

文章编号: 1000-5862(2014)06-0645-05

# 黑藻与苦草在不同水深下光合作用的比较研究

经博翰<sup>1</sup> 袁龙义<sup>1 2\*</sup>

(1. 长江大学园艺园林学院, 湖北 荆州 434025; 2. 长江大学湖北省涝渍湿地农业重点实验室, 湖北 荆州 434025)

**摘要:** 以沉水植物较为丰富的洪湖凹沟子作为采样区域, 利用水下调制荧光仪研究洪湖常见的2种高耐污、高吸污水鳖科沉水植物黑藻(*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle) 与苦草(*Vallisneria spiralis* (L.) Hara) 分别在100 cm及50 cm水深条件下光合作用的差异。结果表明: 在100 cm水深条件下, 当PAR值稳定为 $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 黑藻(*Hydrilla verticillata*)的ETR值趋近 $25.10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而苦草(*Vallisneria spiralis*)的ETR值趋近 $10.10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 当PAR渐强时, 黑藻在PAR值为 $219 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其ETR达到峰值 $21.76 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 苦草在PAR值为 $515 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其ETR达到峰值 $12.65 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 在50 cm水深条件下, 当PAR值稳定为 $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 黑藻的ETR值趋近 $26.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而苦草的ETR值趋近 $11.90 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 当PAR渐强时, 黑藻在PAR值为 $219 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其ETR达到峰值 $25.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 苦草在PAR值为 $1042 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其ETR达到峰值 $4.80 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。综上所述, 在100 cm或50 cm水深条件下, 黑藻的光合作用强度皆强于苦草。

**关键词:** 沉水植物; 水深; 苦草; 黑藻; 光合作用

**中图分类号:** Q 948

**文献标志码:** A

## 0 引言

近20年来, 全世界都面临着湖泊富营养化加剧的严峻挑战<sup>[1]</sup>, 其中我国的湖泊环境问题尤为突出<sup>[2]</sup>。在湖泊治理方面, 利用沉水植物修复富营养化湖泊的成本低廉, 低碳环保<sup>[3]</sup>, 是真正可持续的治理方法。沉水植物作为植物净化法的主体, 其生理生态特征无疑是研究的热门对象。作为沉水植物生理生态特征的重要方面, 光合生理生态特征的研究一直占有极为重要的地位<sup>[4]</sup>。沉水植物是许多淡水生态系统的基本结构框架, 是最重要的第一生产者, 其光合作用对整个生态系统的结构和功能产生着重大的影响<sup>[5]</sup>。

黑藻(*Hydrilla verticillata*)与苦草(*Vallisneria spiralis*)为我国常见的高耐污、高吸污沉水植物, 常用于修复富营养化湖泊植物群落的先锋物种。有关黑藻与苦草光合作用的研究较多, 但大部分集中在环境因子对植物光合作用影响以及植物本身光合代谢途径上<sup>[6-8]</sup>, 而对不同物种间光合作用的比较研究较少。因此, 本文通过对洪湖不同水深条件下黑藻

与苦草原位、无损伤的光合作用测定、比较, 以期为在不同水深条件下, 人工配置沉水植物群落提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

洪湖(N  $29^{\circ}42' \sim 29^{\circ}58'$ ; E  $113^{\circ}13' \sim 113^{\circ}29'$ )位于长江中游北岸, 江汉平原4湖水系尾端, 是江汉湖群中最大的湖泊。担负着长江中下游江汉平原地区供水、蓄洪排涝、污染自净、农渔业生产等重任<sup>[9]</sup>。其植被区划属北极植物区, 中国-日本森林植物亚区, 从湖滨到湖心, 依次出现湿生植物、挺水植物、浮叶植物和沉水植物等生态类型<sup>[10]</sup>。植物资源丰富, 尤其是水生植物种类多、分布广, 因此洪湖无疑是野外研究沉水植物较为理想的实验场所。

### 1.2 研究方法

在洪湖黑藻与苦草群落聚集的湖区, 利用水下调制荧光仪(Diving-PAM)对洪湖2种常见高耐污、高吸污的水鳖科沉水植物苦草与黑藻的叶绿荧光参

收稿日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(31170400), 湖北省教育厅科学技术研究(B20111305)和湖北省科技厅科学自然科学基金(2010CDB04402)资助项目。

通信作者: 袁龙义(1971-), 男, 湖北公安人, 副教授, 博士, 主要从事植物学和湿地生态研究。

数进行测定、计算、分析. 根据对洪湖湖区水深情况以及黑藻与苦草群落分布的实地考察, 实验设计 2 个水深梯度 100 cm 与 50 cm, 且对每个水深梯度的每一实验物种测 3 组重复的数据.

