

太湖开阔水域凤眼莲的放养实验*

窦鸿身 濮培民 张圣照 胡维平 逢勇

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要 1991~1993年在无锡市马山自来水厂太湖水源区开展的旨在除去藻类和净化水质的物理生态工程实验结果表明, 在常有大风浪的太湖开阔水域凤眼莲能正常生长繁殖, 夏季的净生产力达 $500 \text{ g/m}^2/\text{d}$ 左右。根据实验所得, 探讨了在该湖开阔水域放养凤眼莲的技术, 研究了凤眼莲在不同时期、不同密度下的生产力、增长率、适宜放养密度等, 提出了对凤眼莲生长的计算方法。在此基础上, 对比分析了凤眼莲在太湖与内塘生长的个体生物学特性之差异及其原因。

关键词 凤眼莲; 大水面放养

An experimental study on culture of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms on open area of Taihu Lake Dou Hong-Shen, Pu Pei-Min, Zhang Sheng-Zhao, Hu Wei-Ping and Pang Yong (Nanjing Institute of Geography & Limnology, Academia Sinica, Nanjing 210008), *J. Plant Resour. & Environ.* 1995, 4(1): 54~60

An experimental study on the production, growth rate, optimum density with maximum production and maximum capacity density of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (ECS) in different periods is taken place during the physico-ecological engineering for removing algae and purifying water quality in intake area of Mashan Drinking Water Supply Plant, Wuxi for three years (1991~1993). The experimental results showed that ECS is able to grow and breed on the open area of Taihu Lake during strong wave as well as in the normal condition and its net productivity in summer is high up to $500 \text{ g/m}^2/\text{d}$. The techniques for culturing ECS in large lake with strong wind are improved and the statistical methods for calculation the growth characteristics of ECS are developed. The difference of individual bio-characteristics of ECS growing on open area of large lakes and in small rivers/lakes and the reasons of such difference are analyzed.

Key words *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms; culture on open lake

1. 实验目的

凤眼莲(*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)俗称水葫芦, 是一种速生、高产又具有经济价值的水生漂浮植物。因其生长速度快, 饲料价值较好, 且能大量吸收水体中的各种营养盐、重金属离子和降解酚等有机化合物, 在处理污水和发展饲料生产方面可起重要作用, 故受到国内外许多科技工作者的重视。70年代以来, 国内外的科研、高校和有关生产部门出于发展饲料生产或净化水质之目的, 在池塘、港渚、小型湖荡的湖湾或厂矿废水氧化塘内进行了放养凤眼莲的实验研究, 文献报道甚多^[1~5]。但是, 在诸如太湖等大型湖泊的开敞水域, 尤其是在水深浪

收稿日期 1994-09-05

* 江苏省科委下达“净化太湖局部水体的生态工程实验研究”课题(BS90077号)项内。
参加此项实验和提供资料的有周万平, 戴全裕, 陈开宁等人, 谨致谢意

大的开敞水域放养凤眼莲能否正常生长繁殖以及放养技术,迄今尚未见报道。本项实验即是针对这些问题而开展的,以期太湖等富营养化日益发展的大型湖泊局部水域水质的改善,探索采取生物工程进行治理的可行性。

2. 实验区的环境条件

实验现场在无锡市马山自来水厂水源区——太湖北部之梅梁湖(湾)内。此处湖面开阔,与湖的东岸和北岸分别相距8.5 km和4 km,西距马圩大堤30 m,东南向最大吹程约60 km;多年平均水深2 m,汛期最大水深4 m,水位年变幅1.5~2.5 m;湖底平坦,海拔高程0.9 m,硬质底,上覆10~20 cm的薄层淤泥。

本区夏季盛行东南风,经常出现持续性的大风浪。如1991年7月13~14日,平均风速9~15 m/s,瞬时风力达8~9级,近岸带最大波高达3.2 m,该年遇特大洪水,水深超过4 m;1992年7~8月间多次发生过连续12~48 h、平均风速8~12 m/s、瞬时风速25 m/s的大风浪。该区用Aandraa流速仪实测,经常出现的较大流速在20~30 cm/s,最大流速为72 cm/s。

