

李霞, 丛伟, 任承钢, 等. 太湖人工种养凤眼莲的光合生产力及其碳汇潜力分析[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(3): 500-504.

## 太湖人工种养凤眼莲的光合生产力及其碳汇潜力分析

李霞<sup>1</sup>, 丛伟<sup>1</sup>, 任承钢<sup>1</sup>, 盛婧<sup>2</sup>, 朱普平<sup>2</sup>, 郑建初<sup>1,2</sup>, 严少华<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省农业科学院粮食作物研究所, 江苏省优质水稻工程技术研究中心, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 为给太湖地区凤眼莲高产栽培技术提供技术支持, 以太湖地区人工围养生长的凤眼莲群落为研究对象, 在其6~10月旺盛生长季节, 采用LI-6400光合作用测定系统, 以开放式气路测定了其不同叶位的净光合速率( $P_n$ ), 功能叶片重要的光合参数如最大光合速率( $P_{max}$ )、光补偿点( $LCP$ )、光饱和点( $LSP$ )和表观量子效率( $AQE$ )以及叶片叶绿素含量等, 最后测定植株的叶面积指数和干物质重等。结果显示: 太湖地区凤眼莲光合的年度特征表现为7月的光合能力最强, 6~10月的月平均 $P_{max}$ 、 $LSP$ 、 $LCP$ 和 $AQE$ 分别为 $(37.86 \pm 3.27) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $(2502.5 \pm 46.0) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $(16.1 \pm 2.9) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.0532 \pm 0.0014$ ; 从不同月份不同叶位的 $P_n$ 看, 除心叶和最后1片叶外, 均是成熟的光合功能叶片; 功能叶片的叶绿素含量与水稻剑叶类似; 进一步从该地区凤眼莲实际年干物质重分析, 该地区人工种养 $0.067 \text{ hm}^2$ 凤眼莲可吸收 $3.90 \times 10^5 \text{ kg CO}_2$ , 鉴此, 太湖地区大力增加凤眼莲种植面积与发挥其叶片的光合能力, 将是江苏省未来增加碳汇的一条有效技术途径。

**关键词:** 凤眼莲; 太湖; 光合特性; 环境影响因子; 碳汇

中图分类号: Q945.79 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2011)03-0500-05

## Photosynthetic productivity and the potential of carbon sink in cultivated water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Taihu Lake

LI Xia<sup>1</sup>, CONG Wei<sup>1</sup>, REN Cheng-gang<sup>1</sup>, SHENG Jing<sup>2</sup>, ZHU Pu-ping<sup>2</sup>, ZHENG Jian-chu<sup>1,2</sup>, YAN Shao-hua<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Jiangsu High Quality Rice R&D Center, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** To provide technical supports to increase the photosynthetic productivity in domesticated water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Taihu Lake of Jiangsu Province, China, the photosynthetic characteristics of water hyacinth leaves were monitored during June and October, 2009, by using a portable photosynthesis system (LI-6400). The net photosynthetic rate ( $P_n$ ) at different leaf positions, and other photosynthetic parameters including maximum photosynthetic rate ( $P_{max}$ ), light compensation point ( $LCP$ ), light saturation point ( $LSP$ ) and the apparent quantum efficiency ( $AQE$ ), and chlorophyll content in leaves were assayed. The leaf area index and dry weight of individual plant were measured as well after harvest. The results showed that  $P_{max}$  in water hyacinth in Taihu lake area appeared in July, and the monthly average  $P_{max}$ ,  $LSP$ ,  $LCP$  and  $AQE$  were  $(37.86 \pm 3.27) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $(2502.5 \pm 46) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $(16.1 \pm 2.9) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $0.0532 \pm 0.0014$ , respectively, during June and October. All these data suggest that Taihu lake is suitable for growing water hyacinth in large scale; Moreover, the mature leaves at different positions and spanning the whole period, excluding interior and outermost senescent leaves, performed the highest  $P_n$  and there-

收稿日期: 2010-08-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAC63B01)

作者简介: 李霞(1970-), 女, 广西桂平人, 博士, 副研究员, 从事作物高光效生理育种研究。(E-mail): jspplx@jaas.ac.cn

fore played major roles in photosynthesis. The chlorophyll content of these functional leaves was characterized similar to that of flag leaf of rice. According to the yearly dry biomass production of the water hyacinth, it is estimated that approximate  $3.90 \times 10^5$  kg  $\text{CO}_2$  could be absorbed per year by water hyacinth in  $0.067 \text{ km}^2$  field. Accordingly, increase of the planting area in Taihu Lake and photosynthetic productivity in individual plant of water hyacinth was proposed as an effective way to enlarge the carbon sink in Jiangsu Province.

