

不同地区凤眼莲的光合生态功能型及其生态影响因子*

李霞 任承钢 王满 丛伟 盛婧
朱普平 郑建初 严少华

(江苏省农业科学院 南京 210014)

摘要 以江苏省农业科学院太湖雪堰、南京和滇池白山湾的试验点内种养的凤眼莲为研究材料,在相同种养时间内,统一测定不同地区植株的株高和干重的变化及不同叶位光合参数和光合功能叶片的光合-光响应曲线等,以期阐明不同生态区凤眼莲株型特征形成的生态生理机制,并为不同地区人工放养凤眼莲的高产栽培提供理论参考和技术支持。结果表明:(1)不同地区种养的凤眼莲株型有较大差异,滇池的为短地上部分和长根的株型,其茎叶长/根长为 0.4 ± 0.1 ;南京的为中等长度的地上部分和短根的株型,其茎叶长/根长为 7.1 ± 0.3 ;太湖的为长地上部分和中等根长的株型,其茎叶长/根长为 2.0 ± 0.2 。(2)形态有差异的不同地区凤眼莲植株的光合表现存在差异,与南京和滇池地区的相比,太湖凤眼莲不同叶位的净光合速率(P_n)最高($25.9\sim 35.3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$);相关性分析表明,南京凤眼莲的 P_n 与其相对湿度呈极显著负相关($r=-0.831^{**}$, $n=6$),滇池凤眼莲的 P_n 与气孔导度呈显著正相关($r=0.769^*$, $n=6$),太湖凤眼莲的相对湿度与叶片蒸腾速率呈显著负相关($r=-0.818^*$, $n=6$)。可见影响不同地区 P_n 的外界因子有差异,但除外界光强外,相对湿度也是影响其 P_n 高低的重要生态因子。(3)不同生态地区形态有差异的植株已形成了相应的光合潜力,生长能力最强的太湖地区植株,光合能力也最强, P_{max} 最大($36.29\pm 1.21 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)且光饱和点最高($LSP, 2\ 350.0\pm 69.0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$);相关性分析进一步表明,株高和光补偿点(LCP)以及茎叶长度与光饱和点均呈显著正相关,相关系数分别为 $r=0.998^*$ 、 $r=0.997^*$ ($n=10$)。本研究可为不同地区利用凤眼莲净化富营养水域的高产栽培提供参考。

关键词 凤眼莲 生态地区 光合功能型 株型 环境影响因子

中图分类号: Q945.79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)04-0823-08

Comparison of photosynthetic eco-functions of water hyacinth and their environmental factors in different areas

LI Xia, REN Cheng-Gang, WANG Man, CONG Wei, SHENG Jing,
ZHU Pu-Ping, ZHENG Jian-Chu, YAN Shao-Hua

(Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract *Eichhornia crassipes* Solms, commonly known as water hyacinth, is a bundler aquatic plant. It is widely used in sewage purification due to its well developed root system, strong reproductive ability and ultra-strong absorbency. Introduced into China as feed, it is recently moderately consumed as cultivation substrate of edible fungus and methane fermentation materials. In fact, it is now an importantly modern, low-carbon eco-agricultural resource. An experiment was therefore conducted to determine the physiological and ecological characteristics of different types of water hyacinth in different ecological environments. The experiment was carried out at the Jiangsu Academy of Agricultural Sciences experimental sites in Xueyan of Taihu Lake, Nanjing and Dianchi Lake in 2009. Different plant indices such as plant height, root length and dry weight were measured. Also photosynthetic parameters of leaves at different sits were measured using LI-6400 portable photosynthetic system. The related environmental factors such as light intensity, air temperature and relative humid were recorded as well. Different water hyacinth phenotypes were noted in different areas.

* 国家科技支撑计划项目(2009BAC63B01)和国家自然科学基金项目(30871459)资助
李霞(1970-),女,研究员,博士,主要从事作物生理生态研究。E-mail: jspplx@jaas.ac.cn
收稿日期: 2010-12-23 接受日期: 2011-02-28

Short shoot with long root water hyacinths were noted in Dianchi Lake (with shoot/root height ratio of 0.4 ± 0.1). Then medium-long shoot with short root water hyacinths were observed in Nanjing (with shoot/root height ratio of 7.1 ± 0.3). Also long shoot with medium-long root water hyacinths existed in Taihu Lake (with shoot/root height ratio of 2.0 ± 0.2). Compared with those in Nanjing and Dianchi Lake, P_n ($25.9 \sim 35.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) of water hyacinth at Taihu Lake was the highest for different leaf positions. The correlation coefficients between P_n and relative humidity in Nanjing, P_n and stomatal conductance (G_s) in Dianchi Lake, and relative humidity and transpiration rate (T_r) in Taihu Lake were -0.831^{**} , 0.769^* and -0.818^* ($n=6$), respectively. Correlation analysis showed that after light intensity, relative humidity was the next most important ecological driving factor of P_n . Difference in phenotype of water hyacinth in different areas had affected maximum photosynthetic potentials of water hyacinth. The strongest plant growth of water hyacinth in Taihu Lake was related with high photosynthetic capacity ($P_{\text{max}}=36.29 \pm 1.21 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and light saturation point ($LSP=2\ 350.0 \pm 69.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Plant height and light compensation point (LCP), as well as shoot length and LSP were all positively correlated with correlation coefficients of 0.998^* and 0.997^* ($n=10$), respectively. The findings of the study were critical for high yield artificial stocking of water hyacinth. It was recommended that future breeding should focus on extensive adaptability of *E. crassipes* to light and temperature conditions.

