

富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究*

李文朝

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

文 摘 1992~1993 年在富营养湖泊五里湖中开展了常绿型人工水生植被组建实验, 在面积为 2000m² 的半封闭式围隔实验区中, 选用耐寒植物伊乐藻和喜温植物菱及风眼莲, 组建成常绿型人工水生植被。这种常绿型人工水生植被不仅使实验区内常年保持较好的水质, 而且对外来污染冲击有很强的缓冲能力。它可用于水源保护、局部性水质控制、污水净化生态工程、小型富营养水体的生态恢复等。如能解决耐寒型沉水植物伊乐藻与喜温型沉水植物种类间的衔接过渡, 这种常绿型人工水生植被技术还可望用于富营养水体中天然水生植被的恢复。

关键词 常绿植被, 富营养湖泊, 五里湖, 伊乐藻。

风眼莲(*Eichhonia crassipes*)等速生型水生植物在水质净化方面有杰出的功效, 已经被广泛地应用于水体生态工程^(1,2)。但由于风眼莲不耐寒, 在纬度高于 30℃ 的地区难以越冬, 使得以风眼莲为功能主体的水体生态工程无法在冬季运转, 极大地限制了其发展^(2,3)。为解决这一问题, 欧洲一些国家不惜花费巨资建立大面积人工气候室来维持风眼莲的周年生长, 虽然很成功, 但费用太高, 未能普遍推广应用⁽³⁾。本项研究利用太湖地区冬季稳定的光、温条件种植伊乐藻(*Elodea Nuttallii*)、菹草(*Potamogeton crispus*)等耐寒型沉水植物^(4,5), 与菱(*Trapa spp.*)、风眼莲等夏季净化能力较强的喜温植物⁽⁶⁾组成常绿型水生植被, 形成了生长期和净化功能的季节性交替互补。实验结果证明, 这种常绿型人工水生植被在冬季和夏季都具有较强的水质净化能力和抑藻能力。实验在超富营养的五里湖进行, 试图在夏季采用喜温沉水植物, 但尚未取得成功。

1 研究方法

1.1 实验区的建立

实验区选在五里湖东北部中桥水厂取水站附近(图 1)。用隔水布制作成 2000m² 半封闭式正方形无底围隔, 围隔墙布下沿埋入湖底淤泥中, 上沿用棒状浮子浮出水面, 在围隔的三个角

偶处各有一个 1m 宽的网窗, 当水位变化时湖水可经由这些网窗流入或流出围隔, 以保持围隔内外水位一致。

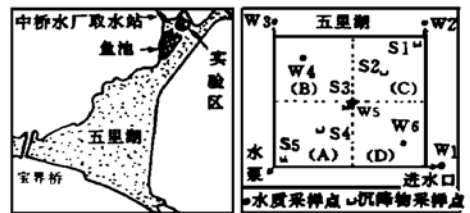


图 1 实验围隔区及其在五里湖的位置

1.2 植被的组建

1992 年 6 月 12~16 日, 自五里湖东南方河道中采集长 2m 左右的野生菱苗 3200kg, 栽植在实验区中。每 3~5 颗分为一束, 在菱茎基部打结。在竹片头部做一缺口, 插住菱茎上的结, 轻轻插入湖底淤泥中。栽植完毕时水面上菱叶覆盖度达到 20% 左右, 一个月后覆盖度达 100%。7 月 20 日后由于菱跳甲为害严重, 逐渐用风眼莲等漂浮植物取代菱。到 8 月 20 时, 菱被全部去除。

8 月 25 日, 移去漂浮植物 5000kg, 空出实验区 1/4 的面积(A), 准备种植沉水植物。8 月 30 日, 从东太湖采集伊乐藻枝尖 100kg, 每 3~5 一

收稿日期: 1995-12-01

* 中国科学院“八五”课题

束,均匀插植在实验区(A)中。同时将采集到的 1.6kg 菹草芽苞撒播在实验区(A)中。9月20日再次插植伊乐藻枝尖 125kg。10月9日移去漂浮植物 7500kg,空出实验区 1/4 的面积(B),撒播金鱼藻枝尖 245kg。11月22日移去全部漂浮植物 21000kg。1993年3月1日,从(A)中收割伊乐藻枝尖 1500kg,将其插植在实验区内其它面积上。4月15日从(A)中收割菹草 200kg。

