

# 冬季富营养化湖泊中 水生植物的恢复及净化作用\*

成小英 王国祥 濮培民 张圣照 陈宝君

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**提 要** 秋末冬初大多数水生植物处于衰亡期,在透明度较低的富营养化湖泊中引种和恢复水生植物往往十分困难.借助物理生态工程技术,秋末冬初在重富营养化湖泊中新建的 1000 m<sup>2</sup> 围隔内,引种漂浮植物和沉水植物,利用群落间的相互作用及人工干预,若干种水生高等植物不仅能够引种存活,而且能够快速提高水体透明度、改善水质.引种水生高等植物 3 周后,有水生高等植物的围区内水体透明度提高一倍,并长期保持在较高水平.6 周后,有植物围区内水体 TN 浓度比对照围区及开敞水域分别降低 43.7% 和 59.4%,TP 分别降低 50.3% 和 57.0%;6 个月后,TN 分别降低 61.6% 和 79.7%,TP 有植物围区较开敞水体降低 72.9%.

**关键词** 富营养化 水生高等植物 恢复 净化 水质 湖泊

**分类号** Q948.8

湖泊是人类十分重要的水资源,然而湖泊的富营养化,特别是以生态系统结构退化、功能丧失为标志的富营养化已成为一个全球性的重大问题<sup>[1]</sup>.目前,退化生态系统的生态恢复是生态学参与生态系统管理和解决实际问题能力的重要体现<sup>[3]</sup>,生态工程则是生态恢复的最佳工具.特别是在大范围的环境污染难以得到有效控制的情况下,借助物理工程的物理生态工程(PEEN)是修复受损伤的生态系统结构、恢复生态系统功能的一项非传统的生态技术,具有广泛的应用前景,并已在生物生长季节控制湖泊富营养化取得了成功<sup>[1-3]</sup>.

以往的研究认为沉水植物的恢复应从冬季开始<sup>[4]</sup>,但在水体透明度低的富营养化湖泊内直接引种沉水植物往往比较困难.特别是秋末冬初,大多数水生高等植物处于衰亡期,因此,冬季水生高等植物的恢复及其净化作用的研究尚不多<sup>[5,6]</sup>.2000 年 10 月起,在南京莫愁湖新建成的物理生态工程围区内,引种多种水生高等植物,观察水生高等植物种群生长发育过程、测定富营养化湖水水质主要指标的变化,旨在探讨秋冬季节在富营养化湖泊内恢复水生高等植物的过程,建立合适的冬季演替系列,净化富营养化湖水,恢复重建健康的湖泊生态系统.

## 1 实验区概况及实验方法

### 1.1 实验水体

莫愁湖位于南京市西南部,水面面积为 0.3km<sup>2</sup>,略呈三角形.莫愁湖无入湖河渠,出湖口位于湖泊东部,通往秦淮河.监测结果表明,莫愁湖自 1989 年弃藕养鱼后,水体透明度迅速下

\* 收稿日期 2001-06-13,收到修改稿日期 2001-08-20. 成小英,女,1977 年生,硕士.

降,藻类生物量急剧上升,富营养化程度逐年加剧.目前,莫愁湖水体已处于超富营养状态.实验区位于莫愁湖东北隅,大致呈西北-东南走向,离岸约 10m,地势平坦,水深 1.3m 左右.

## 1.2 围隔实验区

用不透水材料、浮体及重压管制成的软隔离带,在莫愁湖东北隅围成 5000m<sup>2</sup> 的试验区(100m×50m),整个围区与大湖区完全隔离.并用同样的材料按图 1 所示将整个试验区分成 5 个 1000m<sup>2</sup> 的相互独立的围区(A、B、C、D、E),其中围区 A 又分成 33 个相互独立小围区(图 1).

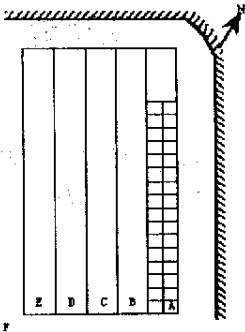


图 1 莫愁湖物理生态工程实验区位置

Fig.1 The sketch of Mochou Lake PEEN experimental area

## 1.3 引种的主要水生高等植物

从 2000 年 10 月初开始,在围区 C 内先后引种凤眼莲(*Eichhornia crassipes* Solms),喜旱莲子草[*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb],伊乐藻[*Elodea nuttallii* (Planch) John],菹草(*Potamogeton crispus* Linn),微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus* A. Benn.)等水生高等植物,对照围区 E 内则不采取任何措施.