1.2.1 数据的测定 2011 年 11 月 26 日, 早 10:30 开始, 分别在凹沟子湖区水深为 50 cm 以及 100 cm 的苦草与黑藻聚集区域用水下调制荧光仪 (Diving-PAM) 进行测定. 选择靠近光合作用测定的完全展开的功能叶进行指标测定, 活体叶片暗适应 3 ~ 5 min 后, 打开叶夹, 开启测光, 首先测定诱导曲线 (恒定的有效辐射强度下叶片光合作用各个荧光参数的变化曲线), 时间约为 5 min, 再测定快速光曲线 (渐强的有效辐射强度下叶片光合作用各个荧光参数的变化曲线), 时间约为 2 min.

1.2.2 数据的测定 将测得数据导入 Excel 中, 计算出同一物种在指定某一水深条件下所测得 3 个重复数据的平均值和标准差, 并用对应的平均值与标准差绘制出图表. 用多因素方差分析 (Multi-factor Analysis of Variance) 和重复测量方差分析 (Repeated Measures) 检验处理间的差异, 统计检验分析用 SPSS11.0 软件 (SPSS Inc, Chicago, IL, USA) 来完成.

$Y$  常用于表示野外测量稳态光照下的量子产量, 此时  $PS II$  的有效量子产量最接近于光合作用的实际量子产量.  $Y$  是根据下式计算的:

$$Y = (F_m' - F_t) / F_m' = \Delta F / F_m'.$$

$PAR$  代表有效辐射强度,  $ETR$  代表相对光合电子传递速率, 单位是  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 它是根据  $Y$  和  $PAR$  计算出来的:

$$ETR = Y \times PAR \times 0.5 \times 0.84.$$

## 2 结果与分析

### 2.1 在 100 cm 水深条件下苦草与黑藻的光合作用比较分析

如图 1 所示, 在 100 cm 水深条件下, 苦草与黑

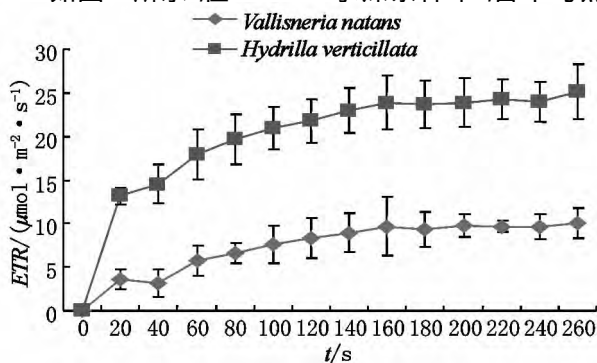


图 1 苦草和黑藻在 100 cm 水深条件下有效辐射强度为  $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时相对光合电子传递速率

藻的诱导曲线最后都趋于一个稳定的值, 黑藻的  $ETR$  值趋近  $25.10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 苦草的  $ETR$  值趋近  $10.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 这表明此 2 种沉水植物在恒定的有效辐射强度下 ( $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 都达到稳定的光合作用后, 黑藻的光合作用强度显著强于苦草的光合作用强度.

如图 2 所示, 在 100 cm 水深条件下, 苦草与黑藻的快速光曲线都有一个初始斜率值以及曲线所达到的峰值, 当  $PAR$  值为  $219 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 黑藻的  $ETR$  达到峰值  $21.76 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 当  $PAR$  值为  $515 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 苦草的  $ETR$  达到峰值  $12.65 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 这表明此 2 种沉水植物在渐强的有效辐射强度下, 黑藻光合作用强度达到峰值的速率比苦草快, 且其峰值也比后者高, 尽管随着有效辐射强度不断增强 2 种沉水植物都出现光抑制现象, 但仍能明显看出黑藻的光合作用在整个过程中要显著强于苦草的光合作用.

