膜通量(L/(m^2·min));Q 为流量(L/min);A 为膜表面积(m^2)。

体积浓缩系数:

$$\upsilon=\frac{F_{in}}{F_{retentate}} \quad (3)$$

式中:υ 为体积浓缩系数;F_{in} 为加入至过滤槽中藻液体积(L);$F_{retentate}$ 为过滤槽中剩余藻液体积(L)。

2　结果与分析

2.1　PBR 中钝顶螺旋藻的生长情况

考察钝顶螺旋藻在 PBR 中的生物量变化,结果见图 3(a)。随着培养时间的进行,藻密度逐渐增大,第 1~10 天螺旋藻生长较快,生物量达到 1.837 g/L;培养至第 16 天,生物量稳定在 2.122 g/L 左右;从 3(b)中可以看出,随着螺旋藻的生长,pH 值从初始 9.14 升高至 9.88,在螺旋藻生长的适合范围内[20]。为维持 PBR 中适宜的藻浓度,保证较高生物量质量浓度下螺旋藻的快速生长,提高生物量产率,同时避免 PBR 中藻质量浓度太高而产生光遮蔽现象,根据生长曲线知,螺旋藻在第 7~10 天生长较快,生物量较高,所以选择螺旋藻生物量质量浓度在 1.5~1.8 g/L 范围内进行后续实验。

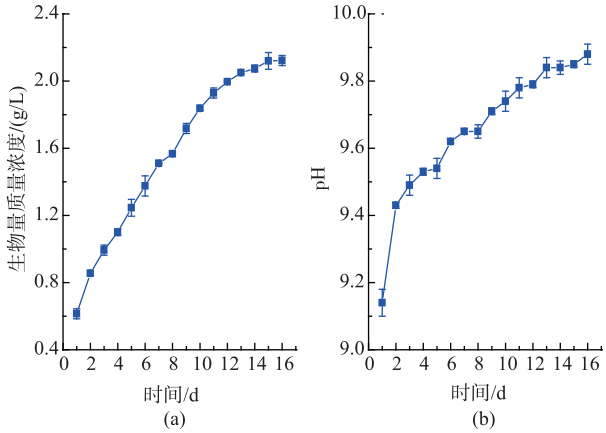


图 3　钝顶螺旋藻在 PBR 中生物量和 pH 变化

Fig. 3　Changes of Spirulina platensis biomass concentration and pH in PBR

分析培养始末培养液的营养盐浓度,结果见表 5。经过 16 d 的培养,HCO_3^-和 NO_3^-–N 浓度明显减小,分别减少了 83.13 mmol/L 和 124.34 mg/L,表明藻类利用 HCO_3^-和 NO_3^-–N 作为生长的碳源和氮源;CO_3^{2-}浓度从初始 30.60 mmol/L 升高至 77.75 mmol/L;培养过程中 HCO_3^-浓度减少,CO_3^{2-}浓度升高的原因是在水溶液中无机碳以 CO_2、HCO_3^-、CO_3^{2-}这 3 种碳源形式存在,三者存在相互转化的动态平衡:

$$HCO_3^- \xleftrightarrow{K_1} CO_2+OH^-$$

$$HCO_3^-+OH^- \xleftrightarrow{K_2} H_2O+CO_3^{2-}[21]$$

Zarrouk 培养基中采用碳酸氢钠作为无机碳源,主要以 HCO_3^-形式存在,此时微藻同化来自 HCO_3^-中的 CO_2,当 CO_2 被利用后,再不断从 HCO_3^-中重新释出 CO_2,使得上述平衡向左移动[20]。PO_4^{3-}–P 浓度变化不大,分析磷源利用较少的原因可能是需要磷元素参与合成的核酸,ATP 等含磷化合物在藻细胞中的含量较低[8]。同时发现培养结束时培养液中仍有一定浓度的 HCO_3^-,NO_3^-–N 以及 PO_4^{3-}–P 剩余,表明初始添加量完全可以满足藻体的生长需要,因此基于成本考虑,可适当减少 Zarrouk 培养基中营养盐浓度。