**Key words:** water hyacinth; Taihu Lake; photosynthetic characteristic; carbon sink

全球和区域碳循环已成为全球气候变化研究和宏观生态学的核心研究内容之一。在碳循环研究中,一个重要的科学问题是回答区域或全球的碳源和碳汇的大小、分布及其变化,因为它与限制一个国家化石燃料使用的国际公约——“京都议定书”紧密联系,所以不仅是一个科学命题,也成为国际社会广泛关注的焦点<sup>[1]</sup>。

全球碳循环是碳元素在地球各个碳库之间不断交换、循环周转的过程,它是地球化学循环中极为重要的组成部分,包括地壳层、海洋和陆地全球三大碳库。其中,内陆水体生态系统是陆地生态系统的重要类型。而在以往对在水体生态系统碳汇的研究中,主要侧重水体中的碳,如溶解性无机碳(DIC)、溶解态有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)和生物有机碳(BOC)<sup>[2]</sup>,而对人类经济活动对流域地表碳汇的影响则考虑不多。研究和预测对内陆水体生态系统产生重大影响的人类活动(如水体富营养化和资源化利用等)对水体碳循环过程和功能的影响,有利于维持内陆水体生态系统的碳平衡,这是一个需要加强的研究方向<sup>[3]</sup>。

凤眼莲(*Eichhornia crassipes*),俗称水葫芦,全球分布广泛,而且因其净水效果好,近年来被广泛应用于人工污水处理和富营养化湖泊<sup>[4-12]</sup>。它在 $25 \sim 35$  °C下生长速度惊人,通常在8个月内就能从10棵增至 $6.0 \times 10^5$ 棵,是公认的生长最快的植物之一<sup>[13]</sup>。计算发现,只要条件允许,单株凤眼莲1年内可以产生 $1.4 \times 10^8$ 棵分株,可以铺满 $140 \text{ hm}^2$ 的水面,鲜重可达 $2.8 \times 10^4$  t,可见其种群恢复和扩散能力极强<sup>[14]</sup>,而且其生育旺盛时期,叶片具有比水稻更高的光合能力<sup>[15]</sup>,因此其很强的固定二氧化碳能力,可能使其碳汇功能成为一个不可小视的生态效应。特别是经济发达的江苏省耕地面积有限,迫切需要开发更多土壤之外的空间,达到国家减排的目标,保证该省实现经济高速发展和环境优良的双重目的。本研究以近年来太湖地区人工种养的凤眼莲

为试材,拟从光合作用代谢的角度,探明植株的光合能力和太湖地区凤眼莲种养可吸收的 $\text{CO}_2$ 含量,从而估算太湖地区人工种养凤眼莲的碳汇潜力,为相关部门规划绿色江苏提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)属雨久花科凤眼莲属,是一种浮生水面的水生植物。在自然条件下,凤眼莲大部分不结实,主要靠分株繁殖,叶腋有腋芽,能抽出匍匐枝,长 $10 \sim 30 \text{ cm}$ ,顶端长出茎、叶和根系,成为新株。凤眼莲采自江苏常州地区溧湖江苏省农业科学院种养的材料,2009年6月开始放养,2009年10月收获,种养面积为 $0.067 \text{ hm}^2$ ,选取10个取样点,每个点选取10株,生理测定的植株特征均为单枝,叶片数为 $(7 \pm 3)$ 个,倒2叶叶柄长度为 $(20 \pm 5.2) \text{ cm}$ 。取白色须根的绿色健壮植株进行光合生理指标的测定,每株10次重复。

