

# 平板式光生物反应器中光照强度对极大螺旋藻生长和生理生化的影响

王丽娟, 杨宋琪, 陈银花, 罗光宏\*, 崔岩, 杨生辉

(河西学院, 甘肃省微藻技术创新中心, 甘肃省河西走廊特色资源利用重点实验室, 张掖 734000)

**摘要:** 以极大螺旋藻(*Spirulina maxima*)为材料, 采用平板式光生物反应器在不同光照强度下(278、327、373、420和463  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )对其进行培养。通过测定藻生物量、生长速率、叶绿素a、类胡萝卜素、藻蓝素、可溶性蛋白和可溶性糖的含量探讨光照强度对极大螺旋藻生长和生理生化特征的影响。结果表明, 在光照强度为373  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时螺旋藻生长最快, 生长速率为0.203, 培养10 d后生物量达0.298  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 是初始生物量的6.2倍。极端光强463  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时藻细胞出现死亡。单位质量藻体中叶绿素a、胞内多糖和胞外多糖积累最大值的光强与生长最佳光强相同, 即在373  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时产量均最高。类胡萝卜素在高光强420  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时产量最高, 而藻蓝素和可溶性蛋白在较低光强278  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时含量显著高于其他各处理组。该研究结果可为平板式光生物反应器在螺旋藻规模化培养中的推广提供理论基础。

**关键词:** 极大螺旋藻; 光照强度; 生理生化指标; 光生物反应器

中图分类号: S968.4; S555.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2019)06-0923-06

## Effects of light intensity on the growth, physiological and biochemistry parameters of *Spirulina maxima* in a flat plate photobioreactor

WANG Lijuan, YANG Songqi, CHEN Yinhua, LUO Guanghong, CUI Yan, YANG Shenghui

(Gansu Tech-Innovation Center of Microalgae, Key Laboratory of Hexi Corridor Resources Utilization of Gansu, Hexi University, Zhangye 734000)

**Abstract:** In this study, the effect of light intensity on the biomass and high valued additives of *Spirulina maxima* was explored, which was cultured in the light intensity of 278-463  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  for 10 days in a flat plate photobioreactor. The effects were investigated by determining its biomass, growth rate as well as the contents of chlorophyll a, carotenoid, phycocyanin, soluble protein and soluble sugar. Results showed that the growth rate was the maximum when the light intensity was 373  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . The relative growth rate was 0.203  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , and the biomass reached to 0.298  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  after cultured 10 days, 6.2 times of the initial biomass. When the light intensity was extremely high, of 463  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , the chlorophyll was oxidized and photolyzed, causing the algae becoming yellow even death. The trends of chlorophyll a, intracellular and extracellular polysaccharide contents were in accordance with the growth rate, and the maximum values were presented at 373  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . The carotenoid content was increased with the increase of light intensity, reaching the highest at 420  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , while the phycocyanin and soluble protein were easy to accumulate at lower light intensity of 278  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . This research might provide some theory bases for scale cultivation of *S. maxima* using the flat plate photobioreactor.

**Key words:** *Spirulina maxima*; light intensity; physiological and biochemistry parameters; photobioreactor

螺旋藻(*Spirulina* sp.)是一种低等水生植物, 属于蓝藻门(Cyanophyta)颤藻科(Oscillatoriaceae)螺旋藻属(*Spirulina*), 含有丰富的蛋白质和一些高附加值产物, 如螺旋藻多糖、 $\beta$ -胡萝卜素和藻蓝蛋白等,

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(11665011), 甘肃省高校协同创新科技团队支持计划项目(2017C-17), 甘肃省高等学校科研项目(2017A-086), 甘肃省重点研发计划项目(18YF1WG087) 和河西学院校长科研创新基金重点项目(XZZD2018002)共同资助。

