DOI号: 10.3724/SP.J.0000.2009.20222

# 武汉月湖水生植被重建的实践与启示

马剑敏[1]　成水平[2]　贺　锋[2]　左进城[2]　赵　强[2]　张　征[2]　吴　娟[2]　吴振斌[2]

(1. 河南师范大学生命科学学院,河南省环境污染控制重点实验室,新乡　453007;
2. 中国科学院水生生物研究所,淡水生态和生物技术国家重点实验室,武汉　430072)

**摘要**:通过生物操纵、浮水植物和植物浮岛原位净化、岸边人工湿地净化和科学种植等措施,2—3年内,在长江中游地区、面积为 0.66km$^2$、水质为劣 V类的重富营养湖泊武汉月湖重建了以菹草和伊乐藻为优势种的沉水植物先锋群落,2005年春季的沉水植物盖度达到 45%,提高了透明度。利用水位低、透明度相对高的冬季种植伊乐藻、菹草等适合冬春季生长的沉水植物是建立沉水植物先锋群落的一个有效途径。重污染水体过低的透明度是重建沉水植被的主要限制因子,在低水位或较高透明度时期,水生植物可以耐受相对较高的污染负荷,并且在有条件降低水位时,会大大提高重建沉水植被的成功率。重建并保持长期稳定的水生植被必须截污,并把营养盐浓度削减到一定范围内。水生植被重建初期是最脆弱的时期,水位、污染负荷等生态因子的较大波动很容易破坏植物群落,在这一时期要尽量保持关键因子的稳定,注意控制浮萍的扩张,使形成的生态系统逐步走向成熟。清除鱼类对提高水的透明度有重要作用,但必须伴随着水生植被的恢复或重建才能维持长久的良好效果。

**关键词**:月湖;水生植被重建;先锋植物群落;生物操纵
**中图分类号**: X171; Q178.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3207(2009)02-0222-08

随着污染的加剧和湖泊富营养化的发展,众多浅水湖泊经历了由以大型水生植物占优势、水质清澈的“草型稳态”阶段向以浮游植物占优势、透明度低、水华频繁爆发为主要特征的“藻型稳态”阶段的转变过程。国内外通过对富营养化的理论研究和实践经验得到一个共识[1]:恢复或重建水生植被,尤其是沉水植被,是控制浅水湖泊富营养化发展的必要环节,目标是实现湖泊由“藻型”到“草型”稳态的转变。

在富营养化浅水湖泊中大面积地重建水生植被是一项非常困难的任务。迄今为止,在较大面积和较短时间内(3年),以人工强化方式大规模实施而成功的例子很少[2,3]。这是因为在藻类占优势的富营养水体中,沉水植物生存的条件已被破坏,恢复或重建的障碍很难逾越,主要有湖水透明度低,难以达到沉水植物的光补偿点,底质厌氧,污染物浓度过高等。要克服这些障碍,需要在综合治理下,改善水质和底质,然后进行自然或人工强化恢复。

在“十五”重大科技专项“武汉市汉阳地区水环境质量改善技术与综合示范”实施过程中,月湖是最重要的研究和工程示范湖泊,其中的水生植被重建工作有诸多经验教训,对以后该领域的研究和工程实践具有重要的借鉴意义。

## 1　月湖背景资料

月湖(N 30°33′,E 114°14′)位于武汉市中心地带,面积 0.66km$^2$,分为大、小月湖,其中小月湖约 27000m$^2$,与大月湖通过一个约 6m宽的水道相连,在 2002年完成清淤,相对较深,冬季低水位时,多数区域有 1.4m深,夏季高水位时可达 1.7m以上;大月湖平均水深 1.2m,淤泥较深,其中 50%以上的区域淤泥超过 1.5m,其他区域 0.3—1.5m;底泥中的有机物和氮磷含量均很高[4]。在 2004年以前的 20余年里,月湖一直有渔业养殖活动。另外,在小月湖东面有一个面积约为 25000m$^2$ 的东月湖,不仅进行投饵养殖,而且还接纳周围的生活污水,水质为劣 V

**收稿日期**: 2007-10-16;**修订日期**: 2008-11-16
**基金项目**:国家十五重大科技专项(2002AA601021);国家杰出青年科学基金(39925007);淡水生态与生物技术国家重点实验室开放课题资助
**作者简介**:马剑敏(1964—),男,河南偃师人;博士;主要研究方向为污染与修复生态学。E-mail: mjm6495@sina.com
**通讯作者**:吴振斌, E-mail: wuzb@ihb.ac.cn

类(2003年4次采样分析结果的均值为总氮9.254mg/L,总磷0.871mg/L,COD 50mg/L),其水位高于小月湖,有一个唯一的出口通向小月湖,平均每日向小月湖排水2000—3000t,下雨时则把平时积累和接纳的众多污水全部倾入小月湖,是一个主要污染源;此外还有2个较大的雨污混合排水口通向小月湖。在大月湖也有2个较大的排污口及数个较小的排污口。全湖平均每天入湖生活污水约10000t。湖岸全被人工硬化,缺少缓坡。

