

雨生红球藻细胞转化、虾青素积累与光照强度的关系及不同品系间的差异性

李颖逾^{1, 2}, 刘建国^{1, 3}, 林伟¹, 崔效杰³, 薛彦斌³

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生物工程中心, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 潍坊科技职业学院爱尔兰发生物技术平台, 山东 潍坊 262700)

摘要: 于2004年利用3个品系的雨生红球藻(H₀、H₂和H₃)和以去除营养物质的藻液为实验对象, 探讨了光强对细胞转化和虾青素积累的影响。结果表明, 光照强度对红球藻虾青素积累和细胞转化有显著影响, 并在品系间存在一定差异性。其中: 品系H₀在光强≤25 000 lx时虾青素积累量随光强的增加而增加, 光强在20 000~35 000 lx时虾青素积累量处于较高水平, 而光照强度>35 000 lx时, 虾青素积累量随光强的升高而下降; H₂品系在光强≤25 000 lx时虾青素积累量随光强的增加而增加, 光强在25 000 lx左右时虾青素积累量较高, 当光强≥35 000 lx时, 虾青素积累大幅度下降; H₃品系在≤35 000 lx时虾青素积累量随光强的升高而增加, 20 000~45 000 lx为虾青素积累较适宜的光强, 高于45 000 lx时虾青素积累量则明显下降。进一步分析得出, 弱光导致红球藻虾青素含量较低是光照强度不足、细胞内虾青素含量少的结果, 而强光下虾青素含量下降则是细胞受到损伤、细胞数量减少导致的。对比研究发现: 在较低光强下(20 000~25 000lx) H₂单个细胞内虾青素积累量略低于H₀, 但其积累虾青素总量却最高, 这是由于此时H₂不动细胞增长速率比其它品系高造成的, 不过适宜H₂积累虾青素的光照范围最窄, 它对高光强的耐受性也最差; 而H₃在较低光强下虾青素积累总量及单个细胞内的积累速率均最低, 但是它的适宜光照范围最宽, 即对高光强的耐受性最强, 在较大的光强波动范围内都可以保证较高的安全转化量, 这就使得它在较高的光强下虽然单个细胞积累虾青素的速率仍然最低, 积累总量反而显著高于其它两个品系。

关键词: 雨生红球藻 (*Haematococcus pluvialis*); 积累; 虾青素; 光照强度
中图分类号: Q945; Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2006)09-0036-06

雨生红球藻 (*Haematococcus pluvialis*) 是一种单细胞绿藻, 具有复杂的生活周期, 在特定 (尤其是逆境) 条件下从游动细胞转化为不动细胞并大量累积虾青素, 是自然界中积累天然虾青素能力最高的生物 (10~30 mg/g)^[1, 2]。天然虾青素具有超强的抗氧化活性, 有“超级维生素E”之美誉, 可作为饲料添加剂、天然食用色素和生物保健品、药品等, 目前生产能力远不能满足市场需求, 国际市场价格远远高于人工合成品的3000美元/kg^[2], 因此利用雨生红球藻抗逆特性培养该藻生产天然虾青素在国内外倍受关注^[3-6]。

目前国内外红球藻虾青素累积方面已经有不少研究, 普遍认为主要环境因子如光、盐度、温度等对细胞生长、转化和虾青素累积具有明显作用^[7-9]。但是, 以往实验大多将红球藻接种到新鲜培养液中, 在

营养物质存在的情况下研究其它外界因子的影响。这样一来, 所得实验结果事实上并没有准确反映单一因子的影响, 而是2种因子 (营养盐动态变化和某一环境因子) 的叠加影响 (促进和抑制作用常常同时存在)。实验证实, 分别将藻种重新接种在全价营养和去除营养物质时, 光强对虾青素积累影响表现出很大

收稿日期: 2005-03-16; 修回日期: 2005-09-20

基金项目: 国家农业成果转化资金资助项目(02EFN2166012-13); 中国科学院方向性创新项目(KZCX3-SW-215); 中国科学院海洋研究所创新项目(L86032523)

作者简介: 李颖逾(1981-), 女, 黑龙江阿城人, 硕士研究生, 研究方向: 微藻及微藻生物技术, E-mail: lylyb@hotmail.com; 刘建国, 通讯作者, jgliu@ms.qdio.ac.cn