2.2　PBR 中不同稀释率和生物量质量浓度对钝顶螺旋藻生长和采收的影响

当 PBR 中螺旋藻生物量质量浓度达到 1.540 g/L

时,进行不同稀释率对螺旋藻生长和采收的影响实验,结果见图 4。当 D=0.05 d^{-1} 和 D=0.08 d^{-1} 时,PBR 中螺旋藻生物量能够保持稳定,即采收一定藻液后,一天时间内 PBR 中螺旋藻生物量质量浓度能够恢复到初始值 1.540 g/L 左右;当稀释率增大到0.10 d^{-1} 时,PBR 中生物量质量浓度开始出现下降;当D=0.13 d^{-1} 时,藻产品生物量质量浓度明显下降,至 1.270 g/L,PBR 中出现明显的冲刷现象,表明在一定时间内,采收的生物量大于反应器中微藻的增殖量,导致反应器中生物量质量浓度不断降低,无法稳定运行。据此得到螺旋藻初始生物量质量浓度为 1.540 g/L,最佳稀释率为 0.08 d^{-1}。

表 5 培养初始和结束时营养盐浓度变化

Table 5 Changes of nutrient concentrations in medium at the initial and final of cultivation

营养盐	初始	结束
CO_3^{2-}/(mmol/L)	30.60	77.75
HCO_3^-/(mmol/L)	150.38	67.25
PO_4^{3-}-P/(mg/L)	79.83	78.28
NO_3^--N/(mg/L)	412.22	287.88

为进一步增加螺旋藻的生物量产率,考察 PBR 中螺旋藻生物量质量浓度为 1.802 g/L 时稀释率为 D=0.05、0.08、0.10、0.13 d^{-1} 时的螺旋藻的生长情况,结果见图 4。当 D=0.05 d^{-1} 和 D=0.08 d^{-1} 时,PBR 中螺旋藻的生物量质量浓度能够稳定在 1.8 g/L 左右,表明此时较高的藻质量浓度下,并未产生明显的光遮蔽而影响螺旋藻生长速率;当 D 增大到 0.10 d^{-1} 和 0.13 d^{-1} 时,PBR 中生物量质量浓度逐渐下降,出现冲刷现象,导致反应器中生物量质量浓度不断降低。因此,螺旋藻初始生物量质量浓度为 1.802 g/L 时,PBR 的最佳稀释率为 0.08 d^{-1}。为提高螺旋藻的采收量,选择螺旋藻初始生物量质量浓度为 1.8 g/L 左右进行后续 MPBR 的相关实验。

2.3 MPBR 中培养和预采收钝顶螺旋藻

2.3.1 *体积浓缩系数的确定* MPBR 中利用膜组件对藻液进行过滤,浓缩时,增大藻液的体积浓缩系数可提高藻产品生物量浓度,但体积浓缩系数太高会加重膜污染,因此需选择合适的体积浓缩系数。藻液质量浓度为 1.855 g/L 时,于过滤槽中进行实验,结果见图 5。随着体积浓缩系数的增大,藻液质量浓度变大,膜通量逐渐降低;第30 分钟时藻液体积浓缩系数达到 2.082,此时膜通量由初始值 3.803 L/(m^2·min) 下降至 2.970 L/(m^2·min),下降了 21.92%。在膜组件使用过程中,为保持较高的膜通量水平,提高膜的使用寿命,防止膜污染加重对膜造成损坏以及增加运行成本,在一定压力下,当膜通量下降 20%左右时,需进行膜清洗[22]。因此,利用 PVDF 膜组件过滤,浓缩生物量质量浓度约为 1.8 g/L 的藻液时,体积浓缩系数最大为 2,可最大程度浓缩藻液。

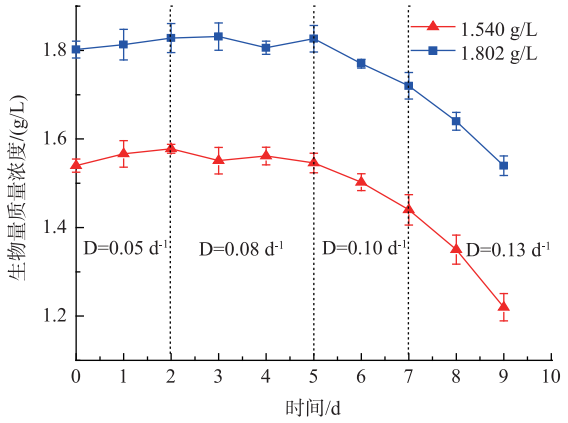


图 4 初始生物量质量浓度为 1.540 g/L 和 1.802 g/L 时藻产品生物量质量浓度随稀释率的变化

Fig. 4 Changes of algae product biomass concentration during different dilution rates with 1.540 g/L and 1.802 g/L initial biomass concentrations

