

浅型富营养湖泊的生态恢复

——五里湖水生植被重建实验

李文朝

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要 依据浅型湖泊生态系统的多稳定态理论,在富营养湖泊治理过程中,当外来污染得到有效控制时,通过人工重建水生植被可以加速湖泊的生态恢复。在五里湖中,挺水植物和浮叶植物都能很好地生长,水底光照不足是沉水植物难以生长的主要原因。在自然条件下建成了永久性挺水植物群落和浮叶植物群落,在人工控制的围隔环境中改善了水底光照条件,建成了沉水植物群落。但这些沉水植物仍不能渡过夏季,主要原因是湖水过深和水温较高,降低水位和建造人工浅滩可为五里湖沉水植被恢复创造有利条件。本研究可为富营养水体的水质控制和植被恢复提供多种实用技术,但在水生植被的结构与环境功能等方面仍需开展深入的定量研究。

关键词 五里湖 浅型湖泊 富营养化 生态恢复 水生植被

浅型湖泊是一类脆弱的生态系统,它具有较低的污染负荷能力^[1]。受人类干扰较轻的浅型湖泊多以大型水生植物占统治地位,它能有效地抑制风浪和藻类,促进营养物质的沉积,降低湖水的营养物含量,提高湖泊的污染自净能力^[2]。人为的破坏和污染使得许多浅型湖泊失去了水生植被的保护,风浪的强烈搅拌引起沉积物的严重侵蚀和营养物释放,导致了迅速的富营养化,这是浅型湖泊富营养化的普遍特征^[3,4]。在同等的外部污染条件下,良好的水生植被可以使浅型湖泊保持清新的水质和较低的营养水平,而水生植被的丧失能使湖水污浊并跃居较高的营养水平^[4,5],导致浮游藻类的大量生长,这就是浅型湖泊的多态现象。荷兰的 Harry Hoser^[6]、Marten Scheffer^[5]及英国的 Brian Moss^[4]在研究浅型富营养湖泊的生态恢复时发现了这种多态现象。

浅型湖泊的富营养化是一个不可逆过程,即使内、外污染源得到了有效控制,湖泊内的自然生态恢复仍然要经历漫长的过程^[4-7]。采取适当的生态工程措施可以加快恢复速度,人工协助下的水生植被重建有可能在较高的营养水平上实现向以大型水生植物占统治地位的清水状态的跃变。为了探索在富营养湖泊中重建水生植被的可能性和技术手段,在五里湖进行了富营养湖泊水生植被恢复实验。本文是对这项研究工作主要成果的总结,详细的单项研究成果见另文^[8-12]。

1 浅型富营养湖泊水生植被恢复的理论依据——多态理论

生态系统的多平衡态(Multiple equilibria)特性已为许多生态学家所认识^[13]。他们认为,有些生态系统存在着不止一个稳定状态(Stable states),这就有可能引起生态系统对连续变化的外部压力的跳跃式或突变式反应。荷兰的 Hoser 等在研究小型浅水富营养湖泊的治理

时发现,在同一营养水平时有可能存在浊水和清水两种状态^[14,15],过多的底栖性鱼类和植物食性鱼类是妨碍湖泊由浊水状态向清水状态转变的障碍。在对这些鱼类实施高强度捕捞之后,促进了水生植被的恢复,成功地实现了清水状态。Scheffer 对这一现象进行了总结,在分析研究这些湖泊内湖水的营养水平、湖水浊度、沉水植被多度、食鱼性鱼类的多度、底栖性和植物食性鱼类的多度五个状态变量之间关系的基础上,提出了高度简化的多态模型——杯中弹子模型^[5](图 1)。

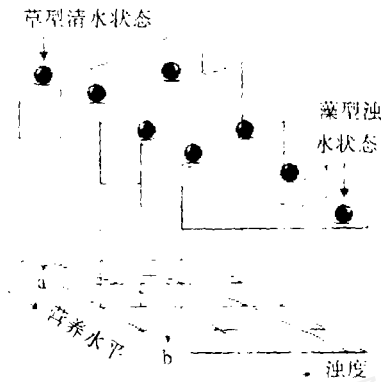


图 1 浅型湖泊生态系统多态现象的“杯中弹子模型”
Fig. 1 The “Marble-in-a-cup” model of multiplicity of stable states in shallow lakes