该湖区接纳来自大运河、闽江以及无锡市、常州市和马山区的部分生活污水及工业污水,N、P、COD、BOD等水质指标比太湖湖心敞水区高出1倍左右,如梅梁湖北端1992年COD、NH₄⁺-N、TN、TP的平均值分别为5.57, 2.48, 4.92和0.13 mg/L,而同时期的太湖湖心区则分别为3.32, 0.11, 1.67和0.059 mg/L。

浮游藻类以蓝藻中的微囊藻(*Mycrocystis*)和色球藻(*Chroococcus*)居绝对优势,占藻类总个数的88.5~99.4%、生物量的85.5~99.4%,且两大藻类全年均有出现。由浮游藻类形成的水华,从每年的5月初即有所见,直至11月才基本消退。因夏季盛行东南风,常导致藻类在该区富集,藻类聚积厚度有时达30~100 cm,严重污染着马山自来水厂的水质。

3. 实验过程与方法

本实验分3年进行,于1991年始,至1993年终。

1991年7月上旬,在水厂取水口外侧60 m处湖面,用毛竹结扎成2m×2m的框架10个置于水面,锚定位置,然后将凤眼莲放置于框架内以观察其生长。7月13日晚,持续东南风5 h,平均风速9~10 m/s;继之,翌日晚5级以上东南风又持续5 h以上,其中22:10~23:20风速达15 m/s以上,瞬时风力8~9级,平均波高2.4 m,最大波高3.2 m;毛竹框架遭受严重损坏,凤眼莲在大风浪中随之漂散,此次实验失败。继之,9月11日于水厂取水口北侧50 m处湖面,布设8只2m×2m的拦挡凤眼莲的框式漂浮软结构。该结构能随风浪起伏,其周边的浮力略大于凤眼莲,并可作一定的水平位移。这样可减少框边与凤眼莲在风浪作用下的相对运动,并防止凤眼莲被风吹散漂失。实验表明,此结构在水中的档水阻水作用较小,以这种方式作围栏放养凤眼莲,经受了实验期间6~8级风力的考验,取得了初步成效。

在1991年实验的基础上,于1992年7~8月间继续进行了凤眼莲的放养实验,以观察其生物学特性,测定生产力。种源取自与实验区邻近的啤酒厂氧化塘,两地相距1 km。氧化塘内,凤眼莲长势良好,植株健壮。

1993年的8~10月间分4次,每次3组,作进一步的放养实验和验证,探讨不同放养密度对凤眼莲增长速度的影响。种源取自附近的化工疗养院内塘。

实验观测的每个样方面积均为4 m²(2m×2m),皆沿用软结构的方式加以围栏。

4. 实验结果与分析

(1) 连续3年的实验结果表明,用特殊的软结构方式进行围栏放养,凤眼莲可在太湖的开阔水域并经常有大风浪的环境下正常生长繁殖,1992年7~8月间的平均净生产力为507 g/m²/d,1993年8~10月间的平均净生产力在91.3~819.5 g/m²/d之间(表1,2),1992年和1993年的实验结果表明,太湖敞水区凤眼莲的净生产力与1983年7~8月在苏州葑门塘河道内实验所测定的净生产力(500~700 g/m²/d)相近⁽²⁾。

表1 太湖敞水区1992年7月9日~8月15日凤眼莲生长情况(样方面积4 m²)

Tab 1 Growth state of ECS on open area of Taihu Lake during July 9~Aug. 15, 1992 (sample area: 4 m²)

日期 Date	重量 Weight (kg)	株数 Amount of individuals	平均株重 Average weight of individuals (g)	平均茎叶高(cm) Average length of stem and leaf	茎叶重/根重 Weight of stem and leaf/ weight of root system	覆盖度 Coverage (%)
7月9日投放 Culturing in July, 9	60	400	150	40~45	1/0.28	65
8月15日收获 Harvesting in Aug. 15	135.02	897	150.5	35~40	1/0.87	95

表2 太湖敞水区1993年8~10月凤眼莲放养试验(样方面积: 4 m²)

Tab 2 Experiment on culturing ECS on open area of Taihu Lake during Aug. ~Oct. 1993 (sample area: 4 m²)