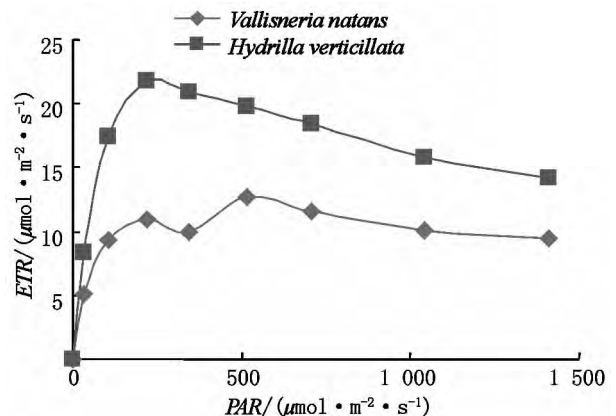


图 2 苦草和黑藻在 100 cm 水深条件下有效辐射强度渐强时相对光合电子传递速率

### 2.2 在 50 cm 水深条件下苦草与黑藻的光合作用比较分析

如图 3 所示, 在 50 cm 水深条件下, 苦草与黑藻的诱导曲线最后都趋于一个稳定的值, 黑藻的  $ETR$

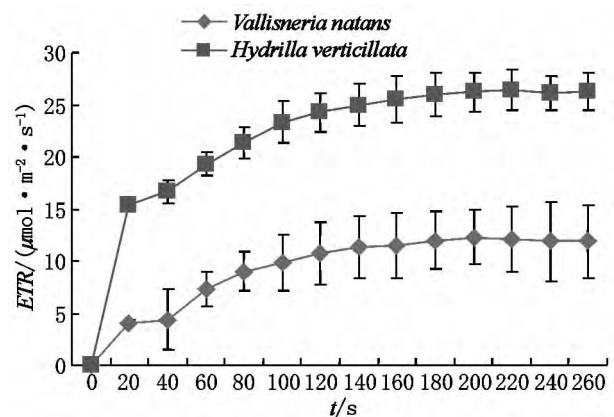


图 3 苦草和黑藻在 50 cm 水深条件下有效辐射强度为  $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时相对光合电子传递速率

值趋近  $26.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 苦草的  $ETR$  值趋近  $11.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这表明此 2 种沉水植物在相同稳定的有效辐射强度下 ( $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 都达到稳定的光合作用后, 黑藻的光合作用强度显著强于苦草的光合作用强度。

如图 4 所示, 在 50 cm 水深条件下, 苦草与黑藻的快速光曲线都有一个初始斜率值以及曲线所达到的峰值, 当  $PAR$  值为  $219 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 黑藻的  $ETR$  达到峰值  $25.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 当  $PAR$  值为  $1042 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 苦草的  $ETR$  达到峰值  $4.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这表明此 2 种沉水植物在渐强的有效辐射强度下, 黑藻光合作用强度达到峰值的速率要比苦草快, 且其峰值也比后者要高, 尽管随着有效辐射强度不断增强 2 种沉水植物都出现光抑制现象, 但仍能明显看出黑藻的光合作用在整个过程中显著强于苦草。

