

# 用管式光生物反应器培养螺旋藻的研究

刘晶璘 李元广 张嗣良\*

(华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室 上海 200237)

**关键词** 光生物反应器, 钝顶螺旋藻, 高密度培养, 光暗比, 幕律流体

**分类号** TQ92 **文献标识码** A **文章编号** 1000-3061(1999)04-0525-28

微藻大规模培养主要有敞开式大池培养和封闭式光生物反应器培养两种主要方式。管式光生物反应器是封闭式光生物反应器的主要类型之一。与其它类型相比,管式光生物反应器放大较易,成本较低。国外关于管式光生物反应器已有不少研究<sup>[1-3]</sup>但关于管式光生物反应器产率与光强和光暗比的关系等方面的研究尚未得出明确的结论。国内管式光生物反应器的研究较少<sup>[4]</sup>,尚未见有关管式光生物反应器中微藻悬浮液流变特性基础参数和产率影响因素的报道。

螺旋藻是丝状体蓝藻,螺旋藻蛋白质含量高,其蛋白质所含必需氨基酸丰富,是国内外大规模商业化生产的少数几种微藻之一<sup>[5]</sup>。螺旋藻的光合效率高,又由于螺旋藻藻体较大、藻丝长、容易采收,而且其适宜的生长 pH 高,不易受到污染,使其作为基因工程宿主藻有较大优势,目前已有很多研究机构正在积极探索,并取得一定进展<sup>[6-8]</sup>。基因工程藻的培养由于安全原因必须用封闭式光生物反应器培养。

我们利用自制的细管式光生物反应器,对螺旋藻进行了高度培养。研究了螺旋藻液的流变特性,并运用半连续培养研究了光强对反应器产率的影响,以及光暗比对反应器体积产率与面积产率的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 反应器

试验用管式光生物反应器由光源、集光玻璃管、脱气筒和蠕动泵等几部分组成(见图 1)。反应器的集光玻璃管放在光照培养箱内,光源设在集光玻璃管上方,为平行排列的 4 只 YZ40RR 型荧光灯管,通过调节集光玻璃管与光源的距离可以控制光照强度。集光玻璃管总长 7.5mm。内径为 5.4mm。脱气筒远离光源,放在恒温水浴中控制温度。由蠕动泵推动藻液在反应器中循环流动,蠕动泵的型号为 FE411,由 B.BRAUN 公司出品。

### 1.2 光暗比的调节

试验用管式光生物反应器的集光玻璃管的长度和管径固定不变,因此,反应器照光部分的体积是固定不变的。通过调节脱气筒中藻液的存留量,就可以改变反应器的暗体积,也就调节了光照体积与暗体积的比例,即光暗比。

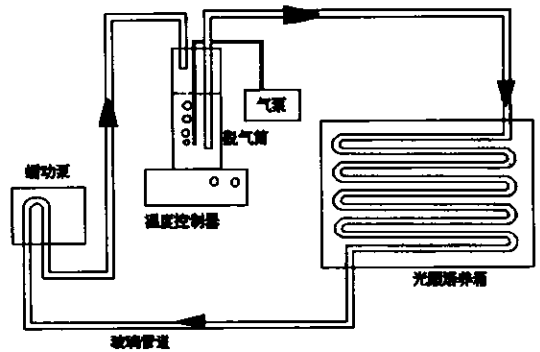


图 1 管式光生物反应器示意图

第一作者现在中国科学院上海植物生理研究所工作。

\* 通讯联系人。

收稿日期:1998-08-01, 修回日期:1999-03-15。

### 1.3 培养条件

采用的藻种为钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*),使用 Zarrouk 培养基<sup>[9]</sup>,温度控制在30℃,用盐酸调节pH在9.8附近。高密度培养采取批培养方式。测定光强及光暗比对产率的影响采取半连续培养方式,即每天早晚2次放出一定量的藻液,再加入等体积的新鲜培养基,通过调节稀释率维持藻液浓度稳定。

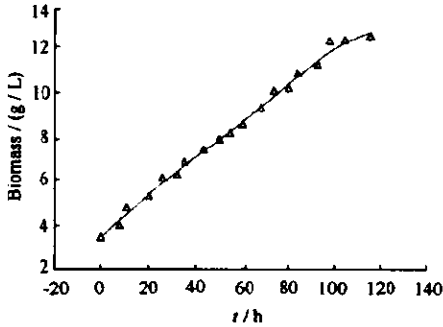


图2 螺旋藻高密度培养生长曲线

管式光生物反应器有优越的供光条件,培养基的养分含量成为高密度培养的主要障碍之一。此外,培养过程中pH上升很快,最高时曾达到pH=12.3,成为生长的另一重要限制因素。经反复试验,通过提高培养基主要成份的浓度,培养过程中用盐酸调节pH,经过近五天的培养,藻液浓度达到12.4 g/L。通常在大池培养时,藻液的浓度在1 g/L以下<sup>[5]</sup>。细管式光生物反应器,适合进行高密度培养。