的差别,说明营养物质存在确实影响了虾青素积累。另外,红球藻细胞周期复杂,其中细胞生长(包括游动细胞和不动细胞生长)、细胞转化、虾青素积累是完全不同但互动的过程^[2-5]。因此以往实验过程基本包含了所有复杂变化,很难准确表述究竟是影响细胞生长的结果,还是对细胞转化或对虾青素累积产生的作用。同时,复杂的关联常常导致促进和抑制作用相互抵消,极易遮盖了事情的本质。最终在生产上达不到较好的虾青素生产效果。

作者以光照强度为例,针对3个品系的雨生红球藻,通过去除全部营养的方法尽可能地将细胞生长、细胞转化和虾青素积累过程分开,排除游动细胞生长对虾青素积累的干扰,重点研究细胞转化后虾青素的积累过程。探讨不同品系红球藻积累虾青素与光强的关系,期望为实际生产提供基础理论指导。

1 材料与方法

1.1 藻种及培养条件

Haematococcus pluvialis 0 (H₀)来自中国科学院水生生物研究所藻种库, *H. pluvialis* 2 (H₂)是从挪威特隆赫姆 Trondheim 海滨分离得到, *H. pluvialis* 3 (H₃)来自瑞典 Thalassa AB。按 MCM 的修正配方配制培养液并灭菌^[10],在温度 24℃±1℃及室内日光灯控光下进行静置培养,光照强度为 10 000 lx,光周期 D:L 为 12:12,每天摇动数次。

1.2 光照梯度的设置

取处于对数生长期的 H₀、H₂、H₃ 游动细胞藻液,以 4 000 r/min 离心 3 min,去掉上清液,然后分别将藻细胞重新悬浮于蒸馏水中,调整藻液密度至 0.5×10⁵ 个/mL 左右,再均分到 100 mL 三角瓶内,每一品系的藻分别设室内漫散光(0~10 000 lx)及 20 000, 25 000, 35 000, 45 000 lx 5 种不同的光强梯度,每种梯度设 3 个平行样,于 24 h 连续光照下进行静置培养,培养温度控制在 24℃±1℃,每天摇动数次。

1.3 虾青素含量的测定

取 2 mL 藻液离心后藻泥用 90% 的丙酮萃取至样品显白色为止。采用 722 型可见分光光度计分别测定 480, 645 和 663 nm 波长下提取液的光吸收值(OD 值),依据 Lichtenthaler^[11]的方法计算藻液中的类胡萝卜素光吸收值,并用 Davies^[12]的计算公式换算成虾青素含量。

1.4 藻细胞计数方法

用血球计数板进行显微细胞计数,每个样品计 20 个数求平均值。

1.5 单个细胞获得光能的计算

细胞平均获得的光能=总入射光能/细胞总数
 $=\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})/(10^4\text{cm}^3/\text{mL})=10^{-14}\text{E}/\text{s}=6.02\times 10^9$ 个光子/s

2 结果讨论

2.1 光照强度对虾青素积累总量的影响

光强对 3 种品系的雨生红球藻虾青素积累的影响如图 1 所示。由图 1 可以看出,红球藻虾青素积累明显受光照强度影响,在 0~25 000 lx 范围内,光强提高有利于 H₀ 品系虾青素的积累,25 000 lx 的光强照射下红球藻积累的虾青素产量显著高于在室内漫散光及低光照条件下的虾青素产量($P<0.05$),这是藻细胞适应高光强的自身保护机制,虾青素积累以对抗高光伤害;光强在 20 000~35 000 lx 范围时,虾青素积累量处于较高水平;然而,当光照强度提高到 35 000 lx 以上时,虾青素积累总量却呈显著下降趋势,经显微镜观察发现持续高光强照射使细胞遭到不同程度的破坏,大多细胞失去积累虾青素能力并随时间逐渐延长而解体,显然此时光强已超出了细胞的自身调节能力范围。对比图 2 细胞数量变化可以看出,高光强影响了 H₀ 品系细胞数量的增长。光强 0~25 000 lx 时 H₀ 细胞数量增长幅度较大,在光强 35 000 lx 时细胞数量增长缓慢而 45 000 lx 时已呈现负增长,到第 9 天时 H₀ 细胞数量已由初始的 5×10⁴ 个/mL 降至 1.04×10⁴ 个/mL。