Key words Water hyacinth, Ecological area, Photosynthetic eco-function, Phenotype, Environmental factor
(Received Dec. 23, 2010; accepted Feb. 28, 2011)

凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)属维管束水生植物, 俗称水葫芦, 具有发达的根系、旺盛的生长繁殖及超强的吸收能力。凤眼莲引入中国最早是用于饲料, 近年来也用于食用菌的培养基质及沼气发酵等, 特别是在富营养化水体治理工程中被广泛应用^[1-2], 使其成为现代高效生态农业的一种重要利用资源^[3-4]。随着凤眼莲人工种养地点的增加, 栽培工作者发现不同地点种养的凤眼莲形态有差异, 诸如叶片数目、株高和根长等, 但导致这种变化的生理生态机制研究目前尚不多, 这就使得栽培工作者很难定向地培育出高生物量的凤眼莲, 在一定程度上限制了其资源化利用的区域。

世界上凤眼莲属有8种植物, 但根据细胞学和分子遗传学的研究结果, 目前分布在我国的仅有来自南美洲巴西的1种^[5-6], 这表明凤眼莲属植物在中国的分布与我国的生态条件有关。王桂荣和李学宝等^[7-8]研究了某些环境条件对凤眼莲生物生产力的影响, 并发现凤眼莲对低温的适应性比水花生(*Alternanthera philoxeroides*)差。朱慧等^[9]从凤眼莲的入侵性和光合能力的角度研究表明, 广东地区的凤眼莲具有较高的光能利用率与较强的光合响应机制, 这是它比大藻(*Pistia stratiotes* L.)具有更强入侵力的生理基础。已有研究表明, 南京地区8月凤眼莲叶片的光合能力显著高于水稻, 并与玉米接近^[10], 这些研究都是凤眼莲对当地光温资源利用的表现以及在相同生态地区与其他物种的比较。但对于富营养化水域较多的中国广大地区, 凤眼莲的表现如何? 又如何保持它在不同富营养化环境下的高速生长来实现高效的净化效果? 这就要求人们进一步研究凤眼莲在不同生态地区光合能力的差异, 探究凤眼莲高效利用的重要理论基础。本文以不同生态地点种养的凤眼莲为试材, 在凤眼莲生长较快的季节(7~9

月), 系统比较其植株形态特征和光合生理生态基础, 深入分析影响不同生态地区株型的关键生态因子, 期望从光合生理生态的角度揭示凤眼莲的生长机制, 从而为不同地区人工放养凤眼莲的高产栽培提供理论参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

凤眼莲属雨久花科凤眼莲属, 是一种浮生于水面的水生植物。在自然条件下, 大部分不结实, 主要靠分株繁殖, 叶腋有腋芽, 能抽出匍匐枝, 其顶端长出茎、叶和根系, 成为新株。本试验在江苏省农业科学院太湖雪堰(试验区水体总氮为 $3.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水温为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$)、江苏南京(试验区水体总氮为 $3.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水温为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$)和云南滇池白山湾(试验区水体总氮为 $3.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水温为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$)的凤眼莲人工种养试验地进行。凤眼莲 2009 年 7 月 1 日的初始放养量为 $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。采用毛竹围栏小区试验, 小区面积为 6 m^2 。生长 2 个月后, 于 9 月选取单枝、叶片数为 9 ± 3 个、白色须根 10 个的绿色健壮植株, 进行植株形态和光合生理生态指标的测定。

1.2 外界光强和温度等环境条件测定

9月18日自然晴天上午9:00~11:00于室外测定当地的光温条件, 用LI-6400型便携式光合仪同时连续测定不同叶位连体材料的光强、温度和相对湿度等环境指标, 重复3次, 每材料的测定在5 min内完成。

1.3 植株形态调查指标的测定

2009年9月, 同时选取不同生态地区的供试材料, 材料选择统一为单分枝、叶片数为 9 ± 3 个、白色须根 10 个的绿色健壮植株, 用直尺测定植株地上

部分茎叶和根的长度, 通过公式: 株高=茎叶长+根长和根茎比=茎叶长/根长, 计算株高和根茎比。

1.4 叶片净光合速率测定

采用美国LI-COR公司生产的LI-6400便携式光合测定仪, 开放系统, 使用红蓝光源测定, 光量子通量密度(photosynthetic photo flux density, *PPFD*) $1\ 600\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 流速设为 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, 室外测定条件为9月18日自然晴天上午9:00~11:00当地的光温条件, CO_2 浓度 $390.0\pm 10.5\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 在相同时间, 3个试验点用3部LI-6400光合仪同时测定供试材料不同叶位叶片的净光合速率(*Pn*), 取10个植株, 每个植株的不同叶位分别测定10次^[11]。