作者简介: 王丽娟, 助理研究员。E-mail: wljhexi@163.com

\* 通信作者: 罗光宏, 教授。E-mail: 13993693452@163.com

使其具有抗氧化、降血糖、降血脂和保护肝脏等多种生物活性<sup>[1-3]</sup>,具有较高的经济价值。目前螺旋藻已从保健食品扩大到食品添加剂、医药、饲料和化妆品等领域。随着应用领域的逐渐扩大,探索针对螺旋藻生物物质和不同高附加值产物的适宜培养条件仍是工业化生产需要解决的重要问题。光生物反应器可以通过优化藻类扩大培养的环境参数获得最佳培养条件,采用光生物反应器来培养微藻愈来愈成为国内外研究的热点<sup>[4-5]</sup>。平板式光生物反应器相对于其他反应器具有结构简单、动力消耗小、容易在室内规模培养等优点,广泛用于微藻的培养<sup>[6]</sup>。但目前采用该类型光生物反应器培养螺旋藻的研究主要集中在不同培养条件对其生物量的影响<sup>[7-9]</sup>,对于其他生理生化指标的影响还鲜见相关报道。

光照强度是影响螺旋藻生长的主要环境因素,为此,本研究采用平板式光生物反应器,系统地比较不同光照强度对螺旋藻生长和生理生化指标的影响,探索螺旋藻生物量和其他高附加值产物积累最大化的生产参数,为该反应器在螺旋藻规模化培养提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 藻种和培养基

极大螺旋藻(*Spirulina maxima*)由甘肃省微藻技术创新中心提供。采用改进的 Zarrouk 培养基培养。配方中含  $\text{NaHCO}_3$   $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NaCl}$   $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NaNO}_3$   $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{KCl}$   $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $0.4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$   $0.05 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{Na}_2\text{EDTA}$   $0.08 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

### 1.2 光生物反应器与培养条件

GBRP-220 型微藻自控光生物反应器来自烟台高新区海洋生物工程研究所。在 220 L 反应器中加入 100 L 的培养基。将对数生长期的螺旋藻过滤得到藻泥,将藻泥直接接种至光生物反应器中。藻细胞初始接种浓度  $OD_{560}$  为  $0.20\pm 0.02$ ,生物量为  $(0.048\ 0\pm 0.001\ 4)\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,培养温度  $25^\circ\text{C}$ ,pH 值 10.0,通入空气量  $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。分别在不同光照强度( $278$ 、 $327$ 、 $373$ 、 $420$  和  $463 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )下进行培养,光周期为 12L:12D。连续培养 10 d。每天测定螺旋藻的生长、生物量、叶绿素 *a*、藻蓝素、类胡萝卜素、蛋白质和多糖的含量。

### 1.3 生长速率和生物量的测定

生长速率的测定:测定波长  $560 \text{ nm}$  处藻液的吸光值,比生长速率  $\mu=(\ln OD_2-\ln OD_1)/(T_2-T_1)$ ,其中  $OD_1$  是第 1 次取样时( $T_1=1$ )的吸光值, $OD_2$  是第 2

次取样时( $T_2=10$ )的吸光值。

生物量的测定:取一定体积藻液,用混合纤维滤膜( $0.45 \mu\text{m}$ )真空抽滤,于  $105^\circ\text{C}$  烘箱中烘至恒重。用单位体积藻体的干重 (DW) 表示: $DW(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})=(W_2-W_1)/V$ 。 $W_1$  为混合纤维滤膜烘至恒重后的质量; $W_2$  为滤膜和藻样烘至恒重后的总质量; $V$  为藻液体积。

