

光照强度、温度、PH 盐度对小球藻 (*Chlorella*) 光合作用的影响

欧阳嵘嵘^{1,2}, 温小斌^{1,2}, 耿亚红¹, 梅洪¹, 胡鸿钧¹, 张桂艳^{1,2}, 李夜光^{1*}

(1. 中国科学院武汉植物园, 中国科学院植物种质创新与特色农业重点实验室, 武汉 430074

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用测定净光合放氧速率的方法研究了光照强度、温度、PH 盐度对小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 和海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 光合作用的影响。小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的适宜光照强度范围为 $100 \sim > 1600 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光饱和点在 $500 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近; 适宜温度范围为 $25 \sim 42.5^\circ\text{C}$, 最适温度为 37.5°C ; 适宜 PH 值范围为 $6.5 \sim 9.0$ 最适 PH 值为 7.0 对盐度的适应范围较广, 在 $0 \sim 0.6 \text{ mol/L}$ 范围内, 随着盐度的升高, 净光合放氧速率有下降趋势。海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的适宜光照强度范围为 $400 \sim > 1600 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光饱和点在 $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近; 适宜温度范围为 $25 \sim 42.5^\circ\text{C}$, 最适温度为 37.5°C ; 适宜 PH 值范围为 $5.0 \sim 9.0$ 最适 PH 值为 8.0 对盐度有很好的适应性, 在 $0 \sim 0.6 \text{ mol/L}$ 范围内, 随着盐度升高, 净光合放氧速率明显上升。小球藻和海洋小球藻的净光合放氧速率随光照强度、温度、PH 值和盐度变化的规律, 表明了两种小球藻的基本生理生态学特性: 能适应较强的光照强度、较高的温度、中性偏碱的环境和较高的盐度。研究结果有助于小球藻培养条件的优化。两种小球藻对光照强度、温度、PH 值和盐度变化的反应也有所不同: 与小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 相比, 海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 对光照强度有更好的适应性, 对 PH 值变化有更宽的适应范围, 适当提高盐度对其光合作用有明显的促进作用。这表明海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 在快速生长繁殖方面具有更大的潜力, 这一研究结果为筛选适合于大量培养的优良藻种提供了依据。

关键词: 小球藻; 海洋小球藻; 光合作用; 光照强度; 温度; PH 盐度

中图分类号: Q945.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-470X(2010)01-0049-07

The Effects of Light Intensities, Temperatures, PH and Salinities on Photosynthesis of *Chlorella*

OUYANG Zheng-Rong^{1,2}, WEN Xiao-Bin^{1,2}, GENG Ya-Hong¹, MEI Hong,

HU Hong-Jun¹, ZHANG Gui-Yan^{1,2}, LI Ye-Guang^{*}

(1. Key Laboratory of Plant Germplasm Enhancement and Specialty Agriculture, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The effects of light intensities, temperatures, PH and salinities on photosynthesis of *Chlorella* sp. XQ-200419 and *Chlorella marina* NJ-016 were studied by measuring net photosynthetic O_2 evolution. For *Chlorella* sp. XQ-200419, the suitable light intensities ranged from 100 to $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and the saturation light intensity is about $500 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The suitable temperatures ranged from 25°C to 42.5°C , with the optimal temperature of 37.5°C . The suitable PH values ranged from 6.5 to 9.0 and the optimum is PH 7.0 . The net photosynthetic O_2 evolution decreased a little while the salinity increased from 0 mol/L to 0.6 mol/L . For *Chlorella marina* NJ-016, the suitable light intensities ranged from 400 to $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and the saturation light intensity is about $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The suitable temperatures ranged from 25°C to

收稿日期: 2009-01-16 修回日期: 2009-04-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30570183); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KSCX2-YW-G-027, KSCX2-YW-G-060, KGCX2-YW-374-1); 中国科学院武汉植物园科技前沿部署项目 (07541221D010).

作者简介: 欧阳嵘嵘 (1983-), 女, 硕士研究生, 从事微藻生物技术研究。

* 通讯作者 (Author for correspondence, E-mail: yeguang@rose.whib.ac.cn).