1.5 叶片光合-光响应曲线和表观量子效率测定

按李霞等^[12]的方法, 采用美国LI-COR公司生产LI-6400便携式光合测量系统, 用6400-02B LED红蓝光源叶室进行连体叶片瞬时光合速率(instantaneous net photosynthetic rate, *INPR*)测定。6400-02B LED红蓝光源为LI-6400便携式光合测量系统组成部分, 能在 $0\sim 2\ 800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光合光通量密度(*PPFD*)内根据设定大小顺序连续变化。设定一系列 *PPFD* 梯度, 测定 *Pn* 的 *PPFD* ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)分别为 0、50、100、150、200、400、600、800、1 200、1 400、1 600、2 000、2 400、2 600 和 2 800, 其他光合参数如气孔导度(*G_s*)、胞间 CO_2 浓度(*C_i*)以及蒸腾速率(*Tr*)等同时得到, 每点测定 10 个重复, 绘制光合-光强曲线, 计算出最大光合速率和光饱和点; 表观量子效率在光强为 $0\sim 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内, 用直线回归求出表观量子效率以及光补偿点。同时计算各点的气孔限制值(*L_s*)、水分利用率(*WUE*)和羧化效率, 其中 $L_s=1-C_i/C_{\text{air}}$ (C_{air} 为空气中 CO_2 浓度), $WUE=P/Tr$, 羧化效率= Pn/C_i ^[13]。

1.6 植株干重的测定

参照李卫国等^[14]的方法, 植株培养90 d后收获, 从每一地点取出10个植物个体, 水洗后, 用滤纸吸干水分, 于85 °C下烘箱中烘干24 h至恒重后, 用感量为0.000 1 g的电子天平称量干重。

1.7 数据分析

采用DPS 3.01统计软件对试验数据进行统计分析, 显著性测验采用LSD法。数据处理和图表绘制通过Microso Excel进行。

2 结果与分析

2.1 不同地区人工种养凤眼莲的株型比较

从表 1 可知, 不同地区种养凤眼莲的株型有较大差异, 从株高看, 滇池的最大, 太湖的次之, 南京的最小; 但从单株干物质累积(单株干重)看, 则太湖的最大, 南京的次之, 滇池的最小。太湖地区茎叶长和根长的比值为 2.0 ± 0.2 , 茎叶和根的生长比较一致, 而南京地区的则为 7.1 ± 0.3 , 主要以茎叶生长为主, 而滇池地区则为 0.4 ± 0.1 , 以根的生长较快, 可见干物质累积(单株干重)与地上部分生长关系更大。

2.2 不同地区人工种养凤眼莲不同叶位叶片外界条件的比较

光温是影响植物地理分布和光合生产力的主要环境因素^[15]。从供试材料叶片光合速率测定的外界环境看(表 2), 实际上 3 地的外界气温(air temperature)无明显差异, 但太湖的相对湿度(relative humidity)显著高于南京和滇池, 而南京和滇池差异不大; 光照强度则是滇池最高, 均显著高于太湖和南京。

2.3 不同地区人工种养凤眼莲不同叶位叶片净光合速率(*Pn*)的比较

叶片某一时刻的光合能力是其形成时间(季节)和叶龄的综合反映^[16], 但叶片结构和生理的发育进程与叶龄紧密关联^[17]。从图 1 可知, 不同地区凤眼莲叶片的 *Pn* 有一定的共性, 都是随叶片的发育而异, 心叶因叶片没有发育完全而 *Pn* 较小, 最后一个叶片由于衰老 *Pn* 也较小, 其他叶位均为成熟叶片, 具有较高的 *Pn*。但不同地区的 *Pn* 存在差异, 太湖的 *Pn* 在 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 而滇池的则在 $15\sim 25\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 南京地区的最低(为 $4\sim 15\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。而不同叶位的蒸腾速率(图 1), 滇池叶片的最高, 南京地区次之, 太湖的最低; 气孔限制值则不同(图 1), 南

表1 不同地区人工种养的单枝凤眼莲的株型比较

Table 1 Comparison in plant types of artificially cultivated *E. crassipe* with a single branch at different locations

地点 Location	株高 Plant height (cm)	单株干重 Dry weight per plant (g)	茎叶长 Shoot height (cm)	根长 Root length (cm)	茎叶长/根长 Shoot height/root length
太湖 Taihu Lake	60.4±5.2Bb	53.2±5.3Aa	40.2±2.3Aa	20.2±0.5Bb	2.0±0.2Bb
南京 Nanjing	45.1±3.3Cc	42.1±2.9Bb	36.3±1.5Aa	5.1±0.2Cc	7.1±0.3Aa
滇池 Dianchi Lake	78.4±6.1Aa	37.5±4.3Cc	22.1±1.1Bb	57.3±1.2Aa	0.4±0.1Cc

不同小写和大写字母分别表示差异达 0.05 和 0.01 显著水平, 下同。Different small and capital letters mean significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

表2 不同凤眼莲人工种养地点外界环境因子的变化
Table 2 Changes of environmental factors at different artificial cultivation locations of *E. crassipes*.

