

# 太湖北部滨岸区水生植被自然修复观测研究\*

杨龙元 梁海棠 胡维平 季 江  
陈伟民 濮培民 蔡启铭

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**提 要** 1997-1999年连续3年对太湖北部围隔实验区水生植被自然修复过程的观测表明,大型富营养化浅水湖泊滨岸水域,通过实施围隔保护等途径,土著水生高等植物如苻菜、菱等能够在次生裸区水域自然修复生长.1998年夏季苻菜、菱种群覆盖面积分别达到围隔保护区总面积的14.3%和12.7%.伴生种群有马来眼子菜、狐尾藻和苦草等.分析了人为刈割、水产养殖对水生高等植物自然修复进程的影响.据此提出治理太湖等大型浅水湖泊富营养化污染的对策.

**关键词** 自然修复 水生高等植物 太湖 富营养化

**分类号** Q948.8

水生高等植物和藻类都是水体生态系统中的初级生产者<sup>[1]</sup>.在同一营养水平下,湖泊水体可表现为以水草茂盛生长为主的“草型湖泊”或以浮游藻类占主导地位的“藻型湖泊”.此现象称之为湖泊水体的多稳态现象<sup>[2-3]</sup>.从水环境保护和改善水质角度分析,草型湖泊的环境效应和资源利用价值优于藻型湖泊.因此,在发生逆向演替的水体生态系统中施加一定的人为影响,有目的地引种优良水草品种,促进退化水体生态系统中水生植被的修复扩展,变“藻型湖泊”为“草型湖泊”,改善湖泊的环境效应和资源利用价值,实现水体生态系统的良性循环,是当代湖泊生态学研究的前沿课题,受到国内外学术界的广泛关注<sup>[4-6]</sup>.

太湖是大型浅水湖泊,风浪的剧烈侵扰抑制着水生高等植物的生长繁殖.用人工移栽水生植物的传统方法修复重建敞水区水生植被,难度较大.大面积推广应用也存在困难.本研究以适合于水生高等植物生长的太湖北部湖滨次生裸区为试验场地,观测围隔保护区内水体在减少捕鱼、刈割等人为干扰的条件下,土著水生高等植物如苻菜、菱和马来眼子菜等从无到有,自然演替为保护区内优势种群过程,探讨在同一营养水平下藻型湖泊转化为草型湖泊的诱发因子和人为干预方法,为太湖等大型浅水湖泊的富营养化治理提供依据.

## 1 实验

### 1.1 实验区

野外示范实验在太湖北岸大浮镇吴塘村康山渚中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统研究站(简称太湖站)滨岸围隔保护区进行.保护区地理位置为31°24'N,120°13'E.海拔4.0m.属亚热带北部边缘气候.年平均气温15.5℃,日照时数2100h,降雨量1150mm,无霜期130d.滨岸围隔区内最大水深为1.9m,现代沉积物厚度约为5-20cm,色泽深黑.

\* 中国科学院知识创新项目(KZCX2-403)和中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金资助联合资助.  
收稿日期 2001-04-25 收到修改稿日期 2001-12-08. 杨龙元,男,1945年生,副研究员.

围隔保护区由水泥柱圈, 渔网圈, 大、小涤纶布圈共 4 层组成(图 1)。其中渔网圈面积 20000m<sup>2</sup>, 大涤纶布圈面积 6625m<sup>2</sup>, 小涤纶布圈为圆型, 面积 283m<sup>2</sup>。

## 1.2 观测和分析

在水生高等植物生长期, 平均每周一次, 在非生长期, 平均每月一次, 用摄像、拍照和采集植物标本及水样等手段, 记录观测实验区内外水生植被自然修复与演替过程。用直角坐标法观测记录实验区内水生高等植物种群分布位置及覆盖面积。夏、秋二季用彼得逊采泥器采集代表性种群样品, 分别称量水生高等植物湿重和烘干重, 计算经自然修复生长的水生高等植物种群的生物量。

## 2 结果

### 2.1 水生高等植物种群

1997-1999 年三年期间, 由自然繁殖途径侵入实验保护区内的水生高等植物种群有:

苦草(*Vallisneria spiralis* L.), 主要分布在离湖岸线 60m 以内, 水深小于 1.2m 的近岸水域。苦草种群的覆盖面积较小。在强风浪作用下, 湖岸边可观察到被风浪连根卷起的苦草植株。