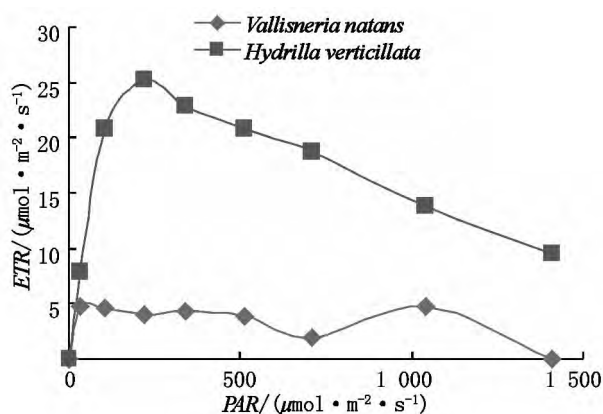


图 4 苦草和黑藻在 50 cm 水深条件下有效辐射强度渐强时相对光合电子传递速率

### 2.3 苦草在 100 cm 及 50 cm 水深条件下光合作用比较分析

如图 5 所示, 苦草在 50 cm 水深条件下诱导曲线最后趋于稳定的值接近于在 100 cm 水深条件下

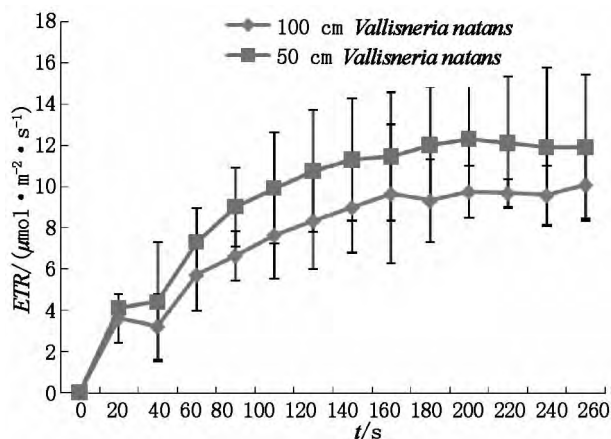


图 5 苦草在 100 cm 及 50 cm 水深条件下有效辐射强度为  $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时相对光合电子传递速率

诱导曲线最后趋于稳定的值, 50 cm 水深条件下苦草的  $ETR$  值趋近  $11.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 100 cm 水深条件下苦草的  $ETR$  值趋近  $10.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 2 条曲线的误差棒重叠。这表明苦草在这 2 个梯度水深但相同有效辐射强度条件下 ( $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 都达到稳定光合作用后, 50 cm 水深中的苦草的光合作用强度接近于 100 cm 水深条件下的苦草。

如图 6 所示, 在 100 cm 水深及 50 cm 水深条件下苦草的快速光曲线都有一个初始斜率以及曲线所达到的峰值, 当  $PAR$  值为  $515 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 100 cm 水深条件下苦草的  $ETR$  达到峰值  $12.65 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 当  $PAR$  值为  $1042 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 50 cm 水深条件下苦草的  $ETR$  达到峰值  $4.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这表明 2 个水深梯度下的苦草在渐强的有效辐射强度下, 100 cm 水深条件下苦草的光合作用强度达到峰值的速率要比 50 cm 水深条件下苦草快, 且其峰值也比后者要高, 尽管随着有效辐射强度不断增强不同水深的苦草都出现光抑制现象, 但仍能明显看出苦草光合作用在 100 cm 水深条件下的光合作用在整个过程中显著强于在 50 cm 水深条件下的。

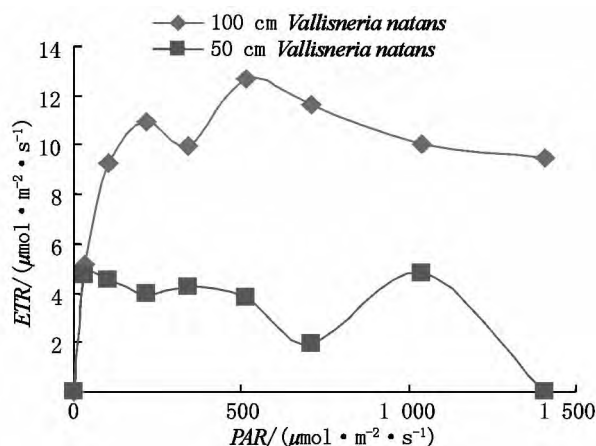


图 6 苦草在 100 cm 及 50 cm 水深条件下有效辐射强度渐强时相对光合电子传递速率

如图 7 所示, 黑藻在 50 cm 水深条件下诱导曲线最后趋于稳定的值明显接近于在 100 cm 水深条件下诱导曲线最后趋于稳定的值, 50 cm 水深条件下黑藻的  $ETR$  值趋近  $26.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 100 cm 水深条件下黑藻的  $ETR$  值趋近  $25.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 2 条曲线的误差棒重叠。这表明黑藻在这 2 个梯度水深但相同有效辐射强度条件下 ( $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 都达到稳定光合作用后, 50 cm 水深条件下黑藻的光合作用强度接近于 100 cm 水深条件下黑藻的光合作用强度, 没有显著的差异。

