

# 光质对等鞭金藻的生长和生物活性产物合成的影响

钟彩荣<sup>1</sup>, 陈钦常<sup>1</sup>, 许涵玥<sup>1</sup>,  
曾子航<sup>1</sup>, 徐绍丝<sup>1</sup>, 车丹丹<sup>1,2</sup>, 方静平<sup>1\*</sup>, 何勇锦<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>福建师范大学生命科学学院; <sup>2</sup>福建师范大学工业微生物教育部工程研究中心, 福州 350117

**摘要:** 本实验探究白光(400~700 nm)、红光(620~650 nm)和绿光(500~580 nm)对等鞭金藻(*Isochrysis* sp. ISO-FJ)的生长和生物活性产物积累的协同影响,以期摸索适宜的光质同时提高其生物活性产物。实验结果表明,等鞭金藻细胞在白光条件下具有最大的生物量。在生物活性产物合成方面,与白光和红光相比,采用绿光培养的等鞭金藻细胞更有利于岩藻黄素、胞外多糖和多不饱和脂肪酸的联产合成。这些结果可表明,等鞭金藻的生长和活性产物合成是受不同光质的调节,为今后定向调控等鞭金藻生长和活性产物合成提供实践依据和理论指导。

**关键词:** 等鞭金藻; 光质; 岩藻黄素; 胞外多糖; 多不饱和脂肪酸

中图分类号: Q935

文献标识码: A

文章编号: 1001-6880(2023)10-1775-07

DOI: 10.16333/j.1001-6880.2023.10.014

## Effect of different light qualities on the growth and bioactive compounds biosynthesis of *Isochrysis* sp. ISO-FJ

ZHONG Cai-rong<sup>1</sup>, CHEN Qin-chang<sup>1</sup>, XU Han-yue<sup>1</sup>,  
ZENG Zi-hang<sup>1</sup>, XU Shao-si, CHE Dan-dan<sup>1,2</sup>, FANG Jing-ping<sup>1\*</sup>, HE Yong-jin<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Life Sciences, Fujian Normal University;

<sup>2</sup>Engineering Research Center of Industrial Microbiology, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

**Abstract:** In order to explore the appropriate light quality to simultaneously improve multiple bioactive compounds productivities, the synergistic effects of white light(400-700 nm), red light(620-650 nm) and green light(500-580 nm) on the microalgal growth and bioactive compounds biosynthesis of *Isochrysis* sp. ISO-FJ were investigated. The results showed that *Isochrysis* sp. ISO-FJ gave the highest biomass in the white light. In term of the bioactive compounds, the green light was more beneficial to the coproduction of fucoxanthin, exopolysaccharides and polyunsaturated fatty acids in microalgal cells, in comparison to the white or red light. These results together suggested that the growth and bioactive compounds biosynthesis of *Isochrysis* sp. were regulated by light qualities, which could offer practical basis and theoretical guidance for the directed regulation of microalgal growth and bioactive compounds by marine microalgae *Isochrysis* strains.

**Key words:** *Isochrysis* sp.; light quality; fucoxanthin; exopolysaccharides; polyunsaturated fatty acids

海洋微藻是一种多功能型的细胞工厂,可合成色素、多糖、多不饱和脂肪酸 PUFAs 等多种活性产物,广泛应用于食品、医药、饲料、化妆品等领域<sup>[1]</sup>。在众多的海洋微藻藻种中,等鞭金藻(*Isochrysis*)具有生长快、光合效率高、岩藻黄素与多不饱和脂肪酸

(PUFAs,如十八碳四烯酸、二十二碳六烯酸)合成能力强、无细胞壁结构等优点,受到科技工作者和微藻企业家的关注,已应用于开发意大利面、饼干、酸奶等功能性食品<sup>[2]</sup>。有研究报道,岩藻黄素被证实具有抗炎、抗肥胖、抗癌、抗菌、神经保护、促进轴突生长、改善代谢、治疗呼吸道疾病等多种药理作用<sup>[3]</sup>;多不饱和脂肪酸也能改善糖尿病、骨质疏松症<sup>[4]</sup>;胞外多糖能促进新陈代谢,增强机体免疫力。因此,利用等鞭金藻开发岩藻黄素和多不饱和脂肪酸应用于食品具有重要的意义。

收稿日期:2023-03-06 接受日期:2023-07-26

基金项目:国家自然科学基金(41906096);福建师范大学碳中和研究院开放项目(TZH-2022-03);福建省环保科技计划(2023R001)

