

温度升高对高光强环境下蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 光能利用和生长的阻抑效应

张 曼 , 曾 波* , 王明书 , 吴国平 , 任秋芳

(西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 三峡库区植物生态与资源重庆市重点实验室, 生命科学院, 重庆 400715)

摘要 :以蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 为实验材料,研究了温度变化对不同光照水平下蛋白核小球藻的光能利用和生长的影响,以明确光照强度对微藻的光能利用和生长的影响是否因温度不同而发生变化。实验中共设置了 3 个光照强度水平 ($50, 150, 300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 2 个温度水平 ($15^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}$)。实验结果表明,不同光照水平下小球藻叶绿素荧光的非光化学淬灭 (NPQ) 大小与温度有关,光照强度为 $150, 300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,温度升高使小球藻叶绿素荧光 NPQ 提高,并且光照强度越高小球藻叶绿素荧光 NPQ 增大越多, $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光照强度下温度升高对叶绿素荧光 NPQ 没有影响。实验发现, 25°C 培养温度下小球藻的光合电子传递速率 (ETR) 随光照强度增高而上升的速率要低于 15°C 时小球藻 ETR 上升的速率,随着光照强度增高,温度升高使小球藻 ETR 降低程度增大。实验结果还表明, 15°C 时小球藻培养液叶绿素 a 浓度随光照强度升高而增高, $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 培养光强下具有最高的叶绿素 a 浓度。但在 25°C 时,光照强度升高叶绿素 a 浓度并不一定增高, $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光照强度下的叶绿素 a 浓度比 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光照强度下要低。本研究表明,温度升高增大了高光强水平下蛋白核小球藻对光能的热耗散,使光照增强对小球藻生长的促进作用减弱。由于温度升高对小球藻光能利用和生长的阻抑作用,小球藻生长的适宜光照水平因温度升高而降低。

关键词 :温度,光照,蛋白核小球藻,叶绿素荧光非光化学淬灭 (NPQ),光合电子传递速率 (ETR),叶绿素 a (Chl a)

文章编号 :1000-0933 (2007) 02-0662-06 中图分类号 :Q945, Q948 文献标识码 :A

The temperature elevation suppresses the light energy utilization and growth of *Chlorella pyrenoidosa* under high light intensity conditions

ZHANG Man, ZENG Bo*, WANG Ming-Shu, WU Guo-Ping, Ren Qiu-Fang

Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (MOE), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, School of Life Sciences, Southwest China University, Chongqing 400715, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (2) 0662 ~ 0667.

Abstract : In the experiment, we investigated the effects of temperature alteration on light energy utilization and growth of *Chlorella pyrenoidosa* growing under different light intensity conditions, and aimed to ascertain whether the influence of light intensity on light energy utilization and growth of phytoplankton is affected by temperature. Three light levels ($50, 150, 300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and two temperature levels ($15^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}$) were included in the experiment. It was found that the non-photochemical quenching (NPQ) of chlorophyll fluorescence of *C. pyrenoidosa* cultivated under different light intensity conditions was influenced by temperature. At light intensities of 150 and $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, temperature

基金项目 : 国家教育部“春晖计划”资助项目 (2004-7); 重庆市科技资助项目 (2003-7858)

收稿日期 : 2006-09-25 ; 修订日期 : 2007-01-11

作者简介 : 张曼 (1982 ~), 河南人, 硕士生, 主要从事水生植物生理生态学研究. E-mail : zm0378@swu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : bzeng@swu.edu.cn

Foundation item : The project was financially supported by Ministry of Education by Chunhui Programme, China (No. 2004-7) and Chongqing Science&Technology Commission (No. 2003-7858)