42.5°C, with the optimal temperature of 37.5°C. The suitable pH values ranged from 5.0 to 9.0, and the optimum is pH 8.0. The net photosynthetic O_2 evolution increased obviously while the salinity increased from 0 mol/L to 0.6 mol/L. The results indicated the basic physiological and ecological characteristics of the two *Chlorella* species adapting to relatively strong light intensity, higher temperature, neutral to alkaline conditions and higher salinity. However, there are some differences between these two species in their response to the change of environmental conditions. Compared with *Chlorella* sp. XQ-200419, *Chlorella marina* NJ-016 has higher saturation light intensity and is able to adapt to much broader pH values. Besides, its photosynthesis is promoted by appropriate increase of salinity. It reveals that *Chlorella marina* NJ-016 might have more potential for fast growth in cultivation. The results are helpful for optimization of culture conditions for *Chlorella* and also valuable for selection of *Chlorella* strains suitable for mass culture.

Key words: *Chlorella*; *Chlorella marina*; Photosynthesis; Light intensity; Temperature; pH; Salinity

小球藻 (*Chlorella*) 是单细胞藻类, 分类学上属于绿藻门 (*Chlorophyta*)、绿藻纲 (*Chlorophyceae*)、绿球藻目 (*Chlorococcales*)、小球藻科 (*Chlorellaceae*)、小球藻属 (*Chlorella* Beijerinck)^[1]。其生态分布广, 生长快速, 易于人工培养^[2], 大规模培养技术成熟, 已成功实现工业化生产^[3]。小球藻含有丰富的蛋白质、脂肪、碳水化合物以及维生素, 有着很高的应用价值, 已被应用于食品、饲料、保健和医药等方面^[3-6]。小球藻的脂肪含量较高, 通过酯化后便可将其转变为生物柴油 (脂肪酸甲酯)^[7,8]。现在利用细胞工程技术, 可获得高脂含量的小球藻, 其脂含量高达细胞干重的 55% (质量分数)^[9]。所以, 小球藻作为一种能源微藻, 有着巨大的应用潜力。早在 20 世纪 80 年代初, 美国可再生能源国家实验室在能源部的资助下, 就开始了利用微藻制备生物柴油的研究, 其中就包括小球藻^[10]。

近年来国内外关于小球藻光合作用特性的研究较少, 主要集中在某些化学元素, 如钙、镉、锌、铜、铝、氟等, 以及光暗周期对光合作用的影响方面^[11-15]。我们利用测定净光合放氧速率的方法, 研究了光照强度、温度、pH 值和盐度对小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 和海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) (本实验室筛选出的在微藻生物柴油生产方面有应用潜力的两种小球藻的藻种^[16]) 光合作用的影响, 以期了解其光合作用特性, 为优化培养条件提供依据。

1 材料与方法

1.1 藻种

小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 和海洋小球

藻 (*Chlorella marina* NJ-016), 由中国科学院武汉植物园经济微藻藻种库提供。

1.2 培养基

小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 采用改良的 BG-11 培养基, 各组分浓度 (mg/L 蒸馏水) 如下: $NaNO_3$ (100), $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ (40), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (75), $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (36), $FeCl_3$ (6), Citric acid (6), $EDTA Na_2$ (1), Na_2CO_3 (20), 微量元素母液 1 mL/L。微量元素母液配方 (g/L): H_3BO_3 (2.86), $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ (1.8), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.22), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (0.08), $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ (0.1104), $Cq(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (0.0494)。

海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 采用 f/2 培养基, 各组分浓度 (mg/L 人工海水) 如下: $NaNO_3$ (75), $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ (6.5), $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (3.2), $EDTA$ (1.8), $Na_2SO_3 \cdot 9H_2O$ (20), Vitamin B₁ (0.1), Biotin (0.0005), Vitamin B₂ (0.0005), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (0.01), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.022), $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ (0.012), $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ (0.18), $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ (0.0073)。人工海水配方 (g/L 蒸馏水): $NaCl$ (20.758), KBr (0.0845), Na_2SO_4 (3.477), H_3BO_3 (0.0225), KCl (0.587), NaF (0.0027), $NaHCO_3$ (0.17), $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (9.395), $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (1.316), $SiCl_2 \cdot 6H_2O$ (0.0214)。

1.3 培养条件

用 1 L 三角瓶培养小球藻, 每瓶放藻液 600 mL。接种后放在水平摇床上培养, 转速 110 r/min, 温度 $24 \pm 1^\circ C$, 光强 $70 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 光暗周期为 14 h : 10 h。