\*通信作者 Tel: 86-013003839291; E-mail: jinphia@fjnu.edu.cn, yongjinhe@fjnu.edu.cn

光质是影响光合自养微藻细胞生长和产物合成的重要因素之一<sup>[5]</sup>。不同的光质拥有不同的光量子通量密度、光谱波长等特性,影响光合自养微藻细胞的光合作用效率和固碳性能,表现出细胞生长性能和产物合成的差异<sup>[6]</sup>。对于等鞭金藻藻种,已有研究表明不同来源的等鞭金藻藻种对光质的选择存在较大差异性<sup>[7,8]</sup>。例如,Che等<sup>[9]</sup>研究发现,等鞭金藻先用(来源韩国海洋微藻培养中心)混合光(蓝光和红光)培养再绿光培养可获得最高的油脂含量(62.5%)。Bu等<sup>[10]</sup>研究表明,湛江等鞭金藻(*Isochrysis zhanjiangensis*)在红光条件下表现最高的生长速率;但是,绿光培养的微藻细胞具有最高的叶绿素含量。值得注意的是,关于光质影响等鞭金藻合成生物活性产物的研究中,科技工作者仅仅关注光质对等鞭金藻细胞某一种活性产物合成的影响。然而,正如上文所述,等鞭金藻会合成岩藻黄素和多不饱和脂肪酸活性物质。基于此,需要通过研究工作筛选出一种合适的光质,实现等鞭金藻协同合成岩藻黄素和多不饱和脂肪酸的平衡,使藻细胞最大化合成其活性物质。

本课题组前期研究表明,在中试规模柱式光反应器(50 L)下,采用半连续培养方式(培养过程补充氮源和磷酸)养殖等鞭金藻(*Isochrysis* sp. ISO-FJ)可获得可持续再生的油脂和岩藻黄素<sup>[11]</sup>。因此,本研究选择等鞭金藻(*Isochrysis* sp. ISO-FJ)为出发菌株,研究三种光质(白光、红光和绿光)对等鞭金藻协同合成岩藻黄素和多不饱和脂肪酸性能的影响,为中试调控等鞭金藻生长和活性产物合成提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

ACQUITYUPLC 超高压液相色谱仪(新加坡沃特斯公司);SCION-436 气相色谱仪(天美仪拓实验室设备(上海)有限公司,型号:SCION-GC436, Burker);UV-9600 分光光度计(科远贸易有限公司);BS224S 电子秤(北京赛多利斯系统仪器有限公司);H1650-W 湘仪离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)。

二水合乙二胺四乙酸二钠(国药集团化学试剂有限公司,纯度 $\geq 99.0\%$ ,批号:20230424);三氯甲烷(昆山金城试剂有限公司,纯度 $\geq 99.0\%$ ,批号:20201021);硝酸钠、浓硫酸、维生素 H、维生素 B12、维生素 B1 己烷(国药集团化学试剂有限公司,纯度

$\geq 99.5\%$ );二水合磷酸二氢钠、氢氧化钠、苯酚、甲醇(西陇科学股份有限公司,纯度 $\geq 99.0\%$ );乙腈、色谱级甲醇(上海麦克林生化科技有限公司,纯度 $\geq 99.9\%$ )。

### 1.2 藻种和培养基

等鞭金藻藻种(*Isochrysis* sp. ISO-FJ)保存于本实验室,由福清市新大泽螺旋藻有限公司董事长郑行捐赠。

培养等鞭金藻的培养基为改良后的 f/2 培养基,组成成分:300 mg/L 硝酸钠,22 mg/L 磷酸二氢钠合水,2.50  $\times 10^3$  mg/L 海盐,12.60 mg/L 氯化亚铁,17.44 mg/L 二水合乙二胺四乙酸二钠,6.92  $\times 10^3$  mg/L 五水硫酸铜,2.52  $\times 10^3$  mg/L 钼酸钠,8.80  $\times 10^3$  mg/L 七水硫酸锌,4.00  $\times 10^3$  mg/L 六水合氯化钴,0.07 mg/L 四水氯化锰,0.80 mg/L 维生素 B<sub>1</sub>,4.00  $\times 10^3$  mg/L 维生素 H,4.00  $\times 10^3$  mg/L 维生素 B<sub>12</sub>。

### 1.3 等鞭金藻的培养

将等鞭金藻细胞接入改良后的 f/2 培养基中,使用 LED 白光(400 ~ 700 nm)、红光(620 ~ 650 nm)和绿光(500 ~ 580 nm)对其进行持续光照培养,藻细胞初始为 3.00  $\times 10^6$  个/mL,通入 1 L/min 的空气。光照强度为 45  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,培养温度为 23  $\pm 1$   $^\circ\text{C}$ ,培养周期为 15 d。