狐尾藻(*Hydrilla verticillata* Royle), 在 3 月底至 4 月初天气转暖时, 是近岸水域最早见到的水生高等植物种群。狐尾藻植株较大, 星点状伴生于荇菜、菱等群落间, 构成其它水生高等植物群落的伴生种。

荇菜(*Nymphoides peltata*), 是离湖岸 60-110m 深水区域内的主要建群种之一。能够形成单优群落。荇菜属浮叶根生植物, 叶片硕大, 茎秆粗壮, 生物量较高。植株于 4 月中旬开始发芽, 半个月后即可在水面形成稠密的覆盖层。是试验区水域的优势种群。

菱(*Trapa* sp.), 分布水域与荇菜发生重叠, 是离湖岸 60-110m 水域内的主要建群种之一。菱也是浮叶根生植物, 生物量较大, 与荇菜种群间存在激烈的空间生态位竞争。但菱发芽较荇菜为迟。6 月中旬以后, 能够取代荇菜成为该水域的优势种群。

马来眼子菜(*Potamogeton malaianus* Mig.) 属沉水植物, 分布区域遍及整个围隔保护区水域。是荇菜、菱和狐尾藻种群的伴生种。1998 年夏、秋季, 已能观测到单一种群的马来眼子菜斑块状分布。斑块平均尺度约为 4 × 4m<sup>2</sup>。

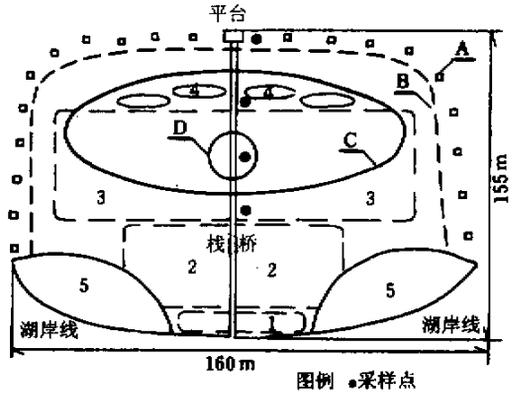


图 1 围隔保护区结构示意图

- A 水泥柱圈; B 渔网圈; C 大涤纶布圈;  
D 小涤纶布圈; 1 苦草; 2 狐尾藻 + 马来眼子菜 +  
荇菜; 3 荇菜 + 菱 + 马来眼子菜 + 狐尾藻;  
4 马来眼子菜; 5 芦苇

Fig. 1 Sketch of enclosed protective construction

- (A : Loop of cement column ;  
B : Loop of fishing net ; C : Big loop  
of polyester fibre cloth ; D Small  
loop of polyester fibre cloth )

- 1 : *Vallisneria spiralis* L. ;  
2 : *Hydrilla verticillata* Royle + *Potamogeton  
malaianus* Mig. + *Nymphoides peltata* ;  
3 : *Nymphoides peltata* + *Trapa* sp.  
+ *Potamogeton malaianus* Mig.  
+ *Hydrilla verticillata* Royle ;  
4 : *Potamogeton malaianus* Mig ; 5 Reed

## 2.2 土著水生高等植物种群覆盖面积与生物量

1995年夏季建设水泥柱圈以前,现围隔保护区水域内除沿岸少量芦苇外,无水生高等植物生长,属被人类生产活动破坏的次生退化裸区;1995-1996年相继建立各圈层后,减少了捕鱼、吸螺、刈割等人为干扰,围隔保护区内土著水生高等植物逐步侵入,生物量和种群尺度逐步增大,呈现水生植被自然修复景观。至1998年7、8月份,试验水域内各类水生高等植物种群覆盖面积累计达6269m<sup>2</sup>,占围隔保护区水域总面积的31.4%;各类水生高等植物最大生物量(湿重)累计达到13588t(表1)。

表1 1997-1999年围隔保护区内土著水生高等植物种群最大覆盖面积与生物量(湿重)

Tab.1 The biggest cover areas and biomass(wet weight) of natural species of aquatic macrophyte at the enclosure from 1997 to 1999