1.4 藻液吸光度的测定

用 752C 紫外可见分光光度计测定,在波长为 540 nm 下测定藻液的吸光度 (OD_{540})。

1.5 光合放氧速率的测定

采用本实验室组装的溶解氧测定系统,测定藻液溶解氧浓度的变化。该系统由具有温度自动补偿功能的 RSS5100 型便携式溶解氧测定仪、带夹层的玻璃反应杯、磁力搅拌器、LKB2219 multiTemp II 型恒温循环水浴(控温精度为 0.1°C)和 2 组荧光冷光源组成,光强调节范围: $0 \sim 1600 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。读取溶解氧测定仪上的读数,即溶解氧浓度 DO (mg/L),计算单位时间内溶解氧的变化值,取 5 个相对稳定的数据,求得平均值,计算净光合放氧速率^[17-20]。

$$\text{净光合放氧速率} (\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{chl a}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = \frac{\Delta \text{DO} (\text{mg/L}) \times 1000}{32 \times \text{chl a} (\text{mg/L}) \times t (\text{h})}$$

式中, chl a 为叶绿素 a 的浓度,单位为 mg/L ,为反应杯中每两次溶解氧浓度读数间的间隔时间,单位为 h。

1.6 叶绿素含量的测定

利用目前研究水生植物和藻类普遍使用的热乙醇萃取分光光度法测定叶绿素 a 含量^[21]。

1.7 不同光照强度下光合放氧速率的测定

在温度为 37.5°C 、pH 值为 7.0 ± 0.05 的条件下,测定小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的净光合放氧速率,光强梯度: 100、300、400、500、600、800、1000、1200、1400、1600 $\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在温度为 37.5°C 、pH 值为 8.0 ± 0.05 的条件下,测定海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的净光合放氧速率,光强梯度: 100、400、600、800、1000、1200、1300、1400、1600 $\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。每次测定设 3 个平行样。

1.8 不同温度条件下光合放氧速率的测定

在光强为 $500 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、pH 值为 7.0 ± 0.05 的条件下,测定小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的净光合放氧速率,温度梯度: 10、15、20、25、30、32.5、35、37.5、40、42.5 $^{\circ}\text{C}$ 。在光强为 $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、pH 值为 8.0 ± 0.05 的条件下,测定海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的净光合放氧速率,温度梯度: 10、15、20、25、30、

35、37.5、40、42.5 $^{\circ}\text{C}$ 。每次测定设 3 个平行样。

1.9 不同 pH 值条件下光合放氧速率的测定

在光强为 $500 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、温度为 37.5°C 的条件下,测定小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的净光合放氧速率,pH 值梯度: 6.0、6.5、7.0、8.0、9.0、10.0、10.5、11.0。在光强为 $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、温度为 37.5°C 的条件下,测定海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的净光合放氧速率,pH 值梯度: 4.0、6.0、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0。每次测定设 3 个平行样。

1.10 不同盐度条件下光合放氧速率的测定

在光强为 $500 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、温度为 37.5°C 、pH 值为 7.0 ± 0.05 的条件下,测定小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的净光合放氧速率,盐度梯度: 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mol/L 。在光强为 $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、温度为 37.5°C 、pH 值为 8.0 ± 0.05 的条件下,测定海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的净光合放氧速率,盐度梯度: 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mol/L 。每次测定设 3 个平行样。

2 结果和分析

2.1 光照强度对光合放氧速率的影响

在光强 $100 \sim 300 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的净光合放氧速率随光强的增加而快速上升;在光强 $300 \sim 500 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,净光合放氧速率随光强的增加而上升的趋势明显减缓;在光强 $500 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时净光合放氧速率达到最大;在光强 $500 \sim 1600 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,净光合放氧速率随光强的增加而缓慢下降(图 1)。实验表明,小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的最适光照强度为 $500 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其光强适应范围较广。在光强 $100 \sim 1400 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的净光合放氧速率随光强的增加而快速上升;在光强 $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时净光合放氧速率达到最大;在光强 $1400 \sim 1600 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,净光合放氧速率随光强的增加而明显下降,表现出光抑制(图 1)。实验表明,海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的最适光照强度为 $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其生长需要较强的光照。