叶位 Leaf position	气温 Air temperature (°C)			相对湿度 Relative humidity (%)			光强 Light intensity ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	太湖 Taihu Lake	南京 Nanjing	滇池 Dianchi Lake	太湖 Taihu Lake	南京 Nanjing	滇池 Dianchi Lake	太湖 Taihu Lake	南京 Nanjing	滇池 Dianchi Lake
倒 1 Last 1 st leaf	27.80Aa	28.70Aa	26.70Aa	81.99Aa	57.30Bb	55.31Bb	943.00Cc	766.09Bb	400.00Ff
倒 2 Last 2 nd leaf	27.88Aa	28.90Aa	27.40Aa	82.51Aa	54.80Bb	53.89Bb	1 049.00Bb	562.88Dd	560.00Ff
倒 3 Last 3 rd leaf	27.85Aa	28.70Aa	26.40Aa	82.18Aa	62.10Bb	57.65Bb	1 400.00Aa	630.85Cc	987.00Cc
倒 4 Last 4 th leaf	27.79Aa	29.20Aa	27.00Aa	80.67Aa	57.60Bb	55.94Bb	917.00Cc	1 043.06Aa	2 108.00Aa
倒 5 Last 5 th leaf	27.76Aa	28.80Aa	30.23Aa	78.28Aa	59.00Bb	59.99Bb	894.00Dd	1 067.68Aa	1 500.00Bb
倒 6 Last 6 th leaf	27.85Aa	28.50Aa	28.08Aa	78.78Aa	58.80Bb	53.58Bb	660.00Ee	1 004.40Aa	859.00Dd
倒 7 Last 7 th leaf		28.40Aa	27.13Aa		62.10Bb	56.46Bb		1 110.70Aa	733.00Ee
倒 8 Last 8 th leaf		28.60Aa	28.71Aa		62.70Bb	59.97Bb		733.52Bb	491.00Ff
倒 9 Last 9 th leaf		28.50Aa	27.60Aa		72.00Bb	55.38Bb		500.00Dd	477.00Ff

京最高,太湖次之,滇池则最低。相关性分析表明,南京地区不同叶位的 P_n 与其相对湿度呈极显著负相关($r=-0.831^{**}$, $n=6$)。南京凤眼莲叶片的 P_n 较低可能是气候干燥导致气孔关闭,气孔限制值高,光合作用可利用的光合底物 CO_2 减少,随气孔关闭时间的延长,还可积累较高水平的活性氧,造成 P_n 降低;且叶片热量无法有效的排散,考虑到其根较短,通过蒸腾作用输送水分并带走部分热量的通道也较短,导致叶温最高(图 1)。对比 3 地的光强可知,滇池的最大光强为 $2\ 108\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,比太湖($1\ 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和南京地区($1\ 110.70\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)高。滇池凤眼莲叶片的 P_n 与气孔导度呈显著正相关($r=0.769^*$, $n=6$),表明滇池凤眼莲气孔的开闭影响其 P_n 的高低,较高的光强引起气孔关闭,减少光合作用利用的光能。但该地区的凤眼莲可通过高蒸腾速率及较长的输送水分的通道(地上茎叶和根的长度最长)而有效地排散叶片的热量,保持较低的叶温,使其 P_n 保持中等水平(图 1)。太湖相对湿度和叶片蒸腾速率呈显著负相关($r=-0.818^*$, $n=6$),表明该地区种植的风眼莲叶片处于高湿的气候环境中(图 1),有充沛的水汽,蒸腾速率和气孔限制值较低,气孔充分开放,使较多的 CO_2 进入植物进行光合作用, P_n 最高。可见不同生态地区影响凤眼莲 P_n 的生态因子存在差异。

2.4 不同地区人工种养凤眼莲功能叶片的光合特性

凤眼莲在不同生态环境表现的形态与光合特性的差异,是形态可塑性还是光合生态型的差异?而在可控的光温条件下,其光合潜力是否改变?为此进一步测定了 3 地的功能叶片倒 3 叶光合-光强曲线(图 2)。3 地的凤眼莲均是典型的 C_3 植物的光合作用类型,但其最大光合能力显著地高于 C_3 植物水稻,

与 C_4 植物玉米类似^[10]。凤眼莲叶片对光强的响应呈典型的抛物线形,其方程为 $y=-7\times 10^6x^2+0.032\ 9x+2.623\ 6$, $R^2=0.975\ 4$ (太湖); $y=-3\times 10^6x^2+0.015\ 5x+2.078\ 5$, $R^2=0.983\ 6$ (南京); $y=-7\times 10^6x^2+0.027\ 9x+0.687\ 1$, $R^2=0.955\ 6$ (滇池)。不同地点凤眼莲叶片的光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、表观量子效率(AQE)和最大净光合速率(P_{max})见表 3。

从表 3 可以看出,太湖地区的 P_{max} 最大(为 $36.29\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),表明饱和光条件下其光合能力最强;而 AQE 则是滇池的最大(为 $0.064\ 7$),表明对低光强具有最强的利用能力。随着光强的增加,净光合速率继续增加,并达到一个稳定的状态,其中太湖凤眼莲的光饱和点最高($2\ 350.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),南京的次之,滇池的最小。在高海拔湖泊生长的凤眼莲并没有形成与当地高光强适应的高光合能力,与太湖和南京地区相比,其具有较窄的光合生态位($60.5\sim 1\ 992.8\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