光强对光生物反应器的产率有直接影响。图3显示了光照强度对管式光生物反应器体积产率的影响,有本试验的光照强度范围内,随着光强的增加,产率逐渐提高。

### 2.2 光暗比对产率的影响

集光管水平放置的管式光生物反应器中的藻液在任何时刻总是分别处于光照部分和暗部分,光照体积与暗体积之比是影响管式光生物反应器产率的重要因素之一。图4显示了光暗比对本反应器体积产率的影响,在光强为10860 lx下,光暗比为1.23时,体积产率为1.11 g/(L·d),光暗比为0.76时,体积产率为1.09 g/(L·d),两者相差很小;但当光暗比降至0.50时,体积产率下降到0.65 g/(L·d),下降幅度达40%以上;光强为7030 lx时,也有类似的情况,不过由于光照强度较低,所有3种光暗比下的体积产率均低于10860 lx下的产率。这说明,设计这类光生物反应器光暗比应高于某一临界值,若低于该光暗比临界值会严重影响单位体积产率,而高于该临界值再继续提高光暗比,体积产率基本保持稳定不变,我们称这种现象为光暗比饱和现象,该光暗比临界值就称为光暗比饱和点。

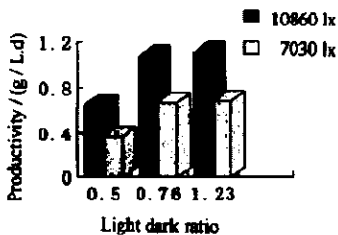


图4 光暗比对体积产率的影响

### 1.4 测定方法

藻液粘度用德国 BRABENDER RHEOTRON 旋转式流变仪测定;光照强度测定用2DS-10自动量程照度计(上海嘉定学联仪表厂)测定;螺旋藻干重测定,用事先称过恒重的定量滤纸对藻液进行抽滤,洗涤后在105℃下烘半小时,然后80℃下烘至恒重称量,经计算得到藻体干重。

## 2 结果与分析

### 2.1 螺旋藻高密度培养及光强对产率的影响

图2为钝顶螺旋藻高密度培养的生长曲线。由于

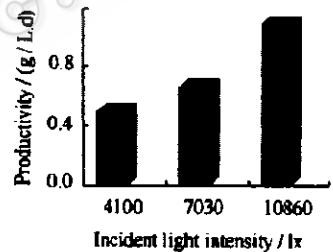


图3 光强对反应器体积产率的影响

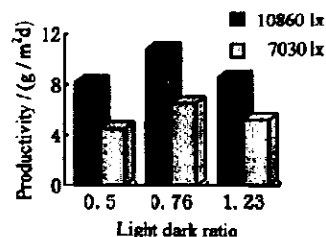


图5 光暗比对面积产率的影响

光暗比饱和概念不同于植物生理学中的光饱和概念,光饱和概念描述的是随着光强的增加达到某临界值后,植物的光合作用同化速率达到饱和不再随光强的增加而提高的现象。<sup>[10]</sup>光暗比饱和概念描述的是,在特定的光强下,随着光暗比增加,光生物反应器的体积产率逐渐增加,当光暗比增加到某一临界值时,体积产率稳定在一定水平上,不再继续增加的现象。

我们的试验表明,在光强低于光饱和点时,仍然有光暗比饱和现象。从图 4 和图 5 中可以看到光强从 7030 lx 提高到 10860 lx 各个光暗比下,无论是体积产率还是面积产率都有很大提高,这说明光强 7030 lx 肯定在光饱和点以下,此时仍然有光暗比饱和现象。在 7030 lx 光强下,光暗比从 0.76 增加到 1.23,体积产率分别为 0.66g/(L·d)和 0.68g/(L·d),基本维持同一水平,光暗比 1.23 已高于光暗比饱和点。这说明光强低于光饱和点时仍然存在光暗比饱和现象。这也说明光暗比饱和概念与光饱和概念是有本质区别的。

光暗比与单位面积产率的关系不同于光暗比与体积产率的关系,本试验的管式光生物反应器的照光体积是固定不变的,光暗比的调节是通过调节暗体积来实现的。从图 5 可以看出,当光暗比为 0.76 时,单位面积产率最高,光暗比过高和过低单位面积产率都有很大程度的下降。这说明以单位面积产率来衡量,存在着最佳光暗比,在此光暗比下,单位受光面积产率最高。这一结论对光生物反应器的设计优化具有理论指导意义。