Received date 2006-09-25 ; **Accepted date** 2007-01-11

Biography ZHANG Man, Master candidate, mainly engaged in aquatic plant eco-physiology. E-mail : zm0378@swu.edu.cn

elevation led to an increase of NPQ, and the higher the light level, the larger increase in NPQ of *C. pyrenoidosa*. At light intensity of $50\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, however, temperature elevation did not affect NPQ of *C. pyrenoidosa*. As regards photosynthetic electron transport rate of *C. pyrenoidosa*, it was revealed that the increase of electron transport rate with light intensity at 25°C was lower than that at temperature of 15°C . Moreover, the suppression effect of temperature elevation on the electron transport rate of *C. pyrenoidosa* increased with light intensity significantly. As far as the growth of *C. pyrenoidosa* is concerned, it was shown in the experiment that at temperature of 15°C , the chlorophyll a concentration of *C. pyrenoidosa* culture solution rised gradually with light intensity, and the highest chlorophyll a concentration of the solution was reached at $300\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. However, when the temperature was 25°C , chlorophyll a concentration of *C. pyrenoidosa* solution did not increase with light intensity, the chlorophyll a concentration of *C. pyrenoidosa* solution cultivated at $300\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ was lower than that of *C. pyrenoidosa* at $150\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Our research clearly demonstrated that temperature elevation enhanced the dissipation of absorbed light energy as heat of *C. pyrenoidosa* exposed to high light intensity conditions, and therefore reduced the positive effects of light intensity augmentation on the growth of *C. pyrenoidosa*. The optimal light levels for growth of *C. pyrenoidosa* was lowered at higher temperature due to the suppression effect of temperature elevation on light energy utilization and growth.

Key Words : light ;temperature ;*Chlorella pyrenoidosa* Chick. ;non-photochemical quenching (NPQ) ;electron transport rate (ETR) ;chlorophyll a (Chl a)

在对微藻的各类研究中,微藻的光合生产和生长一直是水生生物学和生态学的重要研究内容^[1,2]。水生生态系统的初级生产能力大小,水体是否发生水华均与微藻的光合生产和生长有很大关系^[3,4]。除营养成分外,光照和温度是影响微藻光合生产和生长的重要因子,许多研究已表明,只要是在适宜的范围内,不论温度升高还是光照增强均会促进藻类生长^[5,6]。

在微藻的光合作用中,微藻吸收的光能既可以通过光合电子传递链被利用以驱动光化学反应,也可能以热能的形式耗散掉而不能用于光合生产,微藻对光能的热耗散与光合电子传递速率有明显的负相关关系^[7,8]。在研究光照对微藻的影响时人们发现,在适宜的光强范围内,光辐射能可以被微藻充分利用而以热能形式耗散的量较少,光照强度增强会使微藻的光合电子传递速率和光合速率增高,促进微藻的生长和生物量积累^[7,9]。相反,当光强超过微藻的适宜光强范围时,微藻对光能的热耗散增加,并且热耗散的强度随光强的升高而升高^[10-12]。因此,当光强较高时,光照强度的进一步升高并不一定会相应地使微藻的光合速率增高、生长加强,过量光能会以热耗散的形式消耗掉而不能用于光合生产。

已有研究发现,温度影响微藻对光辐射能的利用效率,在相同的光照水平下,温度升高导致藻细胞对光辐射能的热耗散增强,使微藻对光能的利用效率降低^[13-15]。鉴于光照水平大小与光能热耗散有一定关系,那么这种温度对热耗散的影响是否会加剧不同光照水平之间光能热耗散的差异呢?是否温度升高会使高光照水平下的光能热耗散增加的程度要大于低光照水平时光能热耗散的增加程度呢?如果回答是肯定的,可以想象,对于某些原来适宜微藻生长的光照水平,温度升高导致的光能热耗散增加可能会使此光照水平成为不适宜微藻生长的光照条件。在此情况下,可以推测,光照强度增加对微藻光合作用和生长的促进作用会因温度上升而降低。

在本实验中,研究了温度变化对不同光照水平下微藻的光能利用和生长的影响,以明确光照对微藻的光能利用和生长的影响是否因温度不同而发生变化。具体而言,拟回答如下问题:(1)是否不同温度对不同光照水平条件下微藻的光能热耗散影响不同,是否温度升高对微藻光能热耗散的增加在高光照水平下要高于低光照水平?(2)与低温条件相比,温度升高后是否光照增强对微藻生长的促进作用减小?(3)是否温度升高会改变微藻生长的适宜光照水平?

