

# 太湖藻型富营养化对水生高等植物的影响及植被的恢复<sup>\*</sup>

张圣照 王国祥 濮培民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要** 太湖的五里湖是典型的藻型富营养化湖泊,水质污染严重,水生高等植物消失。在该湖的物理-生态工程围区内外,用盆吊繁殖试验、壮芽直播试验及人工水生植物群落套种栽培试验,研究藻型富营养化湖泊中影响水生高等植物生长、繁殖的主要水环境因子。结果表明,水体透明度是制约沉水植物和浮叶植物幼苗成活及生长的主要因子。在水体透明度较低、水下光照不足时,沉水植物生长受水下光照的影响大于浮叶植物,水下光照严重不足时,沉水植物的幼苗大量死亡。1995~1997年,在围区内成功地组建了包括漂浮植物、浮叶植物及沉水植物的15个不同的水生高等植物群落。恢复和重建的水生高等植物群落能够有效地净化富营养化水体。

**关键词** 藻型富营养化;水生高等植物;生长;植被恢复;净化作用

**The influence of algae-type eutrophication on aquatic higher plants and hydrophytic vegetational reconstruction in Taihu Lake** Zhang Sheng-Zhao, Wang Guo-Xiang, Pu Pei-Min (Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008), *J. Plant Resour. & Environ.* 1998, 7(4): 52~57

In the algae-type eutrophication lake in Taihu Lake, by experiments of pot-culture propagation, strong bud sowing and artificial community interplantings, the main factors that influence the growth and propagation of aquatic higher plants were investigated. The results show that the water transparency is the key control factor of survival and growth for submerged and leave-floating plants. When the intensity of illumination of underwater is insufficient, the growth of submerged plants is inhibited more strongly than that of leave-floating plants, and their seedlings will die under serious insufficiency of illumination. From 1995 to 1997, fifteen species of aquatic vascular plants were introduced and vegetated in the enclosures of physical-ecological engineering. Fifteen communities were reconstructed which include floating, leave-floating and submerged plants. It is available to purify the eutrophication lake water by the reconstructed communities.

**Key words** algae-type eutrophication; aquatic higher plants; growth; vegetation reconstruction; purification

太湖是中国五大淡水湖泊之一,位于中国经济最发达的长江三角洲地区。长期以来,太湖

\* 国家科委和欧洲联盟科技部联合支持项目:中国太湖除藻与净化水质的物理生物工程,合同号 C11<sup>\*</sup>-CT93-0094 (DG 12 HSMU)

张圣照:男,1939年生,高级工程师,长期从事湖泊滩地、水生植物实验研究工作。

收稿日期 1998-08-04

集供水、蓄洪、灌溉、养殖、旅游等多种功能于一体<sup>[1]</sup>,因此,其水环境状况直接影响周边地区(包括上海、苏州、无锡等大中城市)人民生活 and 经济发展。

60年代前,太湖湖区水生高等植物繁茂<sup>[2,3]</sup>,60年代后,水生高等植物开始衰退,到70年代,除东太湖及局部岸边有少量挺水和漂浮植物分布外,大湖区内水生高等植物绝迹,“水下森林”消失,生态系统失去平衡。湖区藻类数量急剧上升,“水华”出现的频率和持续时间逐年增加,“水华”严重时,一些水厂被迫停产或供水质量严重下降,直接威胁到生产、生活及生存<sup>[4]</sup>。恢复湖泊良性生态系统,重现湖水清澈、生物多样复杂的历史景观,是富营养化治理的重要途径和最终目标。

## 1 试验生物和试验方法

### 1.1 试验生物

根据以往的调查结果<sup>[2,3,5]</sup>,选择引种了曾在太湖有分布的15种水生高等植物,其中伊乐藻 [*Elodea nuttallii* (Planch.) ST. John]原产美洲,1986年从日本引进<sup>[6]</sup>,现已归化于东太湖。引种的水生高等植物的主要生态特征见表1。