年份		荇菜	狐尾藻	马来眼子菜	菱	水草合计
1997	面积(m <sup>2</sup> )	2001.8	0.0	273.8	673.1	2948.7
	生物量(kg)	6886.2		476.4	646.2	7008.8
1998	面积(m <sup>2</sup> )	2864.1	606.4	254.2	2545	6269.4
	生物量(kg)	9852.5	947.5	442.3	2345.5	13587.8
1999	面积(m <sup>2</sup> )	105.2	0.0	0.0	2620.2	2725.4
	生物量(kg)	361.9			2515.4	3239.2

## 3 讨论

### 3.1 草藻相互作用

水生高等植物和藻类都是水体生态系统中的初级生产者。湖泊水体中N、P等营养元素的增加既可促进水草的生长,又能加强藻类的增殖。因此,当土著水生高等植物入侵围隔保护区水域后,水生高等植物和浮游藻类间就发生了激烈的生存竞争<sup>[7]</sup>。1998年度太湖站围隔保护区水生高等植物生长态势与相伴发生的草-藻相互作用表明,草-藻间的相互作用与竞争态势随生长季节的推移而呈现不同的自然生态景观(表2)。4月中旬至6月中旬,是水生高等植物大量繁殖生长,强烈吸收水体中N、P等营养盐类。新生的荇菜、菱等植物叶片飘浮水面,截留阳光,降低水温,使藻类的生长受到强烈的抑制。庞大的水生高等植物种群还具有消浪作用,促进悬浮物的沉降,增加水体透明度,加速了下层沉水植物的生长。此期间水生高等植物净化水质的作用最显著。6月中旬草-藻作用进入均衡阶段。水生高等植物抑制藻类生长的作用逐渐减弱。约在7月中旬至8月底,因水温增高等因素的催化,受太湖主体蓝藻爆发性繁殖的影响,大量蓝藻水华漂浮涌入围隔保护区水域,藻类反向危害水生高等植物生长的作用加剧。大片水生高等植物受侵害甚至死亡。表2中草-藻作用的五个阶段,是围隔保护区水体草-藻二类不同水生植物发生剧烈种间竞争的具体表现,具有一定的代表性。

### 3.2 水生高等植物种群演替

1998年4月至1998年9月围隔保护区水生高等植物总覆盖面积年变化曲线呈现二个峰值(图2)。分别出现在5月中旬和7月中旬。二个峰值与图中荇菜和菱覆盖面积年变化曲线极大值相对应。表明,围隔保护区内水生植被年演替模式主要由荇菜和菱二个种群的兴衰决定。荇菜和菱构成保护区域内水生高等植物的优势种群。荇菜于4月中旬发芽,5月初形成较大种

群 5 月中旬生物量达最大值, 6 月中旬后叶片发黄, 种群覆盖面积渐趋缩小, 种群开始衰退; 而菱种群则于 5 月中旬后逐渐扩展, 取代苻菜成为围隔保护区的优势种, 使水生高等植物总覆盖面积年变化曲线于 7 月中旬达到第 2 个高峰。

表 2 太湖站围隔保护区草-藻相互作用景观表\*

Tab.2 The landscape table of interaction between macrophyte and phytoplankton at the enclosure of Taihu Station

时间 (1998 年)	草-藻 作用期	0.5m 水温* ( $^{\circ}\text{C}$ )	Chla. ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	草-藻作用景观特征
4.4-4.13	水生高等植物 萌芽期	10-15.7	<5.0	水生高等植物发芽, 幼叶出露水面, 藻类数量浓度低, 草-藻相互作用不明显。
4.13-6.15	水生高等植物 作用占优势期	15.7-23.2	5.0-10	水生高等植物蓬勃生长, 覆盖度剧增, 水体透明度升高, 净化水质作用显著, 藻类数量开始增加, 种群生长受水生高等植物抑制。
6.15-7.15	草-藻作用均 衡期	23.2-27.9	10-25	水生高等植物覆盖面积、生物量达最大值, 净化水质作用达极点, 藻类数量剧增, 水面有蓝藻层聚集, 危及水生高等植物生长, 但未占优势, 透明度降低, 水质渐趋恶化。
7.15-8.31	藻类作用占优 势期	27.9-31.8	>25 极值 可达 287.1	浓厚的蓝藻水华覆盖水面, 透明度接近于零, 近岸区水生高等植物枯萎死亡, 深水区水生高等植物趋于衰败, 水质极度恶化, 水面有死鱼飘浮。
9.1-11.5	草藻衰亡期	28.0-10.0	25-5	蓝藻水华危害减弱, 藻类浓度下降, 水质渐趋好转, 受害水生高等植物生命活动有一定恢复, 但净化水质作用减弱, 随水温进一步降低, 趋于死亡。