1 材料与方法

1.1 实验材料

在本实验中,以分离自嘉陵江(长江支流)的蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa* Chick.)作为实验材料来研究温度对不同光照水平条件下微藻光能利用和生长的影响。

1.2 实验方法

实验中使用人工气候箱对蛋白核小球藻进行培养。实验中设置3个光照水平(50、150、300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光合有效辐射 PAR)和两个温度水平(15、25℃),共对蛋白核小球藻进行6种不同温度和光照处理: L_1T_1 (光强 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度 25℃)、 L_2T_1 (光强 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度 25℃)、 L_3T_1 (光强 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度 25℃)、 L_1T_2 (光强 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度 15℃)、 L_2T_2 (光强 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度 15℃)、 L_3T_2 (光强 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度 15℃)。实验期间培养光暗时间比为 10:14。采用 HGZ 培养液进行培养,培养液 pH7.8。接种前将对应培养光强下驯化约一周的处于对数生长期的藻液于 2500r/min 离心 6min,用已高温高压灭菌^[6]的培养液洗涤 2 次,然后接种于已灭菌的培养液中,初始接种浓度为 10^5 个/L(细胞)。每个处理设置 3 个平行样(即重复),在设定的温度光照条件下培养 12d。自培养的第 2 天起测定不同培养条件下培养液中的叶绿素 a 浓度及不同培养条件下小球藻的表观电子传递速率(ETR)和叶绿素荧光的非光化学淬灭(non-photochemical quenching, NPQ),每隔 1d 测定 1 次。叶绿素 a 浓度可以反映蛋白核小球藻生物量的大小,表观电子传递速率可以反映蛋白核小球藻对光能的利用效率,叶绿素荧光的非光化学淬灭可以反映蛋白核小球藻对光能的热耗散。

蛋白核小球藻的叶绿素 a 浓度、表观电子传递速率(ETR)和叶绿素荧光的非光化学淬灭(NPQ)用 PhytoPAM 浮游植物分析仪(PhytoPAM Phytoplankton Analyzer,德国 Walz 公司)进行测定。

叶绿素 a 浓度测定:根据已建立的蛋白核小球藻叶绿素 a 浓度与荧光强度之间的关系,在 16 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的测量光强条件下(此时 PhytoPAM 浮游植物分析仪的光强设定为 MF32)测定蛋白核小球藻叶绿素 a 浓度。

表观电子传递速率(ETR)和叶绿素荧光非光化学淬灭(NPQ)的测定:将小球藻暗适应 30min 后给予藻液饱和脉冲,测得暗适应状态下的初始荧光 F_0 和最大荧光 F_m 。然后,将测量光强设定为小球藻相应的培养光强,照光时间 150s,在测量光照射结束时给予藻液一个饱和脉冲,测得测量光强下的稳态荧光 F_s 和最大荧光 F_m' 。根据这些指标可以计算出蛋白核小球藻的表观电子传递速率($ETR = [(F_m' - F_s) / F_m'] \times PAR \times 0.5 \times 0.84$ ^[7])和叶绿素荧光非光化学淬灭 $NPQ (NPQ = (F_m / F_m') - 1$ ^[1])。

1.3 数据分析

在检验温度和光照对 NPQ、ETR 和叶绿素 a 浓度的影响时采用双因素方差分析,不同温度或光照水平对 NPQ、ETR 和叶绿素 a 浓度的影响采用单因素方差分析和 Duncan 多重检验。NPQ 和 ETR 为整个实验期间相应指标的平均值,叶绿素 a 浓度为实验期末(培养期最后一天)培养液中小球藻的叶绿素 a 浓度。所有实验数据的处理使用 spss11.5 进行。

2 结果与分析

2.1 光照和温度对蛋白核小球藻叶绿素荧光非光化学淬灭(NPQ)的影响

实验结果发现,在 150、300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 两种光照条件下,温度变化对蛋白核小球藻的叶绿素荧光非光化学淬灭 NPQ 有显著影响,而且这种影响随光照强度增加而增加(图 1)。当培养光强为 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,温度从 15℃ 上升至 25℃ 后蛋白核小球藻的 NPQ 增高 3.16 倍,而当培养光强为 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,温度上升后蛋白核小球藻的 NPQ 增高 4.77 倍。但是,低光照条件(50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)下温度变化对 NPQ 没有明显影响。实验同时发现,较高温度条件下(25℃),不同光照对 NPQ 有显著影响,且 NPQ 值随光照强度的增加而增大;在较低温度条件下,不同光照强度对 NPQ 没有明显影响(图 1)。

