

洪湖 5 种优势沉水植物光合荧光特性比较研究

经博翰¹, 袁龙义^{1,2*}

(1 长江大学 园艺园林学院, 湖北荆州 434025; 2 长江大学 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北荆州 434025)

摘要: 利用水下饱和脉冲荧光仪(DIVING-PAM), 原位观测洪湖 5 种优势沉水植物——苦草[Vallisneria natans (Lour.) Hara]、黑藻[Hydrilla verticillata (L. f.) Royle]、狐尾藻(Myriophyllum verticillatum L.)、菹草(Potamogeton crispus L.)和马来眼子菜(Potamogeton wrightii Morong)的量子产量及快速光曲线。结果显示: 5 种沉水植物苦草、黑藻、狐尾藻、菹草和马来眼子菜最大量子产量(F_v/F_m)分别为 0.603、0.723、0.751、0.778 和 0.646。各物种的开放 PSⅡ 反应中心原初光能捕获效率(F_v'/F_m')的大小依次为菹草>狐尾藻>黑藻>马来眼子菜>苦草, 且除黑藻与狐尾藻间差异不显著外, 其他物种间差异均显著; 各物种光能利用能力(α)的大小依次为菹草>黑藻>狐尾藻>马来眼子菜>苦草, 且除黑藻与狐尾藻间差异不显著外, 其他物种间差异均显著; 各物种无光抑制的最大潜在相对电子传递速率($rETR_m$)的大小依次为菹草>狐尾藻>黑藻>马来眼子菜>苦草, 且各物种间差异显著; 半饱和光强(E_k)的大小依次为狐尾藻>菹草>黑藻>苦草>马来眼子菜, 且除狐尾藻与菹草间差异不显著外, 其他物种间差异均显著。研究表明: 洪湖 5 种优势沉水植物中, 菹草和狐尾藻较耐强光, 光合速率较高, 而苦草则有较强的耐弱光能力。

关键词: 洪湖; 沉水植物; 量子产量; 快速光曲线

中图分类号: Q945.11

文献标志码: A

Photosynthetic Fluorescence Characteristics of Five Dominant Submerged Macrophytes in Honghu Lake

JING Bohan¹, YUAN Longyi^{1,2*}

(1 College of Horticulture and Gardening, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China; 2 Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China)

Abstract: Five dominant submerged macrophytes commonly found in Honghu Lake were collected, including *Vallisneria natans* (Lour.) Hara, *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle, *Myriophyllum verticillatum* L., *Potamogeton crispus* L. and *Potamogeton wrightii* Morong. Their maximal quantum yields of photosystem II (F_v/F_m) as well as rapid light curves (RLCs) were measured *in situ* by using pulse-amplitude modulated fluorometer (Diving-PAM). The results showed that: The measured maximal quantum yields of *V. natans* (Lour.) Hara, *H. verticillata* (L. f.) Royle, *M. verticillatum* L., *P. crispus* L. and *P. wrightii* Morong were 0.603, 0.723, 0.751, 0.778 and 0.646, respectively. All the five species' F_v'/F_m' from high to low order as *P. crispus* L. > *M. verticillatum* L. > *H. verticillata* (L. f.) Royle > *P. wrightii* Morong > *V. natans* (Lour.) Hara. In addition, there was no significant difference between *H. verticillata* (L. f.) Royle and *M. verticillatum* L., all other species display statistically significant differences; All the five species' α from high to low order as *P. crispus* L. > *H. verticillata* (L. f.) Royle > *M. verticillatum* L. > *P. wrightii*

收稿日期: 2014-06-25; 修改稿收到日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(31170400); 湖北省科技厅自然科学基金(2010CDB04402)

作者简介: 经博翰(1988-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事湿地生态学的研究。E-mail: 23618602@qq.com

* 通信作者: 袁龙义, 博士, 副教授, 主要从事湿地生态学的教学与研究。E-mail: yly35@qq.com

Morong>*V. natans* (Lour.) Hara. In addition, there was no significant difference between *H. verticillata* (L. f.) Royle and *M. verticillatum* L., while all other species display statistically significant differences. All the five species's $rETR_m$ from high to low order as *P. crispus* L. > *M. verticillatum* L. > *H. verticillata* (L. f.) Royle > *P. wrightii* Morong > *V. natans* (Lour.) Hara, and all the five species display statistically significant differences; All the five species's E_k from high to low as *M. verticillatum* L. > *P. crispus* L. > *H. verticillata* (L. f.) Royle > *V. natans* (Lour.) Hara > *P. wrightii* Morong. In addition, there was no significant difference between *P. crispus* L. and *M. verticillatum* L., all other species display statistically significant differences. Studies have shown that *P. crispus* L. and *M. verticillatum* L. have higher light resistance capacity as well as faster photosynthetic rate, and *V. natans* (Lour.) Hara has lower light resistance capacity among the five dominant submerged macrophytes commonly in Honghu Lake.