实验期间对实验区内的水生植物生长状况进行定期观测和采样分析。沉水植物用自制的 0.25m^2 网夹式采样器采集,浮叶植物用 1m^2 样方采集。观测项目包括生物量、高度、盖度、生长发育状况等。

1.3 实验区内外水质的检测

在实验区内沿对角线方向设 3 个固定的水质采样点,在围隔的三个进水口外各设一个固定的水质采样点(W1~W6),自 1992 年 6 月至 1993 年 5 月进行定期水质检测。项目包括 TN、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、TP、 PO_4^{3-} 、COD、Chl. a,同时对水深、透明度、消光系数等物理参数进行测定。水质分析均采用有关标准方法⁽⁷⁾。

1.4 水质净化动态模拟实验

分别于 1992 年 7 月 31 日至 8 月 9 日和 1993 年 2 月 18 日至 27 日在实验区内开展了水质净化动态模拟实验,旨检验在夏季和冬季极端温度条件下实验区内水生植被对外来污染的承受能力和对流经实验区湖水的净化能力。在实验围隔没有网窗的角偶处安装水泵,以恒定的速度向外排水,围隔外的湖水经由其它三个角偶处的网窗进入围隔,湖水在围隔内滞留 2.8 天。实验期间,每隔 3~4 天对进水口、围隔中心及出水口的水质进行采样检测。

1993 年 2 月动态模拟实验期间,从进水口至出水口设置 5 个质地为普通塑料的沉淀接收盆(S1~S5),其口径 42cm,水平放置于湖底。实验结束后,洗出接收盆内的沉降物,经初步沉淀分离除去过多水分。量取糊状沉降物的体积,充分搅拌均匀后取样测定各类叶绿素的含量⁽⁸⁾。将其余沉降物风干,测定总烘干重和 TN、TP、TOC 含量。同时采集植物样品,洗脱其表面上的

附着物,与沉降物一同进行分析。

2 结果与讨论

2.1 植被发育状况

菱的耐污性较强,完全适应五里湖的水质和底质条件,1992 年 6 月栽种后的一个月就覆盖了全部水面,最高生物量达 $7\text{kg}/\text{m}^2$ 以上。凤眼莲的空间竞争能力远在菱之上,它进入实验区后迅速取代了菱,平均生物量超过了 $10\text{kg}/\text{m}^2$ 。伊乐藻在改造后的生态环境中生长较快,到 10 月底凤眼莲停止生长时其总现存量已达 1000kg,1993 年 2 月群体数量接近最高值,平均生物量达 $9.7\text{kg}/\text{m}^2$ 。菹草的生长期与伊乐藻基本相近,在实验区内分布较为稀疏,最高群落密度不到 $3\text{kg}/\text{m}^2$ 。这两种沉水植物的生长一直持续到 5 月底,当水温超过 25°C 时,虽然个体仍在生长,但群体增长已经停止。由于以上两类植物的交替生长,实验区内的水生植物群落持续了一个周年,基本实现了常绿型水生植被(表 1)。

2.2 水质保护效果

实验区内的水生植被表现出了卓越的水质保护能力。与实验区外相比,实验区内湖水透明度提高了 2 倍以上,达到或接近于湖水深度(图 2);消光物质的含量减少了 80% 左右,接近于用该湖水生产的自来水;各态氮、磷含量明显降低,其中 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的含量降低了 50% 左右(图 3, 4);浮游藻类受到了强烈的抑制,在菱群落充分发育之后至沉水植物群落开始衰败之前的 9 个月内,实验区湖水中的 chl. a 含量仅是实验区外的 20%~50%(图 5)。

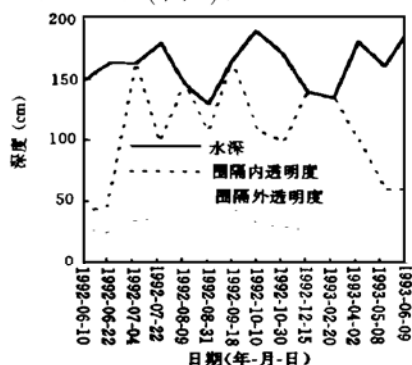


图 2 水深及实验区内外湖水透明度

表 1 实验区内植被发育状况统计(1992 年 6 月 10 日至 1993 年 6 月 9 日)