叶绿素荧光非光化学淬灭(NPQ)在一定程度上反映了植物对吸收光能的热耗散,同时也反映了植物将

过剩光能转化为热能以避免过高光强对植物产生伤害的能力^[1,8]。从本研究可以看出,在相对较低的温度(15℃)下,蛋白核小球藻对光能的热耗散不高,并且在实验所设置的光强范围内,这种热耗散不会因为光照强度的升高而增强(图1)。但是,当温度上升后,小球藻对光能的热耗散明显提高,并且光强越大时热耗散增高越多。实验表明,温度与光照对小球藻的光能热耗散有明显的相互作用,温度对小球藻的光能热耗散影响会因光强的变化而发生变化,光照对小球藻的光能热耗散影响也会因温度的变化而表现出差异。

2.2 光照和温度对蛋白核小球藻表观电子传递速率(ETR)的影响

在实验中测定了不同光照水平和温度下蛋白核小球藻的表观电子传递速率(ETR)。从实验结果可以看出,蛋白核小球藻的光合电子传递速率与光照强度有明显的关系,随光照强度的逐渐增强,电子传递速率逐渐升高(图2)。从实验结果还可以看出,当光照强度处于较高水平时,温度会影响蛋白核小球藻的电子传递速率。当培养光强为150μmol·m⁻²·s⁻¹和300μmol·m⁻²·s⁻¹时,温度升高使电子传递速率明显降低,并且300μmol·m⁻²·s⁻¹培养光强下ETR的降低程度要大于150μmol·m⁻²·s⁻¹时的降低程度(图2)。150μmol·m⁻²·s⁻¹时温度从15℃升高到25℃后小球藻的ETR下降1.44倍,而300μmol·m⁻²·s⁻¹时温度从15℃升高到25℃后小球藻的ETR却下降了1.68倍。当光照强度水平较低时(50μmol·m⁻²·s⁻¹),温度升高对电子传递速率的影响不显著。

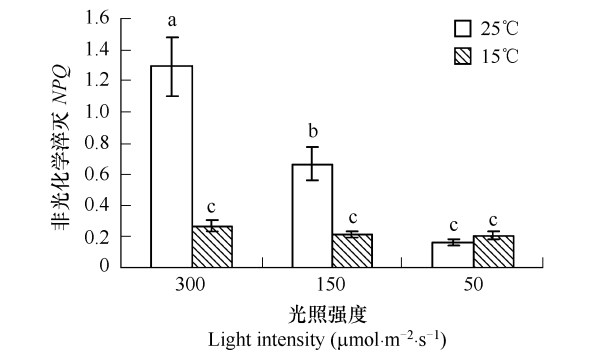


图1 不同光照强度和温度条件下蛋白核小球藻的叶绿素荧光非光化学淬灭 NPQ (mean ± se)

Fig. 1 Non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence (NPQ) (mean ± se) of *Chlorella pyrenoidosa* under various light and temperature conditions

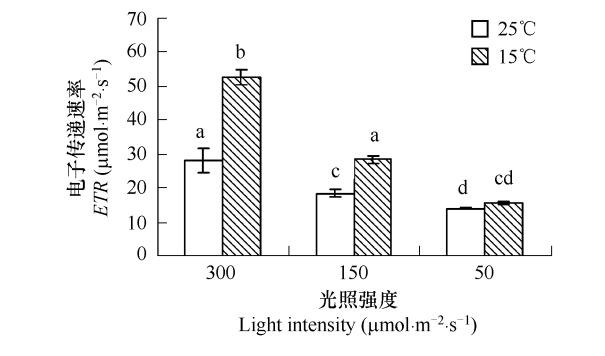


图2 不同光照强度和温度条件下蛋白核小球藻的表观电子传递速率 (mean ± se)

Fig. 2 ETR (mean ± se) of *Chlorella pyrenoidosa* under various light and temperature conditions

植物的ETR刻画了植物吸收的光能沿光合电子传递链被传递利用的多少,可以在相当程度上反映植物的光合速率的大小^[8,9]。从实验结果可以发现,不仅光照强度和温度会影响蛋白核小球藻的电子传递速率,而且二者对小球藻的电子传递速率有交互作用(表1),温度升高对电子传递速率的影响会因光照强度增强而呈现加强作用(图2)。