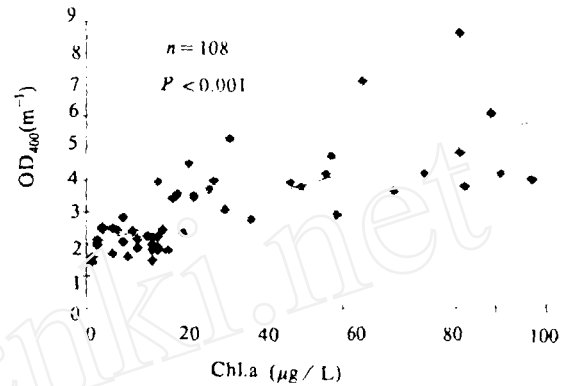


图 2 五里湖湖水的消光系数 OD₄₉₀ 与 Chl.a 含量的线性关系
Fig. 2 Linear relationship between Chl.a concentration and OD value of the water in Wuli Lake

我国的小型浅水湖泊与欧洲同类湖泊的区别是其高强度的渔业生产,所有鱼类的群体数量都在严格的人为控制之下,水质浑浊主要是由浮游藻类及其有机残体所引起(图 2)。因此,当湖水处在较低营养水平时,湖水必然清澈,只存在一种状态——草型清水状态,60 年代以前我国绝大多数小型浅水湖泊处于这种状态^[16,17]。

当湖水处在较高营养水平时,就会出现多态现象——草型清水状态或藻型浊水状态。不

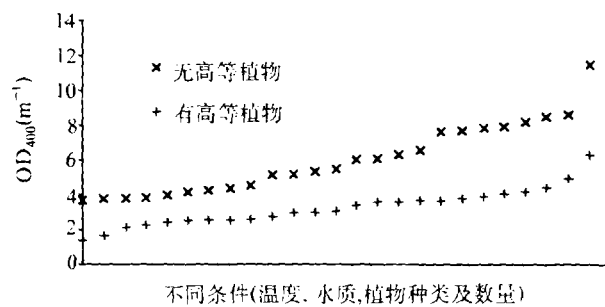


图 3 围隔对比实验中高等植物对湖水消光系数的影响
($1 < TN < 12\text{mg/L}$, $50 < TP < 350\text{mg/m}^3$)
Fig. 3 The effects of macrophyte on OD value of the lake water in the enclosure experiment

论是高等植物还是藻类,都有可能在这种营养条件下形成优势;当出现任何一类植物的优势时,都能使生境条件向着有利于自身而不利于对方的方向发展,藻类与高等植物间这种排斥极化特性是多态现象存在的根本原因^[5,6]。这种多态现象可以在较宽的营养水平范围内存在,五里湖围隔对比实验中(图 3)沉水高等植物控制的清水状态甚至在湖水中 TN 大于 10mg/L 、TP 大于 300mg/m^3 的情况下仍能出现(虽不能常年持续)。

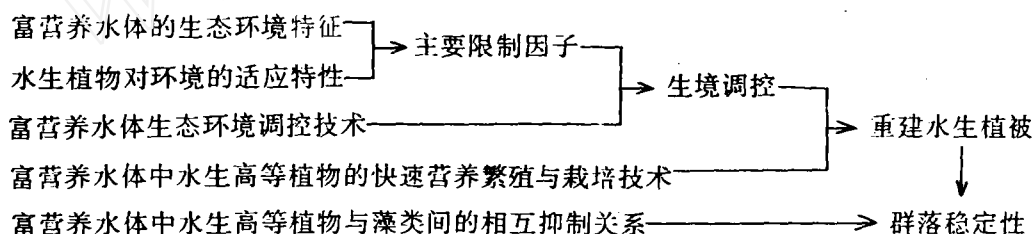
浅水湖泊生态系统的多态特性对于湖泊的生态管理具有十分重要的意义。在仍保留着良好水生植被的浅水湖泊中,精心保护和利用水生植物资源可以强化它们的环境生态功能,防止富营养化;在已经发生了富营养化的浅水湖泊中,当外污染源和湖内一切有碍水生植物生存的人为因素得到有效控制之后,就有可能重建水生植被,实现由藻型浊水的富营养状态向草型清水的中营养状态的跃变,达到生态恢复的目的。