凤眼莲为多年生漂浮植物,生长期春末、夏、秋三季.喜旱莲子草为宿根性多年生水陆两栖植物,春、夏、秋三季生长.伊乐藻能忍受 0℃ 甚至冰点以下的寒冷,菹草也较为耐寒,冬季均能正常生长,两者具有相似的生长节律:夏季高温期生长停滞,秋季再度生长,形成新的群落.微齿眼子菜冬季生长停滞,但根系存活,且在近泥面处部分枝尖仍在缓慢生长<sup>[7]</sup>.

表 1 引种的水生高等植物的主要生态特征<sup>[8]</sup>

Tab.1 Main ecological characteristic of introduced macrophytes<sup>[8]</sup>

种名	生长期(日)	最适生长温度(℃)	引种方法	生活型
凤眼莲	5-11	20-35	植株	漂浮
喜旱莲子草	3-12	20-30	植株	漂浮
微齿眼子菜	3-11	20-30	植株	沉水
伊乐藻	长绿	15-30	植株	沉水
菹草	10-6	10-20	芽孢	沉水

## 1.4 水质监测

采样点:各围区内的水质采样点均位于围区南端,开阔水域采样点位于围隔试验区的西南角 F 点(图 1),每点分别取表层(距湖面 50cm)与底层水样(距湖底 50cm).

采样频率:2000 年 7 月对莫愁湖进行水质本底调查.从 2000 年 9 月底到 2001 年 4 月底,定期或不定期取样测定水体 Chl<sub>a</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、TN、TP 等.

分析方法:按我国《环境监测技术规范》的标准方法分析测定 Chl<sub>a</sub>,其它项目依据《湖泊富营养化调查规范》的方法分析测定<sup>[9]</sup>.

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 沉水植被的恢复

在藻型富营养化浅水湖泊内,沉水植物恢复的主要制约因素之一是水体透明度低下,由于

得不到充足的光照,水下的沉水植物难以正常生长,而其顶冠层上的藻类能够得到充足的光照,处于竞争优势,藻类大量生长又制约了沉水植物恢复。只有当沉水植物生长旺盛时,它才能有效控制藻类、改善富营养化湖泊水质。因此,要保证沉水植物引种成功、并健康地生长发育,首先必须改善水体透明度。

从 2000 年 9 月 28 日起,在围区 C 内陆续引种漂浮植物凤眼莲和喜旱莲子草,其盖度达 50%。凤眼莲的存活率较高,且能在 3 d 后开始恢复生长;喜旱莲子草存活率较低,1 周后方能恢复生长,引种的漂浮植物在短期内迅速提高了透明度(图 2)。10 月 4 日,由于在围区 C 内引种伊乐藻植株、微齿眼子菜植株和菹草繁殖芽,水体受到扰动,透明度有所下降。在漂浮植物及其它人工措施的干预下,3 周后,围区 C 内透明度得到明显提高,为沉水植物萌发、生长提供了保障。12 月中旬,气温突然降至 0℃ 以下,并出现霜冻,凤眼莲全部死亡,被捞出;而喜旱莲子草由于采取了适当的越冬措施,依然能够存活,整个围区内斑块状分布的喜旱莲子草总盖度达 5%;12 月的平均水温为 9℃,围区 C 内可见水下有一簇簇生长旺盛的伊乐藻,菹草繁殖芽也开始萌发。2001 年 1 月下旬,伊乐藻生长正常,新植株长 10-20cm;菹草生长正常,新植株长 10-20cm。2 月,伊乐藻生长较差,长约 10-25cm,菹草长约 20-30cm,水体透明度较低(图 3)。水下的喜旱莲子草枝叶保持绿色,并能缓慢生长,成活率达 95% 以上。冬季(12-2 月)平均水温为 7.2℃,沉水植被恢复较好。3 月,水生植物生长良好,伊乐藻长 20-30cm;菹草长 30-40cm,微齿眼子菜成活。3 月中旬,除去保护措施,喜旱莲子草生长良好。