进一步分析 3 地凤眼莲叶片对外界水分和 CO_2 等资源的利用能力,从图 2 可以看出,太湖地区凤眼莲水分利用效率(WUE)最高,即其利用水的能力最强,南京次之,滇池最小。气孔限制值(L_s)主要随光强的增加而增加,但南京地区明显最高。综合比较 3 地凤眼莲利用 CO_2 的能力,即羧化效率,由于太湖地区的凤眼莲材料具有较高的利用水分能力,气孔开放充分,因而具有最高的羧化效率,滇池的次之,南京的最小。相关性分析进一步表明,株高与光补偿点 LCP 呈显著正相关,相关系数为 $r=0.998^*$ ($n=10$),茎叶长度与光饱和点 LSP 也呈显著正相关,相关系数为 $r=0.997^*$ ($n=10$)。可见,3 个种养地凤眼莲株型的差异主要是其适应当地光照条件的结果,从而形成了匹配的光合能力。

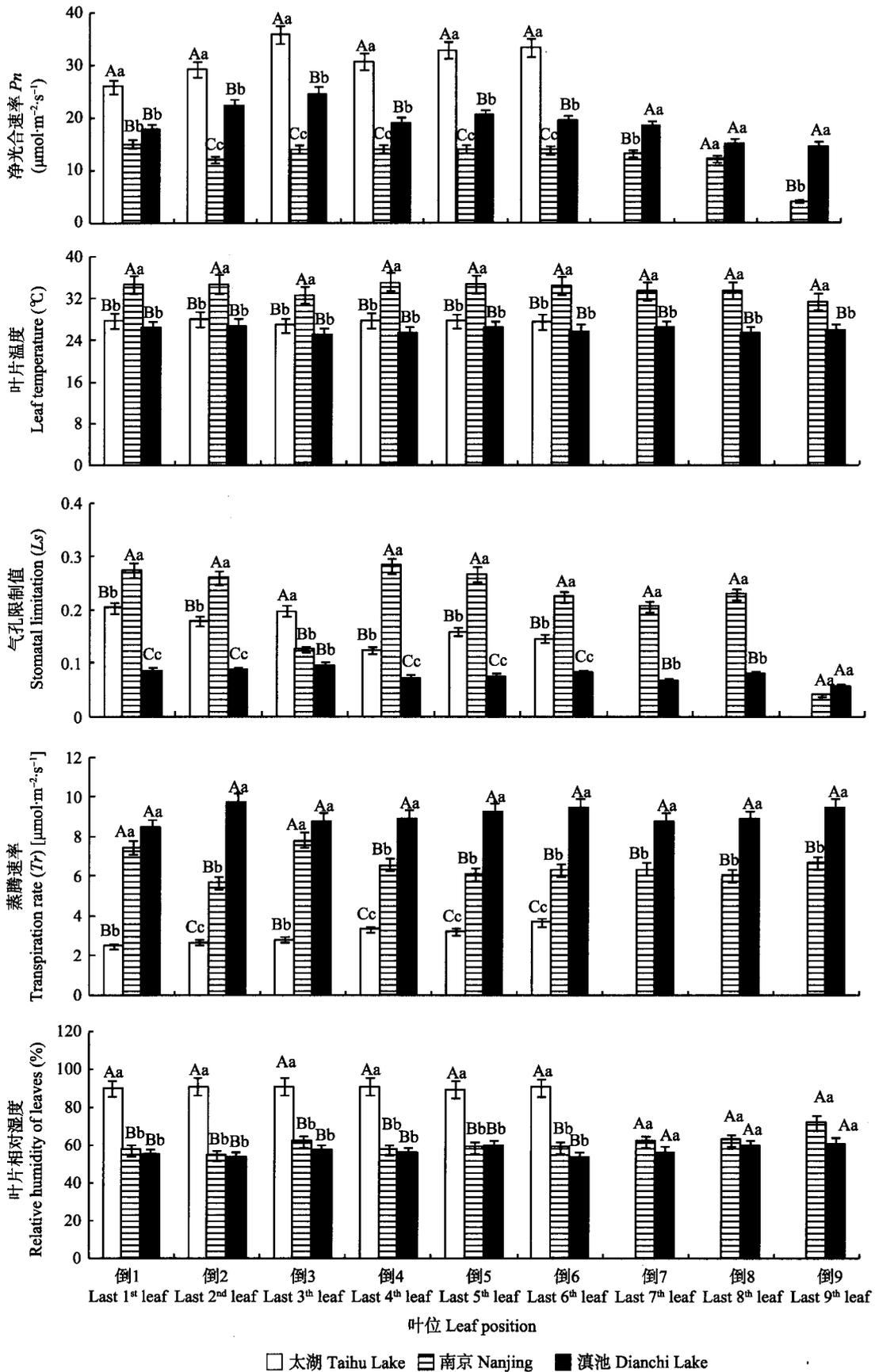


图 1 太湖、南京和滇池凤眼莲人工种养地点不同叶位净光合速率、气孔限制值、蒸腾速率、叶片温度和叶片相对湿度的变化

Fig. 1 Net photosynthetic rate (Pn), stomatal limitation (Ls), transpiration rate (Tr), temperature and relative humidity of leaves at different positions of *E. crassipes* artificially cultivated in Taihu Lake, Nanjing and Dianchi Lake in September, 2009