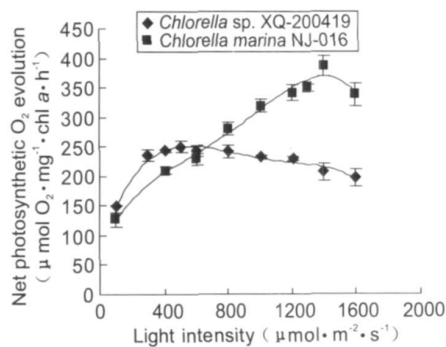


图 1 净光合放氧速率与光照强度的关系

Fig 1 Photosynthesis—light intensity response curves

2.2 温度对光合放氧速率的影响

在 10~37.5℃ 的温度范围内, 两种小球藻的净光合放氧速率随温度的增加而快速上升; 在 37.5℃ 时净光合放氧速率达到最大; 温度高于 37.5℃, 净光合放氧速率随温度的增加而开始下降 (图 2)。实验表明, 两种小球藻最适温度为 37.5℃, 都能够适应较高的温度。

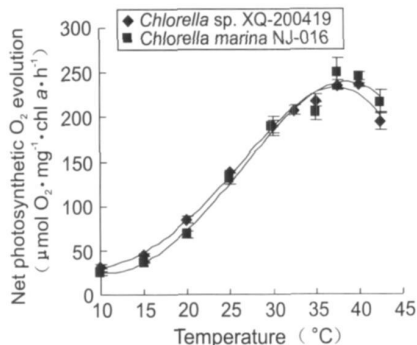


图 2 净光合放氧速率与温度的关系

Fig 2 Photosynthesis—temperature response curves

2.3 pH 对光合放氧速率的影响

两种小球藻的适宜 pH 值都在中性偏碱的范围内。小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 在 pH 7.0 时净光合放氧速率达到最大。海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 在 pH 8.0 时净光合放氧速率达到最大 (图 3)。需要注意的是, pH 6.0 时, 小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的净光合放氧速率为 0, 表明其不能适应较低 pH 的环境; 与小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 不同, 海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 虽然可以耐受较低 pH 的环境, 在 pH 4.0 时仍然保持一定的净光合放氧速率, 但是对于较高的 pH 极敏感, 藻液的 pH 值

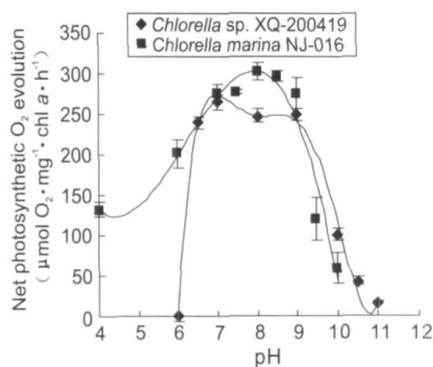


图 3 净光合放氧速率与 pH 的关系

Fig 3 Photosynthesis—pH response curves

高于 10.0 时, 净光合放氧速率急剧下降, 同时藻体絮凝下沉。

2.4 盐度对光合放氧速率的影响

在 0~0.6 mol/L 盐度范围内, 小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的净光合放氧速率随着盐度的增加有缓慢下降的趋势, 海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的净光合放氧速率随着盐度的增加而明显上升 (图 4)。总的来看, 两种小球藻可以适应的盐度范围都较大。

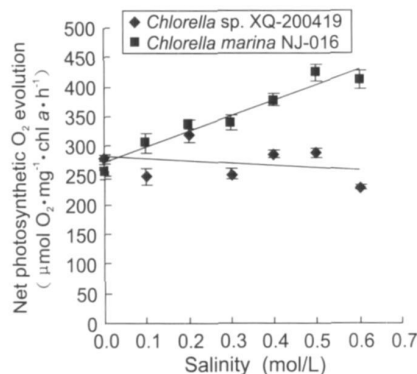


图 4 净光合放氧速率与盐度的关系

Fig 4 Photosynthesis—salinity response curves

3 讨论

光合作用是绿色植物最基本、最重要的生命活动过程。光照是影响藻类生长繁殖的最重要生态因子之一。在一定温度、pH 和营养条件下, 光照的强弱决定着藻类光合作用的速率。藻类对光照强度有一个饱和点, 低于光饱和点, 随着光强的增加, 藻类的光合速率加快; 超过光饱和点, 藻类的光合速率不再增加, 甚至减弱、停止。所以, 并非光强越大, 藻类