2.2 水生植物对透明度的改善

## 2.2 水生植物对透明度的改善

由图 3 可见,围隔建成 1 周内,对照围区 E 的透明度较开敞水域 F 有明显提高,平均值为 70 cm,而开敞水域 F 点的透明度平均值仅为 44.44 cm。但是,一周后,对照围区 E 的透明度呈下降趋势,自 10 月 5 日到 1 月底,对照围区 E 与开敞湖区 F 的透明度几乎在同一水平波动,两者差异不大。2 月,对照围区 E 的透明度有所上升,并于 2 月底达到最大值。围区 C 在围隔建成一周内与对照围区 E 有同样的变化趋势,而一周后,由于引种了水生高等植物,透明度得到进一步的提高。从 10 月底到 2 月底,围区 C 的透明度均高于 100 cm,平均值为 111.5 cm。秋末冬初引种的水生高等植物不但能成活,迅速提高水体透明度,而且冬季能存活或生长,使水体透明度长期保持在很高的水平。

3 月份,随着水温上升(平均水温由 2 月份的 6.75℃ 上升到 12.85℃),由于刚恢复的水生高等植物生物量及其对藻类的抑制作用尚有限,围区内藻类仍有少量暴发,因此,围区 C 的透明度略有下降。到 4 月份,随着沉水植物全面恢复并旺盛生长,围区 C 的透明度又有明显提高。但是,到 5 月底,由于冬绿型沉水植物开始逐渐衰亡,围区 C 的透明度有所降低,但仍高于开敞水域 40cm 左右。此后,随着夏生水生高等植物的出现和生长,围区 C 的透明度又开始升高。而对照围区 E 自 3 月底透明度下降到最低点以后,在最低点附近上下波动。春季,水生高等植物经过短暂的调整 and 适应后,使水体透明度继续保持在较高水平上。从水体透明度的波动,可以

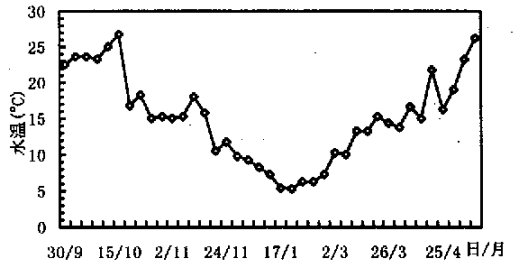


图 2 围区 C 水温的变化

Fig. 2 Change of temperature in enclosure C

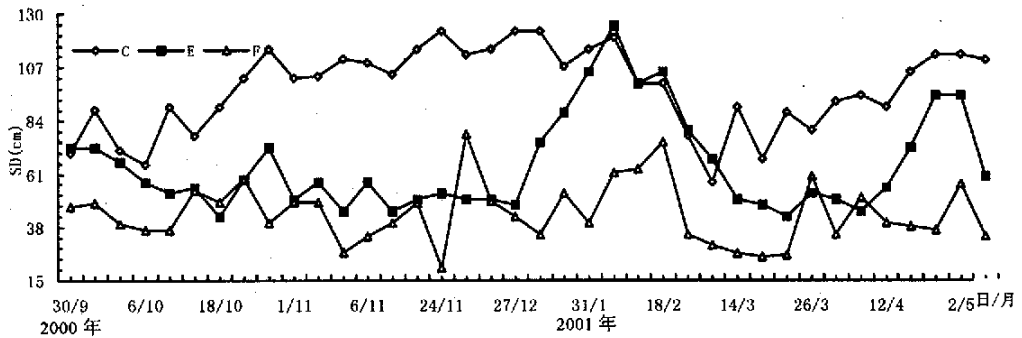


图3 各围区透明度的变化

Fig.3 Change of transparency in each enclosure

明显地看出,在水生高等植物恢复初期,藻类与水生高等植物间的竞争以及水生高等植物种群季节交替对水体透明度的影响。

### 2.3 营养盐的变化

对照围区 E 及围区 C 内 TP 浓度变化趋势类似。除 2 月有较大回升外,围区 C 与开敞水域 F 的 TP 浓度差距逐步加大(图 4a)。水生高等植物引种 40d 后,围区 C 内 TP 浓度较对照围区 E 及开敞水域 F 分别降低 50.3% 和 57%。3 月下旬,较开敞水域 F 降低 72.9%。

试验初、中期,开敞水域 F 的 TN 浓度变化不大,实验中后期,波动较大(图 4b)。实验过程中,对照围区 E 基本呈下降趋势,围区 C 则呈现持续、明显的下降趋势。引种水生高等植物 40d 后,围区 C 内 TN 浓度比对照围区 E 及开敞水域 F 分别降低 43.7% 和 59.4%。3 月下旬,分别降低 61.6% 和 79.7%。