月湖水质属劣Ⅴ类,5—9月的某些时段,有时爆发水华,大月湖多数区域的水质好于小月湖;2002年秋的调查未见月湖有大型水生植物。

## 2　重建月湖水生植被的主要障碍和工作思路

从技术角度上讲,重建水生植被的主要障碍有:(1)透明度低,水下光照不足。(2)底质有机物过多,厌氧环境。(3)截污不完全。(4)鱼类的影响。(5)湖岸几乎都为人工石砌的陡岸,缺乏缓坡,不利于先锋植物定植。工作思路是:先从小月湖开始实施水生植被重建工程,积累经验后,再在大湖中实施。

## 3　测定指标与方法

植物现存量的调查用1/6$m^2$的带网铁锹连根抓起植物,之后洗净称鲜重。水质测定中,总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素*a*(Chl *a*)、透明度(SD)按标准方法测定[5]。浮游植物:定性测定是用25#滤网捕捞后用鲁哥氏液固定,回实验室镜检,定量测定是取1L水样用鲁哥氏液固定,浓缩后镜检、计数;浮游动物:定性测定是用25#滤网捕捞后用甲醛固定,定量测定是用25#滤网过滤10L水,甲醛固定,实验室内镜检、计数。

## 4　工程实践和结果

### 4.1　小月湖工程

先锋植物选择莲、苦草和伊乐藻。莲以观赏为主要目的,种植于湖内的3个荷花池内;苦草和伊乐藻的搭配,目的是实现四季均有植物生长,有利于水质的稳定,两者均全湖种植。

通过改善底泥、原位水质净化(如设置植物浮岛、人工水草等)、建立岸边湿地净化湖水、水位调节、控藻、合理的植物选择和种植技术与策略等多种措施和方法的组合使用,从2003年春夏季开始,经历3次失败,到2005年春季成功重建水生植被,结果(表1)。主要经验教训是:在植被恢复过程中要保持水位的稳定,避免较大的波动;其次要截污,提高透明度。

表1　小月湖水生植物调查

Tab.1　Investigation of aquatic macrophytes in Lake Small Yuehu

| 调查时间 Time | 盖度 Coverage | 现存量 Standing crop (kg) | 优势种 Dominant species | 其他种 The other species |
|---|---|---|---|---|
| 2005年3月 | 80%的样点能采到伊乐藻枝条 | 3000 | 伊乐藻 | 未见 |
| 2005年5月 | 80% | 118500 | 伊乐藻、浮萍 | 菹草、黑藻、睡莲、荷花 |

### 4.2　大月湖工程

月湖属于小型湖泊,在遇到暴雨时,水位会明显升高。在大月湖有一个通汉江的抽水站,在水位较高时可以抽水入汉江。根据前人的报道和已有的经验教训[6,7],在重建大月湖水生植被时,先后采取了如下措施:①终止投饵养鱼并捕捞去除大部分的鱼,实施生物操纵;②与抽水站协商,每到下暴雨时,增加抽排水量,尽量减小水位的波动幅度;③封堵了小月湖的两个直径近1米的雨污混排口和大月湖西部的一个入湖污水明沟,大大减少了暴雨时的入湖水量,也减少了入湖污水量;④把东月湖来水引入岸边的人工湿地净化,之后再排入湖;⑤在重点水域建立了约2000$m^2$的植物浮床和数百平方米的人工水草以净化水质;⑥对底泥污染较重的部分区域泼洒底泥改良剂。

#### 4.2.1　工程规模的研究

2004年春季以苦草和伊乐藻为先锋种,在部分水域种植了伊乐藻,苦草以播撒种子方式在除湖心区外的其他区域(约为总面积的70%)种植,植物的成活情况较差。在大月湖的主体部分的四周近岸区有苦草幼苗分布,其中E区(水最浅,约0.5m,底泥污染也较轻)长势最好(图1),其他区域很弱小;在E区还有莲分布(由底泥种子库萌发而来)。

为了解月湖各水域重建水生植被的难易情况,探讨影响植物定植成活的主要原因,2004年冬季(2005年1月)在工程规模上开展了沉水植物重建实验研究。具体做法是:在大月湖的A区北半部近岸部分以及C、D、F区(图1),均种植面积为4000$m^2$、重量相等的伊乐藻(夹带有金鱼藻)。4个区分别代表底泥重污染、浅水区(水深0.3—0.6m,

