

伊乐藻光合能力对三种生态因子的响应

靳 萍¹, 胡灵卫², 靳同霞¹, 李元龙¹, 马剑敏^{1,3}

(1. 河南师范大学生命科学学院, 河南新乡 453007; 2. 商丘医学高等专科学校, 河南 商丘 476100;
3. 河南省环境污染控制重点实验室, 河南 新乡 453007)

摘要:为了解外来种伊乐藻的生态适应性,通过测定其光合产氧量的方法,研究了其光合能力对温度、光照强度和 pH 3 种生态因子的响应。结果表明:在温度和光照范围分别为 10 ~ 35℃ 和 $1 \times 10^3 \sim 5.3 \times 10^3$ lx 的条件下,伊乐藻光合净产氧量和总产氧量都与温度和光照呈正相关,随温度和光照强度的增加,光合净产氧量和总产氧量呈增加趋势,对不同的温度和光照组合均有很强的适应性;在 5 300 lx 条件下,30℃ 时总产氧量最高,为 1.814 mg/(L · h · g),净产氧量也最高,为 1.47 mg/(L · h · g);在 30℃ 时,5 300 lx 光照强度下其总产氧量和净产氧量均最高,光合能力强,但未达光饱和点;最低光强度条件下未达光补偿点。在 pH 5 ~ 9 的 5 种梯度内,适宜 pH 范围为 5 ~ 7, pH 为 6 时生长最佳。伊乐藻光合能力对 3 种生态因子响应的基本生理生态学特征为:对光照强度和温度的适应性较强,在较强的光照、较高的温度和中性略偏酸的水环境中生长较好。

关键词:伊乐藻;光照强度;温度; pH; 光合产氧量;适应性

中图分类号:Q178.1, Q179.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 3075(2013)01 - 0025 - 05

伊乐藻 (*Elodea nuttallii*) 原产北美,雌雄异株,与我国的苦草、轮叶黑藻同属于水鳖科,于 1980 年代初引入我国(谷孝鸿等,2002;吴英海等,2009),是一种优质、速生、高产的沉水植物。伊乐藻具有适应性强、成本低、净化水质效果好等优点,越来越多地被应用到水产养殖、水体净化、生态修复等领域(吴英海等,2009)。对于伊乐藻的研究,已有不少报道,如在富营养水体中对磷的积累能力研究(Robach 等,1995)、繁殖与栽培技术(连光华等,1996)、断枝的克隆繁殖(马剑敏等,2010)、对高浓度氮磷的耐受性(王小冬等,2009)、在水生态修复中的应用(李文潮,1996;马剑敏等 2007)等。对沉水植物而言,由于完全水生的特点,对环境胁迫的反应极为敏感(王珺等,2006),水中的营养盐、光强、温度、水深、溶氧等理化因子都会对其生长发育及分布建群等造成影响,而光照强度、温度、营养盐被认为是影响沉水植物生产力、分布和种群结构最重要的理化因子(刘建康,1999)。

温度主要影响光合和呼吸速率,对沉水植物的季节性生长有显著影响,是决定沉水植物营养繁殖体萌发及其幼苗生长发育的重要因素。研究发现在 4 ~ 30℃ 的温度范围内,菹草、苦草、狐尾藻、金鱼藻和大茨藻的光补偿点随温度的升高而升高(朱丹婷等,2011)。水下光照强度经水的透射和吸收后变得较弱,研究表明,当水下光照强度小于入射光的 1% 时,沉水植物将长期处于低于其光补偿点的弱光环境而无法定居,若水下光照强度小于入射光的 5%,黑藻断枝将无法发育成成熟植株(苏文华等,2004)。植物光合和呼吸过程会影响水中 pH 变化,进而影响植物的生理生化过程。

本研究采用正交试验设计,研究不同生态因子组合下,伊乐藻光合能力与生态因子的关系,寻求影响伊乐藻生长的主要生态因子,探求其生长适宜的环境条件,为深入研究伊乐藻的光合变化过程和合理应用提供一定的理论依据与参考。