### 1.2 叶片净光合速率( $P_n$ )测定

采用美国LI-COR公司生产的LI-6400便携式光合测定仪,为开放系统,使用红蓝光源测定,光量子通量密度(PPFD)为 $1600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,流速为 $500 \mu\text{mol}/\text{s}$ ,室外测定条件为晴天 $10:00 \sim 12:00$ 的自然温度为 $33 \sim 35$  °C,相对湿度为 $67\% \sim 79\%$ ,光照度为 $(1800 \pm 50) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , $\text{CO}_2$ 浓度为 $(390.0 \pm 10.5) \mu\text{mol}/\text{mol}$ ,分别测定了不同叶位叶片的 $P_n$ <sup>[16-17]</sup>。

### 1.3 植株干物质重的测定

在种养地选取与光合生理指标测定对应的10个取样点,收获期收获整株植株,每个取样点为 $1 \text{ m}^2$ ,最后统一在 $105$  °C中杀青 $15 \text{ min}$ ,在 $70$  °C烘箱中烘干至恒重,记录干物质重<sup>[18]</sup>。

### 1.4 叶片离体叶绿素含量的测定方法

每个测定点取3株不同叶位的叶圆片共10片,浸没于80%丙酮中,置于黑暗中7 d直至叶圆片完

全失绿,用分光光度计测定叶绿素含量<sup>[19]</sup>。

### 1.5 叶面积指数的测定

在同一地点生长的凤眼莲群体内选取 10 个 1 m<sup>2</sup>水面,剪取样本内所有植株的功能叶片,根据叶面积指数=绿叶总面积/占地面积,测定叶面积指数。

## 2 结果

### 2.1 2009 年太湖地区凤眼莲功能叶片光合特性的年度特征

从图 1 可见江苏太湖地区人工种养凤眼莲叶片光合特性的周年特征为: $P_{\max}$ 7 月最高,8 月略

降,9 月份继续下降,10 月份则有小幅上升,而且月平均  $P_{\max}$  为  $(37.86 \pm 3.27) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,显著高于同期水稻与玉米<sup>[14]</sup>;  $LSP$  也是 7 月份最高,测定期间平均为  $(2502.50 \pm 46.00) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,显著高于典型的 C<sub>3</sub> 植物水稻<sup>[15]</sup>,  $LCP$  6~10 月为  $(6.37 \pm 0.35) \sim (28.30 \pm 3.60) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $AQE$  在 6~10 月变化不明显;叶片叶绿素含量与水稻剑叶的相当<sup>[17]</sup>,7 月最高,8~10 月份持续下降,且不同月份间差异不大。可见 6~10 月是太湖地区人工种养凤眼莲光合作用的适宜月份,与其大面积种植情况一致。