冬季水位,下同),水质重污染区(在排污口附近,此排污口是2004年夏季因湖岸边一个池塘接纳下水道的溢出水溢出池塘进入湖内而形成,此前底泥污染不重,水深0.5—0.8m,透明度约0.4m),底泥重污染、深水、高透明度区(水深1.3m,有时可看到湖底)和底泥重污染、深水、低透明度区(透明度约0.6m,水深1.3m)。E区属底泥轻污染的浅水区,其水生植物在2004年春夏季已经正常生长,故本次未再重新种植伊乐藻,但进行相应的调查和监测。上述5个区代表了大月湖不同的水环境条件,我们认为,如果水生植物在5个区都能成活、生长,那么可以认为大月湖大部分区域是可以重建水生植被的(表2)。

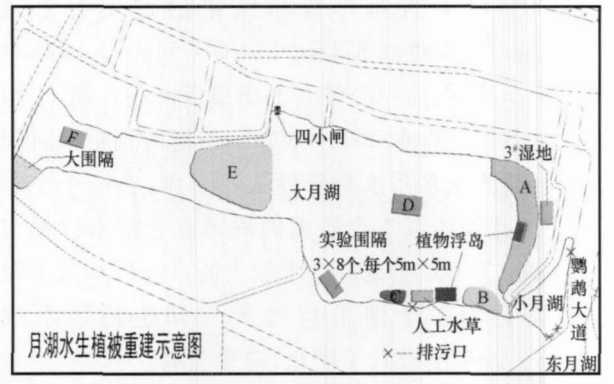



图1 2004年冬季大月湖水生植物种植区域示意图

Fig. 1 Map of the area with planted aquatic plants in Lake Large Yuehu in winter of 2004

表2 月湖几处种植水域的水质、底质及沉水植物生长状况

Tab. 2 Water quality, sediment quality and aquatic macrophytes in some planted areas of Lake Yuehu

| 项目 Index | 时间 Time | Area A | Area C | Area D | Area E | Area F | Small Yuehu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 透明度 SD(cm) | 2005年 1—3月 | 30—50(见底) | 35—55 | 110(见底) | 35—45(见底) | 60—100 | 60—140 |
| | 2005年 4—6月 | 40—见底 | 28—40 | 40—66 | 50(见底) | 50—85 | 40—110 |
| | 2005年 7—9月 | 33—47 | 26—41 | 25—30 | 30—见底 | 40—45 | 30—56 |
| 水质 TN and TP in the water(mg/L) | 2005年 1—3月 | | TN 8.1<br>TP 0.89 | TN 7.4<br>TP 0.32 | TN 4.1<br>TP 0.23 | TN 5.0<br>TP 0.18 | TN 13.5<br>TP 0.26 |
| | 2005年 4—6月 | | | TN 3.3<br>TP 1.29 | TN 1.8<br>TP 0.69 | TN 4.2<br>TP 0.52 | TN 8.5<br>TP 0.66 |
| | 2005年 7—9月 | | | TN 2.7<br>TP 1.59 | TN 2.9<br>TP 0.96 | TN 3.5<br>TP 1.0 | TN 3.1<br>TP 0.96 |
| 底质 TN, TP and OM in the sediment (g/kg) | | OM 120<br>TN 4.7<br>TP 3.2 | OM 119<br>TN 4.6<br>TP 2.2 | OM 85<br>TN 4.0<br>TP 2.2 | OM 110<br>TN 4.1<br>TP 2.4 | OM 186<br>TN 6.0<br>TP 3.4 | |
| 植物现存量 Standing crop (kg FW/m) | 2005年 3月 | 1.2 | 0.35 | 1.3 | 0.98 | 0.31 | 0.13 |
| | 2005年 5月 | 3.2 | 0.01 | 3.4 | 2.9 | 1.1 | 5.5 |
| | 2005年 9月 | 偶见 | 未见 | 偶见 | 1.8 | 未见 | 未见 |

2004年12月—2005年2月,月湖的透明度明显好于往年同期,主要原因有:(1)部分截污。包括封堵了小月湖的两个大排污口,东月湖来水经过岸边新建的一个大型人工湿地净化再入小月湖,使小月湖的透明度迅速大幅度提高。(2)植物净化。月湖设置了两千多平方米的植物浮岛,此外,2004年夏季,凤眼莲在月湖迅速扩展,秋季时已经占据20%—30%的水面,现存量约为300—350t,2004年冬季被全部打捞出。(3)生物操纵。通过大量捕捞鱼,减小了对浮游动物的捕食压力,从而抑制了浮游植物的扩增。同时,也大大减小了鱼类活动对非常疏松的底质的扰动,减少了沉积物的再悬浮。

在植物种植2个月后的2005年3月调查,生长状况由好到差的顺序是D、A、C、F。其中,A、D区间没有明显差别;C区植物则是随着距排污口距离的增加,生长状况逐步好转,植株表面附着了大量的絮状物;F区的透明度不高,看不到植物,根据采样情况判断,现存量小于当初种植的量;E区也有较多伊乐藻,但盖度较小。对比不同时期水质和植物现存量的变化(表2),可以发现,在透明度较好的情况下,伊乐藻、金鱼藻等植物可以忍耐水中较高的氮磷浓度(TN: 10mg/L, TP: 1mg/L)和污染较严重的底泥,水生植物得以部分恢复;若透明度较低,则植物对污染的耐受性就明显降低,植物能否存活、生长取决于透明度与污染程度(氮磷浓度)之间的平衡;透明度是影响沉水植物定植成活的关键因子。对于该结论,还有一些在工程实践中的观察事实支持。例如,在大月湖东北岸边,即东月湖污水引排入大月湖出口,同时也是3号人工湿地进水的抽水口,生长着数株金鱼藻,从2005年早春到夏季,这几株金鱼藻