样方序号 Sample number	放养时间 Culture date		起始放养株数 Primary amount of the cultured individuals	起始放养 重量(g) Primary weight of the cultured	终止收取株数 Terminal harvested number of the cultured individuals	终止收取 重量(g) Terminal harvested weight	放养期间平均 净生产力 Average net productivity during the culturing period (g/m ² /d)	放养密度 Culturing density (g/m ²)
	起止日期 Beginning and terminating date	天数 Day number						
1	8.1~8.17	16	262	36156	304	64752	446.8	9039
	8.17~9.2	16	266	56658	416	92768	564.2	14165
	9.2~10.24	52	364	77532	464	96512	91.3	1938
2	8.1~8.17	16	225	31050	329	83496	819.5	7762
	8.17~9.2	16	294	62622	352	78496	248.0	15655
	9.2~10.24	52	264	58872	384	79872	110.0	14718
3	8.1~8.17	16	200	27600	327	69651	657.1	6900
	8.17~9.2	16	218	46434	294	65562	298.9	11608
	9.2~10.24	52	196	43708	354	73632	143.9	10927
4	8.1~8.17	16	150	20700	190	40470	308.9	5175
	8.17~9.2	16	95	20235	236	52628	506.1	5059
	9.2~10.24	52	118	26314	316	65728	189.5	6578

(2) 试用 Logistic 方程来讨论凤眼莲生长规律: $\frac{df}{dt} = rf(1-f/K)$ (1)

其中: f 为单位水面上凤眼莲的重量(g/m²), r 为凤眼莲的内禀增长率, K 为凤眼莲生长至最大容量时的密度(g/m²), t 为凤眼莲生长时间(d); 当 $f=K$ 时, $\frac{df}{dt}=0$, 凤眼莲则停止生

长。 r 、 K 通常与植物种类、光照、水温、水质等环境条件有关。若在一定时段(τ)内,环境条件基本不变(或取其平均状态), r 、 K 是与植物密度无关的常数,则由(1)式对时间求导可得:

$$\frac{d^2f}{dt^2} = r \frac{df}{dt} \left(1 - \frac{2f}{K}\right), \text{ 由此, 当水面有最佳密度 } f_m = K/2 \quad (2)$$

时,凤眼莲实际增长率达极大值,即: $G_{\max} = \frac{df}{dt} \Big|_{f=K/2} = rK/4$ (3)

当初始 $t=t_0$ 时的放养密度为 f_0 时, (1) 式的解为:

$$f = \frac{KAf_0}{K + Af_0 - f_0}, \quad A = e^{r\tau}, \quad \tau = t - t_0 \quad (4)$$

若在同一水域同一时段内有 N 组不同初始放养密度的植物生长资料, 则可按最小二乘法原理, 求取最小拟合误差时的 r 、 K 值。即需使:

$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[f_i - \frac{KAf_{0i}}{K + Af_{0i} - f_{0i}} \right]^2$ 达最小值; r 、 K 需满足统计方程 $\frac{\partial \sigma^2}{\partial K} = 0, \frac{\partial \sigma^2}{\partial r} = 0$, 由此可得到:

$$K = \frac{(A-1) \sum_{i=1}^N f_i f_{0i}^3}{A \sum_{i=1}^N f_{0i}^3 - \sum_{i=1}^N f_i f_{0i}^2} \quad (5)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N f_i (K - f_{0i})^2}{\sum_{i=1}^N f_{0i} (K - f_i) (K - f_{0i})} \quad (6)$$

可用迭代法求得(5)、(6)式的联立解。考虑到 K 为 f_i 之极限值, 迭代初始值可取 K_0 为 f_i 中的最大值。由(6)式求出近似值 A_0 , 代入(5)式可求得近似值 K_{01} 。下次迭代可取 $K_1 = K_0 + K_{01} - K_0/2$, 如此反复循环。当连续二次迭代 K 值的差别 $\varepsilon = K_{01} - K_0 \leq \varepsilon_0$ 时停止迭代, 计算过程不难在微机上进行。

由表 2 及参考文献[2]中所列的原始资料可求得相应时段和水质等环境条件下的 r 、 K 值(表 3, 图 1, 2)。

表 3 凤眼莲内禀增长率 r 、最大生长容量时密度 K 、最大实际增长率 G_{\max} 及最大增长率时密度 f_m
Tab 3 Specific growth rate r , maximum growth capacity density K , maximum real growth rate G_{\max} and density with maximum growth rate f_m of ECS