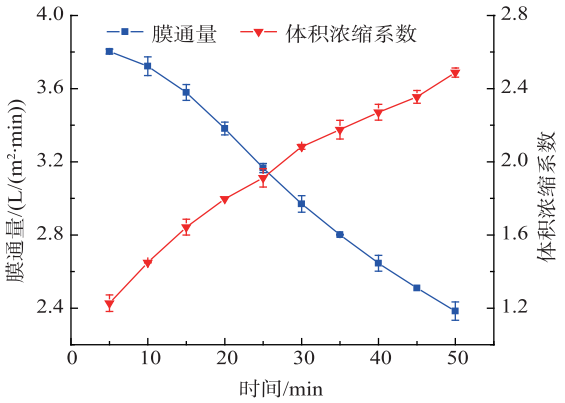


图 5 膜通量和藻液体积浓缩系数的变化

Fig. 5 Changes of membrane flux and volumetric concentration factor

2.3.2 *MPBR 中不同稀释率对钝顶螺旋藻生长和预采收的影响* 选择体积浓缩系数为 2,初始藻液质量浓度为 1.828 g/L 进行 MPBR 中不同稀释率对螺旋藻生长和预采收的实验研究。不同稀释率下钝顶螺旋藻生物量质量浓度和 pH 变化见图 6。从图 6(a)可以看出,D=0.08 d^{-1} 时反应器中螺旋藻生物量

质量浓度稳定在 1.820 g/L 左右;D=0.10 d^{-1} 时生物量质量浓度开始下降,开始出现冲刷现象;当 D 增大到 0.13 d^{-1} 时生物量质量浓度持续下降,出现了明显的冲刷现象,导致反应器中生物量质量浓度不断降低。因此,确定 MPBR 的最佳稀释率为 0.08 d^{-1}。此外,膜组件的过滤作用使藻产品生物量质量浓度明显提高,最高可达 3.319 g/L。本实验中体积浓缩系数约为 2,与 Bilad[15]文献报道中体积浓缩系数为 4.4 有一定差异,可能与膜组件,藻种等条件有关。因此,为进一步增大体积浓缩系数,后期长期连续实验中考虑改进过滤槽结构,合理选择膜组件材质、孔径、结构等条件;同时进行减缓膜污染的相关研究,提高膜的使用寿命,进而明显减少后续采收过程的能耗和成本。培养过程中 MPBR 中藻液 pH 变化见图 6(b)。螺旋藻生长过程中 pH 不断上升,波动范围为 9.4~9.8,与图 2(b)中 pH 变化趋势相似,均在螺旋藻生长的适合范围内[20]。

在培养过程中对培养液中的氮磷进行了监测,氮磷质量浓度变化见图 7。研究发现,氮磷质量浓度均随着培养时间的进行而下降,分别从初始的 297.338、75.945 mg/L 分别减少至 198.908、55.105 mg/L。分析原因可能有两个:一是螺旋藻对营养盐的吸收利用作用;二是因为每天采收一定体积的藻液,同时加入去离子水,其稀释作用使得培养液中离子浓度不断下降。在第 7 天实验结束时,培养液中均剩余一定量氮磷营养盐,pH 值也在螺旋藻生长的适合范围内,表明实验中培养液中氮磷质量浓度能够满足螺旋藻的生长需求,加入的去离子水并未对螺旋藻的生长产生不良影响。由此可见,一定时间内可以用一定体积的去离子水代替 Zarrouk 培养基补加到光生物反应器中,节约营养盐,降低螺旋藻培养成本。但在长期实验中,向Zarrouk 培养基中加入去离子水的量要控制在保证营养盐满足螺旋藻生长需求的范围内。

MPBR 中可将浓缩藻液过程中获得的过滤液循环至光生物反应器中重复利用,减少微藻培养过程中营养盐和水资源的消耗量,降低培养成本。最佳稀释率 D=0.08 d^{-1} 条件下,每天培养结束采收藻液后,MPBR 中需补加 296 mL 过滤液和 296 mL 去离子水(忽略培养初始时取藻液 30 mL),PBR 中需补加 592 mL Zarrouk 培养基;由此可见,与 PBR 相比,MPBR 每天节约水资源、氮、磷营养盐的使用量分别为 296 mL 水、1.48 g $NaNO_3$、0.296 g K_2HPO_4;MPBR 中生物质平均采收量 0.983 g/d,即获得 1 g 生物量,MPBR 中可节约水、氮、磷的量分别为 0.301 L、0.248 g、0.053 g。此外,在后续实验长期连续运行后,水资源和营养盐的消耗量会进行具体的核算。