1 材料和方法

1.1 实验材料

从常年培养于河南师范大学生物园室外水缸中采集伊乐藻。实验前先放入铺有底泥的玻璃缸中预培养,待枝条长到 15 ~ 20 cm 取样。HP300G-C 型智能光照培养箱由武汉瑞华仪器设备有限公司生产。实验过程中培养伊乐藻所用的水为预培养时所用底泥的浸出液,并经细网过滤, pH 值约 7.0。

收稿日期:2012 - 10 - 21

基金项目:国家“十二五”水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101007 - 005);新乡市重点科技攻关计划(ZG11002)

通讯作者:马剑敏,1964 年生,男,博士,教授,主要从事污染与修复生态和环境生物学研究。E-mail: mjm6495@sina.com

作者简介:靳萍,1969 年生,女,实验师,主要从事环境生物学方面的研究。E-mail: jinpj@henannu.edu.cn

1.2 实验方法

1.2.1 温度、光照和 pH 值的设计 温度与光照：选择 10、15、20、25、30、35℃6 个温度梯度，每个温度下有 5 个不同级别的光照强度，用照度仪分别测出平均光强度为 1 000、1 600、3 000、3 600、5 300 lx，分别定义为 1、2、3、4、5 级光照强度。每水平 4 个重复。

pH 值：将自来水用 HCl 和 NaOH 调成 pH 值为 5、6、7、8、9、10。将伊乐藻顶枝放入相应的磨口瓶，每个 pH 值的梯度下设置 4 个白瓶、4 个黑瓶、4 个重复，置于 25℃和 3 600 lx 的光照培养箱中。

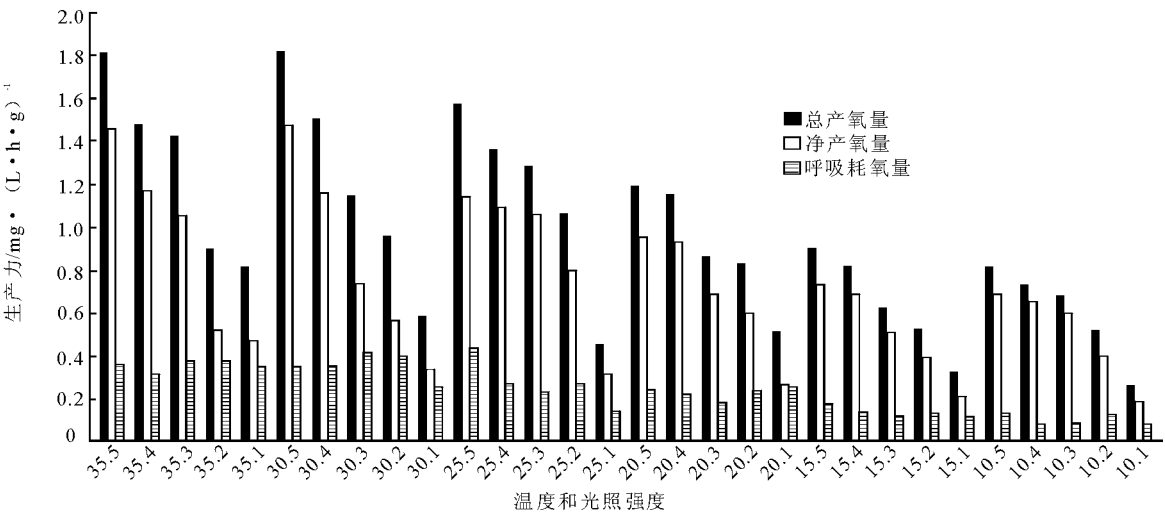
1.2.2 测定方法 黑白瓶法(金相灿等,1990)测定植物的生产力。材料清洗后，放入装有放置 2 周的底泥浸出液的玻璃缸中 1 d，昼夜比为 12 h：12 h。第 2 天称取约 0.4 g，分别放于黑白瓶中，2 h 后取出进行溶解氧的测定(吴英海等,2009)。碘量法(金相灿等,1990)测定曝光前后黑白瓶溶解氧的变化，得出不同植物在不同温度、光照强度和 pH 下