### 2.3 螺旋藻液的流变特性

在管式光生物反应器的设计中需要计算藻液在管道中的流动阻力以及流动中的雷诺准数,以便判断藻液流动的流态<sup>[11]</sup>。另外,在培养过程中,随着藻液浓度的变化,藻液的粘度会发生变化,这会影响到藻液在管路中的流速,还会影响到集光管中藻液的径向混合。为此,我们对螺旋藻液的流变特性进行了测定。图 6 为螺旋藻液剪切应力与剪切率之间关系的双对数坐标图。结果表明,钝顶螺旋藻液属幂律流体,2 个不同浓度藻液的剪切应力对数与剪切率之间有良好的线性关系,相关系数均大于 0.9995,其流体动力学特性可由下式描述:

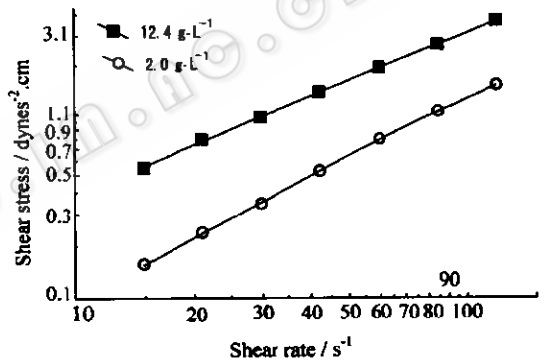


图 6 螺旋藻液剪切应力与剪切率的关系

$$\tau_w = K(\dot{\gamma}_w)^n$$

式中  $\tau_w$  为剪切应力,  $\dot{\gamma}_w$  为剪切率,  $n$  为幂律指数,  $K$  为稠度系数。表 1 给出了 2 个不同浓度藻液的幂律指数和稠度系数。从表 1 中可以看出,随着藻液浓度的增加,藻液的稠度系数增大,藻液变得粘稠。在维持藻液流动速度不变的情况下,管路中的流动阻力就会增加,若流动最初处于湍流状态,则湍动的

剧烈程度就会下降,甚至退化为层流,那么,集光管中藻液的径向混合强度也会减弱,甚至趋向于零。当藻液浓度较高时,集光管背光一侧的藻液是处在暗区的,集光管内光照区与暗区的藻液得不到对流交换,这会严重影响管式光生物反应器的光能利用效率。

表 1 钝顶螺旋藻液的幂律指数和稠度系数

藻液浓度/(g/L)	幂律指数 $n$	稠度系数 $K(N \cdot s^n \cdot m^{-2})$
2.0	1.125	0.00758
12.4	0.914	0.0472

致 谢 刘志结同学参加了部分实验,陈剑佩老师在流变测定时给予了很大帮助。在研究过程中,还得到了中国科学院北京植物研究所施定基教授的指导,在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] S. J. Pirt *et al.* *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 1983, 33b: 35~58.
- [ 2 ] M. R. Tredici, J. Materassi. *Applied Phycology*, 1992, 4: 221~231.
- [ 3 ] Y. K. Lee. The Compilation of International Seminar On Spirulina Development, 1996, Kunming, China pp. 1~9.
- [ 4 ] 李师翁, 李虎乾. 生物工程学报, 1997, 13(1): 93~97.
- [ 5 ] M. A. Browitzka. *Micro-algal Biotechnology*, Lonton: Cambridge University Press, 1988, pp. 85~118.
- [ 6 ] Yoshikazu Kawata, Shin-ichi Yano, Hiroyuki Kojima Sino-Japan Symposium on Algal Genetic Engineering and Bioreactors, 1997, Qingdao, China pp. 12~13.
- [ 7 ] Zeng Junzhi, Hu Zanmin. Sino-Japan Symposium on Algal Genetic Engineering and Bioreactors, 1997, Qingdao, China pp. 18~19.
- [ 8 ] Thankappan Ajith Kumar *et al.* Sino-Japan Symposium on Algal Genetic Engineering and Bioreactors, 1997, Qingdao, China pp. 20~21.
- [ 9 ] E. W. Becker. *Microalgae Biotechnology and Microbiology*, London: Cambridge University Press, 1994, pp. 9~41
- [ 10 ] 潘瑞炽, 董愚得. 《植物生理学》, 北京: 高等教育出版社, 1995, pp. 106.

**Studies on the Cultivation of *Spirulina platensis* in Tubular Photobioreactor**

Liu Jinglin Li Yuanguang Zhang Siliang

(State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

**Abstract** A tubular photobioreactor was constructed with glass tubing of 5.4mm bore. The high density culture of *Spirulina platensis* was tested and the biomass concentration had gained up to 12.4g/L. The research shows the photobioreactor productivity can be influenced significantly by incident light intensity and light/dark ratio. Along with the increasing of light/dark ratio, the productivity per culture volume increased at first, then the light/dark ratio saturation phenomenon occurred; and the productivity per illuminated area increased at first, after that it decreased. There is an optimum light/dark ratio, at which the productivity per illuminated area is optimized. The dynamic viscosity measurement of the culture liquid shows non-Newtonian behavior and it can be described by power-law equation.

**Key words** Photobioreactor, *Spirulina platensis*, power-law liquid, high density culture, light/dark ratio