的光合速率就会越大,而是有一个限度,超过这个限度,藻类的光合作用就会受到抑制。据报道,在适温条件下小球藻最适光照强度为 10000 lx 左右^[22]。严美娇等在研究光照对小球藻生长速率及叶绿素含量的影响时,发现光照强度为 5000 lx 时,小球藻的生长速率和叶绿素含量最大^[23]。孙妮等在研究碳氮比和光强对小球藻合成虾青素的影响时,发现 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强在没有严重影响小球藻生长的同时,明显提高虾青素含量^[24]。毛安君等在研究光谱对小球藻生长的影响时,发现连续光谱能够获得较高的最大生长率,蓝光促进生长的效率较高,两者组合能够较好地兼顾效率和速率^[25]。目前未见光照强度对小球藻光合作用影响的报道。本研究中,小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的光饱和点为 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,随着光强的增加,能很快达到光饱和点,并且在很宽的光强范围内维持高的净光合放氧速率;与小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 相比,海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的光饱和点更高,但是,在光强超过光饱和点后,净光合放氧速率迅速下降。与文献报道中的藻种相比,本研究的藻种对光强的适应能力更强,更具有应用于大规模养殖的潜力。

据报道,小球藻的最佳温度为 25~27℃^[26]。李冬玲的研究结果是小球藻的最适宜生长温度为 26℃^[27]。而吴松则认为小球藻生长的适宜水温是 10~33℃,最适温度为 25℃左右^[22]。刘艳等在研究小球藻的优化培养时,认为其最适的培养温度为 15℃^[28]。不同的研究者报道的最适温度不同,可能是由于实验中所使用的藻种或者品系不同所致。本研究中,两种小球藻光合作用的温度特性相同,最适温度均为 37.5℃,而且 42.5℃ 时仍能进行旺盛的光合作用,均属于耐高温的藻种。

pH 值是藻类生长环境的重要理化指标。据报道,小球藻能生存的 pH 值为 3.5~9.5 其中最适宜生长的 pH 值为 6.5~7.5, pH 值低于 3.0 时小球藻生长会受到抑制,但大于 9.5 时未发现小球藻生物产量受到影响^[29,30]。韦金河等在研究不同氮、碳源对蛋白核小球藻培养液 pH 值的影响时发现,培养液的 pH 值达到 10.00 时,小球藻能正常生长;当 pH 值超过 10.00 时,小球藻发生藻细胞下降现象,但未影响其生长^[31]。贺立静等在研究硫和 pH 对蛋白核小球藻光照产氢的影响时观察到,小球藻

在 pH 6.0~7.0 时生长最佳^[32]。吴松报道,小球藻生长适宜的酸碱度为 pH 6~8 左右^[22]。我们首次详细地研究了 pH 对小球藻光合作用的影响。结果表明,两种小球藻都较适宜中性偏碱的环境,与已有报道基本相符,但也有其各自的特点:小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 在弱酸性环境 (pH 6.0) 中,净光合放氧速率下降为零;海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 虽能耐受弱碱性环境,但是 pH 10.0 时藻细胞便絮凝下沉,净光合放氧速率急剧下降。

目前关于盐度对小球藻影响的报道很少。仅见王全喜等对椭圆小球藻抗盐性的研究,其结果表明,椭圆小球藻能够抵抗较高的盐浓度,可在 0.6% 的氯化钠盐度中正常增殖,在 0.8% 氯化钠盐度中仍可存活,随着盐度的增加,延缓期加长,指数生长期的细胞分裂频率 K 值降低^[33]。本研究首次详细地研究了盐度对小球藻光合作用的影响。结果表明,两种小球藻对盐度都有非常强的适应性,尤其海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016),适当提高盐度对其光合作用有很明显的促进作用,这可能由于海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 来源于海洋,是长期适应海洋高盐度 (3.4%) 环境的结果。不同浓度 NaHCO_3 对小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 生长影响的实验中 (实验结果未显示),在 0~16.8 g/L 浓度范围内,提高 NaHCO_3 的浓度,对小球藻的生长有促进作用,也证明小球藻可以很好地适应较高的盐度。藻种的耐盐特性对于大规模培养有着重要的意义:首先,在培养小球藻时,由于培养条件 (pH 值、温度等) 适合大多数淡水藻生长,常出现很多杂藻,营造高盐度的选择性环境,便可以防止其它杂藻的污染^[33];其次,我国海洋面积广阔,海水资源丰富,若利用海水进行大量培养,有其独特的资源优势,还可以带动沿海地区的经济和社会发展^[34]。