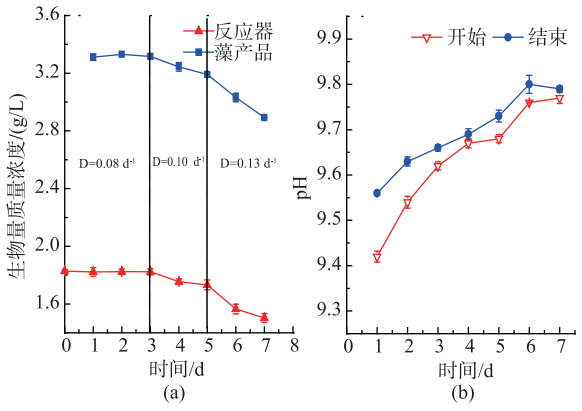


图 6 MPBR 中不同稀释率下钝顶螺旋藻生物量和 pH 变化

Fig. 6 Changes of Spirulina platensis biomass concentration and pH during different dilution rates in MPBR

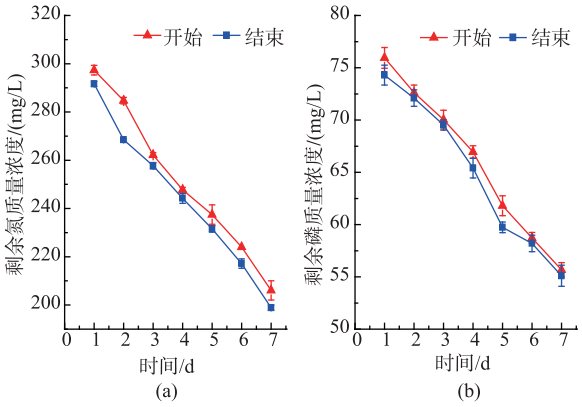


图 7 培养开始和结束时藻液中氮磷变化

Fig. 7 Changes of nitrogen and phosphorus in medium at the initial and final of culturing

Livansky 等[23]研究发现培养基循环利用会导致斜生栅藻生物量产率降低,微藻自身代谢物的积累会限制微藻的生长;可能是由于藻细胞对矿质营养盐有离子选择性吸收的特性[8],尤其是在长期、大量的循环利用过滤液时,过滤液中非限制性营养物质的积累可能会抑制微藻的生长[15];同时微藻在生长过程中或者细胞溶解时释放的某些代谢物(例如脂类、多糖、蛋白质等)[24-25]也会对微藻产生抑制作用[26]。但在本实验中,过滤液循环使用没有对微藻的生

长产生不利影响，一方面可能是因为实验时间较短,且每天补加去离子水对非限制性营养物质的积累起到一定的稀释作用;另一方面是因为本实验培养液中生物量质量浓度在 2 g/L 以下(Livansky [23]研究中斜生栅藻生物量达到了 3 g/L)，微藻培养液中非限制性营养物质以及藻细胞自身代谢产物等积累量很低,不足以对微藻的生长产生抑制作用。

3 结 语

基于 PBR 和 MPBR 培养和预采收钝顶螺旋藻,确定了不同初始生物量质量浓度和稀释率对螺旋藻生长和预采收的影响以及 MPBR 在提高藻产品质量浓度,节约水资源,节约营养盐等方面的有效性。初始生物量质量浓度约为 1.8 g/L 时进行螺旋藻采收;与 PBR 相比,稀释率为 0.08 d^{-1} 时获得 1 g 生物量,MPBR 中可节约水、氮、磷的量分别为 0.301 L、0.248 g、0.053 g。实验结果表明,膜组件的加入可完全截留藻细胞,实现微藻培养和采收过程中的固液分离,提高藻产品质量浓度,减轻微藻采收过程中后续脱水的能耗和成本；同时循环利用过滤液,节约水资源节约营养盐,降低了微藻培养成本。

参考文献:

[1] 赵强强. 酱油制曲及螺旋藻酱油生产工艺的研究[D]. 山东:中国海洋大学,2012.

[2] WANG Hong,HE Qiuju. Development of Spirulina health noodles[J]. **Grain and Oil Food Science and Technology**,2007,(1):50-52.(in Chinese)

[3] ZHU Wangfei,QIANIAN Shengfeng. Spirulina nutrition value and prospect of development and utilization[J]. **Feed Expo**,2005,(11):36-38.(in Chinese)

[4] LIANG Kehong. Progress in studies and application of the algae protein [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2015(6):569-574.(in Chinese)

[5] 边磊. 微藻对氮磷营养盐的脱除利用与废水净化[D]. 杭州:浙江大学,2010.

[6] PIENKOS P T,DARZINS A. The promise and challenges of microalgal-derived biofuels[J]. **Biofuels Bioprod Biorefining**,2009,3(4):431-440.