应当指出,本实验中尽管最大程度地降低了营养物质造成的游动细胞生长的干扰,但较有全价营养时红球藻生长速率(数据未列出)要低很多,同时游动细胞在实验的最初 2 天内全部转化为不动细胞,比有营养情况下的细胞转化的完成时间提前了 7~10 d 左右(数据未列出)。不可否认,营养物质去除后总细胞数量在一段时间内仍然呈上升趋势,该细胞生长主要为游动细胞转化后的不动细胞生长,不动细胞的生长包括有无性生殖形成不动孢子和出芽的营养繁殖方式^[2]。支撑不动细胞生长的营养物质主要来自细胞内部,是储藏的营养成分发生了细胞内再分配的结果。至于高光强下红球藻细胞数量下降是由于游动细胞不能转化为抵抗环境能力强的不动细胞,并在细胞转化过程中逐渐死亡造成的。也反过来证实,以往没有排除营养的实验中存在更多种的细胞生长方式(除上面提到的不动细胞繁殖方式外,还有游动细胞的无性生殖形成游动孢子和 2 分裂营养繁殖方式)以及较长的细胞转化过程^[2],因此复杂的细胞生长对红球藻虾青素积累影响时间越长,对弄清光强与虾青素累积

关系的干扰也越严重。

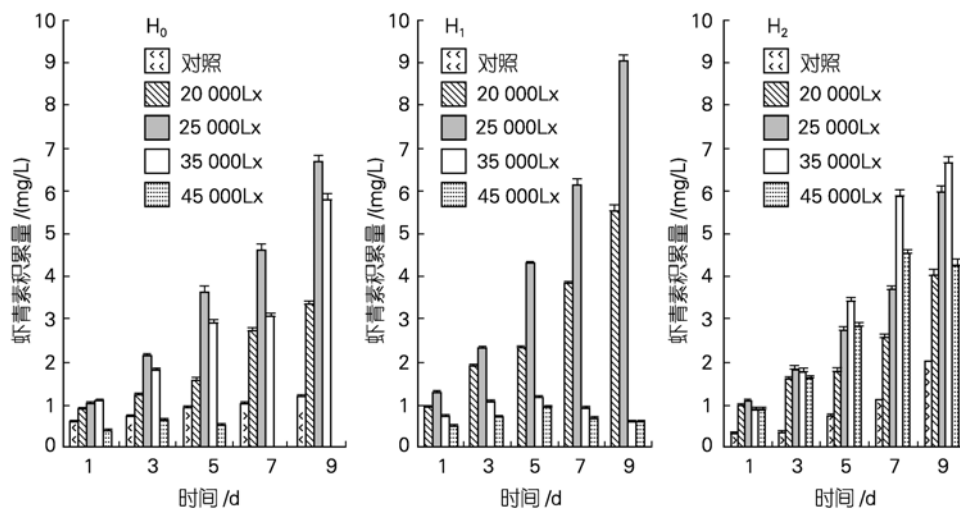


图1 光照对各处理组虾青素积累总量的影响

Fig.1 Effect of light intensity on astaxanthin production

图1中, H₂品系在光强 $\leq 25\ 000\ \text{lx}$ 时虾青素积累产量随光强的增加而增加, 光强在 $25\ 000\ \text{lx}$ 左右时虾青素积累量较高; 当光强 $\geq 35\ 000\ \text{lx}$ 时, H₂品系虾青素积累大幅度下降; H₂品系细胞数量的变化也随光强的升高而变化(图2), 在光强 $35\ 000\ \text{lx}$ 时H₂品系细胞数量已呈下降趋势, $45\ 000\ \text{lx}$ 时细胞数量呈现更大幅度的下降, 到第9天时H₂品系已降至初始的5%左右。同H₀品系一样, 高光强下红球藻H₂细胞

数量下降是由于游动细胞不能转化为抵抗环境能力强的不动细胞, 并发生死亡造成的。对H₃品系而言, 不超过 $35\ 000\ \text{lx}$ 的光强均可以促进红球藻虾青素积累, 并且光强越高积累的虾青素产量也越高。第9天时, $35\ 000\ \text{lx}$ 光强照射的处理组中虾青素积累总量可达 $6.66\ \text{mg/L}$, 而自然光照射下的对照组的虾青素积累量仅为 $2.07\ \text{mg/L}$; 在 $20\ 000\sim 45\ 000\ \text{lx}$ 范围内H₃品系虾青素积累量均处于较高水平; 当光强提高到