\* 表中 0.5m 水温和 Chla. 浓度两项指标由 5-9 月每周一次加密观测数据归纳得出。

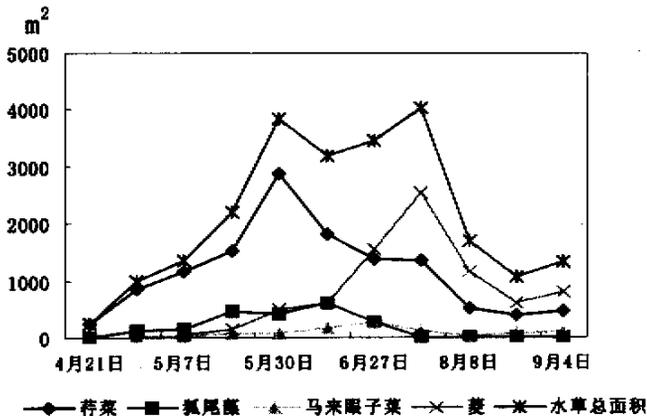


图 2 1998 年围隔区水草总覆盖面积年变化

Fig.2 The annual variation of total cover area by macrophytes in the enclosure of 1998

依据 1997-1999 年 8 月水生高等植物种群净覆盖面积观测数据和 1996 年围隔保护区录像资料绘制了水生高等植物种群净覆盖面积年际变化图(图 3)。围隔保护区内水生高等植物净覆盖面积年际变化曲线为单峰型, 峰值出现在 1998 年夏季, 1997 年 8 月, 实验区内各类水生高等植物种群净覆盖面积为  $1611\text{m}^2$  (覆盖率按 50% 计算), 占围隔水面 8.1%。高于 1996

年水生高等植物覆盖面积;1998年7月中旬,保护区内各类水生高等植物种群净覆盖面积为 $4035\text{m}^2$ ,占围隔水面20.2%,比1997年同期有很大增长.表明在正常气候条件下,围隔保护区内水生植被能够实现自然修复的发展趋势.1999年夏季,保护区内水生高等植物种群净覆盖面积下降为 $2725\text{m}^2$ ,仅占围隔水面13.6%.种群结构也由1998年以荇菜+菱+马来眼子菜+狐尾藻为主要的复合群落演替为以菱为主的单优群落.作者认为,这是由于1998年夏末对水生高等植物种群的人为刈割绞拔和1999年初夏太湖流域遭遇百年不遇的特大洪水的影响所致.