[7] WANG B,LI Y,WU N,et al. CO_2 bio-mitigation using microalgae[J]. **Applied Microbiological Biotechnology**,2008,79:707-718.

[8] 鲍亦璐. 微藻培养过程的营养优化与控制研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[9] 马冬冬. 基于微藻的光 - 膜组合式生物反应器处理海水养殖业废水[D]. 青岛:中国海洋大学,2005.

[10] CHRISTENSON L,SIMS R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment,biofuels,and bioproducts[J]. **Biotechnology Advances**,2011,29(6):686-702.

[11] GREENWELL H C,LAURENS L M L,SHIELDS R J,et al. Placing microalgae on the biofuels priority list:a review of the technological challenges[J]. **Journal Of the Royal Society Interface**,2010,7(46):703-726.

[12] GAO F,ZHAO H Y,CHEN L,et al. Concentrated microalgae cultivation in treated sewage by membrane photobioreactor operated in batch flow mode[J]. **Bioresource Technology**,2014,167:441-446.

[13] SU Z F,LI X,HU H Y,et al. Culture of Scenedesmus sp. LX1 in the modified effluent of a wastewater treatment plant of an electric factory by photo-membrane bioreactor[J]. **Bioresource Technology**,2011,102(17):7627-7632.

[14] BILAD M R,VANDAMME D,FOUBERT I,et al. Harvesting microalgal biomass using submerged microfiltration membranes[J]. **Bioresource Technology**,2012,111:343-352.

[15] BILAD M R,DISCART V,VANDAMME D,et al. Coupled cultivation and pre-harvesting of microalgae in a membrane photobioreactor(MPBR)[J]. **Bioresource Technology**,2014,155:410-417.

[16] GODIA F,ALBIOL J,MONTESINOS J L,et al. A loop of interconnected bioreactors to develop life support in space[J]. **Journal of Biotechnology**,2002,99(3):319-330.

[17] MANICKUM T,JOHN W. The current preference for the immuno-analytical ELISA method for quantitation of steroid hormones (endocrine disruptor compounds) in wastewater in South Africa[J]. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**,2015,407:4949-4970.

[18] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002:246-268.
[19] SYDNEY E B,STURM W,CARVALHO J C,et al. Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae[J]. **Bioresource Technology**,2010,101(15):5892-5896.
[20] MA Chenhao,YU Lijuan,PENG Qijun. The effects of pH on the growth of *Spirulina platensis*[J]. **China Food Additives**,2004(4):68-71.(in Chinese)
[21] YANG Yujuan,REN Hongyan,MIAO Hengfeng,et al. Optimization of environmental factors affecting the potential of carbon fixation of *Spirulina platensis*[J]. **Chinese Journal of Environmental Engineering**,2013,7(7):2795-2800.(in Chinese)
[22] 朱方旭. 预处理—微滤膜处理微污染水的试验研究[D]. 南昌:南昌大学,2012.
[23] LIVANSKY K,DEDIC K,BINOVA J,et al. Influence of the nutrient solution recycling on the productivity of *Scenedesmus obliquus*,utilization of nutrients and water in outdoor cultures[J]. **Arch Hydrobiol Suppl Algol Stud**,1996,114:105-113.
[24] YU Y,HU H Y,LI X,et al. Accumulation characteristics of soluble algal products(SAP) by a freshwater microalga Scenedesmus sp. LX1 during batch cultivation for biofuel production[J]. **Bioresource Technology**,2012,110:184-189.
[25] HARUN R,SINGH M,FORDE G M,et al. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**,2010,14:1037-1047.
[26] RODOLFI L,ZITTELLI G C,BARSANTI L,et al. Growth medium recycling in *Nannochloropsis* sp. mass cultivation [J]. **Biomolecular Engineering**,2003,20:243-248.

科　技　信　息

欧盟批准一种大肠杆菌产生的 L-苏氨酸作为饲料添加剂

据欧盟官方公报消息,2019 年 5 月 29 日,欧盟委员会发布(EU)2019/894 号条例,批准大肠杆菌 CGMCC 7.232 产生的 L-苏氨酸作为所有动物饲料添加剂。

根据附件中规定的条件,此种添加剂被授权作为动物营养添加剂。所属添加剂类别为“工艺性添加剂”,功能组别为“氨基酸、氨基酸盐及其类似物”,授权结束日期为 2029 年 6 月 18 日。本条例自发布之日起第二十天生效。

[信息来源]食品伙伴网. 欧盟批准一种大肠杆菌产生的 L-苏氨酸作为饲料添加剂 [EB/OL]. (2019-5-31). http://news.foodmate.net/2019/05/520644.html