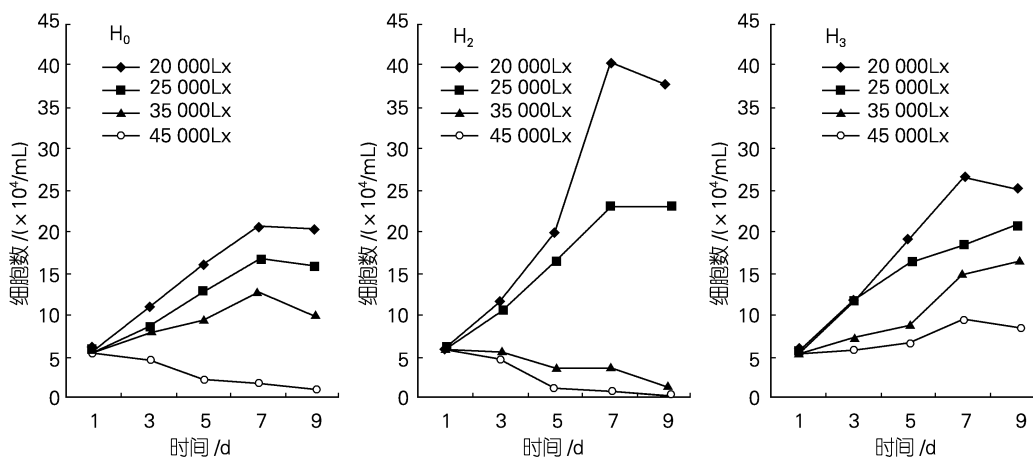


图2 光照对各处理组细胞数量的影响

Fig.2 Effect of salinity on cell number

45 000 lx时, 各H₃ 品系虾青素积累产量迅速下降, 到实验第7天时所测数据已接近0, 显微镜下观察到细胞大量死亡解体, 细胞总数量明显下降。

从虾青素积累随时间变化的动力学角度来看, 虾青素积累随时间变化的增长比率呈上升趋势, 如 25 000 lx 的处理组中, H₀的虾青素增长比率从最初的 1.06 mg/ (L·d) 上升到 2.08 mg/ (L·d), H₂的从 1.09 mg/ (L·d) 上升到 2.93 mg/ (L·d), H₃的从 0.74 mg/ (L·d) 上升到 2.24 mg/ (L·d), 因此在生产上推迟采收时间, 即在积累的后期采收可以获得更高的虾青素产量。

从单个细胞每秒获得的光能来看, 光强为 20 000~45 000 lx 时, 各对照组中细胞获得的初始光能分别为 4.82×10¹¹, 6.02×10¹¹, 8.43×10¹¹ 和 10.8×10¹¹ 个光子, H₀细胞获得 4.82×10¹¹~8.43×10¹¹ 个光子时积累的

虾青素水平较高, H₂细胞获得 6.02×10¹¹ 个光子左右时虾青素积累量较高, 而 H₃细胞获得 4.82×10¹¹~10.8×10¹¹ 个光子范围内积累的虾青素水平平均较高。

2.2 光照强度对单个细胞内虾青素积累量的影响

图3为不同光强下单个细胞内的虾青素积累量随时间变化曲线。由图可知, 单个细胞内的虾青素积累速率随光照强度的升高而增加, 3 种品系在 45 000 lx 光强下细胞内虾青素含量的日平均增长比率依次高于 35 000, 25 000 和 20 000 lx。当光强分别为 20 000, 25 000, 35 000, 45 000 lx 时, H₀ 单个细胞内虾青素含量的日平均增长比率依次为 13.2%、29.1%、36.4%和 63.8%; H₂的依次为 11.9%、23.5%、41.5%和 92.8%; H₃的依次为 11.5%、18.0%、29.3%和 38.5%。