### 1.4 测定方法

#### 1.4.1 生物量的测定

每隔 3 d 取 10 mL 的藻液,用分光光度计在 680 nm 处测量藻液的 OD 值并根据标准曲线计数出等鞭金藻的细胞数。等鞭金藻的细胞个数与其 OD 值的关系: $Y = 163.52 \times 10^4 X - 3.06$  ( $R^2 = 0.999$ ),其中 Y(个/mL)为等鞭金藻细胞数,X 为在 680 nm 处的 OD 值。

#### 1.4.2 硝酸氮浓度的测定

采用紫外分光光度法测定硝酸氮的浓度。以硝酸钾制作标准曲线,计算溶液中硝酸氮浓度。硝酸氮含量标准曲线为: $N = 3.14(A_{220} - 2A_{275}) + 0.01$  ( $R^2 = 0.999$ ),其中  $A_{220}$  为 220 nm 处的 OD 值, $A_{275}$  为 275 nm 处的 OD 值,N(mg/L)为硝酸氮浓度。

#### 1.4.3 岩藻黄素的测定

取 150 mL 的藻液离心并冻干 48 h,向冻干的藻粉中加入 5 mL 的甲醇,摇匀,避光提取 1 h,取上清液过 0.22  $\mu\text{m}$  的有机滤膜,采用 UPLC 检测岩藻黄素。流动相流速:0.25 mL/min。色谱柱温度:40  $^\circ\text{C}$ 。样品室温度:25  $^\circ\text{C}$ 。进样量:2  $\mu\text{L}$ 。进样时间:

12 min。配置好浓度梯度为 0、20、40、60、80、100 mg/L 的岩藻黄素标准品溶液。通过标准曲线计算岩藻黄素的含量。岩藻黄素标准曲线:  $F = 56\ 942z + 160\ 887$  ( $R^2 = 0.999$ ), 其中,  $F$  表示峰面积, 其中  $z$  (mg/L) 表示岩藻黄素的含量。

#### 1.4.4 蛋白质、糖类、油脂和脂肪酸组成的测定

采用 BCA 法<sup>[12]</sup> 测定等鞭金藻的蛋白质含量, 硫酸-苯酚法<sup>[13]</sup> 测定等鞭金藻的多糖含量, 采用氯仿-甲醇法<sup>[14]</sup> 测定等鞭金藻油脂含量。

通过气相色谱仪测定脂肪酸含量<sup>[14]</sup>; 载气为高纯度氦气, 检测器温度为 260 °C, 注射口温度为 250 °C, 分流比为 1:40, 进样量为 1 μL。

#### 1.5 数据处理

所有实验设置三个平行。使用 Excel 和 GraphPad Prism 8.0 软件处理数据和作图, 采用 SPSS

17.0 进行显著性分析,  $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同光质对等鞭金藻细胞生长和硝酸氮消耗的影响

等鞭金藻细胞分别在白、红和绿光下的生长情况如图 1A。由图 1A 可知, 培养结束后, 红光组的等鞭金藻细胞数最低 ( $8.42 \times 10^6$  个/mL), 白光组的藻细胞数最高 ( $1.41 \times 10^7$  个/mL) (见图 1A)。Mao 等<sup>[15]</sup> 研究发现, 等鞭金藻的最大光谱吸收峰为 450 ~ 500 nm, 同时在 550 ~ 650 nm 有一个较小的吸收峰。在本研究中, 三种光质中只有白光的光谱范围包含了 450 ~ 500 nm 的光谱。因此, 由图 1A 的结果可得, 在三种光质中, 白光是最有利于等鞭金藻细胞生长的光质。

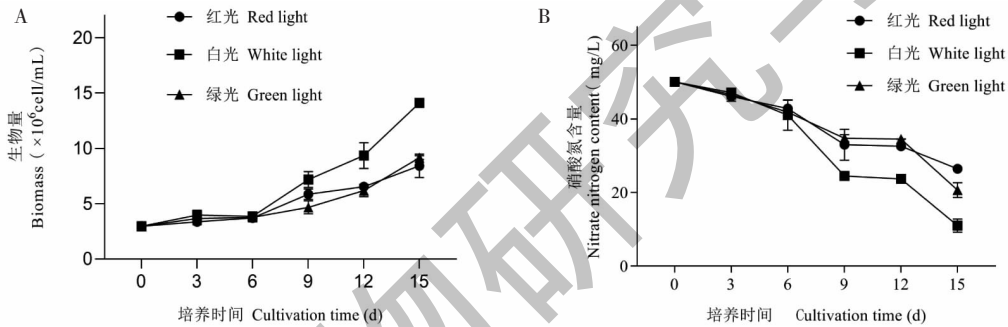


图 1 不同光质对等鞭金藻细胞生长 (A) 和硝酸氮消耗 (B) 的影响

Fig. 1 Effect of different light qualities on the growth of *Isochrysis* sp. ISO-FJ (A) and nitrate nitrogen consumption (B)