地点 Location	时间 Date	r (d^{-1})	K (kg/m^2)	G_{\max} ($g/m^2/d$)	f_m (kg/m^2)
太湖敞水区 Open area of Taihu Lake	1993. 8. 1~8. 17	0. 0882	28. 092	620	14. 0
	1993. 8. 17~9. 2	0. 0889	23. 352	517	11. 7
	1993. 9. 2~10. 24	0. 0276	24. 972	172	12. 5
苏州葑门塘河道* Fengmentang river, Suzhou	1983. 7. 30~8. 5	0. 1204	23. 924	720	12. 0
	1983. 8. 29~9. 10	0. 1159	21. 836	633	10. 9
	1983. 9. 10~9. 28	0. 1182	21. 960	649	11. 0

* 原始资料取自[2], The original data from reference 2.

由表 3 可知, 太湖敞水区凤眼莲的内禀增长率在 7~9 月份较高, 10 月份则明显下降。而苏州葑门塘内之水体营养盐含量数倍于太湖敞水区, 凤眼莲在夏季的内禀增长率约为 $0.12 d^{-1}$, 较太湖敞水区 ($0.09 d^{-1}$) 高出 25%, 但其极限生长密度 ($22 \sim 24 kg/m^2$) 却较太湖敞水区 ($24 \sim 28 kg/m^2$) 小 $2 \sim 4 kg/m^2$ 。造成两者差异的原因与凤眼莲在太湖敞水区为适应环境特点,

根系得到了较大的发展有关。因此,尽管在太湖敞水区的营养盐含量远小于葑门塘河道内之水体,且湖面又常有大风浪,然而凤眼莲的实际增长率却仍能与河道内所放养之凤眼莲有近似的结果。进而说明,在太湖开敞水域放养凤眼莲也同样可对水质起到较好的净化作用。

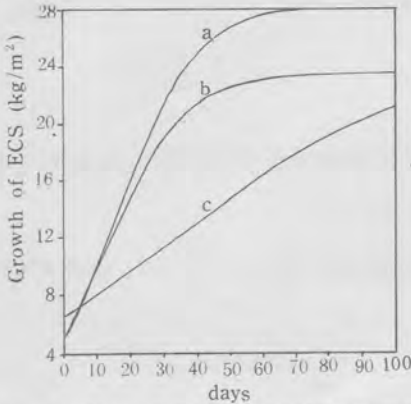


图1 1993年8~10月太湖开敞水域凤眼莲的生长特点

Fig 1 Growth characteristics of ECS on open area of Taihu Lake during Aug. ~Oct. 1993

a—Aug. 1~17; b—Aug. 17~Sep. 2
c—Sep 2~Oct. 24

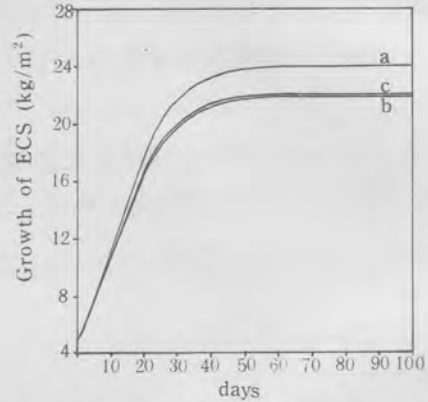


图2 1983年7~9月苏州葑门塘河道凤眼莲的生长特点

Fig 2 Growth characteristics of ECS in the Fengmentang River, Suzhou during Jul. ~Sep. 1983 (the original data from [2])