2 研究内容和方法

2.1 研究内容与技术路线

本课题为一项探索性的基础研究,涉及到植物学、植物栽培学、植物生态学、湖泊学、环境工程技术等学科。它包括5方面的基本内容:富营养水体的生态环境特征研究;水生植物对富营养水体生态环境的适应性研究;富营养水体生态环境调控技术研究;富营养水体中水生高等植物的快速营养繁殖与栽培技术研究;富营养水体中水生高等植物与藻类间的相互竞争关系研究。在更高层次上,还包括主要限制因子的筛选、生境调控方案的制定与实施、水生植物群落的设计与组建、建成后水生植物群落稳定性和环境生态功能的测试等研究内容。

在富营养水体中,找出限制水生高等植物生存的主要环境因子,并研究对它们的人工控制技术,创造出适合水生高等植物生长的生态环境,这是重建水生植被的基础。掌握水生高等植物的快速营养繁殖与栽培技术,在短期内建立具有较大规模和密度的水生植物群落,形成相对于浮游藻类的竞争优势,达到较高的群落稳定性,这是成功地建立水生植被的关键。因此,可将本研究的技术路线归纳如下:



2.2 研究方法

本课题以实验生态学方法为主要研究手段,在太湖西北部的富营养湖湾——五里湖开展了各种规模的实验研究(图4)。同时,就太湖水生植物的营养繁殖特性和生态适应性作了调查研究(表1)。

3 主要研究结果

3.1 五里湖的生态环境特征

早在50年代,五里湖是太湖的一个小湖湾,面积10.139km²,平均水深1.5m,全湖水生植被发育良好,湖水清澈见底,水质为中营养水平。浮游藻类受到水生高等植物的强烈抑制,年平均数量为26.7×10⁴个/L。鱼类及大型底栖动物资源丰富,以凶猛性鱼类和虾、螺、蚌类占优势^[16]。

自50年代以来,占总湖面1/2左右的沿岸带被围垦,失去了最适合大型水生植物生长

表1 研究方法 with 内容
Tab.1 Research content and method

研究方法	研究内容
调查研究	(1) 太湖水生高等植物的自然营养繁殖方式、繁殖力及发育节律; (2) 太湖水生高等植物的环境适应性; (3) 五里湖现存湖泊生态环境及水生植被
定期检测	五里湖水质、底质及浮游生物现状及演变趋势
2000m ² 防鱼围隔实验	(1) 挺水植物营养繁殖与栽培、建立挺水植物群落; (2) 浮叶植物营养繁殖与栽培、建立浮叶植物群落; (3) 浅水区沉水植物营养繁殖与栽培
2000m ² 半封闭式围隔实验	(1) 局部水质与生态环境控制; (2) 沉水植物快速营养繁殖与栽培、建立沉水植物群落; (3) 沉水植物群落和浮叶植物群落稳定性测试; (4) 沉水植物与浮叶植物的无间断更替(人工常绿植被)
200m ² 半封闭式围隔实验	(1) 局部水质与生态环境控制、建立沉水植物群落; (2) 沉水植物与漂浮植物的无间断更替(人工常绿植被)
25m ² 半封闭式围隔实验	(1) 水生高等植物与藻类相互竞争关系; (2) 各种沉水植物的快速营养繁殖与栽培
盆栽实验	(1) 沉水植物快速营养繁殖与栽培; (2) 沉水植物的光需求
原位氧代谢测定实验	(1) 沉水植物的光需求; (2) 沉水植物与浮游藻类间的光竞争
室内栽培实验	(1) 沉水植物的自然营养繁殖方式及发育节律; (2) 沉水植物的抑藻机制; (3) 沉水植物对富营养水体中底质的适应性