Key words: Honghu Lake; submerged macrophytes; quantum yield; rapid light curve

近 20 年来,全世界都面临着湖泊富营养化加剧的严峻挑战^[1],中国的湖泊环境问题尤为突出^[2]。沉水植物普遍出现衰退甚至消失的迹象,并引发了水质恶化、水华频发等一系列生态环境问题,严重影响了人们的正常生活和社会经济的持续发展^[3-4]。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,在湖泊治理方面,利用沉水植物修复富营养化湖泊具有成本低廉、低碳环保等特点,是真正可持续的治理方法^[5]。苦草 [*Vallisneria natans* (Lour.) Hara]、黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、狐尾藻 (*Myriophyllum verticillatum* L.)、菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 和马来眼子菜 (*Potamogeton wrightii* Morong) 是洪湖中心湖区沉水植物群落中具有高耐污高吸污特点的优势物种,对洪湖湖水自净、洪湖淡水生态系统平衡有着重要意义。作为植物净化法的主体,沉水植物的生理生态特征无疑是研究的热门对象,特别是其光合作用,对整个水域生态系统的结构和功能皆有重大的影响^[6]。

叶绿素荧光动力学技术具有测量快速、简便、准确和无损伤等特点,已被视为植物光合作用与环境关系的内在探针,是探测和分析植物光合功能的重要手段^[7-9]。目前,荧光技术已广泛地应用于陆生高等植物,以及大型的海草和珊瑚的生理生态研究,而在淡水水体中水生高等植物的生理生态研究方面运用较少^[10-15],已有的淡水水体中高等水生植物的荧光特性研究,多是在试验控制条件下进行生态因子对水生植物胁迫的对比分析,对自然生境中水生植物光合荧光参数的对比研究还未见相关报道^[16-17]。本实验以自然环境中洪湖常见的 5 种沉水植物苦草、黑藻、狐尾藻、菹草和马来眼子菜作为研究对象,原位测定这 5 种沉水植物主要叶绿素荧光动力学参数及快速光响应曲线,并比较自然水体中这 5 种沉水植物 PS II 主要荧光参数特征,旨在为不同水深条件

下人工配置沉水植物群落提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

洪湖 (29°42'~29°58'N; 113°13'~113°29'E) 位于长江中游北岸,江汉平原四湖水系尾端,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^[18]。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^[19]。植物资源丰富,尤其是水生植物,种类多、分布广^[20],因此洪湖无疑是野外研究沉水植物较为理想的试验场所。

1.2 研究方法

以沉水植物生长茂密的洪湖凹沟子作为采样区域,将 5 种常见沉水植物苦草、黑藻、狐尾藻、菹草和马来眼子菜作为研究对象,利用水下调制荧光仪 (Diving-PAM) 对其叶绿素荧光参数进行原位测定,测定过程中每种受试植物在水深 150 cm 湖区随机选择 3 个样株,每株选择 1~2 片完全展开的健康叶片。

太阳尚未直射到水草上开启检测光 ($0.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),得到暗适应条件下光系统 II (PS II) 最小荧光 (F_0),再由饱和脉冲光 ($4\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 测得暗适应的最大荧光 (F_m)。根据 F_0 和 F_m 计算出 PS II 最大光化学量子产量 ($F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$),以反映 PS II 反应中心内禀光能转换效率或潜在的光能转换效率。然后,开启光化光照射,当时实荧光达到稳态后关闭光化光,同时打开远红光 (约 5 s),经检测光、饱和脉冲光测得光化光适应条件下最小荧光 (F_0') 和最大荧光 (F_m')。根据 F_0' 和 F_m' 算出 PS II 有效光化学量子产量 [$F_v'/F_m' = (F_m' - F_0')/F_m'$],它反映开放的 PS II 反应中心原初光