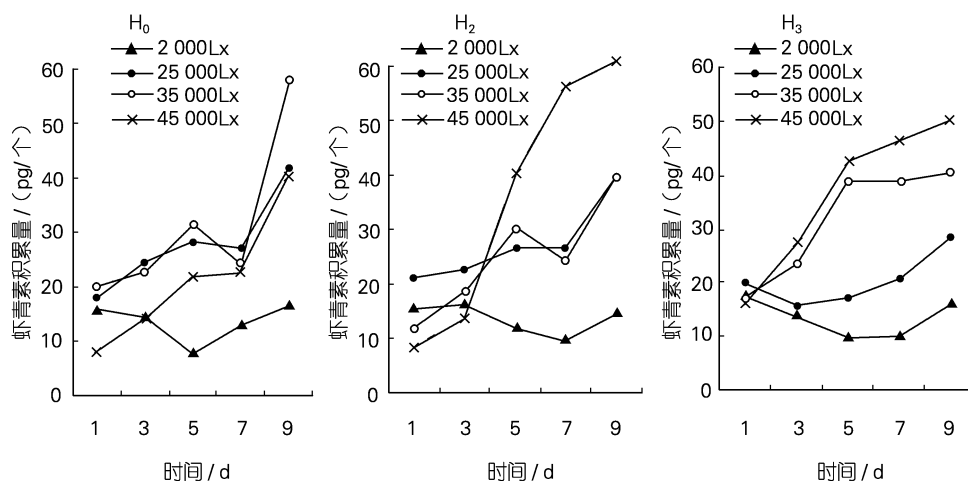


图3 不同光强下单个细胞内虾青素的积累量

Fig.3 Effect of salinity on astaxanthin accumulation per cell

较弱光强下 (20 000 lx) 三种品系单个细胞内的虾青素含量随时间变化均经历了一个先下降后回升的过程, 这主要是由于实验初期的细胞分裂使得新生细胞内的虾青素含量减半引起的, 随着细胞增长速率的降低和虾青素的不断积累而重新回升到与初始值相近的积累水平, 不过此时的虾青素积累总量则由于细胞数量的增长而达到了较高的水平。随着光强的升高, 细胞增长速率下降, 由细胞分裂造成的单个细胞内虾青素含量下降所带来的影响逐渐减弱, 使得单个细胞内的虾青素积累量持续保持上升趋势, 当光强超出各自的适宜范围时, 尽管单个细胞内的虾青素含量仍然

持续升高, 但由受损死亡细胞引起的虾青素含量下降占了上风, 而造成虾青素积累总量呈现不同程度的降低。

2.3 不同品系的雨生红球藻之间的比较

对比图 1 中 3 种品系的红球藻细胞虾青素积累总量发现: 在同等条件下, H₂ 各组的虾青素积累量明显高于其它两个品系 ($P < 0.05$), 25 000 lx 处理组第 9 天时虾青素积累量可达到 9.03 mg/L, 而 H₀ 的积累量为 6.68 mg/L, H₃ 的积累量最低 ($P < 0.05$), 为 6.0 mg/L。20 000 lx 的处理组中, 第 9 天时的积累量分别为: 5.5, 3.37 和 3.21 mg/L, H₂ 的积累量仍然高于其它两个品系

($P < 0.05$), 但 H_0 和 H_3 的积累量则差异不显著。

通过图 3 中各品系单个细胞内积累量对比发现, 当光强不超过 25 000 lx 时, H_0 的日平均增长比率依次高于 H_2 和 H_3 , 此时 H_2 细胞数量增长快于其它两个品系使得它的虾青素积累总量最高; 当光强升至 35 000 lx 以上时, H_2 的日平均增长比率明显高于其它两个品系, H_0 又高于 H_3 ; 但是此时 H_3 的虾青素积累总量反而高于其它两个品系, 这是由于它的耐受范围广从而细胞安全转化量高引起的, 可见细胞的安全转化是决定总产量的重要因素之一。

作者针对生产中所用的 3 种品系的雨生红球藻进行光照胁迫实验, 发现光照强度对于雨生红球藻虾青素积累具有显著影响。总体说来, 在较低的光强下细胞数量增长较快但虾青素积累量较低, 这是由光照不足从而单个细胞内虾青素积累速率较低引起的; 在各自适宜的范围内光照强度的增加有利于虾青素的积累但不同程度地减慢了细胞数量的增长, 不过由于单个细胞内虾青素含量大幅上升使得样品中虾青素积累总量仍然维持在较高水平; 当光强超出各自的适宜范围时, 会对细胞产生损害作用致使部分细胞失去积累虾青素的能力甚至大量死亡, 此时完好的细胞内虾青素的积累量仍然快速增加, 但不足以使虾青素积累总量继续上升, 这主要是由于细胞数量的大幅下降引起的, 可见设置适宜的条件保证游动细胞安全地转化为不动孢子是实现虾青素高量积累的重要环节。