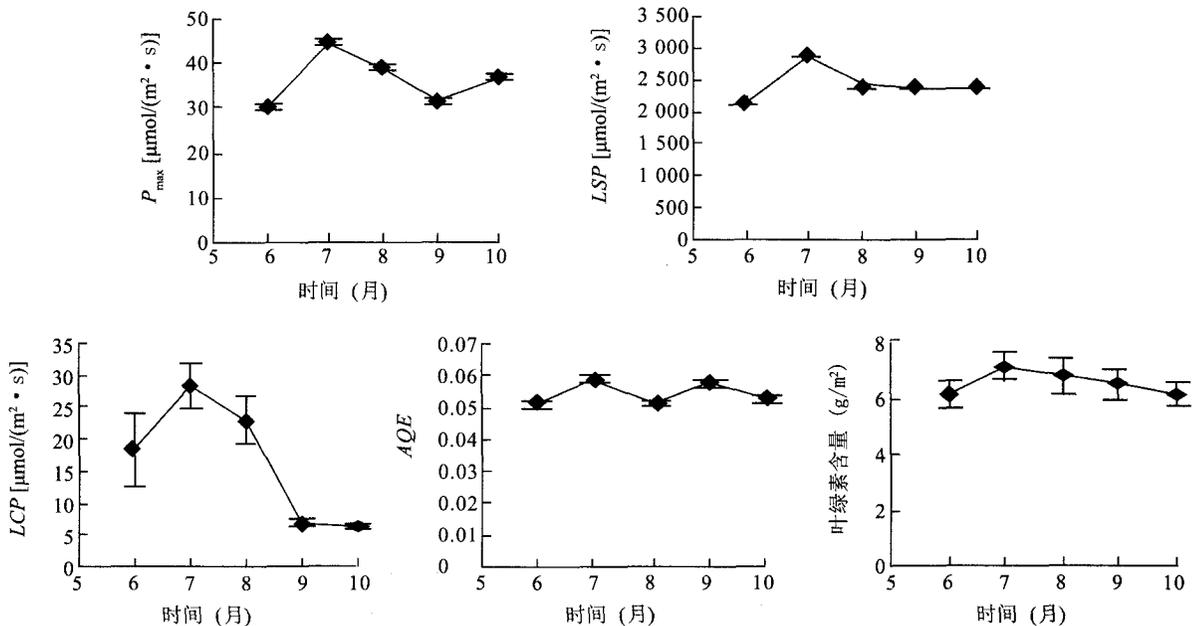


图 1 太湖地区不同月份凤眼莲功能叶片的光合特性(2009)

Fig. 1 Photosynthetic characteristics of mature leaves in water hyacinth from May to October planted in Taihu Lake(2009)

### 2.2 太湖地区人工种养的凤眼莲不同时期及不同叶片 $P_n$ 的变化

从图 2 可以看出,7~10 月太湖地区凤眼莲不同叶位叶片的  $P_n$  都是随心叶向下由小到大,再到小而变化,其中心叶的光合速率较低,最后 1 叶略微下降。图 2 还显示:9 月的倒 1、倒 2 和倒 3 叶的  $P_n$  不仅略低于该月份其他光合功能叶,而且也比其他不同月份相同叶位低;但是太湖种养的凤眼莲不同月份和不同叶位叶片的  $P_n$  均高于南京同期和同叶位叶片<sup>[14]</sup>,且  $P_n$  均大于  $15.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。推测

这可能与江苏太湖凤眼莲人工种养区微生态环境中湿度较大有关,增加湿度会使植物孔径放大,让更多的二氧化碳进入叶片,光合作用因而进行更快。

### 2.3 太湖地区人工种养的凤眼莲固定的 CO<sub>2</sub> 量及碳汇估算

2009 年太湖地区人工种养的凤眼莲为  $0.067 \text{ hm}^2$ ,按实际测定的年干物质累积量  $3.60 \text{ kg}/\text{m}^2$  计,可以吸收  $3.90 \times 10^5 \text{ kg CO}_2$ ,以国际碳汇标准的平均值每吨 770 元人民币计,可产生碳汇  $0.03 \times 10^7$  元人民币,如果太湖水面都种植凤眼莲,那么全年固定的

CO<sub>2</sub>量可高达  $1.42 \times 10^{10}$  kg,可见其 CO<sub>2</sub>吸收能力是很大的,将可产生碳汇  $1.09 \times 10^{10}$  元人民币。根据江苏省 2009 年气候公报,6~10 月太湖地区日照时间约为 1 054 h 以及本研究测定的凤眼莲叶面积系数为 4.3,反推太湖地区凤眼莲叶片实际的净光合速率只有  $8.17 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,仅占 6~10 月份功能叶片月  $P_{\text{max}}$  [月平均值为  $(37.86 \pm 3.27)$

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] 的 21.58%,而且也低于不同叶位的  $P_n$ (图 2)。如果通过栽培措施满足其饱和的光温条件,凤眼莲  $P_n$  可能达到  $37.86 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,全年干物质累积量将提高 5 倍,达  $16.67 \text{ kg}/\text{m}^2$ ,因此提高其干物质累积还有很大的空间。