能捕获效率^[21]。随后,原位测定受试植物的快速光响应曲线,开启光强度分别为:33、104、219、342、515、708、1 042、1 407 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光化光,在任一光合有效辐射(PAR)强度下,打开饱和脉冲前得到的荧光为 F ,打开饱和脉冲后得到的最大荧光为 F_m' ,可变荧光 $\Delta F = F_m' - F$,由此得出光适应条件下水生植物 PS II 的有效量子产量(Y):

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

根据 Y 和 PAR 计算出相对电子传递速率(relative electron transport rate, rETR)^[22]:

$$\text{rETR} = Y \times \text{PAR} \times 0.5 \times 0.84$$

1.3 快速光曲线拟合

采用 SPSS 软件进行快速光曲线拟合,曲线拟合采用最小二乘法,快速光曲线的拟合采用 Platt^[23]、Ralph^[24] 等提出的方程。其方程式为:

$$\text{rETR} = \text{rETR}_m (1 - e^{-\alpha \cdot \text{PAR} / \text{rETR}_m}) e^{-\beta \cdot \text{PAR} / \text{rETR}_m}$$

式中, rETR_m 为无光抑制时的最大潜在相对电子传递速率; α 为 rETR-PAR 曲线的初始斜率,反映植物对光能的利用能力; β 为光抑制参数。由此可以得出半饱和光强: $E_k (E_k = \text{rETR}_m / \alpha)$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件对所有数据进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同数据组间的差异。

2 结果与分析

2.1 5 种沉水植物的荧光参数比较

PS II F_v/F_m 反映 PS II 内禀光能转换效率。由图 1 可以看出,在自然生长条件下,5 种沉水植物 PS II F_v/F_m 分别为苦草 0.603、黑藻 0.723、狐尾藻 0.751、菹草 0.778、马来眼子菜 0.646。其中,苦草与马来眼子菜的 F_v/F_m 分别与另外 4 种沉水植物的差异达到显著水平($P < 0.05$),且苦草的 F_v/F_m 为受试植物中最小,马来眼子菜次之;黑藻与菹草的 F_v/F_m 差异达到显著水平($P < 0.05$),且菹草的 F_v/F_m 比黑藻高;狐尾藻的 F_v/F_m 与黑藻或菹草的差异皆不显著。

PS II F_v'/F_m' 反映开放的 PS II 反应中心原初光能捕获效率。5 种沉水植物的 PS II F_v'/F_m' 分别为苦草 0.423、黑藻 0.574、狐尾 0.608、菹草 0.653、马来眼子菜 0.493。其中,苦草、菹草、马来眼子菜的 F_v'/F_m' 分别与其他 4 种沉水植物的差异达到显著水平($P < 0.05$),且菹草的 F_v'/F_m' 最高,马来眼子菜次之,苦草的 F_v'/F_m' 最低;而黑藻与狐尾藻的

F_v'/F_m' 差异不显著,但二者的 F_v'/F_m' 皆显著低于菹草且高于马来眼子菜。

2.2 不同沉水植物快速光曲线分析

由图 2 可知,洪湖 5 种常见沉水植物快速光曲线(rapid light curves, RLCs)呈明显变化,都可采用指数衰减方程^[21-22]拟合($R^2 > 0.998$, $n = 9$)。通过分析 RLCs,可获得一系列反映光合能力的参数。

α 为 rETR-PAR 曲线初始斜率,反映了植物对光能的利用能力。由图 3 可知,5 种沉水植物的 α 分别为苦草 0.213、黑藻 0.373、狐尾藻 0.348、菹草 0.487、马来眼子菜 0.317。其中,黑藻与狐尾藻的 α 差异不显著,却分别与其他 3 种受试植物的 α 差异