有研究表明, 不同光质条件下, 藻细胞会影响硝酸氮的吸收, 进而呈现明显差异的细胞生长特性<sup>[8]</sup>。图 1B 呈现不同光质影响等鞭金藻细胞吸收硝酸氮的结果。由图 1B 可得, 在等鞭金藻培养过程中, 三种光质中的硝酸氮浓度都呈现递减趋势 (见图 1B)。与其他组相比, 白光组的藻细胞更有利于硝酸氮的吸收, 导致残留硝酸氮最低。该实验结

果与前人研究相似。例如, Gan<sup>[16]</sup> 发现白光组的小球藻比红光组更有利于氮元素的吸收。

### 2.2 不同光质对等鞭金藻蛋白质、胞内多糖和油脂合成的影响

在白、红和绿光下的等鞭金藻蛋白质含量如图 2A 所示。在培养过程中, 三种光质中的蛋白质含量都呈现递减趋势。培养结束后, 红光和绿光组的等

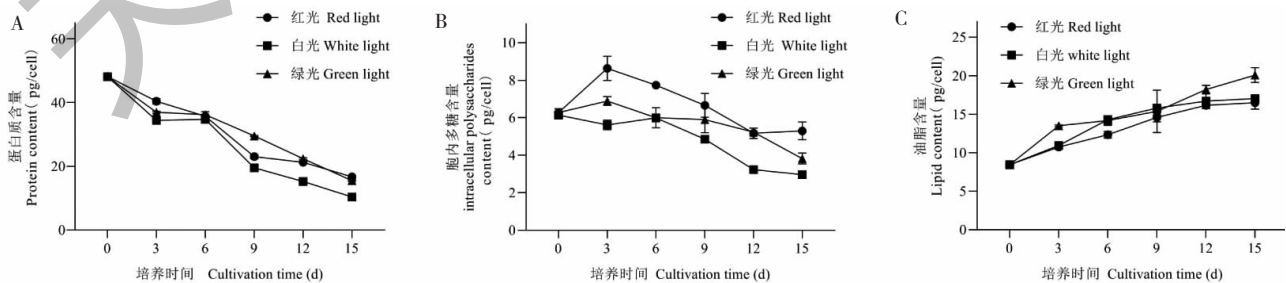


图 2 不同光质对等鞭金藻蛋白质 (A)、胞内多糖 (B) 和油脂 (C) 合成的影响

Fig. 2 Effect of different light qualities on proteins (A), intracellular polysaccharides (B) and lipid (C) of *Isochrysis* sp. ISO-FJ

鞭金藻蛋白质含量明显高于白光组的结果。这结果表明红光和绿光更有利于等鞭金藻蛋白质的积累。此结果与 Gong 等<sup>[17]</sup>发现红光与绿光比白光更有利于石莼蛋白质积累的结果相吻合。但与 Huang<sup>[18]</sup>发现白光更有利于紫球藻中蛋白质的积累存在差异。光质对于微藻的影响存在物种特异性,每种微藻在不同的照明条件下都会有适合其生长的最佳光质,推测出现两种完全相反的结果是因为藻种和培养条件不同造成的。

如图 2B 所示,在培养过程中,白、红、绿光组的等鞭金藻胞内多糖含量先增加后降低。培养结束时,红光组的等鞭金藻胞内多糖含量高(5.81 pg/cell),其次为绿光(5.16 pg/cell),白光组最低(4.98 pg/cell)。已有的研究表明<sup>[19]</sup>,与绿光和白光相比,微藻细胞在红光条件下表现出更强的糖类合成。这可能是红光比绿光和白光更能提高光能捕获效率,可促进微藻光合利用固碳,进而积累糖类化合物。

白光、红光和绿光下等鞭金藻细胞的油脂含量随培养时间的变化如图 2C 所示,三种光质下等鞭金藻油脂含量呈递增趋势。微藻油脂合成途径中关键酶的活性与培养体系中的氮浓度呈负相关关系。本实验中,随着培养时间的延长,三种光质下的硝酸氮浓度逐渐下降(见图 1B),有利于增强等鞭金藻细胞内油脂代谢中关键酶(如溶血磷脂酸酰基转移酶 LAT、二酰甘油酰基转移酶 DGAT)的活力,进而提高细胞内油脂含量。培养结束时,绿光组的等鞭金藻油脂含量最高(20 pg/cell),其次为红光组(16.51 pg/cell),白光组油脂含量最低(16.26 pg/cell)。Helamieh 等<sup>[20]</sup>证实了绿光比红光更有利于栅藻中油脂的积累。前人研究表明<sup>[21]</sup>,在缺氮的情况下,