两种小球藻净光合放氧速率随光照强度、温度、pH 值和盐度变化的规律表明了其基本生理生态学特征:能适应较强的光照强度、较高的温度、中性偏碱的环境和较高的盐度 (表 1, 表 2)。对两种小球藻随 4 种最主要的环境因子变化的规律的了解,为培养条件的优化提供了依据。两种小球藻对光强、温度、pH 值和盐度变化的反应也有所不同:小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-200419) 的光饱和点较低,光强

表 1 小球藻对几种主要环境条件的要求
Table 1 Requirement of *Chlorella* sp. XQ-200419 on main environmental conditions

条件 Conditions	光照强度 Light intensity ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	温度 (°C) Temperature	PH	盐度 Salinity (mol/L)
最适条件 Optimal conditions	500	37.5	7.0	0
适宜条件 Suitable conditions	100 ~ >1600	25 ~ >42.5	6.5 ~ 9.0	0 ~ >0.6

注: 最适条件: 净光合放氧速率最高时条件; 适宜条件: 保持最大净光合放氧速率 50% 的条件。
Notes: Optimal Conditions corresponding to the maximal net photosynthetic oxygen evolution. Suitable Conditions corresponding to 50% of the maximal net photosynthetic oxygen evolution.

表 2 海洋小球藻对几种主要环境条件的要求
Table 2 Requirement of *Chlorella marina* NJ-016 on main environmental conditions

条件 Conditions	光照强度 Light intensity ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	温度 (°C) Temperature	PH	盐度 Salinity (mol/L)
最适条件 Optimal conditions	1400	37.5	8.0	>0.6
适宜条件 Suitable conditions	400 ~ >1600	25 ~ >42.5	5.0 ~ 9.0	0 ~ >0.6

注: 最适条件: 净光合放氧速率最高时条件; 适宜条件: 保持最大净光合放氧速率 50% 的条件。
Notes: Optimal Conditions corresponding to the maximal net photosynthetic oxygen evolution. Suitable Conditions corresponding to 50% of the maximal net photosynthetic oxygen evolution.

适应范围较广, 能适应较高的盐度, 但是不能适应弱酸性 (PH6.0) 环境; 海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 的光饱和点较高, 对 PH 值变化有更宽的适应范围; 盐度的适当提高对其光合作用有很明显的促进作用。表明海洋小球藻 (*Chlorella marina* NJ-016) 在快速生长繁殖方面具有更大的潜力, 这一研究结果也为筛选适合于大量培养的小球藻优良藻种提供了依据。

参考文献:

[1] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生

态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 602—605
[2] 王逸云, 王长海. 无菌条件下的小球藻培养条件优化 [J]. 烟台大学学报: 自然科学与工程版, 2006, 19 (2): 125—129.
[3] 胡开辉, 汪世华. 小球藻的研究开发进展 [J]. 武汉工业学院学报, 2005, 24 (3): 27—30
[4] 李师翁, 李虎乾. 植物单细胞蛋白资源——小球藻开发利用研究的现状 [J]. 生物技术, 1997, 7 (3): 45—48
[5] 李志勇, 郭祀远, 李琳, 等. 微藻保健食品的开发与利用 [J]. 食品研究与开发, 1997, 18 (2): 38—40
[6] Soong P. Production and development of *Chlorella* and *Spirulina* in Taiwan [M]. // Shelef G, Soeder C J. Algae Biomass Production and Use. Amsterdam, Elsevier/North-Holland Biomedical Press, 1980: 97—113.
[7] 缪晓玲, 吴庆余. 微藻生物质可再生能源的开发利用 [J]. 可再生能源, 2003 (3): 13—16.
[8] 缪晓玲, 吴庆余. 微藻油脂制备生物柴油的研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28 (2): 219—222
[9] 缪晓玲, 吴庆余. 藻类异养转化制备生物油燃料技术 [J]. 可再生能源, 2004 (4): 41—44.
[10] Sheehan J, Dunahay T, Benemann J, Roessler P. A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae [M]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-580-24190, 1998.
[11] AbdelBasset R. Role of calcium and cadmium as antagonist in photosynthesis and salinity tolerance in *Chlorella vulgaris* [J]. Bioprocess Technology, 1993, 35 (2): 237—244
[12] Langovan K, Canizares-Villanueva R O, Gonzalez Moreno S, Vololina D. Effect of cadmium and zinc on respiration and photosynthesis in suspended and immobilized cultures of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acus* [J]. Bull Environ Contam Toxicol, 1998, 60: 936—943.
[13] Šegén F, Káňová K, Břehová M. Photosynthesis of *Chlorella vulgaris* as affected by diaqua (4-chloro-2-methylphenoxy)acetic acid-copper (II) complex [J]. Bioprocess Technology, 2008, 38 (1): 71—75.
[14] Grobbelaar J U, Kroon B M A, Burger W, Jersma T, Mur L R. Influence of medium frequency light/dark cycles of equal duration on the photosynthesis and respiration of *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Hydrobiol.