起始天数(d)	植物名称	分布面积(m ²)	覆盖度(%)	群落密度(g/m ²)	总现存量(kg)
6(6月16日)	菱	2000	20	1600	3200
12(6月22日)	菱	2000	30	2100	4200
24(7月4日)	菱	2000	90	4650	9300
40(7月20日)	菱	2000	100	7450	14900
60(8月9日)	菱	1300	100	7500	9750
	凤眼莲	700	100	9014	6310
82(8月31日)	凤眼莲	1500	100	11460	17190
	伊乐藻(A)	500	1	200	100
100(9月8日)	凤眼莲	1500	100	15890	23850
122(10月10日)	伊乐藻(A)	500	5	640	320
	凤眼莲	1000	100	16530	24795
188(12月15日)	伊乐藻(A)	500	20	1035	517
	伊乐藻(A)	500	80	5360	2680
	菹草(B)	500	5	130	65
255(2月20日)	伊乐藻(A)	500	100	9720	4860
	菹草(B)	500	25	580	290
	菹草(C, D)	1000	10	260	260
294(4月2日)	伊乐藻(A)	500	70	6250	3260
	菹草(B)	500	25	630	315
	菹草(C, D)	1000	15	450	450
330(5月8日)	伊乐藻(A)	500	70	4800	2400
	菹草(B)	500	25	750	375
	菹草(C, D)	1000	15	510	510

注: 1992 年 6 月 10 日建立实验围隔, 1993 年 6 月 9 日全部去除水生植物, 结束实验

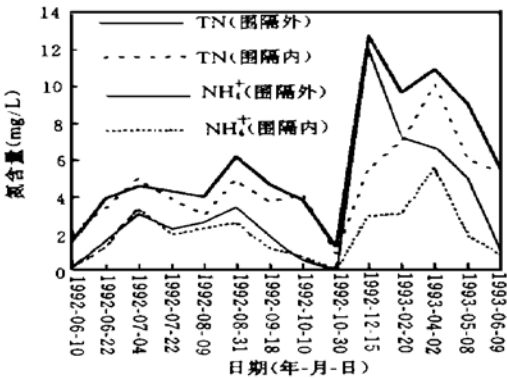


图 3 实验区内、外湖水中的氮含量

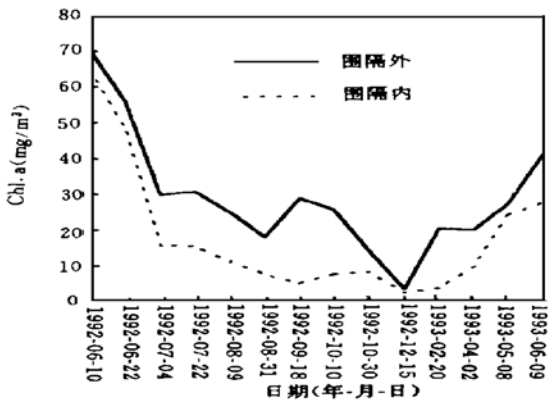


图 5 实验区内、外湖水中 Chl. a 含量

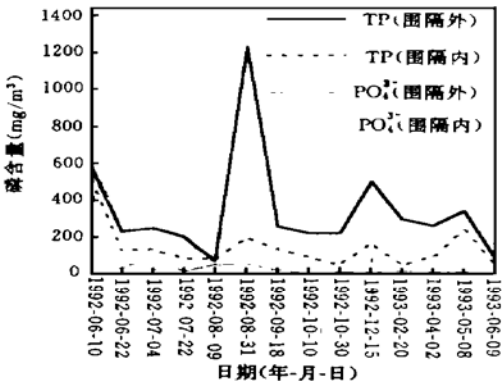


图 4 实验区内、外湖水中的磷含量

2.3 对外来污染的承受能力及净化效果

不论是夏季还是冬季, 这一拥有常绿型水生植被的实验生态系统对流经实验区的富营养湖水均能实施有效的净化。夏季实验期间水温 30 ~ 35℃, 系统对 TP 和 chl. a 的去除率高达 90%, 对 TN 及消光物质的去除率超过了 50%, 对 COD 也有较好的去除效果(表 2)。在冬季, 虽然实验期间水温低于 10℃, 系统对 TP、chl. a 及消光物质的去除率仍高于 60%, 对 TN 和 COD 也有较好的净化效果。在冬季水质净化动态模拟实