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的变化(图 4c)显示,围区 C 与对照围区 E 及开敞水域 F 的差异显著,引种水生高等植物 40d 后,围区 C 内  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度比对照围区 E 及开敞水域 F 分别降低 72.9% 和 83.8%。5 月 9 日,围区 C 内  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度达到 0.16mg/L。

由图 4d 可见,实验开始,围区 C 的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度较开敞水域 F 高出很多,以后,均低于对照围区 E 和开敞水域 F,并与对照围区 E 差距逐步增大。实验过程中,对照围区 E 围绕开敞水域 F 上下波动,波动范围不大。高等植物引种 40d 后,围区 C 的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度较对照围区 E 和开敞水体 F 分别降低 49% 和 52.8%。5 月初,分别降低 89.2% 和 91.7%。

由图 4f 可见,围区 C 内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的变化趋势类似于  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度的变化,实验中后期,围区 C 内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度明显低于对照围区 E 和开敞水体 F。对照围区 E 波动范围较大。2 月,围区 C 内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度较对照围区 E 和开敞水体 F 分别降低 80.6% 和 62.9%。3 月下旬,分别降低 33.9% 和 56.2%。

总之,秋末冬初引种的水生高等植物,在冬季,对富营养化湖泊水体中的营养盐有明显的去除作用,春季,引种的水生高等植物全面恢复,生长茂盛,对水体起进一步净化的作用。

### 2.4 Chla 的变化

监测结果表明,围区 C 水体中的 Chla(图 4e)含量明显低于对照围区 E 和开敞水域 F,这表明,恢复水生高等植物可以有效地控制富营养化水体的藻类。对照围区 E 的 Chla 含量变化趋