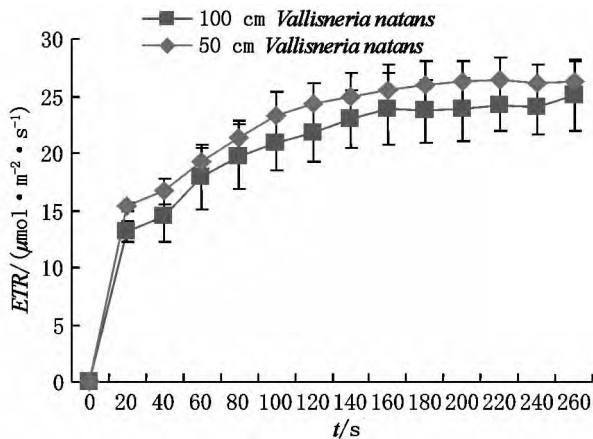


图7 黑藻在 100 cm 及 50 cm 水深条件下有效辐射强度为  $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时相对光合电子传递速率

如图 8 所示,在 100 cm 水深及 50 cm 水深条件下黑藻的快速光曲线都有一个初始斜率数值以及曲线所达到峰值,当  $PAR$  值为  $219 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,100 cm 水深条件下黑藻的  $ETR$  达到峰值  $21.77 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 当  $PAR$  值为 219 时,50 cm 水深条件下黑藻的  $ETR$  达到峰值  $25.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这表明 2 个水深梯度下黑藻在渐强的有效辐射强度下,50 cm 水深条件下黑藻的光合作用强度达到峰值的速率与 100 cm 水深条件下黑藻相同,尽管其峰值比后者要高,但随着有效辐射强度不断增强不同水深的黑藻都出现光抑制现象,特别是在  $PAR$  值为  $708 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,100 cm 水深条件下的黑藻  $ETR$  值开始高于 50 cm 水深条件下的黑藻。因此,黑藻在 100 cm 水深条件下的光合作用在整个过程中与在 50 cm 水深条件下的无明显差异。

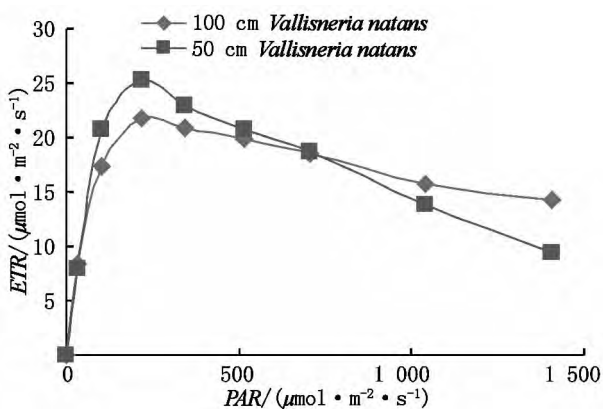


图8 黑藻在 100 cm 与 50 cm 水深条件下有效辐射强度渐强时相对光合电子传递速率

### 3 结论与讨论

实验表明:无论是黑藻与苦草还是黑藻或苦草

本身,在不同的水深条件下光合作用强度皆存在差异,这是由于不同水深对应不同的光强、 $\text{CO}_2$  浓度等环境因子决定的。光合速率更高的黑藻无疑是人工配置沉水植物群落优先考虑的物种,因为光合作用是植物合成干物质的基础,只有光合能力越高,才能使植物贮藏更多的营养物质<sup>[11-12]</sup>。对同样高耐污、高吸污的沉水植物而言,更高效的光合作用确保植物更大的生物量,具有更强转化底泥中 N、P 的能力。特别是在富营养化严重、沉水植物群落衰退明显的水域,更是需要能够快速形成优势种群的物种。