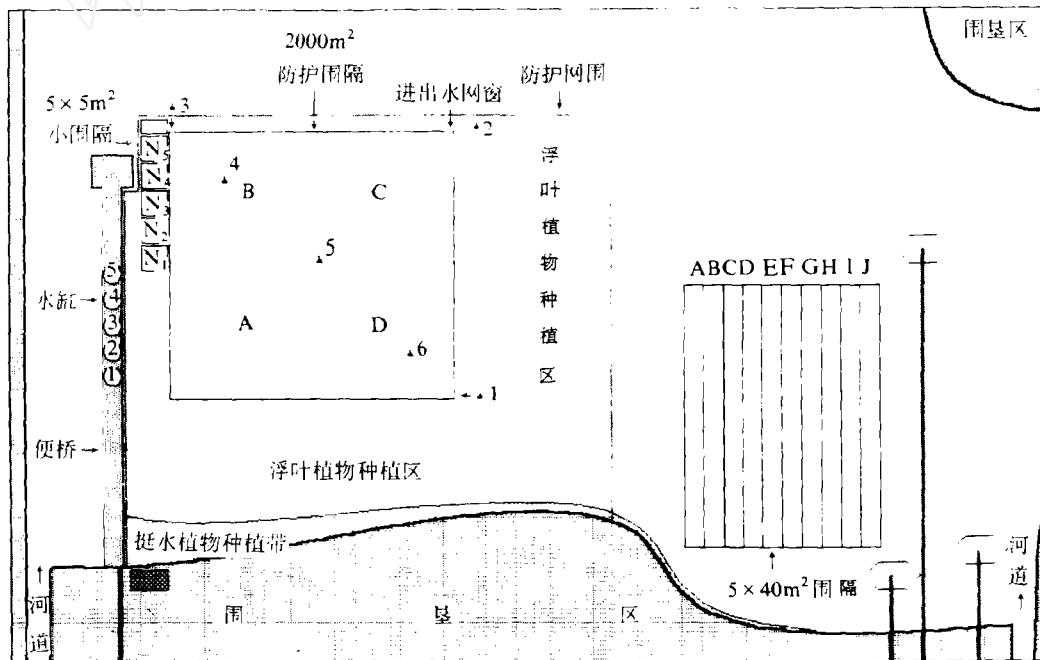


图4 五里湖实验区示意图

Fig. 4 The experimental spot in Wuli Lake

的浅水区生态环境。加之 60 年代后期在全湖放养草鱼,水生植被遭严重破坏。围垦和修建水闸隔断了五里湖与太湖间的通道,限制了二水体间的水流交换,妨碍了污染物的稀释扩散,在日益加剧的外来污染作用下发生了严重的富营养化。1992 年水质已达重富营养水平,透明度小于 0.5m,缺氧较为严重。营养物在底泥中大量积累,TP 和 TOC 含量分别增高了 4.17 倍和 1.87 倍,在春末夏初,由于底泥中污染物的释放而引起水质严重污染。夏季高温期底泥处于厌氧状态,氧化还原电位很低。浮游藻类大量繁殖,年均数量达 4.174×10^4 个/L,是 1951 年的 156 倍,蓝藻水华极为严重。凶猛性鱼类和大型底栖动物基本消失,全湖放养鲢、鳙鱼^[8]。

3.2 水生高等植物对富营养水体生态环境的适应性

挺水植物芦苇、茭草及香蒲完全可以适应五里湖的富营养水质和底质条件,能够在水深小于 1m 的任何底质上生长。但由于围垦,湖周浅滩环境已被破坏,在人工湖岸外仅有 1—3m 的狭窄浅水带,且大多由建筑垃圾堆积而成,生态条件对挺水植物生长十分不利^[1]。

浮叶植物菱也能很好地适应五里湖的环境条件,不仅插蒴菱秧可以成活,播种菱种也能出苗,用这两种方式繁殖的菱苗均能正常生长发育和结实。由于菱盘漂浮在水面,其生长不受湖水深度和透明度的影响。菱较为耐污,它几乎不受水质的影响,肥沃的淤泥为它提供了丰富的营养^[9]。