验中, 沉降物及植物表面附着物分析结果见表 3。总固体的平均日沉降量 $10.8\text{g}/\text{m}^2$, 沉降物中 TN、TP、TOC 和 chl. a 平均含量分别为 0.419%、0.364%、8.75% 和 0.023%。伊乐藻茎叶纤细, 比表面积较大, 实验结束时单位鲜重伊乐藻上的固体干物质附着量达 $28.71\text{g}/\text{kg}$, 单位湖面内的附着量达 $279\text{g}/\text{m}^2$, 附着物中 TN、TP、TOC 和 chl. a 平均含量分别为 0.647%、0.311%、15.4% 和 0.098%。这说明, 吸附和沉降是该系统水质净化机制的重要方面。

表 2 夏季和冬季 2000m² 围隔实验生态系统水质净化动态模拟实验结果(换水周期 28d)

项目	夏季(1992 年 7~ 8 月)					冬季(1993 年 2 月)				
	日/ 月	进水	围隔中	出水	去除率(%)	日/ 月	进水	围隔中	出水	去除率(%)
COD (mg/ L)	31/ 7	18. 5	18. 5	12. 7	31. 4	20/ 2	15. 5	12. 4	11. 6	25. 2
	3/ 8	16. 0	16. 0	9. 6	40. 0	24/ 2	17. 7	13. 3	13. 1	26. 0
	9/ 8	13. 1	13. 1	4. 0	46. 6	27/ 2	15. 6	14. 2	13. 1	16. 0
	平均	15. 9	15. 9	9. 8	38. 4	平均	16. 3	13. 3	12. 6	22. 4
TN (mg/ L)	31/ 7	2. 38	1. 74	0. 71	70. 2	20/ 2	9. 74	6. 84	6. 91	29. 1
	3/ 8	3. 34	2. 50	1. 66	50. 3	24/ 2	13. 20	10. 65	9. 89	25. 1
	9/ 8	3. 84	3. 04	2. 53	34. 1	27/ 2	11. 50	11. 14	10. 23	11. 0
	平均	3. 18	2. 42	1. 63	51. 8	平均	11. 48	9. 54	9. 01	21. 7
TP (mg/ m ³)	31/ 7	200	68	14	93. 0	20/ 2	405	247	151	62. 7
	3/ 8	168	73	14	91. 7	24/ 2	507	242	181	64. 3
	9/ 8	82	41	9	89. 0	27/ 2	460	205	167	63. 7
	平均	150	61	12	92. 0	平均	457	231	166	63. 6
消光物质 OD ₄₀₀ (m ^{- 1})	31/ 7	4. 58	3. 54	2. 46	46. 3	20/ 2	7. 85	2. 26	2. 06	72. 8
	3/ 8	4. 56	2. 48	2. 36	48. 2	24/ 2	10. 30	4. 08	3. 54	65. 6
	9/ 8	4. 54	2. 24	1. 32	70. 9	27/ 2	8. 34	3. 48	3. 82	54. 2
	平均	4. 56	2. 75	2. 05	55. 0	平均	8. 74	3. 27	3. 14	64. 2
Chl. a (mg/ m ³)	9/ 8	23. 4	11. 0	2. 4	89. 7	20/ 2	27. 9	3. 4	3. 6	87. 1
						24/ 2	11. 4	6. 9	5. 8	49. 1
						27/ 2	69. 8	16. 6	9. 0	87. 1
						平均	36. 4	9. 0	6. 1	74. 4

表 3 沉降物及附着物分析结果

项 目	沉 1	沉 2	沉 3	沉 4	沉 5	附着物
总干重(g)	7. 00	27. 31	6. 32	4. 27	7. 52	28. 71 [*]
含 chl. a(‰)	0. 200	0. 131	0. 429	0. 667	0. 884	0. 980
含 chl. b(‰)	0. 071	0. 048	0. 231	0. 389	0. 594	0. 793
含 chl. (‰)	0. 256	0. 177	0. 699	1. 157	1. 822	2. 250
含 TN(%)	0. 316	0. 310	0. 428	0. 546	0. 496	0. 647
含 TP(%)	0. 355	0. 346	0. 361	0. 331	0. 428	0. 311
含 TOC(%)	6. 33	5. 07	8. 34	11. 67	12. 35	15. 40
每日沉降量/ m ³ 湖面 ^{**}						
总固体(g)	7. 22	28. 15	6. 52	4. 40	7. 75	279
chl. a(mg)	1. 40	3. 69	2. 80	2. 93	6. 85	0. 273
TN(mg)	22. 82	87. 27	27. 91	24. 02	38. 44	1. 805
TP(mg)	25. 63	97. 40	23. 54	14. 56	33. 17	0. 867
TOC(mg)	457. 0	1427. 2	543. 8	513. 5	957. 1	42. 966