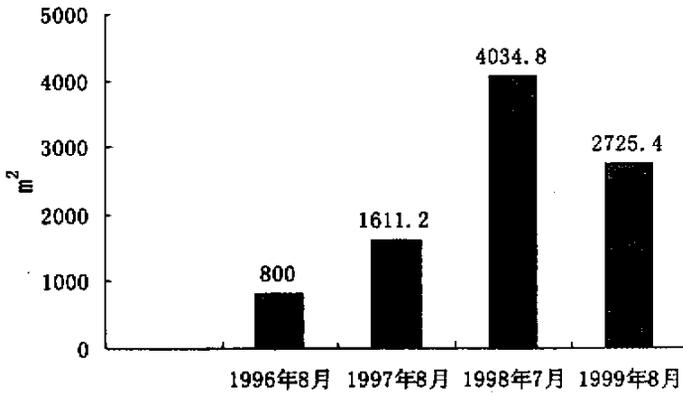


图3 1996-1999年围隔区水草覆盖面积图

Fig.3 The figures of macrophyte cover area in the enclosure from 1996-1999

### 3.3 刈割绞拔和鱼类养殖的影响

水生高等植物的生活史对策可分为 $r$ -选择型与 $k$ -选择型二个类型<sup>[8]</sup>.菱主要以种子繁殖,菱实寿命较长,隔年尚能发芽生长,有的可长达5年<sup>[8]</sup>.种群遭受破坏后能够迅速恢复.因此,属 $r$ -选择型植物,荇菜、马来眼子菜主要通过地下根状茎行营养繁殖,种群迁移占据新境速度迟缓,属 $k$ -选择型植物.1997年秋季,为减轻水生植物死亡引起的二次污染,作者在围隔保护区内选择一片荇菜单优群落,用竹杆连根绞除群落中心区域的荇菜约 $70\text{m}^2$ .1998年夏、秋季,此群落形态演变成为中心无水生高等植物生长的环形荇菜覆盖区.1999年初夏,此中心裸区则为菱种群率先侵入占据.1998年8月中、下旬,受太湖主体水域蓝藻水华暴发的影响,围隔保护区域内水生高等植物遭受蓝藻水华的毒害,趋于死亡.为避免腐烂水草对太湖站饮用水源的二次污染,刈割拔除了围隔区内所有水生高等植物.水生植物的自然修复进程受到较大的人为干扰,以致造成次年(1999年)围隔区内只有菱发芽良好,形成了一定的种群规模;荇菜仅有少量生长,生物量锐减;马来眼子菜和狐尾藻则已从围隔保护水域内消失的生态景观.植被种群衰退演替现象表明水环境因子和人为干扰对水生植被的自然修复进程影响很大. $k$ -选择型植物种群对人为干扰的响应更激烈.在实施水生植物生态修复工程时应予特别注意.

草食性鱼类啃食水草,对水生植被的修复构成一定的生境压力.1997年5月,作者向小涤纶布圈水域内投放了杂食性的鲫鱼苗 $12.5\text{kg}$ (约 $600\text{kg}/\text{hm}^2$ ).投放鲫鱼苗时,小涤纶布圈水域内的优势种群马来眼子菜长势良好,有一定的覆盖度.1998年夏季,小涤纶布圈内的是马来

眼子菜叶片被鲫鱼啃食,只剩少量茎干在水体中摇曳。种群覆盖面积萎缩,而鱼类不喜食的苕菜、菱则先后在小涤纶布圈水域内繁衍起来,取代马来眼子菜成为优势种,表明渔业养殖压力具有一定的选择性。水体中放养一定数量的鱼类可改变水生植被自然修复及种群演替过程。据此可人为调控水生植被组成和结构,取得较好的生态工程效果。

### 3.4 太湖北部湖湾水草自然修复的可能性

1998年8月,作者在太湖北部的梅梁湾、竺山湖和贡湖进行了湖面水生植物分布状况考察,记录到在人类活动影响较大的竺山湖(鱼类养殖)、梅梁湾西岸(湖岸围垦),基本上无水生高等植物生长;但在人类活动影响较小的梅梁湾东岸三国城至康山渚一带和贡湖北岸的滨岸水域,均有面积大小不等的苕菜、菱等土著水草分布。但是,渔民捕鱼捉虾等生产活动对水生高等植物的生长破坏较大,限制了水生高等植物种群面积的扩展。而在贡湖东南部大、小贡山区间及其以东水域,有较大面积(约数千亩)的马来眼子菜单优势种分布。该区域内水体透明度较高,水质较好,已经成为苏州、无锡二市的几个大水厂的水源地。因此,在太湖北部的梅梁湾、竺山湖和贡湖等湖湾水域,存在着水生高等植物自然恢复生长的种子库、源和扩展基地。太湖是大型浅水湖泊,平均水深仅2m。太湖流域气候温暖,适合植物生长。按李文朝<sup>[3]</sup>阐述的湖泊生态系统稳态理论和在东太湖进行水生植被净化湖泊水质的研究经验,太湖东北沿岸带的几个湖湾是有可能通过重建水生植被实现生态修复。邱东茹<sup>[9]</sup>等基于在武汉东湖进行了多年人工水生植被修复试验的基础上,提出在风浪作用弱小的东湖的牛巢湖、后湖等水域,如果停止放养草食性鱼类,减轻人类生产活动对水草生长的干扰后,大茨藻、聚草和苦草等大型水生高等植物可以自然恢复;并认为一旦水生植被开始恢复、建立,可通过一系列正反馈机制,抑制藻类,水质将逐步好转,使其它对污染较为敏感的水草种群如竹叶眼子菜、黑藻和水车前等也能得到恢复发展。本观测研究表明,对如太湖滨岸敞水区这样风浪作用十分强烈的水域,若能采取适当措施减轻甚至消除人类生产活动对水草自然生长的干扰压力,经过一定时间的保护,能抗风浪侵扰的先锋植物如苕菜、菱等土著水草种群有可能在保护区域内迅速自然修复生长起来。水生高等植物种群覆盖面积能够达到一定规模。据此我们认为,在太湖北部的梅梁湾、竺山湖和贡湖等湖湾内,如能够采取适当措施减少航运、养殖、捕捞等人类生产活动的影响,或对局部水域(如贡湖及梅梁湾的各个自来水厂取水口附近区域)实施封湖保护等措施,辅以合理的水环境管理策略,以土著水生高等植物种群苕菜、菱等为先锋植物,促使其种群的扩展和向深水区推进。在水生高等植物覆盖区内利用水生高等植物抑制藻类生长,逐步改善水质,诱导马来眼子菜、苦草等沉水植物的生长繁殖,则有可能变蓝藻水华危害严重的贡湖、梅梁湾等藻型湖泊水体为污染较轻的草型湖泊水体,实现用生态工程技术治理湖泊富营养化污染的目的。