表1 引种的水生高等植物的主要生态特征

Tab 1 Main ecological characteristics of introduced aquatic higher plants

种名 Species	生长期(月) Growth period (month)	最适生长温度 Optical temperature( )	试验繁殖方法 Propagation method	生态型 Ecological type
凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms	5~11	20~35	腋芽	漂浮
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> (Mart.) Griseb.	3~12	20~30	腋芽	漂浮
水鳖 <i>Hydrocharis dubia</i> (Bl.) Backer	6~11	20~30	匍匐节	漂浮
细果野菱 <i>Trapa maximowiczii</i> Korsh.	4~11	20~30	种子	浮叶
乌菱 <i>T. bicornis</i> Osbeck	4~11	20~30	种子	浮叶
苻菜 <i>Nymphaoides peltata</i> (Gmel.) O. Kuntze	4~11	15~25	根茎	浮叶
金银莲花 <i>N. indica</i> (L.) O. Kuntze	4~11	15~25	根茎	浮叶
微齿眼子菜 <i>Potamogeton maackinus</i> A. Benn.	3~11	20~30	腋芽	沉水
马来眼子菜 <i>P. malaianus</i> Miq.	3~11	20~30	根茎	沉水
菹草 <i>P. crispus</i> Linn.	10~6	10~20	芽苞	沉水
聚草 <i>Myriophyllum spicatum</i> Linn.	3~11	15~30	腋芽	沉水
苦草 <i>Vallisneria spiralis</i> Linn.	3~11	20~30	球茎	沉水
黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i> (Linn. f.) Royle	3~11	20~30	鳞芽	沉水
金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i> Linn.	5~11	20~30	冬芽	沉水
伊乐藻 <i>Elodea nuttallii</i> (Planch.) ST. John	常绿	15~30	腋芽	沉水

### 1.2 试验方法

1.2.1 试验区分隔 在五里湖中桥湖湾内,用防水工业滤布围隔了10个相互分隔的围区,每个围区面积200 m<sup>2</sup> (20 m × 5 m),平均水深1.5 m,围区外湖水透明度仅30~50 cm。

1.2.2 漂浮植物越冬试验 霜冻前,将漂浮植物凤眼莲、喜旱莲子草混种在一起,并用农膜覆盖在植物群落上。在次年清明节后,揭去农膜,观察其越冬成活率及生长情况。

1.2.3 盆栽试验 1997年2~5月,用口径40 cm的塑料盆,在盆内铺上五里湖的湖泥约15 cm厚;选取细果野菱种子、苦草地下球茎、黑藻鳞芽,于每盆中各播种1种植物的种子或营养

繁殖体 20 颗,每种植物播 6 盆。在围区内、外的上、中、下层(水面下 30~40 cm、80~90 cm、110~130 cm)各放置 1 盆。定期观测植物萌发、成活、生长情况及水体透明度、光照强度等指标。

1.2.4 壮芽直播试验 1997 年 4 月 2 日,从试验区内选取乌菱、黑藻、苦草、马来眼子菜 4 种植物的壮芽各 80 颗,裹上湖泥,分 2 组直接播于围区内、外的水体中,并定期观测水体透明度、光照强度及植株发芽成活、生长情况。

1.2.5 水生高等植物人工群落的重建试验 根据各种水生高等植物的生态特性及富营养化水体的主要特点,首先在富营养化水体中引种漂浮植物凤眼莲、喜旱莲子草等,同时引种浮叶植物菱、荇菜等,最后引种沉水植物聚草、伊乐藻、黑藻等,重建多种生态类型水生高等植物共存的人工群落。

## 2 结果与讨论

### 2.1 漂浮植物的覆膜越冬

一些漂浮植物虽然是多年生的,但每年霜冻后,植株的水上部分被冻死,其残体往往又污染水体。用农膜覆盖喜旱莲子草和凤眼莲,冬季农膜下植物群落中的水温保持在 6℃ 以上,植株水上部分不受霜冻影响。覆膜的喜旱莲子草越冬成活率达 95% 以上,枝叶保持绿色,并能缓慢生长;覆膜的凤眼莲越冬成活率达 80%。冬季漂浮植物生长的围区,水体透明度保持在 100 cm 以上,为沉水植物生长提供了保障。

### 2.2 围区内、外水体透明度及水下光照差异

1996 年 4 月至 1998 年 1 月,围区内、外水体透明度测定结果(表 2)表明,有水生高等植物生长的围区内水体透明度达 110 cm,有时围区内水体清澈见底;而围区外无水生高等植物生长的水体其透明度平均仅 40 cm,最大值也只有 50 cm。

盆栽试验期间,围区内、外不同水深处的相对照度测定结果(表 2)表明,围区内、外的水下相对照度自上而下均呈明显的递减趋势。围区内水面下各水层处的相对照度均高于围区外相应水层处的相对照度,围区内底层(平均水深 150 cm)的相对光强明显高于围区外水下 80~90 cm 处的相对照度。这表明在物理-生态工程围区内,由于采取了物理、生物措施,水体透明度得到明显改善,水下光照条件较好。