一直顽强地生长并长大,3月份该处水的 TN、$NH_4^+$-N和 TP分别高达 23.51、14.6和 1.01mg/L,但奇怪的是与周围的水质相比,水色绿的程度较浅,藻类密度较低,透明度较高。原因是这里有特殊的小环境:第一,为防止水泵堵塞,周围用网隔离,相对独立;其次,排污和抽水经常同时进行,水的流动性大、交换率高,使得藻类不易过多繁殖,透明度相对较高(大约 40cm),水中不易缺氧;第三,金鱼藻生长的地方水较浅(约 60cm)。

**4.2.2　全湖水生植被的重建工程**

在上述实验研究的基础上,通过生物操纵技术、底泥改良技术、原位水质净化技术(植物浮岛和人工水草等净化)以及正确的种植方法和策略,在2005年春季重建了月湖的水生植被。结果(表 3)。

2005年 3月的调查显示,全湖大型水生植物的总生物量约 160t,其中伊乐藻和菹草分别约 60t和 99t,金鱼藻等约 1t(主要分布在 E区);总体盖度约为 15%。此外,在湖内还有许多丝状绿藻,主要分布区是 A区北部和 E区东部,以及 A、E区之间近北岸的区域,总生物量约有 100t。它们对水质的改善也有贡献,但往往缠绕在大型植物上,与之竞争资源,有时造成大型植物死亡。

**表 3　大月湖水生植物调查**

Tab.3　Investigation of aquatic plants in Lake Large Yuehu

| 调查时间 Time | 大型沉水植物盖度 Coverage of macrophyte | 大型沉水植物总生物量(吨) Biomass of submersed macrophyte (t) | 沉水植物优势种 Dominant species of submersed macrophyte | 其他沉水植物种类 The other species of submersed macrophyte | 非沉水植物种类及优势种 Species of emergent and floating-leaved plants | 非沉水植物总生物量(吨) Biomass of emergent and floating-leaved plants (t) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2004年 5月 28日 | 15% | 多为苦草幼苗 | 苦草 | 伊乐藻,菹草(偶见) | 凤眼莲,莲(均很少) | |
| 2004年 10月 | 2.4% | 20—30 | 苦草 | 金鱼藻(少量) | 凤眼莲(优势),莲 | 300—350(2005年 1月移出) |
| 2005年 3月 27日 | 15% | 160 | 菹草 | 伊乐藻,金鱼藻,还有很多丝状藻 | | |
| 2005年 5月 14日 | 45% | 810.4 | 伊乐藻 | 菹草(很多),金鱼藻,黑藻 | 紫萍(优势),莲,水鳖 | 949 |

2005年 5月,沉水植物几乎全湖分布,总体盖度达到了 45%左右,总生物量约 810.4t。在 F区的西边,植物较稀少,盖度约为 15%,以伊乐藻为主;在 F区东部约 40000$m^2$ 区域,植物盖度约 45%,以伊乐藻和金鱼藻为主;再向东到 E区西边约 50000$m^2$ 区域,植物盖度约 75%,以金鱼藻和伊乐藻为主;E区植物盖度约 70%,其中莲约有 30000$m^2$,另一大半以伊乐藻和金鱼藻为主;月湖西半部狭长区域整体盖度约为 65%,总生物量约为 400.4t(2.8kg/m),其中,伊乐藻约占 45%,金鱼藻约占 35%,菹草约占 15%,其他约占 5%。在湖的主体区域,南部和东部沿岸带植物密度较高,中央开阔区域以及北部植物较疏,整体盖度约为 40%,总生物量约为 410t(2.5kg/m),其中伊乐藻约占 60%,菹草约占 30%,金鱼藻约占 10%,还有少量黑藻、水鳖等。在南部排污口附近,即 C区东部和人工水草种植区北部约 3000$m^2$ 以上的区域植物基本消失,而不同于上次调查,而且该区域水色发黑,是整个月湖水质最差的区域。另外在 B区东部以及 A区南部一带,植物盖度与上次调查情况相近,菹草长势较差。

自 5月初开始,浮萍大面积爆发,5月中旬时盖度已达 55%左右,总生物量约有 949t(2.74kg/m)。由于它的遮光等影响,不利于沉水植物的生长;此时菹草开始大面积衰退。