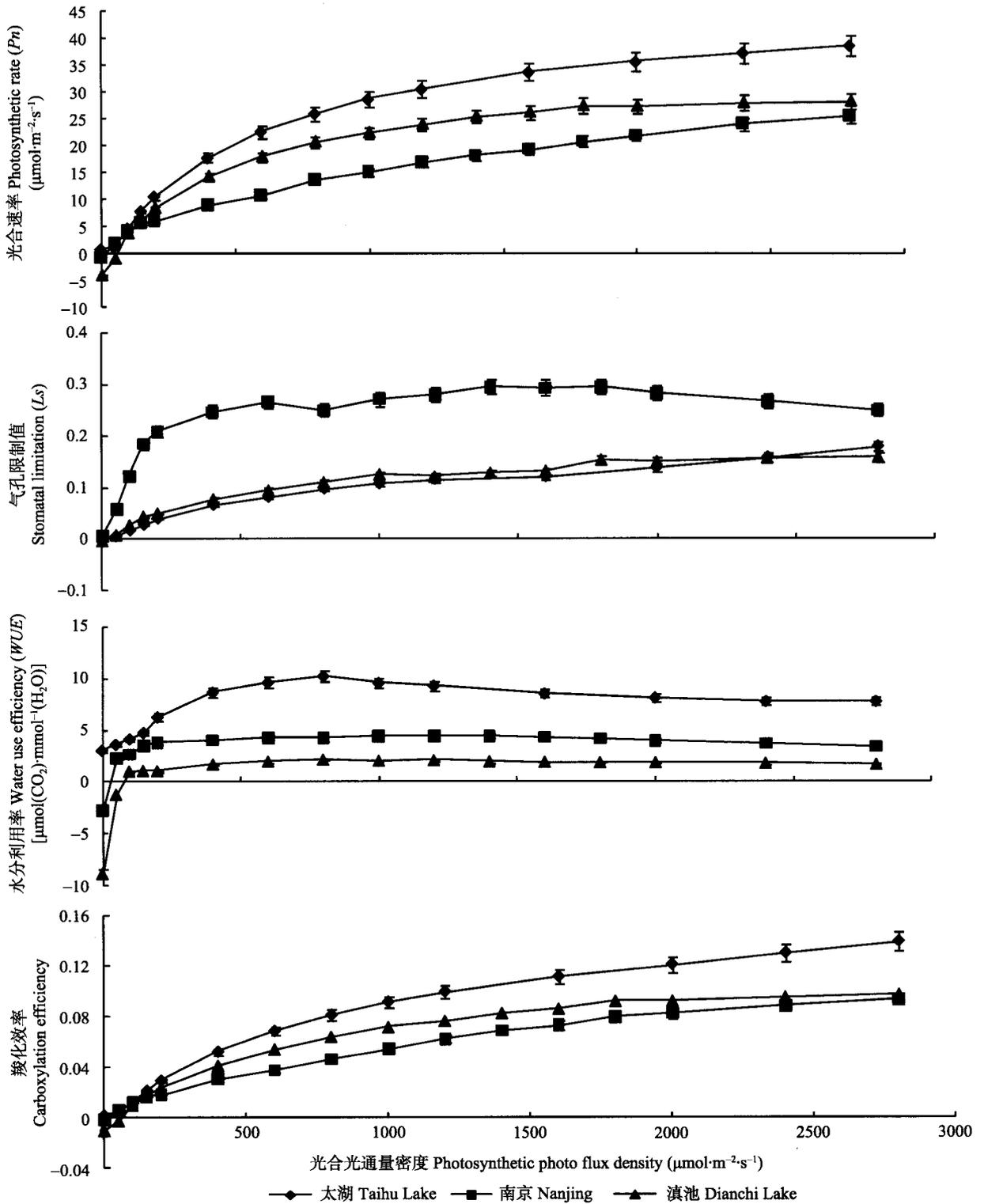


图 2 太湖、南京和滇池人工种养地点凤眼莲叶片在不同光强下光合速率、气孔限制值、水分利用率和羧化效率的变化
 Fig. 2 Changes of P_n , stomatal limitation, water use efficiency and carboxylation efficiency in *E. crassipes* artificially cultivated in Taihu Lake, Nanjing and Dianchi Lake in September, 2009

表3 南京、太湖和滇池人工种养凤眼莲叶片光合参数的比较

Table 3 Comparison of photosynthetic parameters of leaves of *E. crassipes* artificially cultivated in Nanjing, Taihu Lake and Dianchi Lake