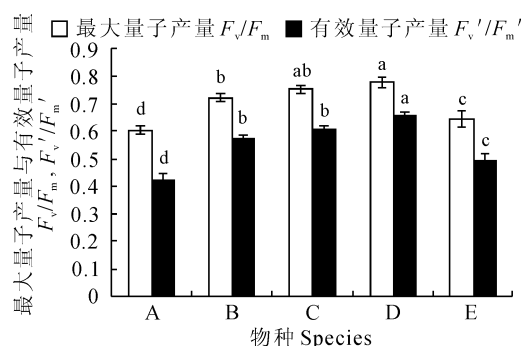


图 1 不同沉水植物 PS II 最大量子产量和 PS II 光化学有效量子产量

A. 苦草; B. 黑藻; C. 狐尾藻; D. 菹草; E. 马来眼子菜; 小写字母表示不同物种间在 0.05 水平存在显著性差异; 下同

Fig. 1 F_v/F_m and F_v'/F_m' for submerged macrophytes

A. *V. natans* (Lour.) Hara; B. *H. verticillata* (L. f.) Royle; C. *M. verticillatum* L.; D. *P. crispus* L.; E. *P. wrightii* Morong; The different normal letters represent significant differences among species at 0.05 level; The same as below

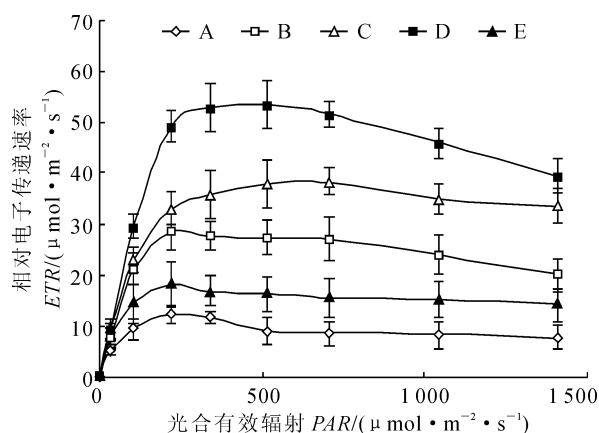


图 2 5 种沉水植物的快速光曲线比较

Fig. 2 Comparative study on the rapid light curves of five submerged macrophytes

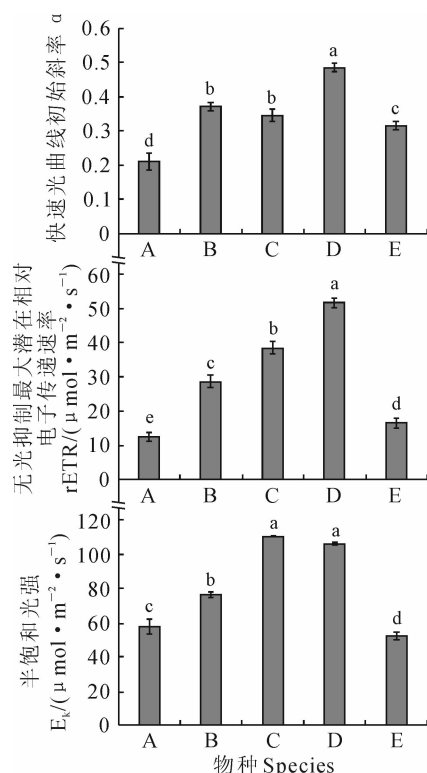


图 3 5 种沉水植物快速光曲线初始斜率、最大电子传递速率和半饱和光强比较

Fig. 3 Comparative study on the α , $rETR_m$ and E_k of five submerged macrophytes

达到显著水平 ($P < 0.05$), 且菹草的 α 最高, 黑藻、狐尾藻居中, 马来眼子菜次之, 苦草最低。

$rETR_m$ 为无光抑制时的植物最大潜在相对电子传递速率。由图 3 可知, 5 种沉水植物的 $rETR_m$ 分别为苦草 12.3、黑藻 28.6、狐尾藻 38.4、菹草 51.7、马来眼子菜 16.5。其中, 每种沉水植物之间的 $rETR_m$ 差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。这表明 5 种沉水植物在无光抑制时的最大潜在相对电子传递速率菹草最高, 狐尾藻次之, 黑藻居中, 马来眼子菜再次之, 苦草最低。

半饱和光强 E_k 可反映植物对强光的耐性。由图 3 可看出, 5 种沉水植物 E_k 分别为苦草 57.90、黑藻 76.63、狐尾藻 110.35、菹草 106.15、马来眼子菜 51.99。其中, 菹草与狐尾藻的 E_k 差异不显著, 却分别与其他 3 种受试植物的 E_k 差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 且这 5 种沉水植物耐强光性菹草、狐尾藻最强, 黑藻居中, 苦草次之, 马来眼子菜最弱。