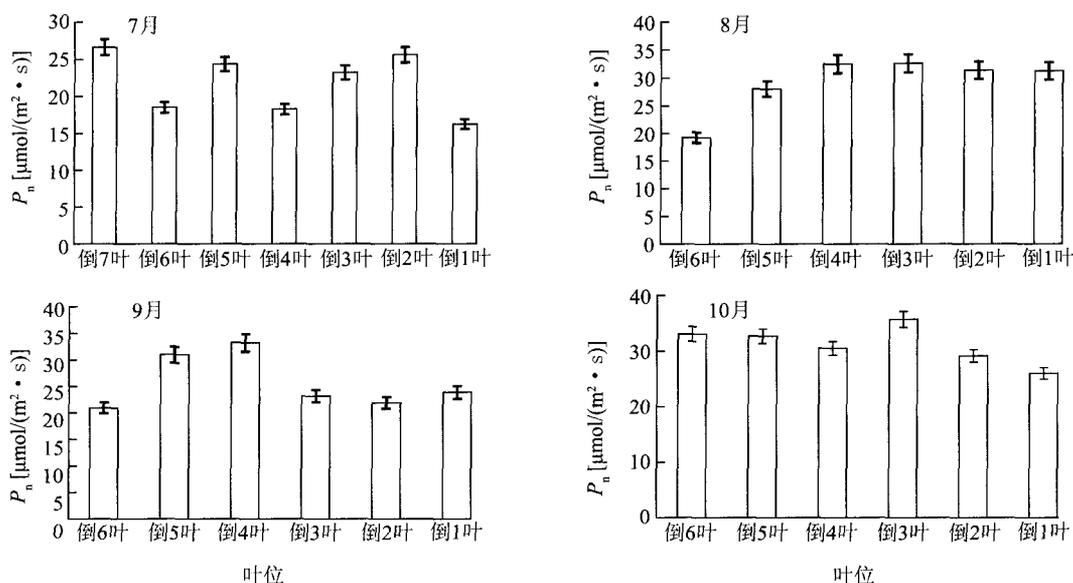


图 2 太湖地区种养的凤眼莲 7~10 月不同叶位叶的  $P_n$  值(2009)

Fig. 2  $P_n$  value in different leaf positions from July to October (2009) in *Eichhornia crassipes* cultivated in Taihu Lake

### 3 讨论

#### 3.1 江苏太湖人工种养的凤眼莲光合能力的生理基础

已有的江苏南京地区凤眼莲功能叶片的光合特性表明它是典型的阳生植物<sup>[14]</sup>,符合热带植物的光合特性<sup>[19]</sup>。进一步分析太湖地区种养的凤眼莲光补偿点比水稻和玉米都低<sup>[14]</sup>,平均光饱和点为  $(2\ 502.50 \pm 46.00) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,比水稻和玉米高,它们的  $AQE$  也较高,可见太湖地区凤眼莲对光照环境的适应性范围更广,有广幅的光合生态位,加上其茎短,叶片与根相连,具有物质运输途径短的形态特征<sup>[20]</sup>,而且太湖大水面种植区内的相对湿度大,其孔径放大,让更多二氧化碳进入叶片,表现高蒸腾速率,使光合作用更高。但是从其结构基础上看,其叶绿素含量与水稻的剑叶类似。这些表明凤眼莲高光合生产力的表现可能不是在结构上的差

异,而是与不同外界环境超强的适应性机制有关。

#### 3.2 有关限制太湖地区人工种养凤眼莲光合作用发挥的主要环境因子

江苏受东西海陆和季风影响,常常遭遇大风和暴雨等灾害性天气,阴雨寡照条件较多,即使在 7~8 月江苏地区太阳辐射的高峰季节,在晴天中午的最大光照度也不高于  $1\ 400.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[21]</sup>。但是不同生态环境下凤眼莲的表现有差异,如本研究显示太湖地区人工种植凤眼莲的光合潜力比南京高<sup>[14]</sup>,虽然太湖地区的光温条件比南京地区更有利于发挥其光合潜力,但是其实际用于干物质累积的光合速率则有限,不同叶位的  $P_n$  只有  $P_{\text{max}}$  的一半,可见光照和温度还是限制太湖地区凤眼莲光合能力发挥的主导环境因素。今后将太湖地区人工种植的风眼莲安排在光线充足的开阔水面,或者筛选适合太湖地区光温条件的高光合能力的材料,可能是今后进一步增加其干物质累积的一条有效途径。

### 3.3 太湖地区人工种养凤眼莲的碳汇功能

当生态系统固定的碳量大于排放的碳量,该系统就成为大气 CO<sub>2</sub> 的汇,简称碳汇(Carbon sink)<sup>[22]</sup>。而二氧化碳是植物生长的“粮食”,植物把叶子吸收的二氧化碳和根部输送上来的水分在光能的作用下转变为糖和氧气。植物这种利用光能将水和二氧化碳转变成葡萄糖,并释放出氧气的过程被称为植物的光合作用。正是植物的光合作用使植物吸收的二氧化碳以有机物的形式储存起来,形成了树干、树枝、树叶等,达到吸收、固定大气中二氧化碳的作用,从而减少大气中的二氧化碳浓度,减缓温室效应。本研究结果表明,凤眼莲由于具有高吸收 CO<sub>2</sub> 的高光合能力,展示了其作为碳汇生态材料的远大前景。增加凤眼莲在太湖地区的种植面积对于经济高度发达,耕地有限,减排压力巨大的江苏省具有一定的实践意义。而从其光合能力发挥的角度,实际凤眼莲叶片的光合能力还不到最大光合能力的 1/4。可见,通过改善养殖条件进一步提高其叶片的光合能力,不仅将为江苏省太湖富营养化水体的净化起到一定的作用,而且为凤眼莲的资源化利用提供丰富的材料,最终也将为全省增加碳汇,实现减排目标起到重要的作用。