### 1.4 叶绿素 *a* 和类胡萝卜素的测定

参照文献[10]并稍作改进,取  $20 \text{ mL}$  藻液,离心去除上清液,加入  $5 \text{ mL}$   $80\%$  丙酮溶液,低温超声  $20 \text{ min}$ ,于  $4^\circ\text{C}$  放置  $24 \text{ h}$ ,离心后测定上清液在波长  $663 \text{ nm}$ 、 $646 \text{ nm}$  和  $470 \text{ nm}$  处的吸光值。按式(1)、(2)和(3)计算叶绿素 *a* 和类胡萝卜素含量:

$$C_a(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})=12.21OD_{663}-2.81OD_{646} \quad (1)$$

$$C_b(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})=20.13OD_{646}-5.03OD_{663} \quad (2)$$

$$C_x(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})=(1\ 000OD_{470}-3.27C_a-104C_b)/229 \quad (3)$$

其中  $C_a$ 、 $C_b$  和  $C_x$  分别代表叶绿素 *a*、*b* 和类胡萝卜素的浓度。

### 1.5 藻蓝素的测定

参照文献[11]并稍作改进。取  $20 \text{ mL}$  藻液,离心去除上清液,加入  $5 \text{ mL}$  磷酸盐缓冲液( $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , pH 7.0),混匀后低温超声  $20 \text{ min}$ ,并于  $-80^\circ\text{C}$  冻融循环 3 次,离心后测定上清液在  $620 \text{ nm}$  和  $652 \text{ nm}$  处的吸光度。藻蓝素含量计算如式(3):

$$PC(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})=0.187OD_{620}-0.089OD_{652} \quad (4)$$

### 1.6 可溶性糖和可溶性蛋白的测定

取  $20 \text{ mL}$  藻液离心,上清液测定胞外多糖。藻泥加入  $5 \text{ mL}$  PBS 缓冲液(pH 7.8),混匀后低温超声  $20 \text{ min}$ ,并于  $-80^\circ\text{C}$  冻融循环 3 次,离心后上清液用于测定胞内多糖和可溶性蛋白<sup>[12]</sup>。可溶性糖的测定采用硫酸蒽酮法,可溶性蛋白的测定采用考马斯亮蓝法。

### 1.7 数据处理

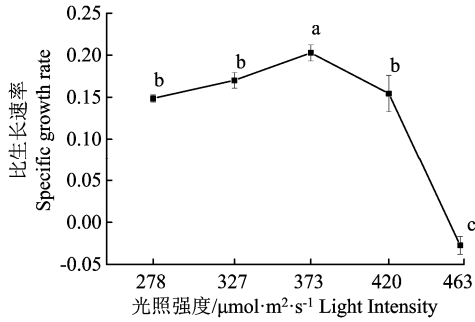
每组实验设置 3 个平行,数据处理与计算使用 Excel 2010 软件,在 SPSS 20.0 统计分析软件中采用 Duncan 法进行各组间显著性差异分析, $P<0.05$  表示有显著性差异。并用 Origin 9.1 进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 光照强度对螺旋藻生长的影响

螺旋藻在不同光照强度下的比生长速率和生物量变化如图 1 和图 2 所示。由图 1 可知,光照强度从  $278 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  增加到  $463 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,螺旋藻的生长速率呈现先上升后下降的趋势。在光照强度为  $373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时生长最快,比生长速率达

0.203, 生物量从开始的 0.048 g·L<sup>-1</sup> 积累到第 10 天的 0.298 g·L<sup>-1</sup>, 显著高于其他各组( $P < 0.05$ ), 表明 373  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  的光强是螺旋藻生长的最佳条件。并且在培养的前 3 d, 其他各组均无明显生长, 第 4 天开始除极端光强 463  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  组螺旋藻出现下降趋势外, 其他各组均进入对数生长期。可见光照强度对螺旋藻的生长影响较大。



不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 下同

Different lowercase letters mean significant difference( $P < 0.05$ ), and the same below

图 1 不同光照强度对螺旋藻比生长速率的影响

Figure 1 Effects of different light intensities on the specific growth rate of *S. maxima*