2.3 光照和温度对蛋白核小球藻叶绿素a(Chl a)浓度增长的影响

叶绿素a在藻细胞将光能转化为化学能的过程中发挥着重要作用,水体中叶绿素a浓度可以很好地反映出水体中浮游植物的生物量和生长状况^[18,19]。在实验中对不同光照强度和温度条件下小球藻培养液的叶绿素a浓度进行了分析,实验结果表明,温度对叶绿素a浓度变化的影响非常显著,温度升高导致小球藻的

表1 不同光照强度和温度对蛋白核小球藻ETR的影响

Table 1 The effects of light intensity and temperature on ETR of *Chlorella pyrenoidosa*

变量 Variable	双因素方差分析 Two way ANOVA		
	自由度 df	F 值 F value	显著性水平 Sig.
光照强度 Light intensity	2	88.10549	6.72 × 10 ⁻⁸
温度 Temperature	1	76.89873	1.45 × 10 ⁻⁶
光照 × 温度 Light × Temperature	2	31.37975	1.71 × 10 ⁻⁵

生长加快,培养液中叶绿素 a 浓度升高 (图 3)。

从实验结果还可以发现,光照增强对小球藻生长 (即叶绿素 a 浓度)的影响却可因温度的不同而不同。在 15℃ 时,培养液中叶绿素 a 浓度随光照强度升高而增加,但在 25℃ 时,叶绿素 a 浓度并不因为光照强度升高而一定会增加 (图 3),在此温度下,光强从 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 上升到 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,小球藻叶绿素 a 浓度增加,但光强从 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 上升到 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,叶绿素 a 浓度不但没有增加,反而下降。温度从 15℃ 上升至 25℃ 后,小球藻叶绿素 a 浓度在 50、150、300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 培养光强下分别增加 5.45、4.62 和 2.26 倍,光强越高,温度上升对生长的增强效应越低,说明温度与光照强度对小球藻叶绿素 a 浓度的影响存在极显著的交互作用 (表 2)。

3 讨论

许多研究已经发现,光照强度会影响植物和微藻叶绿素荧光的非光化学淬灭 (NPQ),随着光照强度升高,NPQ 会逐渐增大^[10~12]。同时,也有研究发现,温度也会影响植物叶绿素荧光的非光化学淬灭 (NPQ),当温度升高时,植物叶绿素荧光的非光化学淬灭 (NPQ)会增大^[13~15]。但在以往的研究工作中,对温度和光照这两个环境因子如何共同影响植物叶绿素荧光的非光化学淬灭少有关注。在本研究中,我们对不同温度和不同光照水平下蛋白核小球藻的叶绿素荧光非光化学淬灭 (NPQ)进行了分析,实验结果表明,温度对蛋白核小球藻 NPQ 的影响与光照水平有关,而同时,光照对蛋白核小球藻 NPQ 的影响也与温度高低有关,并非只要温度或光照强度升高,蛋白核小球藻的 NPQ 就一定会增大。当温度为 15℃ 时,蛋白核小球藻的 NPQ 并不因光照强度的增强而增大,而当光照强度为 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 (相对较低的光强),小球藻的 NPQ 也不因温度上升而相应地上升 (图 1)。从本研究中还可以看出,温度对小球藻 NPQ 的增强效应与光照水平有很大关系,光照水平越高,温度升高使小球藻 NPQ 增大的幅度越大,温度升高加强了高光照水平下小球藻对光能的热耗散 (图 1)。

在微藻吸收的总光能中,一部分光能可以通过光合电子传递链传递以驱动光化学反应用于碳同化,一部分光能以热能的形式耗散掉而不能用于光合生产。微藻对光能的热耗散与光合电子传递速率有明显的负相关关系^[7,8]。在本研究中,可以发现,由于温度升高会增高蛋白核小球藻的 NPQ,并且此增高的程度与光照水平有明显的关系 (图 2),因此,尽管随着光照强度的增加小球藻的电子传递速率逐渐升高,但低温时 (15℃) 这种升高的速率比在高温时 (25℃) 要快 (图 2)。由于温度升高对小球藻 NPQ 的增强效应在高光照水平时要比低光照水平大 (图 1),因而当温度升高时,高光照水平 (300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 下小球藻电子传递速率的降低程度比相对较低光照水平 (150、50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 下小球藻电子传递速率的降低程度大 (图 2)。不少研究已经表明,植物的光合电子传递速率与植物的光合速率 (CO₂ 吸收) 和生长有直接的关系,光合电子传递速率在很大程度上决定植物生长速率^[7,8]。由于温度升高导致高光照水平下小球藻叶绿素荧光非光化学淬灭增大并由此使小球藻的光合电子传递速率相对于低温时降低更多,小球藻的生长速率与光照水平的关系在高温