的净产氧量，采用 3 次重复实验测定的溶解氧平均值，回归分析计算其光补偿点。

2 结果与分析

2.1 伊乐藻在不同温度和光照下产氧量和呼吸耗氧量的变化

伊乐藻光合产氧量(包括总产氧量和净产氧量)和呼吸耗氧量的变化总趋势一致，在设定的温度和光强条件下，随温度和光照强度的增加而增加，但 35℃时与 30℃时的差异较小，在 35℃和光强 5 级时，光合产氧量还略有降低，光合作用速率减慢并逐渐达到光饱和(图 1)。温度和光强的增加有利于伊乐藻进行光合作用，快速生长；在较短的时段内，伊乐藻对较高温度和充足的阳光有良好的适应性；当温度和光照强度降低时，其总产氧量、净产氧量和呼吸耗氧量也随之降低，在 10℃和 1 级光强时，光补偿点仍不为 0，说明伊乐藻光补偿点较低，能在较低温度和较低光照强度下生长。



横轴小数点前的数指温度(℃)，小数点后的数指光照强度，1,2,3,4,5 分别表示光强为 1 000、1 600、3 000、3 600、5 300 lx

图 1 伊乐藻在不同温度和光照强度下的产氧量

The number before the decimal point refers to temperature(℃)，and the number after the decimal point refers to light intensity on horizontal axis,1,2,3,4,5 representing the light is 1 000 lx, 1 600 lx, 3 000 lx, 3 600 lx, 5 300 lx

Fig.1 The oxygen production of *E. nuttallii* on different temperatures and different light intensities

伊乐藻在 5 300 lx 光照条件下的产氧量，总体随着温度的增加而呈上升趋势(图 2)。30℃时其总产氧量最高，为 1.814 mg/(L · h · g)，净产氧量也最高，为 1.47 mg/(L · h · g)，说明伊乐藻的净光合作用在 30℃最高，净积累的有机物最多，较有利于生长。35℃时的总产氧量 1.808 mg/(L · h · g)，略低于 30℃时的总产氧量，但相比其他较低温度下的总产氧量也明显高，说明伊乐藻对较高温度有一定耐受性。

在 30℃温度条件下，随着光照强度的增强伊乐藻总产氧量和净产氧量呈增加趋势(图 3)。光照强度与总产氧量和净产氧量之间正相关($p < 0.05$)，而其呼吸耗氧量变化幅度并不大。结合图 2，说明 30℃最适合伊乐藻生长，净积累的有机物最多。同时看出 5 级光强下，仍未达其光饱和点；最低光强度条件下，净产氧量大于 0，未达其光补偿点，能继续净积累有机物。表明伊乐藻对光照强度的适应性较好，适宜生长条件为 30℃和 5 300 lx。

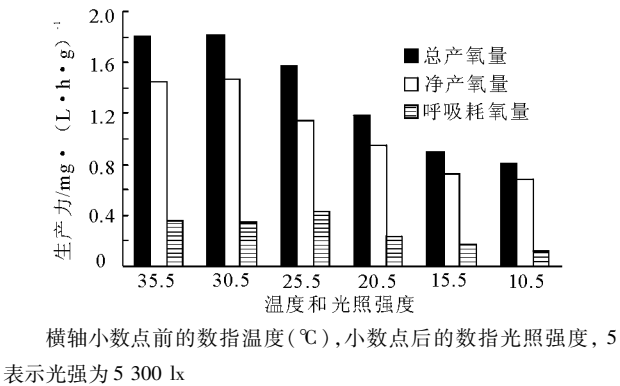


图2 5 300 lx 光照强度下伊乐藻在不同温度的产氧量

The number before the decimal point refers to temperature(℃), and the number after the decimal point refers to light intensity on horizontal axis, 5 representing the light is 5 300 lx