3 讨论

3.1 PS II 潜在光能转化效率

F_v/F_m 是 PS II 最大光化学量子产量, 代表了

PS II 反应中心内禀光能转换效率或最大 PS II 的光能转换效率。已有研究表明^[25-26], F_v/F_m 不受物种的影响, 非胁迫条件下, 该参数的变化极小, 多数高等植物 F_v/F_m 约为 0.83; 当植物受到胁迫时, F_v/F_m 会显著降低。叶片叶绿素荧光与光合作用中各反应过程密切相关, 任何环境因子对光合作用的影响都可通过叶片叶绿素荧光动力学反映出来^[27]。从本实验结果可以看出, 5 种沉水植物的 PS II F_v/F_m 均小于 0.8, 表明此 5 种沉水植物均可能受到胁迫, 且外界胁迫对沉水植物 PS II 反应中心造成一定损伤^[28]。现如今已有关于 UV-B 辐射、多环芳烃污染以及网状藻的附着对水生植物 F_v/F_m 影响的报道^[29-30], 其他因子胁迫对 F_v/F_m 影响还未见相关报道。结合采样区域的水质状况, 最有可能引起采样区域沉水植物 F_v/F_m 值降低的原因为植物体上附着的丝状藻类^[31], 至于不同植物本身 F_v/F_m 对胁迫因子的耐受性如何, 还有待进一步研究。