另外, 通过不同品系的藻虾青素积累量的对比发现, 在较低光强下(20 000 和 25 000 lx) H_2 单个细胞内的虾青素积累量略低于 H_0 , 但积累虾青素的总量却最高, 此时 H_2 细胞增长速率高于其它两个品系, 它对高光强的耐受性最差, 即适宜 H_2 积累虾青素的光照范围最窄; 而 H_3 在较低光强下虾青素积累总量及单个细胞内的积累速率均最低, 但是它的适宜光照范围最宽, 即对高光强的耐受性最强, 在较大的光强波动范围内都可以保证较高的安全转化量, 这就使得在较高的光强下虽然单个细胞积累虾青素速率最低, 但积累总量反而显著高于其它两个品系。由此在实际生产中可根据实时的光照条件选择相应的品系进行生产, 以获得理想的虾青素产量(投入产出比)。

研究表明, 细胞的生长、转化及虾青素积累是 3 个各自独立的过程, 需要的适宜条件也各不相同, 在研究中应尽量将他们分开来考虑。否则极易导致结果不一致, 如氮营养方面, 有人认为氮缺乏促进虾青素的积累, 而有的则认为氮磷饥饿不会影响虾青素的积累^[13], Boussiba 等^[14]甚至提出氮存在促进虾青素的积累。尽管有学者指出这是雨生红球藻的不同品系对外

界反应差异导致的虾青素积累量不同^[15, 16]。实际上在实验前都没有进行相应预处理, 在有其它因素干扰的情况下, 没有将所研究因子对细胞生长、转化及虾青素积累各个阶段的影响分开来, 造成实验结果所述不明、不能相互参照才是最重要的原因。

从应用的角度来看, 由于促进虾青素积累的条件往往都不利于细胞生长, 一味地提高外界条件的胁迫程度往往不能在实际生产中得到最高的产量, 这就需要综合考虑细胞存活与虾青素积累双方面的因素, 因此建议在今后的研究及生产中采用三步培养法达到较高的虾青素积累水平, 即在细胞生长、转化及虾青素积累的各个阶段采用不同的处理方法, 即首先提供最适的生长条件获得较高的生物量; 然后通过外界条件的改变实现细胞的安全转化; 当游动细胞均转化为有活力的不动细胞后施加较高程度的胁迫条件以达到大量的虾青素积累。

细胞密度不同样品对光照强度的反应也有所不同, 因此作者进一步计算了单位细胞所能接受的光照强度, 期望为不同密度下的相关研究提供参考。得出的适宜范围比已有的大部分报道中得到的光强数值要高, 而与 Dominguez-Bocanegra^[17]的研究结果 3.45×10^4 lx 相近, 这可能是由于实验用藻的品系或其它外界条件不同造成的。当然, 由于所设梯度有限, 本研究得出的适宜范围还可以进一步缩小, 也会随其它外界条件的改变而有所变化, 还需要在今后的研究中不断完善。

参考文献:

- [1] 施安辉, 萧海杰. 目前国内外虾青素研究的进展[J]. 生物工程进展, 1999, 19(1): 29-31.
- [2] 殷明焱, 刘建国. 雨生红球藻和虾青素研究述评[J]. 海洋湖沼通报, 1998, 2: 53-59.
- [3] Grung M D, Souza F M L, Borowitzka A, et al. Algal carotenoids 51. Secondary carotenoids 2. *Haematococcus pluvialis* aplanospores as a source of (3S, 3'S)-astaxanthinesters[J]. *Appl Phycol*, 1992, 4: 165-171.
- [4] Lee Y K, Soh C W. Accumulation of astaxanthin in *Haematococcus lacustris* (Chlorophyta)[J]. *J Phycol*, 1991, 27: 575-577.
- [5] Liu JG, Liu W, Yin MY, et al. Some scientific and technical approaches of culture *Haematococcus pluvialis* from laboratory to pilot scale for natural astaxanthin[J]. *An Interdisciplinary J of Research on Carotenoids*, 2005, 9: 50.
- [6] Lorenz R T, Cysewski G R. Commercial potential for *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin[J]. *Tibtech*, 2000, 18: 160.