## 4 结论

1997-1999年太湖站围隔保护示范区水生高等植物自然修复观测研究表明,大型富营养化浅水湖泊的滨岸水域,在减少人类生产活动对水生高等植物生长的干扰压力后,苕菜、菱和马来眼子菜等土著种水生植物能够自然修复并形成一定的种群规模;水生高等植物抑制藻类生长的能力随生长季节的不同而异。苕菜、菱等土著水生植物种群净化水质、抑制藻类生长占优势的最佳时期为5-6月份;人为刈割和渔业养殖等人类生产活动对水生高等植物自然修复进程构成一定的环境压力。人为干扰对k-选择型植物的影响大于r-选择型植物。

致谢 中国科学院南京地理与湖泊研究所张文华同志参加了围隔实验区各圈层的施工, 为本研究提供了良好的试验场地, 张琛同志帮助绘制了围隔示范区水面图, 周子元同志参加了部分野外观测和分析测定工作. 特此一并致谢.

### 参 考 文 献

- 1 章宗涉. 水生高等植物—浮游植物关系和湖泊营养状态. 湖泊科学, 1998, 10(4): 83—86
- 2 Hoesper S H. Biomaniplulation, new perspective for restoring shallow, eutrophic lakes in the netherlands. *Hydrobiol Bull*, 1989, 23: 5—11
- 3 李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用. 湖泊科学, 1997, 9(2): 97—104
- 4 Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components. *Hydrobiologia*, 1990, 200/201: 367—377
- 5 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): 1—10
- 6 马剑敏, 严国安等. 武汉东湖受控生态系统中水生植被恢复结构优化及水质动态. 湖泊科学, 1997, 9(4): 357—363
- 7 杨清心. 富营养化水体中沉水植物与浮游藻类相互竞争研究. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 17—24
- 8 陈家宽, 周进. 湖北斧头湖浮叶水生植物群落研究, I. 菱群落的结构. 水生生物学报, 1995, 19(1): 40—47
- 9 邱东茹, 吴振斌等. 武汉东湖水生植物生态学研究, I. 水生植被现状与演替动态. 水生生物学报, 1995, 19(2): 103—113

## The Study on Natural Restoration of Aquatic Vegetation in the Northern Lakeside, Lake Taihu

YANG Longyuan    LIANG Haitang    HU Weiping    JI Jiang  
CHEN Yuwei    PU Peimin    CAI Qiming

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

### Abstract

It has been observed and studied that the natural restoration process of aquatic vegetation in the experimental enclosure of northern lakeside, Lake Taihu, from 1997 to 1999 years. It is found that the local macrophytes, for example, the *Nymphaoides peltata*, *Trapa* sp. and *Potamogeton malainus* Mig, can be naturally restored in the bare lakeside of big shallow eutrophication lakes by an enclosed protection methods. The cover area by species of *Nymphaoides peltata* and *Trapa* sp. has taken up to 14.3% and 12.7% of the total enclosure area in the summer of 1998, respectively. The companion species of vegetation are *Potamogeton malainus* Mig, *Hydrilla verticillata* Royle and *Vallisneria spiralis* L. The affection to the natural restore of macrophytes by anthropologic rearing and fish culture has also been discussed. According to the results of enclosure experiment, it has provided a strategy for control of eutrophication in big shallow lakes, for example, Taihu Lake.

**Key Words** Natural restoration, macrophytes, Taihu Lake, eutrophication