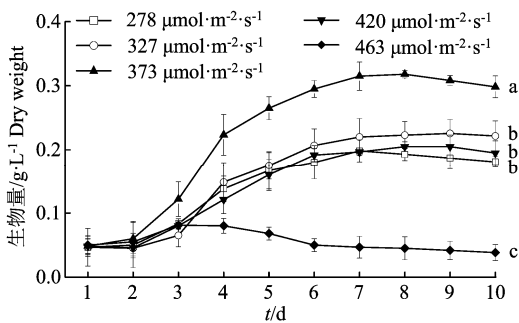


图 2 不同光照强度对螺旋藻生长的影响

Figure 2 Effects of different light intensities on the growth of *S. maxima*

## 2.2 光照强度对螺旋藻叶绿素 a 和类胡萝卜素的含量影响

随着培养时间的延长, 除极端光强组外其他各处理组藻细胞内叶绿素 a 和类胡萝卜素的积累量均逐渐升高(图 3 和图 4)。并且在光照强度为 278~373  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 叶绿素 a 的产量随着光照强度的升高而显著增加, 光照强度大于 373  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 产量开始显著下降。在培养的前 3 d, 除最佳光强 373  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  组叶绿素 a 含量有所上升外, 其他各组含量变化不大, 第 4 天开始极端光强组出现下降, 各处理组的叶绿素 a 含量顺序依次是 373>327>420>278>463  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 这与螺旋藻生长变化趋势一致。而类胡萝卜素在光照强度小于 420

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 随着光强的升高产量一直显著增加, 当光照强度大于 420  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 产量开始显著下降。培养的前 4 d, 各处理组的类胡萝卜素含量顺序依次是 420>373>463>327>278  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。表明随光照强度的升高积累的叶绿素 a 和类胡萝卜素逐渐增多, 并且在一定范围内, 高光强组有利于类胡萝卜素的积累。但当光照强度大于一定值时, 叶绿素 a 和类胡萝卜素含量均出现显著下降趋势。

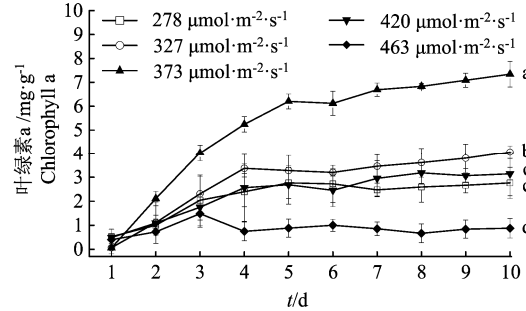


图 3 不同光照强度对螺旋藻叶绿素 a 含量的影响

Figure 3 Effects of different light intensities on the chl a content in *S. maxima*

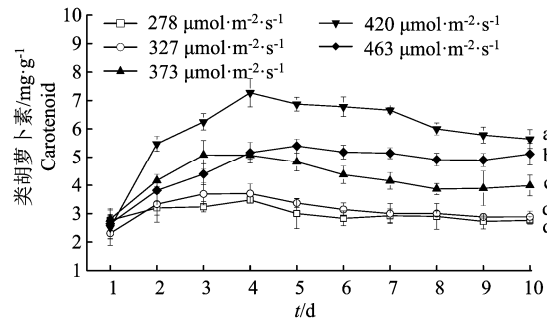


图 4 不同光照强度对螺旋藻类胡萝卜素含量的影响

Figure 4 Effects of different light intensities on the carotenoid content in *S. maxima*

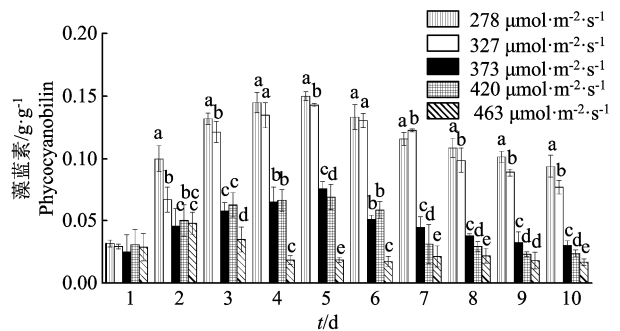


图 5 不同光照强度对螺旋藻藻蓝素含量的影响

Figure 5 Effects of different light intensities on the phycocyanobilin content in *S. maxima*