在一些因素促使下,从 6月开始大量打捞浮萍,然而浮萍与沉水植物相伴很难分离,在尝试多种方法、历经一个多月之后,最终把大部分浮萍捞出,并控制了其蔓延;但同时有 50%以上的沉水植物被带出,并严重扰动和损伤了沉水植被,导致其快速衰退。当时,由于准备实施月湖清淤计划(在 2007年春完成),故没有继续大规模地进行植被维护和重建工程。

**4.3　植被重建过程中的水质变化**

根据监测,小月湖的水质劣于大月湖;在湿地净化、生物操纵等措施实施后的 2004年冬季始,水质

开始明显好转,并持续到水生植被生长较好的 2005年春季。

**4.3.1 TN的变化**

大月湖和小月湖在监测期间 TN浓度的平均值分别为 4.793和 9.783mg/L,远高于国家 V类水标准,小月湖的浓度约为大月湖的 2倍。由图 2可知,小月湖在每个月都高于大月湖的值,在植被明显恢复时期(2005年),TN浓度仍较高,尤其是小月湖有上升趋势,这可能与小月湖的补充水,即月湖 3号湿地出水的 TN浓度仍然高有关,虽然湿地净化后消除了 50%以上的总氮。2005年 3月 3号湿地进水(来自东月湖)和出水(经湿地净化后入小月湖)TN浓度分别为 23.5和 11.3mg/L;大月湖则有下降趋势,这与湖中水生植物快速增长有关。

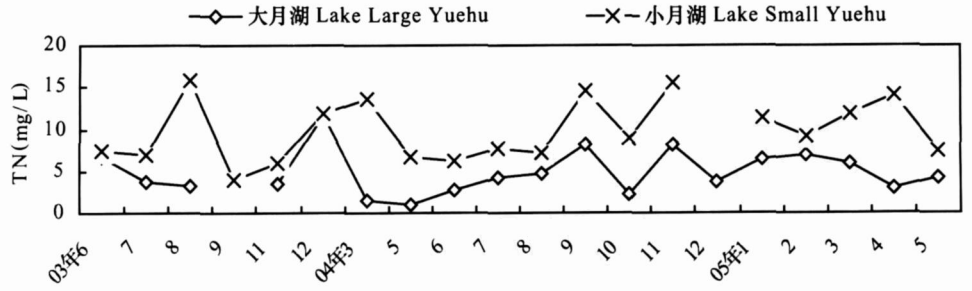



图 2 大、小月湖总氮浓度的变化

Fig. 2 Changes of total nitrogen concentration in Lake Large and Small Yuehu

**4.3.2 TP的变化**

大月湖和小月湖在监测期间 TP浓度的平均值分别为 0.467和 0.49mg/L。仍大于国家 V类水标准,小月湖的浓度略高于大月湖。由图 3可知,在 2004年 7—9月和 2005年 4月大月湖的 TP浓度大于小月湖,其他时间,大月湖的浓度小于小月湖。2004年 7—9月大月湖水华时常发生,而小月湖则无;2005年 3、4月,小月湖的水生植物增长明显快于大月湖,3号湿地出水的 TP浓度与湖水的平均值相比也不高(3月份湿地进出水 TP浓度分别为 1.01和 0.367mg/L),这可能是产生这些差异的主要原因。

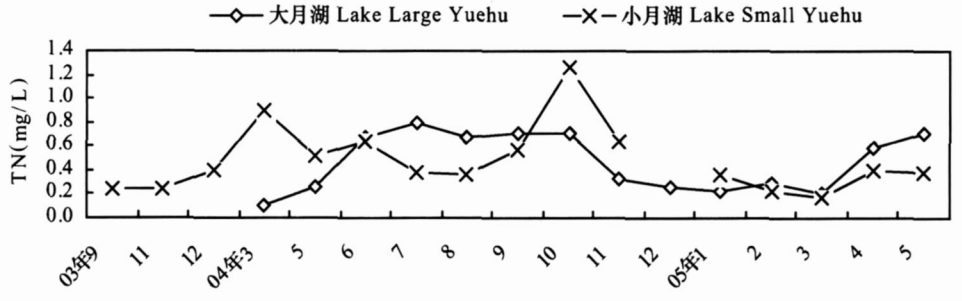



图 3 大、小月湖总磷浓度的变化

Fig. 3 Changes of total phosphorus concentration in Lake Large and Small Yuehu

**4.3.3 Chl a的变化**

大、小月湖 Chl *a*含量的平均值分别为 34.2和 48.7μg/L。由图 4可知,多数月份小湖的值高于大湖。大湖自 2004年 11月至次年 5月 Chl *a*含量一直很低。

**4.3.4 SD的变化**

大、小月湖 SD的平均值分别为 62和 49cm。在 2004年 10月以前,多数月份大、小湖之间的 SD差别不大,2004年 6—8月期间,小湖的 SD高于大湖,这与当时大湖经常出现水华有关;2004年 11月后,大湖的 SD明显提高(4月明显降低),小湖的波动很大,趋势在提高(图 5)。