此外,由于围隔作用,围区内水体处于相对静止状态,其流动性较围区外明显降低。

表 2 盆栽试验各试验点的水体透明度、相对照度(1997 年 2~5 月,太湖五里湖)

Tab 2 Transparency, relative intensity of illumination in pot-culture experiment (Feb. 11 to May 15, 1997, Bay Wulihu of Taihu Lake)

天数 Day	透明度 Transparency (cm)	相对照度 (%) <sup>1)</sup> Relative intensity of illumination (%) <sup>1)</sup>		
		上层 Upper	中层 Middle	下层 Lower
围区内 Inside of enclosure				
32	100	26.4	10.8	4.2
50	100	32.8	11.7	5.2
62	95	33.8	12.1	5.5
76	105	27.4	9.9	4.2
92	110	28.4	10.6	4.7
围区外 Outside of enclosure				
32	30	7.2	0.2	0.1
50	40	22.9	4.6	1.3
62	40	14.5	2.9	0.9
76	40	10.8	1.9	0.6
92	50	16.4	4.3	0.3

<sup>1)</sup> 上层、中层、下层分别为试验盆的悬吊深度 30~40 cm、80~90 cm、110~130 cm。Upper, middle, lower mean depth of hanging pot 30~40 cm, 80~90 cm, 110~130 cm.

### 2.3 水生高等植物的萌发、幼苗成活率及生长

尽管围区内、外及不同水深处的光照强度差异较大,相对照度围区内高于围区外,上层高于下层。但盆栽试验结果显示,细果野菱、苦草和黑藻在围区内、外不同水深处的萌发率均在 70%~90%之间,差异并不明显。这表明水生高等植物的种子或营养繁殖体萌发不受光照影响,繁殖体在适宜的温度条件下,依赖其中贮存的营养物质萌发形成幼苗。

盆栽试验水生植物幼苗成活率测定结果(表 3)表明,细果野菱、苦草和黑藻的存活率自上而下有明显的递减趋势,特别是在围区外下层,沉水植物苦草、黑藻分别在 62 d、76 d 时全部死亡。由于围区外上层的吊盆恰好位于水体透明度的深度,该层吊盆内的植物可获得一定的光照而生长,因此,围区内、外上层吊盆内的植物存活率差异并不显著;但是中层、下层吊盆内的植物存活率围区内明显高于围区外。例外的是上层吊盆内的苦草存活率围区外高于围区内,这是因为苦草习生于有缓慢流动的水体中,而围区外水体流动性高于围区内,有利于苦草的生长,同时围区外上层的光照基本可满足水生高等植物的生长需要。

表 3 盆栽试验水生植物幼苗成活率(%) (1997 年 2~5 月,太湖五里湖)

Tab 3 Seedling survival ratio of hydrophytes in pot-culture experiment (Feb. 11 to May 15, 1997, Bay Wuliu of Taihu Lake)

位置 Site	天数 Day	细果野菱 <sup>1)</sup>			苦草 <sup>1)</sup>			黑藻 <sup>1)</sup>		
		<i>Trapa maximowiczii</i>			<i>Vallisneria spiralis</i>			<i>Hydrilla verticillata</i>		
		上层 Upper	中层 Middle	下层 Lower	上层 Upper	中层 Middle	下层 Lower	上层 Upper	中层 Middle	下层 Lower
围区内 Inside of enclosure	32	95	90	95	80	75	65	95	90	95
	50	95	90	95	75	65	30	95	90	60
	62	95	95	80	60	50	10	90	80	40
	76	90	95	70	50	30	0	90	70	10
	92	90	95	60	40	20	0	85	70	5
围区外 Outside of enclosure	32	90	95	85	90	85	75	95	90	85
	50	90	95	85	90	20	10	90	45	10
	62	95	85	70	80	10	0	85	30	5
	76	90	85	50	80	5	0	80	30	0
	92	90	85	50	80	5	0	75	20	0

<sup>1)</sup> 上层、中层、下层分别为试验盆的悬吊深度 30~40 cm、80~90 cm、110~130 cm。Upper, middle, lower mean depth of hanging pot 30~40 cm, 80~90 cm, 110~130 cm.