湖泊的浅水区(0 ~ 100 cm)与人类生活密切相关,也是受人类活动干扰最严重的区域,绝大部分湖泊的该区域沉水植物群落退化明显,因此恢复该区域的沉水植物群落不仅能净化湖滨带水体,更能防止水体污染进一步向湖心区发展。实验证明:黑藻较苦草而言,是更适合该区域人工配置群落的物种,然而,一定范围内单一物种的配置往往会造成单一优势群落的不良后果。因此,不同物种组合配置在不同水深条件下光合特性的比较有待进一步研究。

### 4 参考文献

- [1] 张宇,王圣瑞,李重祥,等. 沉水植物对富营养化水体的修复作用及其研究展望 [J]. 内蒙古草业, 2009, 21(4): 17-21.
- [2] 马婷,王国祥,李强,等. 富营养化水体中菹草光合荧光特性研究 [J]. 生态环境, 2007, 16(3): 758-761.
- [3] 张饮江,刘晓培,金晶,等. 沉水植物对水体净化的研究进展 [J]. 科技导报, 2012, 30(27): 72-79.
- [4] 苏文华,张光飞,张云孙,等. 5 种沉水植物的光合特征 [J]. 水生生物学报, 2004, 28(4): 391-395.
- [5] 王艳丽,周阳. 沉水植物综合利用的研究进展 [J]. 环境保护科学, 2009, 35(12): 16-19.
- [6] 苏睿丽,李伟. 沉水植物光合作用的特点与研究进展 [J]. 植物学通报, 2005, 22(增刊): 128-138.
- [7] Takabayashi A, Kishine M, Asada K, et al. Differential use of two cyclic electron flows around photosystem I for driving  $\text{CO}_2$ -concentration mechanism in  $\text{C}_4$  photosynthesis [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2005, 102: 16898-16903.
- [8] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity [J]. Aquat Bot, 2005, 82: 222-237.
- [9] 卢山,李世杰,王学雷. 洪湖的环境变迁与生态保护 [J]. 湿地科学, 2004, 2(3): 234-237.
- [10] 李伟. 洪湖水生维管束植物区系研究 [J]. 武汉植物学

- 研究, 1997(2): 113-122.
- [11] 王少先, 李再军, 王雪云, 等. 不同烟草品种光合特性比较研究初报 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(5): 245-252.
- [12] 陈浩磊, 陈厚彬, 刘财兴. 桂味荔枝果顶形状与种核质量的关系研究 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(4): 20-26.

## The Comparative Study on Photosynthesis of *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria natans* in the Different Depth

JING Bo-han<sup>1</sup>, YUAN Long-yi<sup>1, 2\*</sup>

(1. College of Horticulture and Gardening, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025, China;

2. Hubei Water-Logging Disaster and Wetland Agriculture Key Laboratory, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025, China)

**Abstract:** Chosen the Wagouzi site with abundant submerged population in the Honghu Lake as a sampling region, the difference of photosynthesis of submerged macrophytes *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle and *Vallisneria natans* (Lour.) Hara which are high resistance and absorption to the dirty water in Honghu Lake was designed to research their response in the 100 cm and 50 cm water depth by Diving-PAM apparatus. The results showed that the value of External Transfer Rate (ETR) of *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria natans* separately approached to  $25.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $10.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  when the value of Photosynthetic Active Radiation (PAR) was stable for  $342 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  under the condition of 100 cm water depth. With the PAR intensity gradually becoming strong, ETR of *Hydrilla verticillata* reached its peak  $21.76 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  when the PAR value was  $219 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , as well as ETR of *Vallisneria natans* reached its peak  $12.65 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  when the PAR value was  $515 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . On the other hand, the value of ETR of *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria natans* separately approached to  $26.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $11.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  when the value of PAR was stable for  $515 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  under the condition of 50 cm water depth. With the PAR intensity gradually becoming strong, ETR of *Hydrilla verticillata* reached its peak  $25.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  when the PAR value was  $219 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , as well as ETR of *Vallisneria natans* reached its peak  $4.80 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  when the PAR value was  $1042 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . In summary, no matter in 100 cm or 50 cm water depth condition, photosynthesis intensity of *Hydrilla verticillata* is stronger than that of *Vallisneria natans*.

**Key words:** submerged plant; water depth; *Vallisneria natans*; *Hydrilla verticillata*; photosynthesis

(责任编辑: 刘显亮)