a—Jul. 30~Aug. 5; b—Aug. 29~Sep. 10;
c—Sep. 19~Sep. 28

(3) 根据对凤眼莲在放养前后的个体生物学特性观察发现,凤眼莲由内塘暂养区移植于大湖面放养后,其植株形态发生了显著变化,最突出的是植株普遍矮化,根系发达,茎叶重与根系重的比值缩小,甚至呈负值,即植株的根系重量超过了茎叶的重量,说明植株在生长过程中,根系的增长率较茎叶的增长率大。如1992年取自啤酒厂氧化塘的凤眼莲,在7月9日放养时平均茎叶高40~50 cm,茎叶重/根重为1/0.28,历经37天的大湖面放养,至8月15日测定时茎叶高为35~40 cm,较放养前矮了5 cm;茎叶重/根重为1/0.87,根系相对重量较前增加了两倍以上。1993年取自化工疗养院内塘的凤眼莲经大湖面放养后也观察到这一现象,是年8月1日放养时平均茎叶高40.6 cm,茎叶重/根重为1/0.4,当放养至8月17日测定时,平均茎叶高18.8 cm,茎叶重/根重为1/1.05,根系相对重量也较放养前增加了两倍以上(见表4)。凤眼莲为须根系植物,上述观测结果提示:如果在受污染的湖泊大水面采用大规模放养凤眼莲的生态工程净化水质,虽可通过其生长过程提取水体中大量的营养盐,但在收获时则必须注意避免因大量的须根被折断而滞留于水体中。否则,将会造成大量的有机物沉积和水体的二次污染。

凤眼莲由内塘移植到大湖面放养后,根系较茎叶增长率大的原因,初步分析认为:暂养区与太湖水体中营养盐含量的差异是其主要方面。尽管太湖已日益富营养化,但水体中营养盐含量仍远较啤酒厂氧化塘和化工疗养院内塘暂养区低(表5),发达的根系有助于在营养盐含量相对较低的太湖水体吸收更多的营养盐,供生长繁殖之需要;其次,经大水面放养后,茎叶高度矮化,根系发达,则重心下移,提高了凤眼莲在大水面生长的稳定性,有利于防风抗浪。茎叶重/根系重发生的变化是对生态环境适应性的一种自身调节。

表4 1993年太湖大水面凤眼莲放养前后个体生物学特点

Tab 4 The individual bio-characteristics of ECS before and after culturing on open area of Taihu Lake in 1993

植株序号 Individual number	放养前测定(8月1日) Observed before culturing (Aug. 1)				放养后测定(8月17日) Observed after culturing (Aug. 17)			
	茎叶高(cm) Length of stem and leaf	茎叶重(g) Weight of stem and leaf	根系长(cm) Length of root system	根系重(g) Weight of root system	茎叶高(cm) Length of stem and leaf	茎叶重(g) Weight of stem and leaf	根系长(cm) Length of root system	根系重(g) Weight of root system
1	34.0	40.0	11.0	15.0	40.0	160.0	52.0	150.0
2	40.5	60.0	20.0	25.0	17.0	60.0	20.0	90.0
3	44.0	90.0	20.0	45.0	19.0	30.0	22.0	35.0
4	42.0	150.0	22.0	40.0	23.0	70.0	25.0	100.0
5	39.5	110.0	18.5	80.0	17.0	30.0	22.0	50.0
6	36.0	90.0	20.0	35.0	15.0	70.0	13.0	40.0
7	42.0	100.0	27.0	30.0	15.0	40.0	20.0	45.0
8	41.5	75.0	22.0	30.0	16.0	50.0	14.0	45.0
9	41.5	120.0	18.0	20.0	10.0	50.0	16.0	45.0
10	45.5	160.0	20.0	75.0	8.0	25.0	23.0	25.0
平均	40.6	99.5	19.85	39.5	18.8	58.5	22.7	61.5
茎叶重/根重	Weight of stem and leaf/weight of root system				1/0.4			

表5 放养凤眼莲之不同水体营养盐比较

Tab 5 Comparison on the nutrients between the different water bodies cultivating ECS (mg/L)

水体 Water bodies	TN	TP	NH ₄ -N	COD	备注 Notes
太湖 Taihu Lake	1.60	0.052	0.30	4.18	放养区 Culture area
啤酒厂氧化塘 Oxidizing pond in a beer plant	49.13	6.62	29.58	117.96	暂养区 Temporal culture area
疗养院内塘 Pond inside a sanatorium	2.43	0.241	0.69	22.89	暂养区 Temporal culture area