**4.3.5 浮游生物的变动**

浮游植物和浮游动物的群落结构随着季节的变化而改变,夏季两者的密度和生物量均最大,冬季最少(浮游动物的生物量在秋季最少)。随着鱼类的逐渐清除和沉水植被的重建,浮游植物与浮游动物的密度比和生物量比值均趋向减小,生物量比值在

2005年 1月和 4月突然降到了很低的水平 (表 4),说明浮游动物相对增加了,这可能与鱼类的清除和植被的重建有关,与同期 Chl *a*的含量明显减少、SD明显增加的现象相吻合。

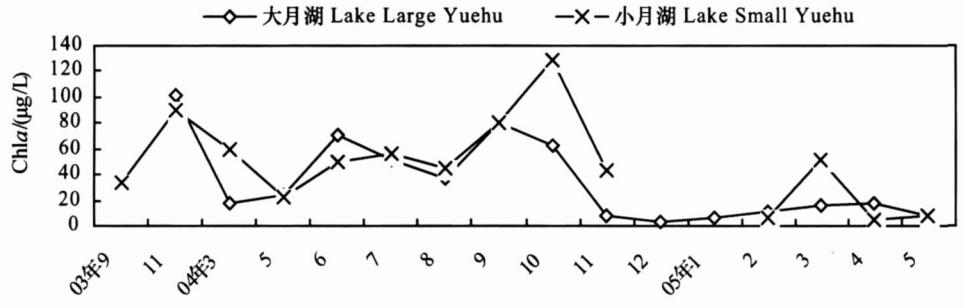



图 4　大、小月湖 Chl *a* 含量的变化

Fig. 4　Changes of Chl *a* concentration in Lake Large and Small Yuehu

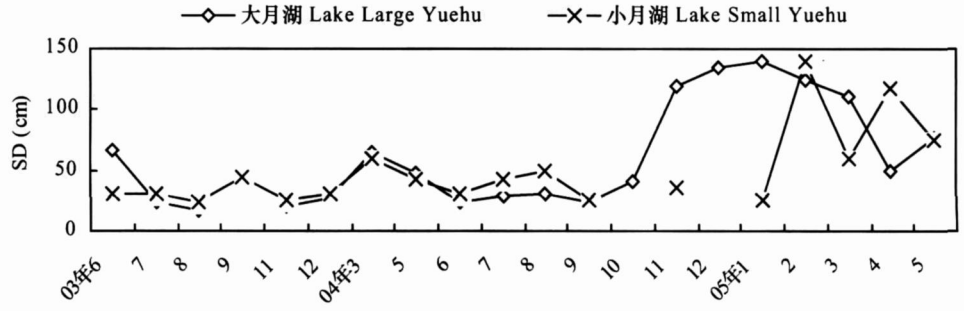



图 5　大、小月湖透明度的变化

Fig. 5　Changes of SD in Lake Large and Small Yuehu

**表 4　2004年春季到 2005年春季大月湖浮游生物动态 (湖心样点)**

Tab. 4　Changes of density rate and biomass rate of phytoplankton to zooplankton in Lake Large Yuehu (Spring, 2004-Spring, 2005)

| 采样时间 Time | 2004年 3月 | 2004年 8月 | 2004年 11月 | 2005年 1月 | 2005年 4月 |
|---|---|---|---|---|---|
| 密度比 (植物/动物) $D_p/D_z$ | 18.1 | 788.3 | 1846.2 | 329.1 | 377.8 |
| 生物量比 (植物/动物) $B_p/B_z$ | 0.047 | 0.758 | 0.274 | 0.025 | 0.023 |

## 5　讨　论

Scheffer, *et al.* 报道[8],在 0.25mg/L 以内的磷负荷下,浅水湖泊可以通过沉水植物固定营养物而维持清洁状态,高于此浓度,浮游植物将会占据优势。在月湖的水生植被重建中,大、小月湖的磷浓度均明显高于 0.25mg/L,但其沉水植被的重建获得了初步的成功, Chl *a* 含量处于较低水平,从外观来看,水色由过去的绿色,变成了基本无色的状态,尤其是月湖西部的狭长区域,重建植被前水色很绿,2005年春季水色近无色 (2004年和 2005年春季的透明度分别为 45cm 和 70cm),即浮游植物得到了有效控制。这是生物操纵技术的应用效果。这种结果是否意味着需要调整 0.25mg/L 这个磷浓度呢?这需要从两个方面认识这个问题: (1)月湖此时的水生植被重建属于初步阶段,植物多样性小,结构尚不稳定,能维持多久尚待观察; (2)我国的浅水湖泊富营养化与欧洲和北美国家相比,具有氮磷浓度高、污染严重等特点, Scheffer, *et al.* 的研究结论是否具有普适性 (如不同纬度的湖泊是否都如此等)也是需要进一步验证的。