微藻将蛋白质和糖分解并优先合成油脂,但在本研究中蛋白质和胞内多糖降低,是不是因为被降解合成油脂需要进一步深入研究。

### 2.3 不同光质对等鞭金藻岩藻黄素、胞外多糖、SDA、DHA、PUFAs 合成的影响

如图 3 所示,岩藻黄素标准品和从等鞭金藻中提取的岩藻黄素样品出峰时间皆为 3.219 min,可初步证明从等鞭金藻中提取的物质为岩藻黄素。如图 4 所示,三种光质中,等鞭金藻岩藻黄素含量先上升后下降,在第 6 d 时达到最大值,此时绿光组岩藻黄素含量最高(0.78 pg/cell),白光组次之(0.69 pg/cell),红光组最低(0.66 pg/cell)。Fujita 等<sup>[22]</sup>的研究也表明,绿光能促进三角褐指藻中岩藻黄素合成。岩藻黄素主要与叶绿素 a 结合形成岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体(FCP),FCP 可以捕获绿色区域的光能<sup>[23]</sup>,为岩藻黄素的合成提供充足能量。此外,相对于绿光,红光和白光释放更多的光子,形成更高的 PPFD/W 比值<sup>[24]</sup>,(PPFD:光合光子通量密度;PPFD/W:表示消耗一瓦电所产生的 PPFD)促进等鞭金藻光合作用,产生更多的活性氧(reactive oxygen species,ROS),引起岩藻黄素的氧化(见图 5),使其岩藻黄素的含量降低。由图 4A 的结果可知,绿光比红光和白光更有利于等鞭金藻岩藻黄素的积累。

等鞭金藻胞外多糖在白、红和绿光中的合成情况如图 4B 所示。由图可知,等鞭金藻在三种光质条件下所合成的胞外多糖呈上升趋势。在整个培养过程中,绿光最有利于等鞭金藻胞外多糖的积累,培养结束时其含量为 88.84 mg/L;红光次之,为 75.71 mg/L;白光最次,为 66.20 mg/L。这些结果表明,绿光比红光和白光更有利于等鞭金藻胞外多糖的积累。

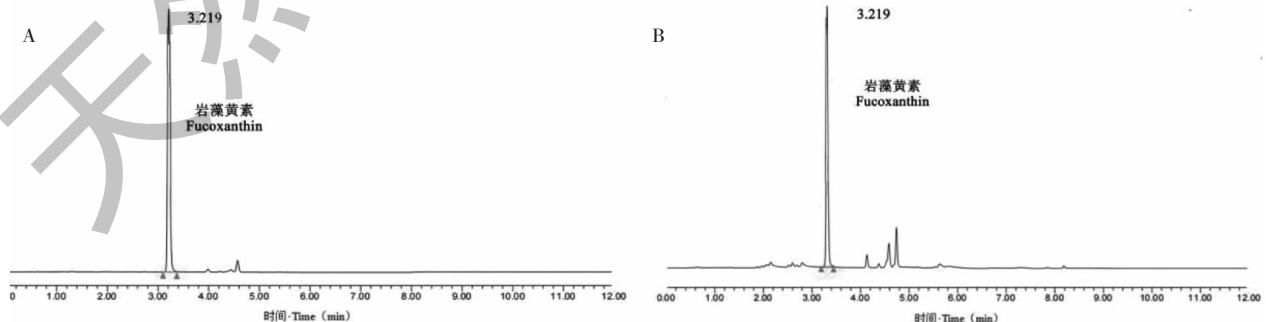


图 3 岩藻黄素标准品(A)和等鞭金藻提取的岩藻黄素样品(B)色谱图

Fig. 3 The chromatographic spectra of fucoxanthin standard (A) and sample of fucoxanthin extracted from *Isochrysis* sp. ISO-FJ (B)

如图 4C~4E 所示,等鞭金藻十八碳四烯酸、二十二碳六烯酸和多不饱和脂肪酸在白光、红光和绿

光条件下都呈递增趋势,其中绿光最有利于多不饱和脂肪酸的合成。培养结束时,绿光下的藻细胞的



十八碳四烯酸、二十二碳六烯酸和多不饱和脂肪酸最大含量分别为 0.74、0.21 和 1.32 pg/cell。已有的研究表明,微藻细胞的油脂代谢中关键酶(如脂肪酸合成酶、脱氢酶等)的表达和活性与其所培养