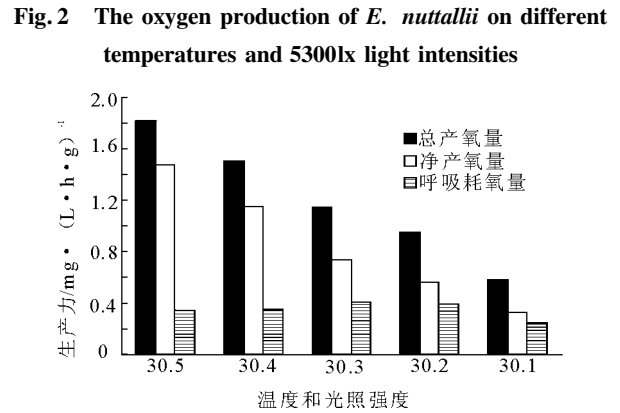


图3 30℃下伊乐藻在不同光照强度的产氧量

The number before the decimal point refers to temperature(℃), and the number after the decimal point refers to light intensity on horizontal axis, 1,2,3,4,5 representing the light is 1 000, 1 600, 3 000, 3 600, 5 300 lx

Fig.3 The oxygen production of *E. nuttallii* at 30℃ and different light intensities

2.2 pH 对伊乐藻光合作用的影响

伊乐藻在光照强度 3 600 lx、水温 25℃ 和 pH 5 ~ 9 的条件下,光合作用强度随着 pH 值的增加呈现先增后降的趋势(图 4)。pH 为 6 时总产氧量和净产氧量均达最大值,之后随着 pH 的升高,总产氧量和净产氧量都急剧降低。光合最佳 pH 值为 6,说明伊乐藻喜中性略偏酸的水环境,对碱性水质较敏感。

3 讨论

3.1 伊乐藻光合能力对光照和温度的响应

实验结果表明:伊乐藻对水环境有较好的生态适应性,较适宜的温度范围为 10 ~ 35℃,在 1 000 ~ 5 300 lx 的光强范围内均可以正常生长,以 30℃ 和

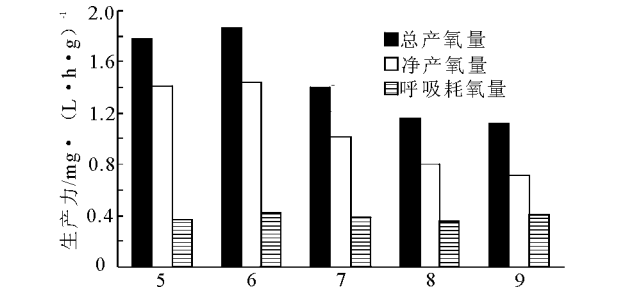


图4 伊乐藻在不同 pH 下产氧量的变化

Fig.4 The trend of oxygen production of *E. nuttallii* in different pH of water

5 300 lx 的组合条件为最佳。这与李文朝(1996)和朱松泉等(1996)的研究结果不完全一致,他们认为伊乐藻不喜高温,为喜冷植物,在水温 5 ~ 30℃ 都能处于正常的营养生长状态,最适温度 25℃ 左右,30℃ 以上对其生长有抑制。而 MA Jian-Min 等(2009)在研究伊乐藻耐高温实验时,发现在 35 ~ 39℃ 温度条件下,用 Hoaglands 培养液和自来水培养伊乐藻,15 d 内仍有较高的生长率,但随着时间的延长,对高温的耐受性变差,认为伊乐藻对高温的耐受性与实验时间的长短有关,并认为高温不是导致伊乐藻在我国南方夏季大量死亡的直接原因,而可能是间接诱因。

沉水植物的光强适应阈值的上限可能限于 1/3 ~ 1/2 全日照强度(金相灿等,1990;苏胜齐,2001)。本研究认为伊乐藻生长的适宜光照范围为 5 300 lx 左右,且实验采用的光照和温度条件基本覆盖了室外培养时遇到的大多数情况,尤其在华北地区,春、秋、冬和夏初水面上的自然光照一般不会超过 10 × 10⁴lx,水下的光照会迅速衰减,水温大多在 5 ~ 35℃。因此,光照和温度一般不会对伊乐藻的生长产生大的限制作用;但到了炎热的夏季,光照在 10 × 10⁴lx 以上天数会增多,且水表层温度会在 30℃ 以上。此时,水表面强烈的光照和较高温度将对伊乐藻的生长产生一定的抑制作用,甚至会导致伊乐藻种群的衰亡(苏胜齐,2001)。伊乐藻在夏季死亡是多种因素促成的,高温是死亡的主要诱因,但不一定是直接原因(MA Jian-Min 等,2009)。