有研究显示,生物操纵必须在一定的营养负荷内才能获得较好的效果,磷的浓度要在 0.05—0.15mg/L 范围,否则难以成功[9]。2004年 11月以后,大月湖水质 (主要是透明度)的迅速好转,生物操纵机制在其中起了重要作用。自 2004年 3月后,月湖中的捕鱼活动持续不断,这无疑会减轻甚至消除对浮游动物的捕食压力,从表 4可知,随着鱼类的减少,浮游植物/浮游动物的生物量比值有减小趋势。另外,季节的更替恰好到了藻类较少、水华不易

爆发的冬季,所以促成了水质的好转。此外,清除大部分鱼类可以减少由于鱼的扰动而引起的沉积物的再悬浮,同时也减少了对沉水植物的干扰和破坏,对提高透明度有贡献。荷兰浅水湖泊的生态修复实践也证明:在浅水湖泊,以消减鱼类为主的生物操纵技术是可行的,是能够提高透明度的[10]。当然,其他因素如凤眼莲的大量生长并被捞出等对此也是有益的。但是,月湖的磷浓度远远高于上述范围,如果说月湖的生物操纵取得了初步成效,那么,这种成效有两个条件:一是要在适当的季节(冬季),二是要靠建立水生植被维持。

在水生植物生长良好的春季,水中的 TN、TP浓度未见明显下降,可能的原因是:月湖仍未完全截污,每天仍有数千吨的污水进入,抵消了植物对营养盐的吸收;根据月湖一年的氮磷输入量(排入污水等)和输出量(植物固定、湿地去除、出水和捕鱼带出等)的粗略估算,总氮和总磷的输入与输出差分别为 9.6t和 0.96t,如此水中的氮磷浓度不可能下降。由此来看,水体生态修复必须在截污的前提下,才可能达到降低水中氮磷浓度的目的。

根据水生植被重建过程中水质和植物生物量的变化,以及工程实践中的经验,总体上看,单纯的水中氮磷浓度高,尚不是限制植物恢复重建的关键因子,而透明度和底泥状况(特别是厌氧程度)则显得更加重要。植被重建后,对透明度和叶绿素含量的影响相对明显,而在底泥营养负荷高、没有完全截污时,对水中氮磷浓度的降低则不明显。

冬季和初春一般是湖泊水位最低、透明度较高的时期,最适合沉水植物的种植,但对多数植物而言,却不是合适的种植季节。伊乐藻是喜冷性植物,耐污性强,繁殖快,适合冬春季种植。这为富营养水体的植被重建提供了一条有效之路。但其生态安全性需要注意。由于伊乐藻在长江中下游湖泊中有不易度夏的问题,以及缺乏有性繁殖机制,其扩张性和竞争性受到严重削弱,从我国引进已 20余年的情况看,其危害性尚不明显。作者认为,在其生态安全性尚未有定论以前,可以把种植伊乐藻作为一种先期改善水质的手段,而不要把它作为恢复和重建水生植被的目的,一旦建立起了水生植被,就要逐步用本土种替代它。

总结月湖沉水植被重建成功的主要经验,在工程思路上是先通过生物操纵、植物浮床、人工湿地、人工水草、底泥改良、截污等措施改善水质,之后种植植物;在技术路线上,先从浅水区开始,并且选择透明度较高的冬季种植植物,由点到面,多点突破;在种植策略和底泥改良方面有所创新。

## 6 结 论

在重富营养化的浅水湖泊,通过生物操纵、原位和旁路净化、稳定水位、科学种植等手段是可以重建其沉水植被的。截污、稳定水位、清除鱼类是重建沉水植被的重要条件。在低水位或较高透明度时,水生植物可以耐受相对更高一些的污染负荷。

利用冬季水位低、透明度相对高的时机种植伊乐藻、菹草等适合冬春季生长的沉水植物是建立先锋沉水植物群落的一个有效途径。在有条件降低水位时,将会大大增加重建沉水植被的成功率。

清除鱼类,对提高透明度有重要作用。一方面是利用其生物操纵的下行效应,另一方面是可以减轻对水体的扰动,减少沉积物的再悬浮。通过生物操纵去控制藻类生物量,从而为大型植物的恢复创造条件是一个有效方法,但必须伴随着水生植被的恢复或重建才能维持长久的良好效果。

重建并保持长期稳定的水生植被必须把营养盐浓度削减到一定范围内。沉水植被重建后,降低了 Chl *a* 含量,提高了透明度,但在没有完全截污的情况下,难以降低氮磷浓度。

植被恢复和重建期植物群落最脆弱、结构最不稳定,所形成的生态系统也是最脆弱的时期,水位、污染负荷等生态因子的明显改变很容易造成系统破坏,浮萍等植物易爆发。因此,在该期要尽量保持关键因子的稳定,注意控制浮萍的扩张,使形成的生态系统逐步走向成熟。