的光质存在相关性。本研究中,等鞭金藻在绿光条件下可能有利于油脂代谢中这些关键酶的活性,促进胞内油脂及其长链多不饱和脂肪酸的合成(见图 5)。

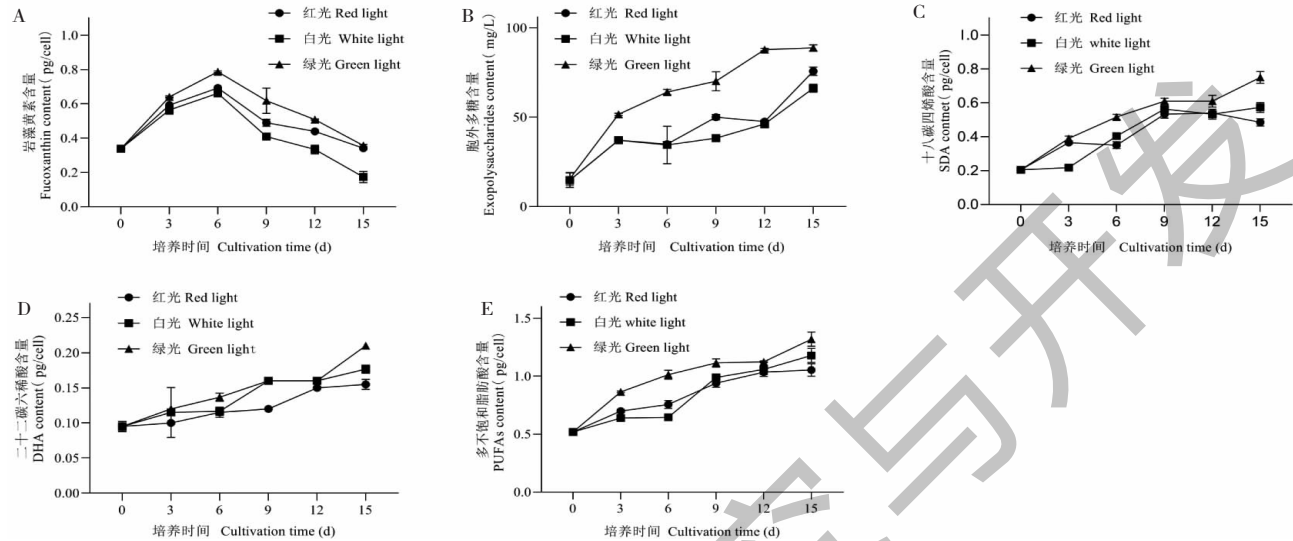


图 4 不同光质对等鞭金藻藻黄素(A)、胞外多糖(B)、十八碳四烯酸(C)、二十二碳六烯酸(D)和多不饱和脂肪酸(E)的影响

Fig. 4 Effects of different light qualities on fucoxanthin (A), exopolysaccharides (B), SDA (C), DHA (D) and PUFAs (E) of *Isochrysis* sp. ISO-FJ