吊盆试验植株分枝率测定结果表明,在水面下 30~40 cm 处,围区内、外细果野菱、苦草和黑藻的分枝率无显著性差异( $P>0.05$ );但是在水面下 80~90 cm 处,围区内有 5%~30% 植株继续分枝,而围区外无一植株继续分枝。在水面下 110~130 cm 处,围区内、外均无分枝。这表明水生高等植物的分枝受光照的影响明显。

盆栽试验 92 d 时的生物量测定结果表明,细果野菱、苦草和黑藻的生物量(kg/盆)在围区外分别为 3.82、0.48 和 0.90,而围区内则为 3.42、0.16 和 0.68,围区外高于围区内,这主要是因为围区内外的 30~40 cm 处,虽然光照强度有明显差异,但基本上可满足水生高等植物生长需要,而围区外的营养盐浓度明显高于围区内,因此围区外的植物生长快于围区内。在中层,围区外的水下相对照度平均仅 2.78%,围区内达 11.02%,围区内 3 种植物的生物量(kg/盆)分别为 3.61、0.80 和 0.56,而围区外则为 2.91、0.30 和 0.24,围区内明显高于围区外。在下层,围区外的相对照度平均仅 0.64%,围区内也只有 4.70%,因此,细果野菱的生物量围区

内(2.60 kg/盆)明显高于围区外(1.80 kg/盆);黑藻在围区内有少量生长(0.2 kg/盆),围区外全死亡;苦草在围区内、外的底层均死亡。在围区外,3种植物生物量均表现出自上而下递减的垂直梯度,这充分说明光照对水生高等植物生长有着极其重要的影响。相比较而言,浮叶植物(如细果野菱)生长对光的依赖性弱于沉水植物(如苦草、黑藻),沉水植物中,黑藻生长对光的依赖性略弱于苦草;在光照不足时,沉水植物生长首先受到限制甚至停止生长并大量死亡;而浮叶植物能够缓慢生长,当浮叶植物生长到达水面后,水下光照对它便失去制约作用。

壮芽直播试验结果(表4)表明,在围区内,直播繁殖第30 d时,细果野菱生长到水面(水深240 cm);第43 d,黑藻和马来眼子菜生长到达水面;第60 d,苦草生长到达水面。而在围区外,除细果野菱能够生长外,其余3种植物均死亡;围区外细果野菱的存活率、植株高度、生物量均明显低于围区内。这进一步说明沉水植物生长受水下光照的影响强于浮叶植物。

表4 壮芽直播试验结果(1997年4月2日至6月1日,太湖五里湖)<sup>1)</sup>

Tab 4 The results of direct sowing of strong bud (April 2 to June 1, 1997, Bay Wulihu of Taihu Lake)

观测指标 Items	天数 Day	细果野菱 <i>Trapa maximowiczii</i>		黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i>		马来眼子菜 <i>Potamogeton malianus</i>		苦草 <i>Vallisneria spiralis</i>	
		IE	OE	IE	OE	IE	OE	IE	OE
		存活率 Survival ratio (%)	60	80.0	5.0	20.0	0.0	30.0	0.0
植株高 Height (cm)	0	1.5	2.5	5.0	4.5	3.0	2.5	4.0	4.0
	60	240.0	220.0	130.0	0.0	180.0	0.0	110.0	0.0
总生物量 Total biomass (kg/80 robust seedling)	60	6.4	4.2	0.4	0.0	1.1	0.0	0.1	0.0

<sup>1)</sup> IE: 围区内 Inside of enclosure; OE: 围区外 Outside of enclosure

## 2.4 水生高等植物人工群落的恢复及其净化作用

依据水生高等植物的生态特性及试验区湖水污染特点,在单种试验的基础上,1995~1997年,在太湖五里湖湖湾的物理-生态工程各围区内,先后引种、移栽了漂浮、浮叶、沉水植物15种,建立了15类人工水生高等植物群落(表5)。试验初期,湖水透明度较低时,首先用漂浮植物如喜旱莲子草、凤眼莲等作为先锋种,快速提高水体透明度,随后逐步恢复浮叶植物及沉水植物。试验所建立的植物群落大部分能够随着季节变化实现自我演替,群落稳定性较高,而且,有效地净化了围区内的重富营养化水体。1996~1997年围区内外水体主要营养盐指标及叶绿素a测定结果表明,有水生高等植物生长的围区内水体总氮(TN)、总磷(TP)、氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)及叶绿素a分别为1.662 mg/L, 0.074 mg/L, 0.388 mg/L和33.92 mg/m<sup>3</sup>,比围区外无水生高等植物生长的水域分别降低74.9%、50.9%、89.9%和47.8%。