## 2.3 光照强度对螺旋藻藻蓝素含量的影响

螺旋藻在不同光照强度下的藻蓝素变化如图 5 所示。由图 5 可知, 随着光照强度的增加, 藻蓝素

的积累呈显著下降趋势。光照强度为  $278 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时藻蓝素积累量最高, 达单位质量藻体的  $0.094 \text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而且在低光强 278 和  $327 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 藻蓝素的积累量显著高于其他高光强组。表明低光照强度更有利于藻蓝素的积累。并且除极端光强组外, 其他各处理组培养第 5 天时藻蓝素含量达到最高, 然后呈显著下降趋势。

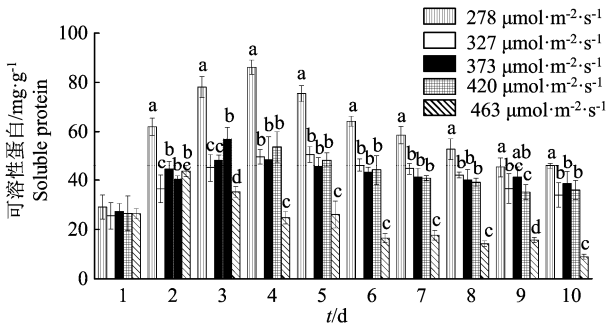
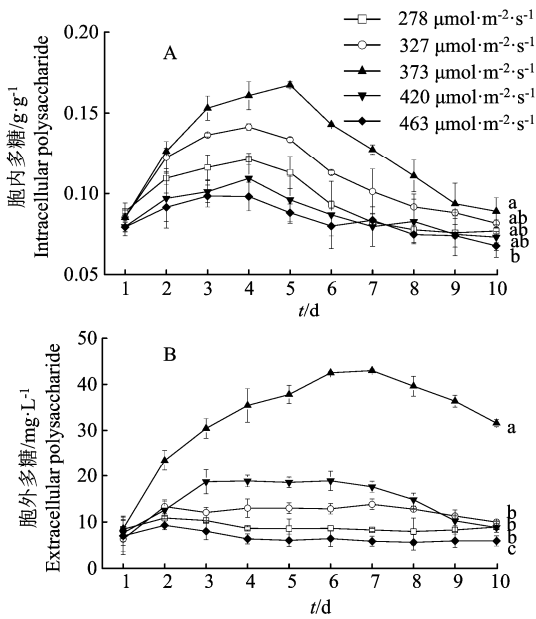


图 6 不同光照强度对螺旋藻可溶性蛋白含量的影响  
Figure 6 Effects of different light intensities on the soluble protein content in *S.maxima*



A. 胞内多糖; B. 胞外多糖

A. Intracellular polysaccharide; B. Extracellular polysaccharide

图 7 不同光照强度对螺旋藻可溶性糖含量的影响

Figure 7 Effects of different light intensities on the soluble sugar contents in *S.maxima*

2.4 光照强度对螺旋藻可溶性蛋白含量的影响

由图 6 可以看出, 可溶性蛋白的含量随光照强度的升高而下降, 低光强  $278 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  组可溶性蛋白含量最高, 达到单位质量藻体的  $45.91 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 显著高于其他各处理组。并且除极端光强组外, 其余各处理组之间无显著差异。而随着培养时间的延