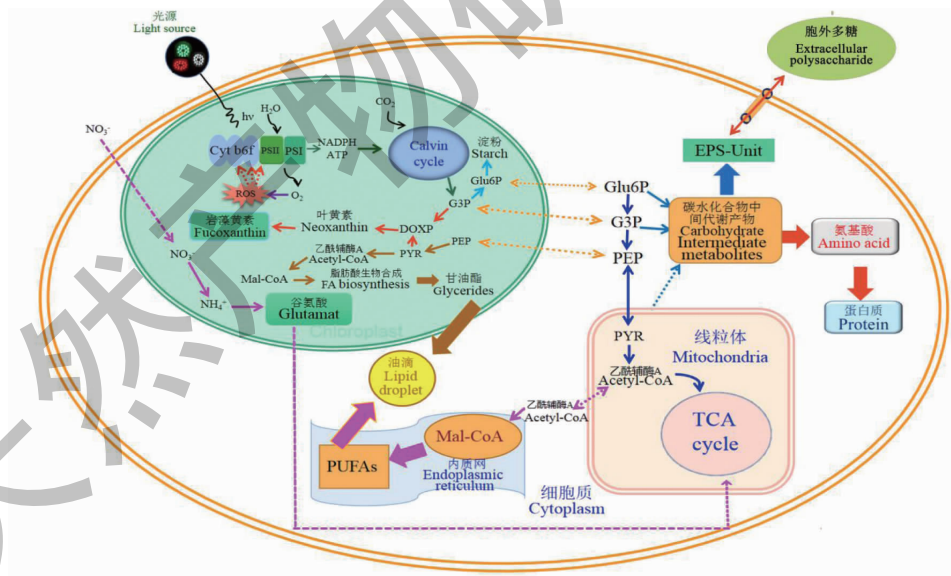


图 5 等鞭金藻生物活性物质合成途径

Fig. 5 Metabolic pathway of bioactive substances of *Isochrysis* sp. ISO-FJ

注: ROS: 活性氧; G3P: 3-磷酸甘油醛; DOXP: 5-磷酸脱氧木酮糖; Glu6P: 葡萄糖; PEP: 磷酸烯醇式丙酮酸; PYR: 丙酮酸; FA biosynthesis: 脂肪酸生物合成; PUFAs: 多不饱和脂肪酸; EPS-Unit: 胞外多糖-单位; TCA-cycle: 三羧酸循环; PSII: 光合系统 II; PSI: 光合系统 I; Cyt b6f: 细胞色素 b6f 复合体。Note: ROS: Reactive oxygen Species; G3P: Glyceraldehyde-3-phosphate; DOXP: 1-deoxy-d-xylulose5-phosphat; Glu6p: Glucose-6-phosphate; PEP: Phosphoenolpyruvate; PYR: Pyruvate; FA biosynthesis: Fatty acid biosynthesis; PUFAs: Polyunsaturated fatty acid; EPS-Unit: Exopolysaccharides-unit; TCA-cycle: Tricarboxylic acid cycle; PSII: Photosynthetic system II; PSI: Photosynthetic system I; Cyt b6f: Cytochrome b6f complex.

### 3 结论

本实验探究了白光(400 ~ 700 nm)、红光(620 ~ 650 nm)和绿光(500 ~ 580 nm)三种不同光质对等鞭金藻的生长和生物活性产物积累的影响。实验结果发现,不同光质会明显影响等鞭金藻的生长和生物活性产物的协同合成。在微藻细胞生长方面,与红光和绿光组相比,采用白光培养等鞭金藻更有利于藻细胞的生长和硝酸氮营养物质的吸收。在生物活性物质合成方面,在所选择三种光质中,藻细胞在绿光条件下可合成最大的岩藻黄素、胞外多糖和PUFAs。由此可见,白光可以促进等鞭金藻的生长,而绿光更有利于生物活性物质的积累。今后可采用两步法(先用白光培养再用绿光培养)培养等鞭金藻,研究是否可显著提高等鞭金藻细胞生长与生物活性物质的合成,促进等鞭金藻生物活性物质规模化生产。