## 3 结 论

(1) 光照条件对水生高等植物繁殖体的萌发无显著影响,但对水生高等植物的存活率和生长有重要影响,藻型富营养化湖泊较低的透明度是制约沉水植物恢复的关键因子。在水体透明度较低、水下光照不足时,沉水植物生长受到限制甚至停止生长并大量死亡。

(2) 在藻型富营养化湖泊中,采用物理-生态工程技术,可提高水体透明度和水下光照强度,在局部恢复湖泊原有的水生高等植物。在湖水透明度较低的湖泊中,首先用漂浮植物如喜

旱莲子草、凤眼莲等作为先锋种,快速提高水体透明度,为进一步恢复沉水植物和建立人工植物群落提供保障。

(3) 本试验建立的 15 类人工水生高等植物群落不仅能够有效地净化富营养化湖水,而且可实现湖泊生态系统的良性循环,提高湖泊的自净功能。

表 5 物理-生态工程内 15 类人工水生高等植物群落的主要特征(1995~1998,太湖五里湖)

Tab 5 The main characteristics of 15 hydrophytes communities of aquatic higher plants in physical-ecological engineering (1995~1998, Bay Wulihu of Taihu Lake)

群落名称 <sup>1)</sup> Name of communities	生长期 Growth period	盖度 Coverage (%)	生物量 Biomass (kg/m <sup>3</sup> )	伴生种 <sup>1)</sup> Accompanying species	透明度 Transparency (cm)
凤眼莲群落 Ec	05~11(1996~1997)	95	10.50		200
喜旱莲子草群落 Ap	1996-11~1997-12	75~95	13.20	Ms, Hv, Cd, En	210
水鳖群落 Hd	05~11(1997)	95	8.37		150
细果野菱群落 Tm	1995-04~1997-12	85~100	10.20	Tb, Cd, En	140~230
乌菱群落 Tb	1996-05~1997-12	95	12.66	Tm, Ms, Cd, En	130~210
苻菜群落 Np	1996-11~1998-02	65~80	1.20	Ms, Hv, En	140
伊乐藻群落 En	09-次年 06(1995~1997)	85	7.82	Ms, Hv, Cd	130~160
菹草群落 Pc	10-次年 06(1995~1997)	60	5.24	Tm, Cd, En	130
黑藻群落 Hv	1996-11~1997-12	50	4.82	Hd, Ni, Cd	130~210
聚草群落 Ms	1996-11~1997-07	55	5.10	Tm, Cd	130~160
金鱼藻群落 Cd	1995-12~1997-12	45	3.96	Hv, Ed	60
细果野菱-伊乐藻群落 Tm-En	1995-11~1996-11	90	17.44	Cd, Hv, Pc	140~210
细果野菱-聚草群落 Tm-Ms	1996-11~1997-07	95	9.74	Hd, Cd, En	140~200
苻菜-伊乐藻群落 Np-En	1996-11~1997-12	100	5.56		140~165
细果野菱-伊乐藻-菹草群落 Tm-En-Pc	1995-11~1996-08	75	12.50		140~200

<sup>1)</sup> Ec: 凤眼莲 *Eichhornia crassipes*; Ap: 喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides*; Hd: 水鳖 *Hydrocharis dubia*; Tm: 细果野菱 *Trapa maximowiczii*; Tb: 乌菱 *Trapa bicornis*; Np: 苻菜 *Nymphaea peltata*; En: 伊乐藻 *Elodea nuttallii*; Pc: 菹草 *Potamogeton crispus*; Hv: 黑藻 *Hydrilla verticillata*; Ms: 聚草 *Myriophyllum spicatum*; Cd: 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*; Ni: 金银莲花 *Nymphaea indica*

## 参 考 文 献

- 1 窦鸿身. 太湖流域围湖利用的动态变化及其对环境的影响. 环境科学学报, 1988, 8(1): 1~9.
- 2 伍宪文. 五里湖 1951 年湖泊调查. 水生生物学集刊, 1962, (1): 63~113.
- 3 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告. 北京: 科学出版社, 1965.
- 4 濮培民等实验小组. 改善太湖马山水厂水源区水质的物理-生态工程实验研究. 湖泊科学, 1993, 5(2): 171~180.
- 5 张圣照. 东太湖植被及其环境条件. 见: 江苏省海洋湖沼学会编. 海洋湖沼研究文集. 南京: 江苏科学技术出版社, 1986. 84~87.
- 6 杨清心, 李文朝. 伊乐藻在东太湖的引种. 见: 中国科学院南京地理与湖泊研究所编. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 第 6 号. 北京: 科学出版社, 1989. 84~91.

(责任编辑: 宗世贤)