长, 可溶性蛋白含量在第 4 天时达到最大, 随之开始显著下降。第 10 天时低光强组含量下降了 53%。而在极端光强组第 3 天时开始下降, 最后达到最低。

2.5 光照强度对螺旋藻可溶性糖含量的影响

不同光照强度下螺旋藻胞内多糖和胞外多糖含量变化(图 7)结果显示, 当光强小于  $373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 胞内和胞外多糖含量随光强的升高而显著增加; 当光强大于  $373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 胞内多糖含量下降不显著, 胞外多糖含量开始显著下降。表明光照强度  $373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  胞内多糖和胞外多糖的含量最高。不同的是, 胞内多糖在各处理组的含量大小依次是  $373>327>278>420>463 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而胞外多糖在各处理组的含量大小依次  $373>420>327>278>463 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 表明高光强时更利于胞外多糖的积累。并且随着培养时间的延长, 胞内和胞外多糖在各处理组中出现不同程度的下降趋势。

3 讨论与结论

光是影响螺旋藻生长的最重要因子之一。本研究中, 螺旋藻在光照强度小于  $373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时生长速率随着光强的增加而增大,  $373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时达到最高, 可能是  $373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  已经达到了螺旋藻生长的光饱和点。Zarrouk<sup>[13]</sup>在 1966 年测得极大螺旋藻的光饱和区间为  $462\sim555 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , Vonshak<sup>[14]</sup>在螺旋藻生理、细胞和生物技术一书中提到螺旋藻生长的最适光照为  $150\sim200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 本试验结果则显示极大螺旋藻光饱和点处于二者中间。光补偿点、光饱和点和光抑制点均受到培养环境因子的影响, 尤其是光照强度、温度和时间, 因此不宜简单比较。试验中发现在极端光强  $463 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 培养 3 d 后藻体突然变黄而死亡, 这可能是由于光照强度达到了光抑制点, 叶绿素被氧化光解, 藻体变黄, 从而导致光合速率下降, 生长速率降低。因此为了充分利用日光能又避免藻体死亡, 夏季时可以提高接种密度, 使藻细胞能够相互遮阴而减弱光照强度<sup>[15]</sup>。

叶绿素含量的变化反映了藻细胞生理特征的变化。本试验中叶绿素 a 含量大小与螺旋藻生长率趋势基本一致。类胡萝卜素的含量随着光强的升高而增加, 这是由于在高光强下, 藻细胞内产生较多的活性氧自由基<sup>[16]</sup>, 而类胡萝卜素是一种内源性抗氧化剂<sup>[17]</sup>, 可以淬灭多余的氧自由基, 防止脂膜发生过度氧化, 这也是藻体的自我保护; 当光照强度达到极端时, 类胡萝卜素含量依然较高, 可能是因为藻细胞死亡变黄而产生的色素干扰。

藻蓝素在低光强下更利于积累, 和螺旋藻的色素组成以及光能利用率有关<sup>[18-19]</sup>。螺旋藻虽然没有叶绿体但具有叶绿素 a、藻蓝素、别藻蓝素和藻红素, 光合作用是在他们的共同作用下完成的。光能吸收传输路线是: 光照→藻红素→藻蓝素→叶绿素 a。前三者传递光能, 而叶绿素 a 作为光合作用反应中心将光能转化为电能<sup>[20]</sup>。在光照强度较低时, 螺旋藻为了适应环境, 刺激藻蓝素的产生, 通过补偿性的增加光合色素来增强光吸收能力, 从而弥补光照不足引起的光能利用率低和生长缓慢等问题, 维持了光能转换的分布平衡<sup>[21-22]</sup>, 保证了光合作用的正常进行。当光照强度升高时, 藻蓝素含量下降可能是因为光合速率过于旺盛, 导致氮素缺乏而引起光合色素的减少<sup>[23]</sup>。同时在培养后期藻蓝素在各处理组中均出现下降趋势, 可能是由于培养后期营养盐的消耗使氮素缺乏, 藻细胞对氮素饥饿反应使自身含氮大分子降解, 从而引起藻蓝素减少<sup>[24]</sup>。当然, 黑光和弱光条件时, 藻细胞的低生长速率也不利于其合成<sup>[21]</sup>。