3.2 伊乐藻光合能力对 pH 的响应

伊乐藻对环境 pH 的适应能力不强且范围较窄,生长适宜的 pH 范围为 5 ~ 7,喜中性略偏酸的环境,对 pH 的变化极为敏感,一旦超过其适宜的 pH 范围光合速率将大幅下降(邓光等,2004)。吴英海等(2009)在与本研究类似的实验设置条件下,发现伊乐藻的最适 pH 也在 5 ~ 7,而且在 pH 6 时得到最

大的净光合产氧量。除去环境 pH 本身对植物细胞生长造成的影响之外,对于淡水植物而言,环境 pH 的变化对于其吸收利用无机碳的形式和方式具有重要影响,而这些影响又直接体现在对光合活性的改变上。若在碱性条件下缺乏 CO_2 和 HCO_3^- ,就限制了伊乐藻的生长。而伊乐藻对水体 pH 值的要求趋向于弱酸性,这或许是伊乐藻在夏季高温的环境中死亡腐烂的原因。温度高,光照强度大,伊乐藻的光合作用和呼吸作用都强,但呼吸作用随温度升高而增加的速度一般大于光合作用增加的速度(潘瑞炽等,1979),水中的 CO_2 被利用的较多,水体的 pH 值升高,不利于伊乐藻在高温环境下的光合作用,而且在 pH 值偏高的条件下呼吸耗氧量也较高,净光合作用较低,植物便发生衰败腐烂的状况,这可能是伊乐藻夏季生长停滞、甚至死亡的主要原因。这与陈灿等(2009)研究结果有一定差异。他们研究发现在弱碱性(pH 8.0)水环境中伊乐藻光合生理机能处于较佳的状态,但如果 pH 继续升高,则会对伊乐藻造成胁迫。结果不同可能与实验设置不同有关。此外,水的 pH 值会随着水生植物光合作用的进行而即时发生变化,这也会造成一定的实验误差。关于 pH 升高对伊乐藻胁迫的机理尚不清楚,伊乐藻在我国南方水域夏季死亡的原因仍需进一步研究。

综合本研究和前人的相关研究结果,发现在对伊乐藻生长的适宜温度、光照、pH 等条件方面的认识上有一定出入,主要原因一是实验设置的条件不同,在实验持续时间、培养液、检测指标等方面不统一;二是取自不同地区的伊乐藻植物,可能由于长期适应于当地的水环境而存在个体差异。但较为普遍的看法是:伊乐藻喜冷,在较高温度下短时间可以良好生长,但时间较长后不好预测,能适应较低的光照,适于中性略偏酸的水质。

沉水植物生长发育过程受诸多生物与非生物环境因子互作的影响,而非单个因子影响的结果。只有弄清影响沉水植物生长发育及繁殖等不同阶段的各种主效环境因子,结合野外实际条件,才能确保沉水植物恢复与重建工作的顺利进行。由于实验室研究往往受多种环境条件的限制,在一定程度上影响实验研究的准确性,因此实验室的研究结果仍需在实际运用中进行修正。

参考文献

陈灿,龚艳,李研. 2009. 不同光强下 pH 对伊乐藻光合机能的影响[J]. 湖南林业科技,36(1):16-17.