五里湖水深一般在 1.5m 以上,但湖水透明度很差,水底相对光照强度小于 1%。沉水植物生存所需的最低光照条件为 5% 左右^[12],满足这一光照条件的水深不大于 0.5m。五里湖的年水位变幅一般在 1m 以上,在夏季高水位期水深小于 0.5m 的浅水环境是不存在的。因此,沉水植物无法适应五里湖的水环境条件。在人工控制条件下将湖底相对光照强度提高到 5% 以上时,各种沉水植物均能适应这样的环境条件,形成发育良好的单种种群群落。但在夏季高温、高水位期,沉水植物还不能将水质控制在适合自己生存的范围内。在人工控制水质的情况下沉水植物虽能生长,但无法实现自然再生。故大多数沉水植物在五里湖不能渡过夏季,常因底层缺光、缺氧而发生烂根^[12]。

3.3 富营养水体生态环境的调控

在五里湖这样的富营养水体中重建水生植被,必须对其生态环境实施有效的控制和改造。除了对污染源和人类活动的控制外,降低水位、开挖表层淤泥、再造沿岸带浅滩环境等均有助于创造适合水生植物生长的生态环境。在小规模的模拟实验,无法施行水位控制和湖底改造,而是从另一方面开展了局部湖区生态环境的人工调控,取得了预期的成果。

建立半封闭式无底围隔,对面积为 2000m² 的实验区实施内、外水流交换控制,目的在于防止外部污染物进入实验区。由于五里湖水水位变幅较大,围隔为软体结构,围隔内外的水位必须保持一致,围隔壁上留有 3 处网窗以便涨落水时水流出入。在这样的控制条件下,通过种植浮叶植物和漂浮植物,有效地改善了实验区的水质,将透明度稳定地控制在 1m 以上,创造出了适合沉水植物生长的生态环境(图 5)。另外,在 5 个 25m² 围隔和 4 个 200m² 围隔中均实现了有效的水质控制。实验证明,围隔技术与水质生物净化技术相结合,是富营养水体中局部性水质控制的有效手段,它将成为重建水生植被的重要设施。

3.4 富营养水体中水生高等植物的快速营养繁殖技术

大多数水生高等植物均具备很强的营养繁殖能力,在水底光照不足和缺乏氧气供给的

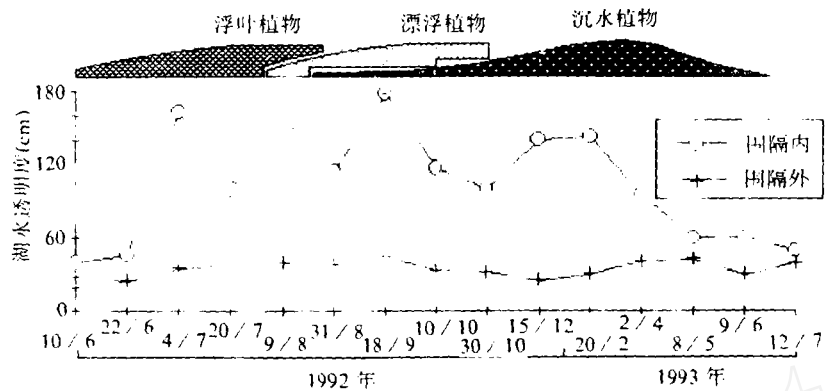


图5 2000m²实验区内湖水透明度的生物控制效果

Fig. 5 The effect of macrophyte on water transparency in the 2000m² experimental enclosure