地点 Location	最大光合速率 Maximum photosynthesis rate (P_{max}) [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	光饱和点 Light-saturation point (LSP) [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	光补偿点 Light compensation point (LCP) [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	表观量子效率 Apparent quantum efficiency (AQE)	暗呼吸 Dark respiration rate [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
太湖 Taihu Lake	36.29±1.21Aa	2 350.0±69.0Aa	36.4±3.8Bb	0.052 6±0.003Aa	-2.640±0.31Aa
南京 Nanjing	25.08±1.14Bb	2 250.0±82.9Aa	20.3±3.1Cc	0.034 7±0.002Bb	-0.844±0.22Aa
滇池 Dianchi Lake	28.49±1.25Bb	1 992.8±27.4Bb	60.5±5.3Aa	0.064 7±0.002Aa	-4.170±0.51Bb

3 讨论与结论

3.1 不同生态地区凤眼莲形态特征

形态特征和生长特性的改变是植物适应不同环境和资源水平的重要策略^[18], 如水稻的广适性表现^[19]。表型可塑性是同一基因型在不同环境条件下产生不同表型的特性, 是生物在没有遗传变异的情况下适应环境的一种机制^[20]。叶片适应环境的能力与环境条件共同决定了植物的存活和生长, 并在一定程度上决定了植物的分布方式和丰度^[21]。但对于中国的入侵植物凤眼莲, 原产于巴西, 现在已分布于南纬32.3°和北纬32.0°之间的世界大部分地区, 在25~35℃下生长速度惊人, 通常在8个月内就能从10棵增至 6×10^5 万棵, 是公认的生长最快的植物之一^[22], 但它也对水生生态系统和渔业生产造成了严重威胁, 被列于世界自然保护联盟(IUCN)公布的全球100种最具威胁的外来物种之中^[23], 如何有效地控制和利用此物种成为摆在生态和生物防治工作者面前的双重课题。近年来凤眼莲在富营养化水体治理工程中被广泛应用^[24]。凤眼莲的高效种养成为其在当地利用的关键技术, 因此, 凤眼莲对当地光温资源生理生态特性的研究开始受到关注^[9-10]。随着凤眼莲人工种养地点的增加, 栽培工作者发现不同地点种养的凤眼莲形态存在差异, 诸如叶片数目、株高和根长等, 且生物量累积差异很大, 揭示在不同生态地区的凤眼莲生长和生态适应机制, 建立其高效种养关键技术, 则对富营养化水域较多的中国广大地区生态环境的改善有重要的理论价值和积极的实践意义。本文对凤眼莲在不同生态地区的生态生理适应机制的研究表明: 分布于中国的凤眼莲在南京、太湖和滇池3个不同生态区有不同的形态特征, 表现在株型发生明显变化, 如南京的中等茎叶和短根的株型, 可能其在光强中等和干燥生境有关; 而在高光强(紫外辐射很强)的干燥生境下, 滇池的短茎叶和长根的株型, 有助于避免高光强的伤害; 在高湿和适应光强的生境下, 太湖的凤眼莲地上部分生长旺盛, 并形成中等长度的根。相关性分析也表明, 相对湿度和光照是影响凤眼莲株型的主要生态因子。

3.2 凤眼莲的光合生态功能型

光是最重要的生态因子之一, 很多学者对不同光环境下植物的生物量分配、形态特征、生长速率等作过研究^[25-26], 植物功能型是研究植被对环境动态变化的综合, 是兼顾植物的生态功能与生态对策的重要参数。如互花米草通过克隆整合加强其子分株的策略, 完成在海拔较低的沿海湿地的入侵^[27]。

Feng等^[28]的研究表明: 弱光下紫茎泽兰增加叶片生物量投入, 提高了捕光能力, 但随着光强的升高其叶片变小、变厚, 厚的叶片光合能力强, 小叶散热快、蒸腾失水少, 它主要通过增加氮向光合机构分配, 使植株保持强光下的水分平衡, 从而具有超强的生长能力^[29]; 人工种养的凤眼莲经过不同湿度环境和光强的适应后, 不仅形态上, 而且光合能力也出现了一定适应性的弹性变化, 如在气候比较干燥的地区, 通过气孔调节, 减少水分的损失(南京地区); 因UV-B辐射随海拔升高而增强, 在紫外线比较强的高海拔地区则通过增加蒸腾作用和降低光饱和点来减少紫外辐射对植物的伤害(滇池), 这与张常隆等^[30]的研究类似; 而在适宜的温暖高湿的条件下, 则通过降低蒸腾作用来减少光能和水分的损失, 从而增加叶片的光合能力, 最经济地利用外界的光温资源(太湖), 因此, 凤眼莲在不同生态条件下形成了“避强光”、“省水”和“费水”等多重特点, 这有利于灵活应对光强和水分环境特点, 形成了特有的形态株型特征, 从而保证在不同生态环境中的生存和有利环境中的快速扩展, 这与入侵植物紫茎泽兰气孔调节^[31]和叶氮定向分配的适应策略不同^[32]。凤眼莲在不同生境下表现的形态和生理的适应机制, 是表型的可塑性反应, 还需要同质生态园的研究进一步证实。而如何调节凤眼莲在外界条件下的“随遇而安”的生态适应策略以发挥其高光合生产潜力, 则是凤眼莲作为高效生态农业资源在不同地区富营养化水域进行资源化利用需要深入研究的技术课题。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 盛婧, 陈留根, 朱普平, 等. 高养分富集植物凤眼莲的农田利用研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 46-49
- [5] 汪光熙, 王徽勤. 凤眼莲的核型研究[J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 1989(4): 131-132
- [6] Ren M X, Zhang Q G, Zhang D Y. Random amplified polymorphic DNA markers reveal low genetic variation and a single dominant genotype in *Eichhornia crassipes* populations throughout China[J]. Weed Research, 2005, 45(3): 236-244
- [7] 王桂荣, 张春兴. 某些环境条件对凤眼莲生物生产力的影响[J]. 生态学杂志, 1996, 15(4): 33-36
- [8] 李学宝, 何光源, 吴振斌, 等. 凤眼莲、水花生若干光合作