* 吸附量(g 干重/ kg 鲜重伊乐藻) ** 附着量 g/ m² 湖面

3 讨论

3.1 实验结果证明, 在重富营养的五里湖中, 利用大型无底围隔控制边界条件, 以喜温的浮叶植物菱及漂浮植物凤眼莲与耐寒型沉水植物伊乐藻等组建常绿型人工水生植被是成功的。植物种

群间在生长期上密切衔接, 在凤眼莲与伊乐藻的生长过渡期采取了空间分布上的镶嵌, 保证了水生植被的连续性。

3.2 除了营养吸收之外, 这些水生植物的水质净化功能还表现在对浮游藻类的竞争抑制以及对湖水中污染物的吸附净化和促进沉降等方面。

3.3 所选用的几种水生植物都有较高的生长率和水质保护功能, 尤其是耐寒植物伊乐藻在冬季具有较强的净化能力, 保证了所建常绿型水生植被较强的环境生态功能及其周年连续性, 这种植被可用于局部性水质保护等目的。

3.4 水质净化动态模拟实验结果表明, 该围隔实验生态系统对过往水质有较强的周年性净化能力, 尤其对 TP、chl. a 及消光物质有很高的去除率, 可以用于水源水质保护及污水净化生态工程, 可保证其周年连续运转。

3.5 本项技术可用于小型富营养水体生态恢复中的水质控制和营养盐输出。如能实现耐寒型沉水植物伊乐藻与其它喜温性沉水植物种类在生

长期上的衔接与更替, 本项技术还可望用于天然水生植被重建生态工程, 这需要进一步的探索。

参考文献

- 1 Mitsch W J, et al. Ecological Engineering, 1993, 2: 177~ 191
- 2 Jingsong Yan and Ma Shijun. Ecological Engineering for Wastewater Treatment. New York: Bok Skogen Publishers, 1991, 80~ 94
- 3 Gusterstam B. Ecological Engineering for Wastewter Treatment. New Yoke: Bok Skogen Publishers, 1991, 38~ 54
- 4 孙顺才等. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993, 90~ 99
- 5 杨清心. 伊乐藻在东太湖的引种. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 1989, 6: 84~ 92

- 6 Tchobanglous G. Ecological Engineering for Wastewater Treatment. New Yoke: Bok Skogen Publishers, 1991, 110 ~ 120
- 7 美国公共卫生协会等编. 宋仁元等译. 水和废水标准检验法 (第 15 版) 北京: 中国建筑工业出版社, 1985
- 8 Coombs J, et al. Techniques in bioproductivity and photosynthesis (2nd edition). Pergamon Press, 1985

作者简介

李文朝 男, 1957 年 1 月生。现任中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊生物生态学研究室副主任, 副研究员。“85”以来主要从事“湖泊生态渔业”和“浅水富营养湖泊水生植被恢复”等重大研究课题。发表论文 30 余篇。

Construction and purification efficiency test of an ever-green aquatic vegetation in an eutrophic lake

Li Wenchao

Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008

Abstract— Experimental studies were carried out on constructing a kind of ever-green aquatic vegetation in the littoral zone of an eutrophic lake, Wali Lake, from June, 1992 to June, 1993. The vegetation was constructed in a no-bottom enclosure with surface area of 2000m². Cold-tolerant plant *Elodea Nuttallii* and thermophilous plant *Eichhonia crassipes* and *Trapa* spp. were used as the dominant. The vegetation not only kept better water quality in the enclosure through the experimental period, but also had strong buffering capacity to the external pollution. It may be used to drinking water source protection, regional water quality conservation, ecological engineering for wastewater purification, and ecological restoration of small eutrophic lakes. If the succession from *Elodea Nuttallii* to other submerged thermophilous plant will be possible, this technique might be used for constructing naturally-regeneratable aquatic vegetation.

Key words: ever-green vegetation, eutrophic lakes, Wuli Lake, *Elodea Nuttallii*.