- 邓光,李夜光,胡鸿钧,等. 2004. 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,22(2):129-131.
- 谷孝鸿,陈开宁,胡耀辉. 2002. 东太湖伊乐藻的营养繁殖及对渔业污水的净化[J]. 上海环境科学,21(1):43-46.
- 金相灿,屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范(第二版)[M]. 北京:中国环境科学出版社:178-182.
- 李文朝. 1996. 浅型富营养湖泊的生态修复——五里湖水生植被重建实验[J]. 湖泊科学,8(增刊):1-10.
- 连光华,张圣照. 1996. 伊乐藻等水生高等植物的快速营养繁殖技术与栽培方法[J]. 湖泊科学,8(增刊):11-16.
- 刘建康. 1999. 高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社:300.
- 马剑敏,胡灵卫,胡倩如,等. 2010. 伊乐藻和黑藻断枝根和芽的发生及生长研究[J]. 水生生物学报,34(3):525-532.
- 马剑敏,贺锋,成水平,等. 2007. 武汉莲花湖水生植被重建的实践与启示[J]. 武汉植物学研究,25(5):473-478.
- 潘瑞炽,董恩得. 1979. 植物生理学(下册)[M]. 北京:人民教育出版社:112-113.
- 苏胜齐. 2001. 环境对菹草生长和繁殖的影响及菹草对富营养化水净化能力的研究[D]. 重庆:西南农业大学:5-24.
- 苏文华,张光飞,张云孙,等. 2004. 5种沉水植物的光合特征[J]. 水生生物学报,28(4):391-395.
- 王珺,顾宇飞,纪东成,等. 2006. 富营养条件下不同形态氮对轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)的生理影响[J]. 环境科学研究,19(1):71-74.
- 王小冬,秦伯强,高光,等. 2009. 伊乐藻(*Elodea nuttallii*)对高浓度氮磷营养盐的耐受性[J]. 生态学杂志,28(12):2561-2566.
- 吴英海,卞国建,方建德,等. 2009. 环境因子对伊乐藻光合作用影响的试验研究[J]. 四川环境,28(6):1-2.
- 朱丹婷,乔宁宁,李铭红,等. 2011. 光强、温度、总氮浓度对黑藻生长的影响[J]. 水生生物学报,35(1):88-89.
- 朱松泉,刘正文. 1996. 伊乐藻—草鱼圈养人工复合生态系统建设的研究[J]. 湖泊科学,8(增刊):46-61.
- Ma Jian-Min Ma, Jin Tong-Xia Jin, He Feng He, et al. 2009. Responses of *Elodea nuttallii* and *Ceratophyllum demersum* to high temperature [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 18(9):1588-1594.
- Robach F, Hnjasek I, Eglin I, et al. 1995. Phosphorus sources for aquatic macrophytes in running waters: water or sediment? [J]. Acta botanica gallica, 142:719-731.

(责任编辑 张俊友)

Responses of the Photosynthetic Capacity of *Elodea nuttallii* to Three Ecological Factors

JIN Ping¹, HU Ling-wei², JIN Tong-xia¹, LI Yuan-long¹, MA Jian-min^{1,3}

(1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2. Shangqiu Medical college, Shangqiu 476100, China;

3. Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to know the ecological adaptability of alien species *Elodea nuttallii*, the responses of photosynthesis capacity of *Elodea nuttallii* to three main ecological factors, as light intensity, temperature and pH, were studied by measuring the photosynthetic oxygen production. The results showed that with the temperature and illumination 10 – 35℃ and $1 \times 10^3 - 5.3 \times 10^3$ lx conditions, the net and gross photosynthetic oxygen production of *Elodea nuttallii* showed a positive correlation with the temperature and illumination. With the increasing of temperature and light intensity, the net and gross photosynthetic oxygen production increased; it showed very strong adaptability to different temperature and illumination combinations. In the same light condition, at about 30℃ the gross production of oxygen was, the most 1.814 mg/(L · h · g), net oxygen production was also the most 1.47 mg/(L · h · g). With the same temperature, 5300lx light intensity, the gross and net photosynthetic oxygen production were the most, photosynthetic capability was strong, but not reached the light saturation point; in the minimum light intensity conditions, it also didn't reach its light compensation point; among the range pH 5 – 9, the suitable pH values ranged from 5.0 to 7.0, and the optimum was pH 6.0. The basic physiological and ecological characteristics of which the response of *Elodea nuttallii* photosynthetic capacity to three ecological factors were as the follows: it had strong adaptability to the light intensity and temperature. it grew well in the strong light intensity, higher temperature and meta-acid water environment.

Key words: *Elodea nuttallii*; light intensity; temperature; pH; photosynthetic oxygen production; adaptability