植物体内的可溶性蛋白大多是参与各种代谢的酶类。本研究发现螺旋藻可溶性蛋白随光照强度的增加呈下降趋势, 这与石莼、鼠尾藻、海黍子一致<sup>[25-27]</sup>。可能是因为低光强下藻类生长受到抑制, 体内酶水平补偿性的增加, 从而提高藻体对光能的有效利用率。培养后期最低光强  $278 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  组可溶性蛋白出现明显下降, 可能是环境胁迫超过了耐受极限, 细胞受损, 蛋白水解, 可溶性蛋白含量开始下降<sup>[28]</sup>。螺旋藻在极端光强组受胁迫最为严重, 可溶性蛋白含量最低。

胞内多糖积累的最佳条件和生长最适条件相同, 这与文献报道一致<sup>[29]</sup>。胞外多糖在光照强度为  $278\sim 373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 随光强的升高其含量增加, 是由于光合速率过于旺盛而导致氮素缺乏, 从而使自身含氮大分子降解引起碳水化合物如多糖和脂类的积累。这同时与本文中藻蓝蛋白的结果相互互补。各处理组在培养后期胞内和胞外多糖的含量下降可能和培养基中营养盐的消耗有关。氮是影响蓝藻胞外多糖合成的重要因素之一, 而且不论氮浓度还是氮形态都对蓝藻胞外多糖的分泌有重要影响<sup>[30-32]</sup>。因此在培养后期, 可能由于培养基中营养盐的消耗而导致胞内和胞外多糖的合成受阻。

以极大螺旋藻为试验材料, 采用平板式光生物反应器培养, 发现光照强度为  $373 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时有利于其生物量和可溶性糖积累, 高光照  $420 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  有利于其类胡萝卜素积累, 低光照  $278$

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  有利于藻蓝素或可溶性蛋白积累。同时, 在大规模培养时后期添加适量的营养盐有助于提高相关指标的产量。此培养工艺可为极大螺旋藻在平板式光生物反应器中扩大规模培养提供理论依据和技术方法。

## 参考文献:

- [1] 张文, 吴清平, 吴军林. 螺旋藻营养保健价值及开发应用进展[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(3): 89-92.
- [2] 刘灵杰, 陈卫卫, 梁迪, 等. 螺旋藻营养保健作用及脱腥味的研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(2): 213-219.
- [3] SAMARAKOON K, JEON Y J. Bio-functionalities of proteins derived from marine algae: A review[J]. Food Res Int, 2012, 48(2): 948-960.
- [4] 徐明芳, 郭宝江. 光生物反应器在螺旋藻大规模培养中的应用前景[J]. 水产学报, 1998, 22(2): 162-169.
- [5] 刘娟妮, 胡萍, 姚领, 等. 微藻培养中光生物反应器的研究进展[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 772-777.
- [6] 许波, 王长海. 微藻的平板式光生物反应器高密度培养[J]. 食品与发酵工业, 2003, 29(1): 36-40.
- [7] 苏贞峰, 薛升长, 康瑞娟, 等. 平板式光生物反应器培养液混合强度对螺旋藻生长的影响[J]. 中国生物工程杂志, 2009, 29(3): 51-56.
- [8] 石峰, 刘冉, 纪瑞杰, 等. 平板式光生物反应器中钝顶螺旋藻高密度培养的工艺优化[J]. 农业生物技术学报, 2016, 24(3): 461-468.
- [9] XUE S Z, SU Z F, CONG W. Growth of *Spirulina platensis* enhanced under intermittent illumination[J]. J Biotechnol, 2011, 151(3): 271-277.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 75.
- [11] 刘传琳, 徐春野, 徐庆勇, 等. 利用生物反应器培养钝顶螺旋藻的研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 1999, 12(2): 127-132.
- [12] 王长海, 贾顺义. 盐度对紫球藻生长及氮磷利用的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 194-197.
- [13] ZARROUK C. Contribution a l'etude d'une cyanophycee: Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et photosynthese de *Spirulina maxima*[D]. Paris: University of Paris, 1966.
- [14] VONSHAK A. Outdoor mass production of *Spirulina*: The basic concept. *Spirulina platensis* (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology[M]. London: Taylor & Francis Ltd, 1997: 87.
- [15] 鲁纯养, 车凤琴, 周荣, 等. 光照度和温度对螺旋藻生长速率及品质的影响[J]. 北京农业工程大学学报, 1992, 12(2): 31-37.
- [16] 鹿宁, 臧晓南, 张学成, 等. 逆境胁迫对藻类抗氧化酶系统的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2012, 58(2): 119-124.
- [17] THIRUMALA M. Optimization of growth of *spirulina platensis* LN1 for production of carotenoids[J]. IJPSR, 2012, 1(2): 152-157.