表 2 不同光照强度和温度对培养期末蛋白核小球藻培养液中叶绿素 a 浓度的影响

Table 2 The effects of light intensity and temperature on Chl a concentrations of *Chlorella pyrenoidosa* culture solution at the last day of cultivation

变量 Variable	双因素方差分析 Two way ANOVA		
	自由度 df	F 值 F value	显著性水平 Sig.
光照强度 Light intensity	2	156.5926	2.53×10^{-9}
温度 Temperature	1	299.9669	7.43×10^{-10}
光照 × 温度 Light × Temperature	2	156.5926	2.53×10^{-9}

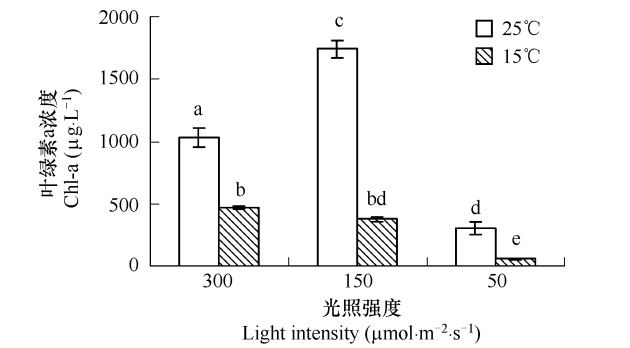


图 3 不同光照强度和温度条件下蛋白核小球藻叶绿素 a (Chl a) 浓度 (mean ± se)

Fig.3 Chl a concentration (mean ± se) of *Chlorella pyrenoidosa* culture under various light and temperature conditions

(25℃)和低温(15℃)条件下表现出明显不同。从研究结果可以看出,与15℃时相比,温度升高至25℃后光照增强对小球藻生长的促进作用减小,15℃时 $300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下小球藻生物量(叶绿素a浓度可间接表示)高于 $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下的生物量,但25℃时 $300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下小球藻生物量不但不高于 $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下的生物量,反而显著降低(图3)。这表明,温度升高对高光强水平下小球藻的光能利用和生长会产生阻抑,温度升高影响小球藻生长的适宜光照水平,导致小球藻最适生长光照水平降低。

在自然环境中,水体中的微藻会面临不同的温度和光照条件。相对而言,对于河流水体,除因汛期影响之外,夏季的光照水平高而冬季光照水平低,就温度条件而言,夏季温度高而冬季温度低。从本研究的结果看出,尽管单就光照水平或单就温度而言,它们都在微藻生长的适宜范围之内,单独光照水平上升或单独温度升高均会有利于小球藻的生长。但是,如果光照和温度两因子共同作用于微藻,两因子的水平均在发生变化的情况下,则由于温度和光照的相互作用,会导致原来适宜微藻生长的光照水平当温度升高后变为不适宜微藻生长的光照水平。因此,当对自然环境中藻类的生长进行分析和预测时,不仅仅需要考虑光照或温度单因素情况下当该因素水平变化时微藻生长的变化情况,同时一定要注意考虑这些环境因素共同作用时是否存在相互影响而改变微藻原有的最适生长条件,这样才能保证对藻类生长的分析和预测更为合理和准确。

References :