3.2 洪湖水域沉水植物快速光响应曲线特性

光合作用是沉水植物最重要的代谢活动^[4]。沉水植物的光合作用能力受植物本身和外界环境因子的双重影响, 其核心是光响应曲线^[31]。传统的氧光合曲线 (photosynthesis-irradiance curve, P-I 曲线) 测量时, 要求在每一 PAR 梯度下适应较长时间 (5~10 min), 测量过程中的光照会影响受试植物的光合状态, 而且在野外难以进行平行测量。而利用调制叶绿素荧光技术可以缩短每一 PAR 梯度下的适应时间 (10 s), 得出的典型光响应曲线 (RLCs) 可以基本反映受试植物的自然光合状态^[31]。本研究中沉水植物的 RLCs 均是在自然条件下原位测量的, 且测定结果均可采用拟合光合响应曲线方程来拟合^[23-24]。经过受试植物 RLCs 的光合参数比较, 植物 $rETR_m$ 和 E_k 变化趋势基本一致, 实验中光合效率较高的菹草与狐尾藻都是耐受强光能力较好的优势种。这是因为 E_k 反映了植物耐受强光的能力^[24], 而耐受强光能力强的植物具有较高的最大光合速率。之前已有报道显示苦草有较强的耐低光能力, 在仅为 5% 自然光强下, 其细胞膜透性仍无明显变化, 在自然水体的底层有很强的生长优势, 可能是修复富营养化水体的一个先锋物种^[32]。由于本实验对每种沉水植物在 150 cm 水深条件下的光合荧光特征进行了测定分析, 而不同的水深梯度、光强、CO₂ 等环境影响因子皆有不同。因此自然水体中不同水深梯度下各种沉水植物的光合荧光特性比较有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHANG Y(张宇), WANG SH R(王圣瑞), LI ZH X(李重祥), *et al.* Effect of repairing and research prospect of eutrophication water by submersed macrophytes[J]. *Inner Mongolia Prataculture*(内蒙古草业), 2009, **21**(4): 17—21(in Chinese).
- [2] MA T(马婷), WANG G X(王国祥), LI Q(李强), *et al.* The growth of *Potamogeton crispus* in the eutrophication water[J]. *Ecology and Environment*(生态环境), 2007, **16**(3): 758—761(in Chinese).
- [3] QIN B Q(秦伯强), WANG X D(王小冬), TANG X M(汤祥明), *et al.* Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: cause and measurement[J]. *Advances in Earth Science*(地球科学进展), 2007, **22**(9): 896—906(in Chinese).
- [4] SU R L(苏睿丽), LI W(李伟). Advances in research on photosynthesis of submerged macrophytes[J]. *Chinese Bulletin of Botany*(植物学通报), 2005, **22**(S): 128—138.
- [5] ZHANG Y J(张饮江), LIU X P(刘晓培), JIN J(金晶), *et al.* Research progress in submerged plant purifying water quality[J]. *Science & Technology Review*(科技导报), 2012, **30**(27): 72—79(in Chinese).
- [6] SU W H(苏文华), ZHANG G F(张光飞), ZHANG Y S(张云孙), *et al.* The photosynthetic characteristics of five submerged aquatic plants[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*(水生生物学报), 2004, **28**(4): 391—395(in Chinese).
- [7] ZHANG SH R(张守仁). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*(植物学通报), 1999, **16**(4): 444—448(in Chinese).
- [8] KUSTER A, ALTENBURGER R. Development and validation of a new fluorescence-based bioassay for aquatic macrophyte species[J]. *Chem. Osphere*, 2007, **67**(1): 194—201.
- [9] LIU SH R(刘书仁), GUO SH R(郭世荣), CHENG Y J(程玉静), *et al.* Effect of exogenous proline on the ascorbat-glutathione cycle and photosynthetic fluorescence characteristics in leaves of cucumber seedlings under high temperature stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报), 2010, **30**(2): 309—316(in Chinese).
- [10] ZHENG SH X(郑淑霞), SHANGGUANG ZH P(上官周平). Comparison of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in eight broad-leaved tree species[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2006, **26**(4): 1 080—1 087(in Chinese).
- [11] JU ZH CH(鞠郑春), YU ZH W(于振文). Effects of nitrogen topdressing at different growth stage on chlorophyll fluorescence of winter wheat flag leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2006, **17**(3): 395—398(in Chinese).
- [12] WANG M(王梅), GAO ZH K(高志奎), HUANG R H(黄瑞虹), *et al.* A heat stress characteristics of photosystem II in eggplant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2007, **18**(1): 63—68(in Chinese).
- [13] BELSHE E F, DURAKO M J, BLUM J E. Photosynthetic rapid light curves (RLC) of *Thalassia testudinum* exhibit diurnal variation[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **342**: 253—268.
- [14] LAMOTE M, DUNTON K H. Effects of drift macroalgae and light attenuation on chlorophyll fluorescence and sediment sulfides in the sea grass *Thalassia testudinum*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, **334**(2): 174—186.
- [15] RALPH P, GADEMANN R, LARKUM A, *et al.* Spatial heterogeneity in active chlorophyll fluorescence and PSII activity of coral tissues[J]. *Marine Biology*, 2002, **141**(4): 639—646.
- [16] LI Q(李强), WANG G X(王国祥), PAN G Q(潘国权), *et al.* Influence of water turbidity on germination of *Potamogeton crispus* and growth of germinated seedling[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2006, **26**(11): 3 594—3 601(in Chinese).
- [17] HANELT D, HAWES I, RAE R. Reduction of UV-B radiation causes an enhancement of photoinhibition in high light stressed aquatic plants from New Zealand lakes[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2006, **84**(2): 89—102.
- [18] LU SH(卢山), LI SH J(李世杰), WANG X L(王学雷). Study on the environmental evolution and ecological protection of Honghu Lake[J]. *Wetland Science*(湿地科学), 2004, **2**(3): 234—237(in Chinese).
- [19] LI W(李伟). Flora studies on aquatic vascular plants in Lake Honghu[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*(武汉植物学研究), 1997, **15**(2): 113—122(in Chinese).
- [20] WANG X L(王雪雷), LIU X T(刘兴土), WU Y J(吴宜进). Analysis of water environment characteristics and purification ability of Honghu Lake wetland in Jiangnan Plain[J]. *J. Wuhan Univ.*(Nat. Sci. Ed.) *武汉大学学报·理学版*, 2003, **49**(2): 217—220(in Chinese).
- [21] WALDHOFF D, FURCH B, JUNK W J. Fluorescence parameter, chlorophyll concentration, and anatomical features as indicators for flood adaptation of an abundant tree species in central Amazonia: *Symmeria paniculata*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, **48**(3): 225—235.
- [22] RALPH P J, GADEMANN R, DENNISON W C. In situ seagrass photosynthesis measured using a submersible, pulse-amplitude modulated fluorometer[J]. *Marine Biology*, 1998, **132**(3): 367—373.