(4) 据研究^[2], 凤眼莲每生产100kg鲜重生物量, 可分别吸收氮158g、磷25.8g、钾25.5g、硫19.8g。依据1992、1993年实验所得净生产力推算, 在太湖大水面每放养1公顷凤眼莲, 在7~8月间每天约可增重5~7t, 相应可分别提取水体中的氮约8~11kg、磷1.3~1.8kg、钾1.28~1.78kg、硫1~1.4kg。

(5) 凤眼莲放养区内的藻类远少于无凤眼莲生长的相邻水域。以1992年8月19日的采样分析为例, 前者蓝藻浓度比后者少48%。实验表明, 凤眼莲有明显的阻隔和抑制藻类生长的作用。实验结果与孙文浩等人的研究^[3,4]是一致的。

5. 结 语

在经常遭受大风浪袭击的太湖开阔水域, 采取何种结构的围栏设施是放养凤眼莲能否取得成功的关键。连续3年小规模初步实验表明, 采用漂浮软结构围栏设施放养凤眼莲, 不仅可以正常的生长繁殖, 而且还能获得较高的生产力。

在富营养化的马山水厂水源区, 通过放养凤眼莲来提取水体中营养盐和抑制藻类生长, 可以收到改善水质的效果。但是, 凤眼莲在太湖地区是夏绿型植物, 不能自然越冬, 而富营养化水体的危害则是一个不间断的持续过程。因此, 若在本区采取以凤眼莲为主体的生态工程净化太湖水质, 必然要受到季节限制, 是难以克服的缺陷。再者, 若大规模放养凤眼莲, 每年

深秋季节必须适时捞取,以免导致水体的二次污染。本实验表明,当凤眼莲在大水面放养时,根系的生长率相对大于茎叶的生长率,适时而妥善的捞取就显得格外重要。笔者认为,调查研究并筛选不同季节的速生、高产、耐风浪的水生植物或常绿型水生植物,建设复合型或常绿型水生植被以取代单一的夏绿型水生植被,对治理富营养化湖泊水体,将有广阔的应用前景和重要的理论意义。

参 考 文 献

- 1 濮培民,颜京松,窦鸿身等. 1993: 湖泊科学 5(2): 171~180.
- 2 张雁秋. 1989: 农村生态环境 (1): 40~43.
- 3 孙文浩,俞子文,余叔文. 1989: 环境科学学报 9(2): 188~195.
- 4 孙文浩. 1988: 植物生理学报 14(3): 294~299.
- 5 颜京松. 1986: 农村生态环境 (4): 19~23.
- 6 Boyd C E. 1970: *Economic Botany* 24: 95~103.

(责任编辑: 罗 董)

全国第二届数量分类学学术交流会在武汉召开

受中国植物学会委托,由中国植物学会数量分类学专业委员会主持,武汉大学和中国科学院植物研究所承办的“第二届数量分类学学术交流会”于1994年10月10日至13日在风景秀丽的东湖之滨——武汉大学国际学术交流中心举行。来自全国科研与教学部门的代表约60人参加了会议。

本届会议的主要中心议题有: 1. 数量分类学理论、方法和模型; 2. 数量分类学应用研究; 3. 分支分类学应用研究; 4. 生物信息系统。

本届会议的主要特点是: 1. 既有早期从事数量分类研究的学者,又有近几年涉足该学科的后起之秀,特别是青年专家学者(占75%); 2. 数量分类学、分支分类学和生物信息系统等理论、方法与应用研究方面有较多创新之处,达到了较高的学术水平; 3. 论文内容涉及学科领域较广,包括植物分类、植

物生态及植物地理学以及动物、微生物、环境、农业、林业、生物多样性等,由此说明数量分类、分支分类和生物信息系统技术已成为生物科学研究的一种基本工具和有效手段。

会议期间,还举行了本专业委员会第一次全体委员会议,商讨了今后如何加强数量分类学的科学普及与教育工作,提出了深入开展数量分类学研究并形成我国特色的努力方向,同时讨论了如何利用本学科优势,开展协作研究,推动生物科学发展等普遍关心的热点问题。希望能在本届专业委员会任期内举办全国第三届数量分类学学术交流会(争取主办或合办一次国际性数量分类学学术会议)。会议始终充满了活跃、积极、紧张的气氛,收到了预期的效果。

(魏宏图,周铜水)