- pg. 1992, 238: 53—62
- [15] Rai LC, Husaini Y, Malik N. pH altered interaction of aluminum and fluoride on nutrient uptake, photosynthesis and other variables of *Chlorella vulgaris* [J]. *Aquatic Toxicology*, 1998, 42: 67—84
- [16] 梅洪, 张成武, 殷大聪, 耿亚红, 欧阳峥嵘, 李夜光. 利用微藻生产可再生能源研究概况 [J]. *武汉植物学研究*, 2008, 26(6): 650—660
- [17] 李小龙, 耿亚红, 李夜光, 胡鸿钧. 从光合作用特性看铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 的竞争优势 [J]. *武汉植物学研究*, 2006, 24(3): 225—230
- [18] 邓光, 李夜光, 胡鸿钧, 齐雨藻, 耿亚红, 李中奎. 温度、光照和 pH 值对锥状斯氏藻和塔玛亚历山大藻光合作用的影响及光暗周期对其生长速率和生物量的影响 [J]. *武汉植物学研究*, 2004, 22(2): 129—134
- [19] 张宝玉, 李夜光, 李中奎, 耿亚红, 胡鸿钧. 温度、光照强度和 pH 对雨生红球藻光合作用和生长速率的影响 [J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(5): 558—565
- [20] 殷大聪, 耿亚红, 梅洪, 欧阳峥嵘, 胡鸿钧, 李夜光. 几种主要环境因子对布朗葡萄藻 (*Bouyococcus braunii*) 光合作用的影响 [J]. *武汉植物学研究*, 2008, 26(1): 64—69
- [21] 陈宇炜, 高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定 [J]. *湖泊科学*, 2000, 12(2): 185—188
- [22] 吴松. 小球藻工厂化人工培育技术 [J]. *海洋与渔业*, 2008(8): 34—35
- [23] 严美姣, 王银东, 胡贤江. 光照对小球藻、斜生栅藻生长速率及叶绿素含量的影响 [J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(23): 27—29, 59
- [24] 孙妮, 向文洲, 何慧, 陈峰. 碳氮比和光强对小球藻合成虾青素的影响 [J]. *微生物学通报*, 2008, 35(3): 353—357
- [25] 毛安君, 王晶, 林学政, 孟继武. 光谱对小球藻和等鞭金藻生长的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(5): 991—994
- [26] 张登沥, 何培民, 周洪琪. 不同方法培养小球藻的试验 [J]. *上海水产大学学报*, 1999, 8(1): 1—5
- [27] 李冬玲. 小球藻的培养管理 [J]. *特种经济动植物*, 2006, 9(2): 39—39
- [28] 刘艳, 杨海波, 林芃, 张欣华. 小球藻的优化培养及胞内多糖的提取 [J]. *生物技术*, 2002, 12(3): 18—20
- [29] 张大兵, 吴庆余. 小球藻细胞的异养转化 [J]. *植物生理学通讯*, 1996, 32(2): 140—144
- [30] 张丽君, 杨汝德. 小球藻的异养生长及培养条件优化 [J]. *广西植物*, 2001, 21(4): 353—357
- [31] 韦金河, 汪廷, 宁运旺, 唐玉邦, 虞利俊. 不同氮、碳源对蛋白核小球藻 pH 值的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2004, 20(1): 63—64
- [32] 贺立静, 雷腊梅, 龙敏南, 韩博平. 硫和 pH 对蛋白核小球藻光照产氢的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(6): 487—492
- [33] 王全喜, 李宝娥, 刘祥君. 椭圆小球藻抗盐性的研究 [J]. *牡丹江师范学院学报 (自然科学版)*, 1992(2): 3—5
- [34] 胡风庆, 侯潇, 吴庆余. 利用微藻热解成烃制备可再生生物能源进展 [J]. *辽宁大学学报*, 1999, 26(2): 182—187