- [18] 尤珊, 郑必胜, 郭祀远. 光照对螺旋藻生长和形态的影响[J]. 微生物学杂志, 2002, 22(6): 58-59.
- [19] KUMAR M, KULSHRESHTHA J, SINGH G P. Growth and biopigment accumulation of cyanobacterium *Spirulina platensis* at different light intensities and temperature[J]. Braz J Microbiol, 2011, 42(3): 1128-1135.
- [20] 魏泽英, 杨明莉, 谭辉玲. 螺旋藻藻蓝色素对叶绿体仿生膜光电效应的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1997, 20(6): 114-116.
- [21] WYMAN M, FAY P. Underlight water climate and the growth and pigmentation of planktonic blue-green algae(Cyanobacteria) I. The influence of light quantity[J]. Proc R Soc Lond B-Biol Scis, 1986, 227 (1248): 367-380.
- [22] 方哲, 刘敏, 梁磊, 等. 光照强度对琼枝麒麟菜生长及色素含量的影响[J]. 水产养殖, 2012, 33(10): 44-46.
- [23] 尤珊, 郑必胜, 郭祀远. 光照对螺旋藻形态及胞外多糖的影响和机理[J]. 海湖盐与化工, 2004, 33(1): 23-25, 31.
- [24] VAN EYKELENBURG C, FUCHS A, SCHMIDT G H. Some theoretical considerations on the in vitro shape of the cross-walls in *Spirulina* spp[J]. J Theor Biol, 1980, 82(2): 271-282.
- [25] 王巧晗, 董双林, 田相利, 等. 光照强度对孔石莼生长和藻体化学组成的影响[J]. 海洋科学, 2010, 34(8): 76-80.
- [26] 姜宏波, 田相利, 董双林, 等. 温度和光照强度对鼠尾藻生长和生化组成的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 185-189.
- [27] 詹冬梅, 吴海一, 刘梦侠, 等. 光照强度对海黍子生长及部分生化指标的影响[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 140-144.
- [28] 宋玉芝, 孔繁璠, 王敏, 等. 光照强度及附植藻类对狐尾藻生理指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 233-239.
- [29] 刘娟妮, 王雪青, 庞广昌. 温度和光照对极大螺旋藻多糖含量和 SOD 酶活力的影响[J]. 食品工业科技, 2008, 29(9): 132-134.
- [30] 葛红梅, 周旭萍, 夏令, 等. 光强和氮源对念珠藻胞外多糖分泌的影响[J]. 水生生物学报, 2014, 38(3): 480-486.
- [31] 郑怡, 刘艳如. 培养条件对极大螺旋藻胞内和胞外多糖含量的影响[J]. 中国海洋药物, 2001, 20(6): 29-31.
- [32] 张欣华, 杨海波, 于媛, 等. 不同培养条件对海洋微藻多糖含量的影响[J]. 生物学杂志, 2000, 17(6): 17-18.