- [1] Han B P, Han Z G, Fu X. Algal Photosynthesis :Mechanisms and Models. Beijing Science Press ,2003.
- [2] Rao Sanadi D, Vernon L P. Current Topics in Bioenergetics. A Subsidiary of Harcourt Brace Hovanovich Publishers ,1978.
- [3] Geider R J, Delucia E H, Falkowski P G, *et al.* Primary productivity of planet earth :biological determinants and physical constraints in terrestrial and aquatic habitats. Global Change Biology ,2001 ,7 :849—882.
- [4] Zhou M J, Zhu M Y, Zhang J. Status of harmful algal blooms and related research activities in China. Chinese Bulletin of Life Sciences ,2001 ,13 (2) :53—59.
- [5] Liu Y S, Han M, Liang Z B. Influence of light intensity ,temperature and nutrients on the growth of *Microcystis* in water Dianchi Lake. Research of Environmental Sciences ,1995 ,8 (6) :7—11.
- [6] Takashi A, Munira S, Jagath M, *et al.* The effect of epiphytic algae on the growth and production of *Potamogeton perfoliatus* L. in two light conditions. Environmental and Experimental Botany ,2004 ,52 :225—238.
- [7] Peter J R, Rolf G. Rapid light curves :A powerful tool to assess photosynthetic activity. Aquatic Botany ,2005 ,82 :222—237.
- [8] D'Ambrosio N, Arena C, De Santo A V. Temperature response of photosynthesis ,excitation energy dissipation and alternative electron sinks to carbon assimilation in *Beta vulgaris* L. Environmental and Experimental Botany ,2006 ,55 :248—257.
- [9] João S, Rui S. Can chlorophyll fluorescence be used to estimate photosynthetic production in the seagrass *Zostera noltii* ? Journal of Experimental Marine Biology and Ecology ,2004 ,307 :207—216.
- [10] He Y H, Guo L S, Tian Y L. Chlorophyll fluorescence quenching characteristics of seven coniferous and broadleaved species in different light intensities. Scientia Silvae Sinicae ,2006 ,42 (2) :17—31.
- [11] Lian J Y, Xu Z F, Ye W H, *et al.* The characteristics of chlorophyll fluorescence in *Merremia boissiana*. Journal of Tropical and Subtropical Botany ,2005 ,13 (5) :443—446.
- [12] Philip H, John B. Changes in chlorophyll fluorescence during exposure of *Dunaliella tertiolecta* to UV radiation indicate a dynamic interaction between damage and repair processes. Photosynthesis Research ,2000 ,63 (2) :123—134.
- [13] Warner M E, Fitt W K, Schmidt G W. The effects of elevated temperature on the photosynthetic efficiency of zooxanthellae in hospite from four different species of coral reef :a novel approach. Plant Cell&Environment ,1996 ,19 :291—299.
- [14] Hill R, Schreiber U, Gademann R, *et al.* Spatial heterogeneity of photosynthesis and the effect of temperature-induced bleaching conditions in three species of corals. Marine Biology ,2004 ,144 :633—640.
- [15] Hill R, Frankart C, Ralph P J. Impact of bleaching conditions on the components of non-photochemical quenching in the zooxanthellae of a coral. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology ,2005 ,322 :83—92.
- [16] Hua R C. Cultivation and utilization of unicellular algae. Beijing :Agricultural Press ,1981.
- [17] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. Chinese Bulletin of Botany ,1999 ,16 (4) :444—448.
- [18] Dong Z Z, Dong Z F, Ding D W. A method of quick determination of algal biomass. Marine Sciences ,2004 ,28 (11) :2—3+6.
- [19] Wu S C, Chen W M. The periodic change of phytoplankton biomass in Taihu Lake. China Environmental Science ,2004 ,24 (2) :151—154.

参考文献 :

- [1] 韩博平,韩志国,付翔.藻类光合作用机理与模型.北京:科学出版社,2003.
- [4] 周名江,朱明远,张经.中国赤潮的发生趋势合研究进展.生命科学,2001,13(2):53—59.
- [5] 刘玉生,韩梅,梁占彬.光照、温度和营养盐对滇池微囊藻生长的影响.环境科学研究,1995,8(6):7—11.
- [10] 何炎红,郭连生,田有亮.7种针阔叶树种不同光照强度下叶绿素荧光猝灭特征.林业科学,2006,42(2):17—31.
- [11] 练璐璐,徐志防,叶万辉等.金钟藤叶绿素荧光特征初探.热带亚热带植物学报,2005,13(5):443—446.
- [16] 华汝成.单细胞藻类的培养与利用.北京:农业出版社,1981.
- [17] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论.植物学通报,1999,16(4):444—448.
- [18] 董正臻,董振芳,丁德文.快速测定藻类生物量的方法探讨.海洋科学,2004,28(11):2—6.
- [19] 吴生才,陈伟民.太湖浮游植物生物量的周期性变化.中国环境科学,2004,24(2):151—154.