#### 参考文献:

- [1] UNFCCC, FACT SHEET. The Need for Mitigation [EB/OL]. [2008-09-07]. <http://unfccc.int/press/items/2794.php>. 2008.
- [2] 王春权,孟宪民,张晓光,等. 陆地生态系统碳收支/碳平衡研究进展[J]. 资源开发与市场,2009,25(2):165-171.
- [3] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑),2007,37(6):804-812.
- [4] 胡长伟,孙占东,李建龙,等. 凤眼莲在城市重污染河道修复中的应用[J]. 环境工程学报,2007,1(12):51-56.
- [5] 齐玉梅,高伟生. 凤眼莲净化水质及其后处理工艺探讨[J]. 环境科学进展,1999,7(2):136-140.
- [6] 周文兵,谭良峰,刘大会,等. 凤眼莲及其资源化利用研究进展[J]. 华中农业大学学报,2005,24(4):423-428.
- [7] 周蓓蕾,彭进平,郭建维,等. 凤眼莲活性提取物的抑菌活性研究[J]. 江苏农业学报,2009,25(3):547-550.
- [8] 张 砾,郝民杰,高红莉,等. 添加水葫芦对牛粪厌氧产沼气的影晌[J]. 江苏农业科学,2011(1):449-451.
- [9] 杜 静,常志州,黄红英,等. 水葫芦脱水工艺参数优化研究[J]. 江苏农业科学,2010(2):267-269.
- [10] 沈明星,刘凤军,施林林,等. 水葫芦沼液肥对菜薹产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2009(4):168-169.
- [11] 范 铮,徐 俊,郑晓峰,等. 水葫芦提取物抑菌作用的初步研究[J]. 江苏农业科学,2009(3):143-144.
- [12] 刘海琴,宋 伟,姜继辉,等. 控温和添加垃圾液对水葫芦发酵效果影响的研究[J]. 江苏农业科学,2009(3):374-376.
- [13] 安鑫龙,李 婷. 凤眼莲的生态特征[J]. 水利渔业,2007,27(4):82-84.
- [14] 王一专,吴竞仑. 中国水葫芦危害、防治及开发利用[J]. 杂草科学,2004(3):6-9.
- [15] 李 霞,任承钢,王 满,等. 江苏地区凤眼莲叶片光合作用对光强与温度响应[J]. 江苏农业学报,2010,26(5):943-947.
- [16] 李 霞,刘友良,焦德茂. 不同高产水稻品种叶片的荧光参数的日变化和光适应特性的关系[J]. 作物学报,2002,28(2):145-153.
- [17] 李 霞,焦德茂,戴传超,等. 转育 PEPC 基因的杂交水稻的光合生理特性[J]. 作物学报,2001,27(2):137-143.
- [18] 李 霞,焦德茂,刘 蔚,等. 转玉米 PEPC 基因水稻的农艺性状及生理特性[J]. 江苏农业学报,2007,23(2):87-92.
- [19] ARNON DI. Copper enzymes in isolated chloroplast: polyphenol-oxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant Physiol,1949,24:1-15.
- [20] 蒋高明,何维明. 一种在野外自然光照条件下快速测定光合作用—光响应曲线的新方法[J]. 植物学通报,1999,16(6):712-718.
- [21] 李 林. 江苏省稻作气候[C]//杨立炯,崔继林,汤玉庚. 江苏稻作科学. 南京:江苏省科技出版社,1990:32-37.
- [22] 于洪贤,黄璞玮. 湿地碳汇功能探讨:以泥炭地和芦苇湿地为例[J]. 生态环境,2008,17(5):2103-2106.