- [7] Boussiba S, Fan L, Vonshak A. Enhancement and determination of astaxanthin accumulation in green alga *Haematococcus pluvialis*[J]. *Enzymol*, 1993,213: 386-391.
- [8] Cordero B, Otero A, Patina M, *et al.* Astaxanthin production from green alga with different stress conditions[J]. *Biotechnology Letters*, 1996,18(2):213-218.
- [9] Harker M, Tsavalos A J, Young A J. Use of response surface methodology to optimise carotenogenesis in the microalga, *Haematococcus pluvialis*[J]. *Appl Phycol*, 1995,7:399-406.
- [10] 张京浦, 刘建国. 营养盐对雨生红球藻光合作用影响的研究[J]. *工业微生物*, 1997, 27(4):14-17.
- [11] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes[A]. Packer L, Douce R. *Methods in enzymology*[C]. Vol. 148. San Diego, California: *Academic Press*, 1976.350-382.
- [12] Davies B H. Carotenoids[A]. Goodwin T W. *Chemistry and biochemistry of plant pigments*[C]. Vol. 2. London: *Academic Press*, 1976.38-166.
- [13] 庄惠如, 施巧琴. 营养胁迫对雨生红球藻虾青素累积的影响[J]. *水生生物学报*, 2000, 24(3):208-212.
- [14] Boussiba S, Vonshak A. Astaxanthin accumulation in the green alga *Haematococcus pluvialis* [J]. *Plant Cell Physiol*, 1991, 32(7): 1 077-1 082.
- [15] Harker H, Tsavalos A J, Young A J. Autotrophic growth and carotenoid production of *Haematococcus pluvialis* in a 30-liter airlift photobioreactor[J]. *Ferment Bioeng*, 1996, 82:113-118.
- [16] Harker M, Tsavalos A J, Young A J. Factor responsible for astaxanthin formation in the Chlorophyte *Haematococcus pluvialis* [J]. *Bioresource Technology*, 1996, 55(3) : 207-214.
- [17] Dominguez-Bocanegra A R, Guerrero Legarreta L, Martinez Jeronimo F, *et al.* Influence of environmental and nutritional factors in the production of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 92:209-214.

Effects of light intensity on cell transformation, astaxanthin accumulation in three strains of *Haematococcus pluvialis* and their difference

LI Ying-yu^{1, 2}, LIU Jian-guo^{1,3}, LIN Wei¹, CUI Xiao-jie³, XUE Yan-bin³

(1. R&D Center of Marine Biotechnology Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Alpha-biotech Platform, Weifang Sci-Tech Vocational College, Weifang 262700, China)

Received: Mar., 16, 2005

Key words: *Haematococcus pluvialis*; accumulation; astaxanthin; light intensity

Abstract Effects of light intensities on cell transformation, astaxanthin accumulation in three strains of *Haematococcus pluvialis* (H₀, H₂ and H₃) were studied in 2004 by using nutrients eliminated culture. Results showed a distinctive influence of light intensity on astaxanthin accumulation and cell transformation from motile cells to non-motile cells. Astaxanthin concentration in H₀ increased with the enhancement of light intensity in the range lower than 25 000 lx. It remained at a high level under the light intensity between 20 000 and 35 000 lx, then started to decrease severely when the light intensity was over 35 000 lx. H₂ showed similar astaxanthin changes to H₀ except for that maximal astaxanthin was obtained at 35 000 lx. Regarding to H₃, an increase of astaxanthin accumulation was accompanied with an improvement of light intensity in the range below 35 000 lx. Light intensity between 20 000 lx and 45 000 lx was conducive to astaxanthin accumulation then led to a decrease of astaxanthin if further increase light radiation. The reasons causing astaxanthin accumulation decrease in low dim light differed from that at high light radiation. The former was mainly led by the decrease of astaxanthin per cell, and the latter was a result of light damage and reduction of safety cell transformation. Comparison of three strains abilities of astaxanthin accumulation found that H₂ showed the highest amount of astaxanthin quantity under light intensities between 20 000 lx and 25 000 lx due to its fast non-motile cell growth rate. Meanwhile, H₂ had the narrowest favorable light intensity and poorest tolerance to strong light among the three strains. On the contrast, H₃ showed a high rate of cell transformation from motile cells to non-motile cells and good output of astaxanthin because of its wide range of suitable light intensity and high tolerance to strong light. (本文编辑: 张培新)