### 参考文献

- Suhaimi NB, Kwan PP, Banerjee S, et al. Influence of blue and yellow light-emitting diodes on the lipid and carbohydrate composition of *Isochrysis galbana* [J]. *Aquac Res*, 2021, 52:3226-3232.
- Gohara-Beirigo AK, Matsudo MC, Cezare-Gomes EA, et al. Microalgae trends toward functional staple food incorporation: Sustainable alternative for human health improvement [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2022, 125:185-199.
- Zhao ZS, Li H, Miao ZM, et al. Effect of drying methods, storage temperatures on fucoxanthin stability from *Sargassum fusiforme* [J]. *Nat Prod Res Dev* (天然产物研究与开发), 2019, 31:689-695.
- Soto-Sanchez O, Hidalgo P, Gonzalez A, et al. Microalgae as raw materials for aquafeeds: growth kinetics and improvement strategies of polyunsaturated fatty acids production [J]. *Aquacult Nutr*, 2023, 2023:5110281.
- Maltsev Y, Maltseva K, Kulikovskiy M, et al. Influence of Light conditions on microalgae growth and content of lipids, carotenoids, and fatty acid composition [J]. *Biology*, 2021, 10:1060.
- Mei YX. Precise analysis on effect of light to  $\beta$ -carotene accumulation in *Dunaliella salina* and its mechanism [D]. Dalian: Dalian University of Technology (大连理工大学), 2021.
- Liu YL, Chen CL, Fu L, et al. The roles of cell-to-cell communication in phycosphere [J]. *Acta Microbiol Sin* (微生物学报), 2022, 62:33-46.
- Fiutak G, Michalczyk M, Filipczak-Fiutak M, et al. The impact of LED lighting on the yield, morphological structure and some bioactive components in alfalfa (*Medicago sativa* L.) sprouts [J]. *Food Chem*, 2019, 285:53-58.
- Che CA, Kim SH, Hong HJ, et al. Optimization of light intensity and photoperiod for *Isochrysis galbana* culture to improve the biomass and lipid production using 14-L photobioreactors with mixed light emitting diodes (LEDs) wavelength under two-phase culture system [J]. *Bioresource Technol*, 2019, 285:121323.
- Li DG, Chen N, Zhou ZH, et al. *Isochrysis* sp. cultivation in pilot-scale to concurrently produce sustainable triacylglycerols for human milk fat substitutes and fucoxanthin [J]. *Algal Res*, 2023, 69:102937.
- Bu L, Ziling L, Yu C, et al. Effect of different colored led lighting on the growth and pigment content of *Isochrysis zhanjiangensis* under laboratory conditions [J]. *J Mar Sci Eng*, 2022, 10:1752.
- Hu Y, Ji DM, Zhan J, et al. Development and verification of a modified BCA method for determination of plasminogen content in human plasma [J]. *Chin J Biolog* (中国生物制品学杂志), 2021, 34:595-601.
- Kuang JH, Huang YY, Hu JH, et al. Cotimization of fermentation conditons and anti-oxication of exopoisaccharide produced by bacilus amyocuelaciens DMBA-K4U [J]. *Food Ferment. Ind* (食品与发酵工业), 2020, 46:28-35.
- Wei DX, Che DD, Chen BL, et al. Three phase partitioning to simultaneously extract the lipids, protein and polysaccharide from *Schizochytrium* biomass [J]. *China Oils Fats* (中国油脂), 2023, 48:123-129.
- Mao AJ, Wang J, Lin XZ, et al. Effect of spectra on growth of *Chlorella* and *Isochrysis* [J]. *Spectrosc Spectral Anal* (光谱学与光谱分析), 2008, 28:991-994.
- Gan YH. Effect of light quality on the growth and denitrification and phosphorus removal of effect of light quality on the growth and denitrification and phosphorus removal of *Chlorella Sorokiniana* [D]. Nanning: Guangxi Universty (广西大学), 2022.
- Gong J, Liu Z, Zou D. Growth and photosynthetic characteristics of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) and *Ulva lactuca* (Chlorophyta) cultured under fluorescent light and different led light [J]. *J Appl Phys*, 2020, 32:3265-3272.
- Huang ZC. Studies on physiology of *Porphyridium cruentum* affected by light quality and extracting microalgal protein [D]. Fuzhou: Fujian Normal University (福建师范大学), 2020.
- Abomohra A, Shang H, El-Sheekh M, et al. Night illumination

- using monochromatic light-emitting diodes for enhanced microalgal growth and biodiesel production [J]. *Bioresource Technol*, 2019, 288:121514.
- 20 Helamieh M, Gebhardt A, Reich M, et al. Growth and fatty acid composition of *Acutodesmus obliquus* under different light spectra and temperatures [J]. *Lipids*, 2021, 56:485-498.
- 21 Gameiro PA, Struhl K. Nutrient deprivation elicits a transcriptional and translational inflammatory response coupled to decreased protein synthesis [J]. *Cell Rep*, 2018, 24: 1415-1424.
- 22 Fujita Y, Ohki K. On the 710 nm fluorescence emitted by the diatom *Phaeodactylum tricorutum* at room temperature [J]. *Plant Cell Physiol* 2004, 45:392-397.
- 23 Leong YK, Chen CY, Varjani S, et al. Producing fucoxanthin from algae-recent advances in cultivation strategies and downstream processing [J]. *Bioresource Technol*, 2022, 344: 126170.
- 24 Oka K, Ueno Y, Yokono M, et al. Adaptation of light-harvesting and energy-transfer processes of a diatom *Phaeodactylum tricorutum* to different light qualities [J]. *Photosynth Res*, 2020, 146:227-234.
- 
- (上接第 1723 页)
- 27 Li J, Chang DG, Huo LB, et al. Oleanolic acid attenuates liver injury induced by severe acute pancreatitis via inhibiting ferroptosis by Nrf2 in rats [J]. *Chin J Pathophysiol* (中国病理生理杂志), 2022, 38:1470-1477.
- 28 Deng L, Feng J, He CHS, et al. Oleanolic acid inhibit tumor necrosis factor alpha-induced inflammatory cytokines production of synovial cells and its mechanism [J]. *Nat Prod Res Dev* (天然产物研究与开发), 2018, 30:1138-1142.
- 29 Wang XP, Wu LL, Li LL, et al. Protective effect of daucosterol on acute liver injury induced by concanavalin A [J]. *Chin J Mod Appl Pharm* (中国现代应用药理学), 2020, 37:2305-2310.