- 用参数与酶类的研究[J]. 水生生物学报, 1995, 19(4): 333-336
- [9] 朱慧, 马瑞君. 2 种水生入侵植物光合特征的比较[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 193-198
- [10] 李霞, 任承钢, 王满, 等. 江苏地区风眼莲叶片光合作用对光照度和温度响应[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(5): 943-947
- [11] 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
- [12] 李霞, 戴传超, 焦德茂, 等. 光照条件下低温对水稻籼粳亚种幼苗抗氧化物质含量的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(3): 345-353
- [13] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis[M]//Govindjee. photosynthesis. New York: Academic Press, 1982: 263-343
- [14] 李卫国, 王建波. 光照和氮素对外来植物风眼莲生长和生理特性的影响[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2007, 53(4): 457-462
- [15] 蔡志全, 曹坤芳, 冯玉龙, 等. 夜间低温胁迫对两种生长光强下藤黄幼苗叶片荧光特征和活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 326-331
- [16] Kitajima K, Mulkey S S, Wright S J. Decline of photosynthetic capacity with leaf age in relation to leaf longevities for five tropical canopy tree species[J]. American Journal of Botany, 1997, 84(5): 702-708
- [17] Ishidaa, Uemura A, Koike N, et al. Interactive effects of leaf age and self-shading on leaf structure, photosynthetic capacity and chlorophyll fluorescence in the rain forest tree, *Dryobalanops aromatica*[J]. Tree Physiology, 1999, 19(11): 741-747
- [18] Maherali H, DeLucia E H. Influence of climate-driven shifts in biomass allocation on water transport and storage in ponderosa pine[J]. Oecologia, 2001, 129(4): 481-491
- [19] 李霞, 孙志伟, 吕川根, 等. 田间杂交水稻单年单点 5 种不同逆境的批量筛选及聚类分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 528-534
- [20] 王俊峰, 冯玉龙. 光强对两种入侵植物生物量分配、叶片形态和相对生长速率的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 781-786
- [21] Whitmore T C. A review of some aspects of tropical rain forest seedling ecology with suggestions for further enquiry[M]//Swaine M D. The ecology of tropical forest tree seedlings. Paris: Parthenon Publishing Group, 1996: 3-39
- [22] 安鑫龙, 李婷. 风眼莲的生态特征[J]. 水利渔业, 2007, 27(4): 82-84
- [23] 赵运涛, 李新华, 张征文. 中国主要外来入侵物种的危害及防治措施[J]. 林业调查规划, 2005, 30(6): 113-117
- [24] 濮培民, 李正魁, 王国祥. 提高水体净化能力控制湖泊富营养化[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2757-2763
- [25] Bossdorf O, Auge H, Lafuma L, et al. Phenotypic and genetic differentiation between native and introduced plant populations[J]. Oecologia, 2005, 144(1): 1-11
- [26] King D A. Branch growth and biomass allocation in *Abies amabilis* saplings in contrasting light environments[J]. Tree Physiology, 1997, 17(4): 251-258
- [27] Poorter L. Growth responses of 15 rain-forest tree species to a light gradient: The relative importance of morphological and physiological traits[J]. Functional Ecology, 1999, 13(3): 396-410
- [28] Feng Y L. Photosynthesis, nitrogen allocation and specific leaf area in invasive *Eupatorium adenophorum* and native *Eupatorium japonicum* grown at different irradiances[J]. Physiologia Plantarum, 2008, 133(2): 318-326
- [29] Xiao Y, Tang J B, Qing H, et al. Clonal integration enhances flood tolerance of *Spartina alterniflora* daughter ramets[J]. Aquatic Botany, 2010, 92(1): 9-13
- [30] 张常隆, 李扬平, 冯玉龙, 等. 表型可塑性和局域适应在紫茎泽兰入侵不同海拔生境中的作用[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1940-1946
- [31] 祖元刚, 王文杰, 杨逢建, 等. 紫茎泽兰叶片气体交换的气孔调节特性: 对其入侵能力的意义[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 25-35
- [32] Feng Y L, Lei Y B, Wang R F, et al. Evolutionary tradeoffs for nitrogen allocation to photosynthesis versus cell walls in an invasive plant[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106(6): 1853-1856