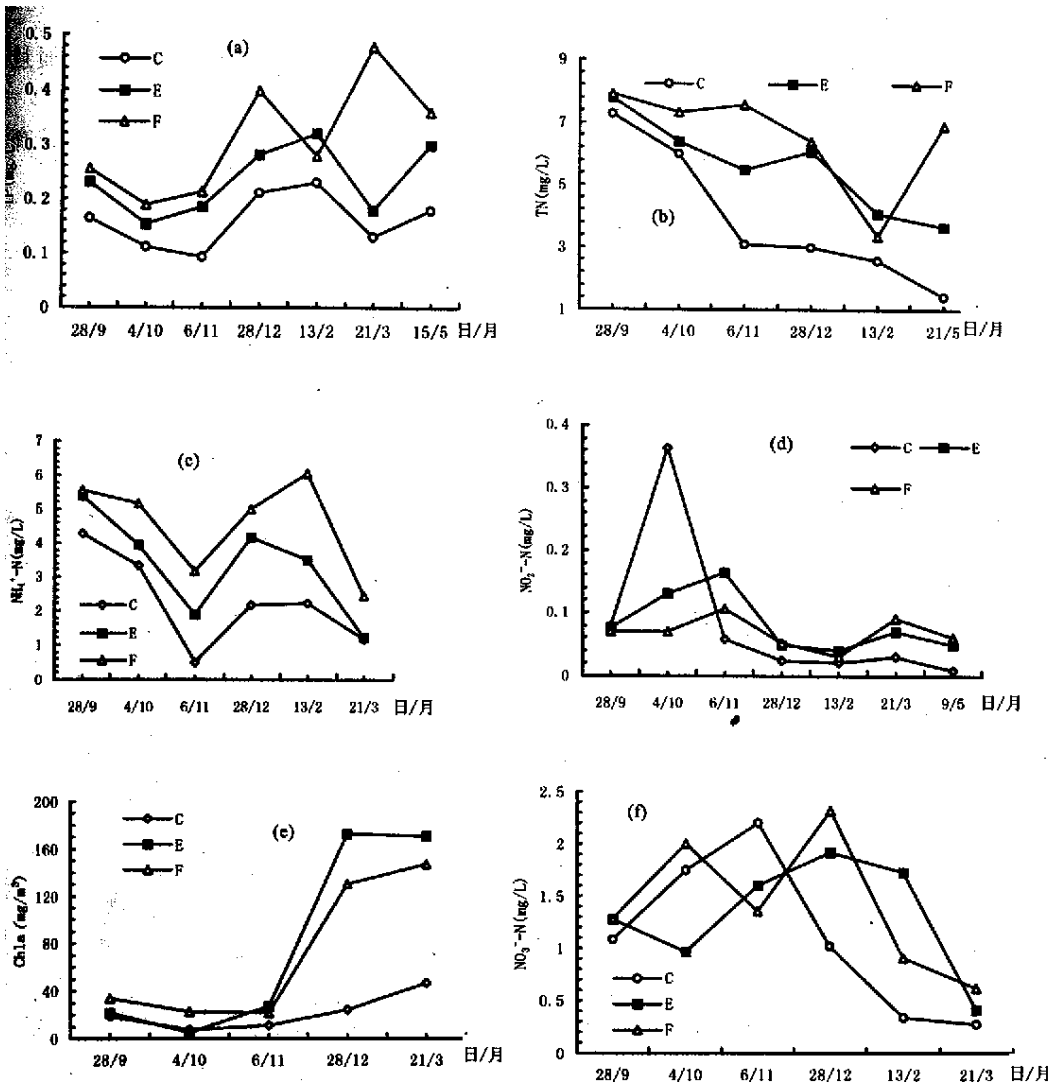


图 4 各围区内水质变化状况 (a :TP ; b :TN ; c :NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N ; d :NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N ; e :Chla ; f :NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)

Fig.4 Change of the water quality in each enclosure

势类似于开敞水域 F,而且波动很大.对照围区 E 内由于风浪扰动少,底泥释放量小,加之无外源污染,水体中营养盐含量较低,从围区内外水体 TP、TN 的变化(图 4a、b)可以看出,对照围区 E 的 TN、TP 浓度低于开敞水域 F,3 月下旬,分别较开敞水域 F 降低 47.1%和 62.5%.尽管对照围区 E 内营养盐较开敞水域低,由于缺乏水生高等植物,藻类生物量仍很高.

### 3 结论

1) 秋末冬初,按照一定的程序引种不同生态类型的水生高等植物,可以快速恢复和建立

水生高等植物群落。

2) 采取适当的保护措施, 秋末冬初引种的水生高等植物不仅在冬季能够成活, 而且能够有效的快速提高水体透明度, 改善富营养化水质感观指标。

3) 秋末冬初刚恢复的水生高等植物群落, 在冬季对富营养化湖水中的营养盐有较高的去除作用、对藻类也有明显的抑制作用。

### 参 考 文 献

- 1 王国祥. 富营养化湖泊生态修复的物理生态工程. 中国科学院南京地理与湖泊研究所博士学位论文, 1999
- 2 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): 171-179
- 3 濮培民, 胡维平, 逢勇等. 净化湖泊饮用水源的物理-生态工程实验研究. 湖泊科学, 1997, 9(2): 159-167
- 4 杨清心. 富营养水体中沉水植物与浮游藻类相互竞争的关系. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 17-24
- 5 王国祥, 濮培民, 张圣照. 冬季水生高等植物对富营养化湖水的净化作用. 中国环境科学, 1999, 19(2): 106-109
- 6 李文朝. 浅型富营养湖泊的生态恢复-五里湖水生植被重建实验. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 2-9
- 7 张圣照, 王国祥, 濮培民. 太湖藻型富营养化对水生高等植物的影响及植被的恢复. 植物资源与环境, 1998, 7(4): 52-57
- 8 连光华, 张圣照. 伊乐藻等水生高等植物的快速营养繁殖技术和栽培方法. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 11-16
- 9 金相灿, 屠清瑛主编. 湖泊富营养化调查规范. 第二版, 中国环境科学出版社, 1990

## Restoration and Purification of Macrophytes in An Eutrophic Lake during Autumn and Winter

CHENG Xiaoying      WANG Guoxiang      PU Peimin  
ZHANG Shengzhao      CHEN Baojun

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

### Abstract

From the late autumn to the early winter, several macrophytes were introduced to our newly constructed enclosures in a eutrophic lake. The purification and ecological restoration were investigated during the declining season of most macrophytes. The results show several macrophytes could be introduced to this eutrophic lake by physico-ecological engineering technique. Moreover, the newly introduced macrophytes could increase the transparency, improve water quality and remediate the eutrophic ecosystem. After three weeks, the transparency increases two-time as much as original level in the enclosure with macrophytes. Comparing with control enclosure and open water, TN concentration decreased by 43.7% and 59.4% after three weeks, 61.6% and 79.7% after six weeks, respectively; and TP concentration decreased by 50.3% and 57.0% after three weeks.

**Key Words** Eutrophication, macrophytes, purification, water quality, eutrophic lakes, restoration