- [23] PLATT T, GALLEGOS C L, HARRISON W G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton[J]. *Journal of Marine Research*, 1980, 38: 103—111.
- [24] RALPH P J, GADEMANN R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity[J]. *Aquatic Botany*, 2005, 82: 222—237.
- [25] CAO Y H(曹永慧), ZHOU B ZH(周本智), ZHANG R M(张汝民), *et al.* Response of chlorophyll fluorescence parameters of *Illicium lanceolatum* on different light conditions[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2012, 32(3): 525—531(in Chinese).
- [26] CHENG X R(成向荣), SHU J(舒 骏), LIU J(刘 佳), *et al.* Growth, Photosynthesis and fluorescence characteristics of *Begonia fimbripula* and *Gynura divaricata* under different light conditions[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2014, 34(7): 1 426—1 431(in Chinese).
- [27] HUI H X(惠红霞), XU X(许 兴), LI Q R(李前荣). Exogenous betaine improves photosynthesis of *Lycium barbarum* under salt stress [J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2003, 23(12): 2 137—2 142(in Chinese).
- [28] DAWSON S P, DENNISON W C. Effects of ultraviolet and photosynthetically active radiation on five sea grass species[J]. *Marine Biology*, 1996, 125(4): 629—638.
- [29] MARWOOD C A, SOLOMON K R, GREENBERG B M. Chlorophyll fluorescence as a bioindicator of effects on growth in aquatic macrophytes from mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, 20(4): 890—898.
- [30] LI Q(李 强), WANG G X(王国祥), MA T(马 婷), *et al.* Changes of photosynthetic characters of *Vallisneria asiatica* adhered by *Hydrodictyon reticulatum* [J]. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), 2007, 19(3): 315—320(in Chinese).
- [31] SONG Y ZH(宋玉芝), CAI W(蔡 炜), QIN B Q(秦伯强). Photosynthetic fluorescence characteristics of floating-leaved and submersed macrophytes commonly found in Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, 20(3): 569—573(in Chinese).
- [32] XIAO Y E(肖月娥), CHEN K N(陈开宁), DAI X B(戴新宾), *et al.* Comparison of adaptive capacity to low light intensity of two angiosperm submersed macrophytes from Taihu Lake[J]. *Plant Physiology Communication* (植物生理学通讯), 2006, 42(3): 421—425(in Chinese).

(编辑:宋亚珍)

封面植物介绍——秦岭石蝴蝶

秦岭石蝴蝶(*Petrocosmea qinlingensis* W. T. Wang), 隶属于苦苣苔科, 石蝴蝶属, 是本属分布最北缘的种, 为多年生宿根草本。叶 7~12 枚, 具长或短柄; 叶片草质, 宽卵形、菱状卵形或近圆形, 长 0.7~3 cm, 宽 0.7~2.8 cm, 顶端圆形或钝, 基部宽楔形, 边缘浅波状或有不明显圆齿, 两面疏被贴服短柔毛。花序 2~6, 顶生 1 花。花萼 5 裂达基部, 外面疏被短柔毛; 花冠淡紫色, 外面疏被贴服短柔毛, 内面在上唇被白色柔毛; 花冠筒长约 2.8 mm, 上唇长约 4.8 mm, 2 深裂, 下唇与上唇近等长, 3 深裂, 所有裂片近长圆形, 顶端圆形。可育雄蕊 2, 着生于近花冠基部。雌蕊长约 5 mm, 子房与花柱被开展的白色柔毛, 柱头小, 球形。花期 8~9 月。秦岭石蝴蝶花冠筒内面被毛, 与其近缘种中华石蝴蝶(*P. sinensis* Oliv.) 的区别是后者花冠筒内面无毛。

秦岭石蝴蝶是由我国著名分类学家王文采教授在 20 世纪 80 年代描述并命名的新物种。模式标本产地为陕西省勉县茶店, 之后近 30 年间的调查中, 均未发现其野生居群。直到近年, 在陕西省第二次野生植物资源调查和汉中市极小种群野生植物秦岭石蝴蝶、庙台槭资源调查中被重新发现。

秦岭石蝴蝶是秦岭地区特有的珍稀濒危野生植物, 一般生长于阴湿山谷岩石上, 群落上层为落叶阔叶林, 郁闭度比较高。由于其野生居群地理分布极为狭窄, 个体数量稀少, 已经被列入第一批国家二级重点保护野生植物, 具有较高的科研价值。

(图文分别由陕西理工学院 王勇、杨培君, 略阳县野生动植物保护管理站 李长波和勉县野生动植物保护管理站 樊荣 提供)