**致谢**:

月湖的沉积物分析数据由中国科学院水生生物研究所周易勇研究员提供,特此致谢。

**参考文献**:

[1] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from the eutrophication of shallow lakes which aquatic plant communities are important components [J]. *Hydrobiologia*, 1991, **200/201**: 367—377

[2] Chen H D, Wen Z R. The first successful case in China in restoration aquatic vegetation with large scale in Lake to develop aquiculture of special and excellent breed [J]. *Fisher Guide to be Rich*, 1998, (6): 8 [陈洪达,温周瑞. 我国首例湖泊大面积恢复水草发展名特水产养殖模式试验成功. 渔业致富指南, 1998, (6): 8]

[3] Tu Q Y, Zhang Y T, Yang X Z Approaches to the ecological recovery engineering in Lake Shichahai, Beijing [J]. *Journal of*

*Lake Science*, 2004, **16**(1): 61—66 [屠清瑛,章永泰,杨贤智. 北京什刹海生态修复试验工程. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 61—66]

[4] Chen F, Xia Z Y, Song C L, *et al* Relationships between organic matter in sediments and internal nutrient loadings in shallow lakes in Hubei Province of China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(4): 467—472 [陈芳,夏卓英,宋春雷,等. 湖北省若干浅水湖泊沉积物有机质与富营养化的关系. 水生生物学报, 2007, **31**(4): 467—472]

[5] State Environmental Protection Administration of China. Assay methods for water and waster water (the third edition) [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press. 1989 [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第三版). 北京:中国环境科学出版社. 1989]

[6] Cui X H, Zhong Y, Li W, *et al* The effect of catastrophic flood on biomass and density of three dominant aquatic plant species in the Poyang Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**(4): 322—325 [崔心红,钟扬,李伟,等. 特大洪水对鄱阳湖水生植物三个优势种的影响. 水生生物学报, 2000, **24**(4): 322—325]

[7] Ma J M, He F, Cheng S P, *et al* Practice of Establishing Aquatic Vegetation in Lake Lianhuahu in Wuhan, China [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2007, **25**(5): 473—478 [马剑敏,贺锋,成水平,等. 武汉莲花湖水生植被重建的实践与启示. 武汉植物学研究, 2007, **25**(5): 473—478]

[8] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, *et al* Catastrophic shifts in ecosystems [J]. *Nature*, 2001, **413**: 591—596

[9] Mitsch W J and JΦrgensen S E. Ecological engineering and ecosystem restoration [M]. New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. 2004, 105—124

[10] Song G J, Wang Y N. Practice on ecological restoration of shallow lakes in the Netherlands [J]. *Shanghai Environmental Science*, 2003, **22**(5): 346—348 [宋国君,王亚男. 荷兰浅水湖的生态恢复实践. 上海环境科学, 2003, **22**(5): 346—348]

# PRACTICE AND IMPLICATION OF ESTABLISHING AQUATIC VEGETATION IN LAKE YUEHU IN WUHAN, CHINA

MA Jian-Min[1], CHENG Shui-Ping[2], HE Feng[2], ZUO Jin-Cheng[2], ZHAO Qiang[2], ZHANG Zheng[2], WU Juan[2] and WU Zhen-Bin[2]

(1. *Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang* 453007, *China*; 2. *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430072, *China*)

**Abstract:** Lake Yuehu locates in Wuhan city, which is in the middle reach of the Yangtze River. It is a small (0.66 km$^2$) and shallow hypereutrophic lake, consists of Lake Small Yuehu and Lake Large Yuehu. The water quality of the lake was worse than Class Five (a water quality standard of China). Pioneer submersed plant community dominated by *Potamogeton crispus* and *Elodea nuttallii* was established within 2—3 years by the help of biomanipulation, purification of water with floating-leaved plants and plant floating islands in the lake, purification with wetland on the bank, transplantation of submersed plants and so on. In the spring of 2005, the coverage of submersed vegetation was 45%. Transparence of the water was improved markedly. It was an effective way to establish pioneer submersed plant community by transplant *Potamogeton crispus* and *Elodea nuttallii* in winter when water level was lower and its transparence was higher than other seasons of a year. In the hypereutrophic water body, low transparence was the key factor limiting to rebuild submersed vegetation. When water level was lower or transparence was higher, aquatic plants could resist pollution more. If water level could be lowered, the effort to rebuild submersed vegetation would be more successful. To rebuild and maintain the vegetation, sewage interception was necessary, and the concentrations of nutrients in the water, such as nitrogen and phosphorous, must be reduced to some extent. The newly rebuilt plant community was the weakest. Intensive fluctuations of some major environmental factors, such as water level, pollution load and so on, could easily destroy the plant community. Therefore, in this period, it was necessary to keep these factors steady and to prevent outspreading of duckweed. It was effective to improve the water transparence by fish clear along with aquatic vegetation restoration.

**Key words:** Lake Yuehu; Establishing aquatic vegetation; Pioneer plant community; Biomanipulation