富营养水体中, 种子繁殖的可能性很小, 营养繁殖为重建水生植被提供了有效的技术手段^[10]。芦苇、茭草、香蒲等挺水植物大都为宿根性多年生植物, 有发达的根状茎和依赖于根状茎的营养繁殖能力, 春季进行分苗移栽取得很好的营养繁殖效果。菱具备种子繁殖和营养繁殖的双重本领, 播种菱种和移栽菱秧均易成活, 并能正常生长发育和结实。伊乐藻、黑藻和金鱼藻为1年生沉水植物, 插枝繁殖简便而有效, 适合大规模栽培, 且栽植季节长, 是重建沉水植被的首选种类。菹草在5—6月能形成大量的繁殖芽苞, 收集撒播这些芽苞是简单易行的栽培办法。苦草依靠地下块茎的营养繁殖能力十分有限, 微齿眼子菜和马来眼子菜凭借地下根状茎繁殖, 这3种植物栽培比较困难, 分苗移栽较为有效。

3.5 富营养水体中水生高等植物与藻类间的相互竞争关系

水生高等植物和藻类都是湖泊中的初级生产者, 它们共同拥有光照、矿质营养等资源, 相互之间存在着竞争关系。尤其是沉水植物, 它和浮游藻类共同生活在水面以下, 相互间的竞争更为激烈^[11]。

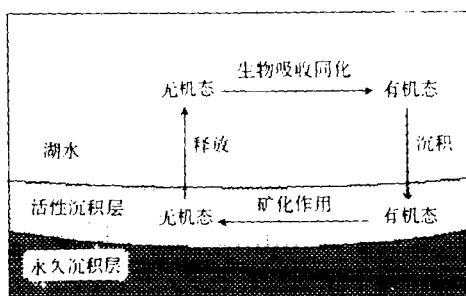


图6 湖水与底质间通过生物沉积和分解释放途径的矿质营养交换
Fig. 6 Mineral bio-nutrient exchange between lake water and sediment by bio-sedimentation and release

水生高等植物扎根在湖底, 主要从底泥中吸收矿质营养。而藻类则悬浮在湖水中, 只能从湖水中得到矿质营养。从表面上看二者之间似乎没有营养竞争, 但从湖泊学角度分析, 在湖水与底泥间存在着强烈营养物质交换(图6), 底泥是湖水中溶解态矿质营养物质的重要来源^[8]。底泥中溶解态矿质营养物质沿浓度梯度方向扩散进入湖水中, 通过水生高等植物的吸收作用可以降低底泥中溶解态矿质营养物质的浓度, 削弱由底泥向湖水的转移速度, 在一定程度上降低湖水中矿质营养物质的含量, 对藻类起到间接的营养竞争作用。在矿质营养的竞争方面, 水生高等植物占有绝对优势。伊

乐藻、黑藻、金鱼藻等沉水植物的根系很不发达, 它们的茎叶也能直接从湖水中吸收矿质营养, 大幅度降低湖水中矿质营养物质的含量, 对藻类的营养竞争更为显著^[11]。

在富营养水体中,藻类能捕获进入水中的光能,降低水下光照强度(图7)。在与藻类间的光资源竞争利用方面,挺水植物和浮叶植物处于绝对优势地位,而沉水植物与藻类间竞争最为激烈。挺水植物的大部分茎叶挺立在水面以上,能从大气层中截获光能。虽然从湖底新生出的枝条在长出水面之前处于水下,藻类的遮阴作用能影响其光环境。浮叶植物的主要光合器官——叶片的叶面直接暴露在空气中,可优先于藻类获得光能。但浮叶植物一般分布在湖水较深的湖区,从位于湖底的繁殖体萌发到第一片叶片伸长到水面,这一生长过程是在水下,直接受到藻类遮阴作用的影响。沉水植物完全处在水面以下,在与藻类的光竞争中处于相对劣势地位。沉水植物正常生长的最低光照条件是5%以上的相对光照强度(相对于水面上的光强),在五里湖中只有0.5m以内的浅水层中才具备这样的光照条件,而该湖的水深一般都在1.5m以上。所以,水下光照不足是沉水植物生长的主要限制因子,改善水下光照条件是重建沉水植被的首要任务。当沉水植物生长到较大的密度和高度时,其冠层处于较浅的水层,不仅能得到较好的光照条件,而且可通过其茎叶的遮阴作用抑制藻类的生长。在光照和营养充足的条件下,沉水植物还能向水中分泌某种生化物质,促使浮游藻类沉降。

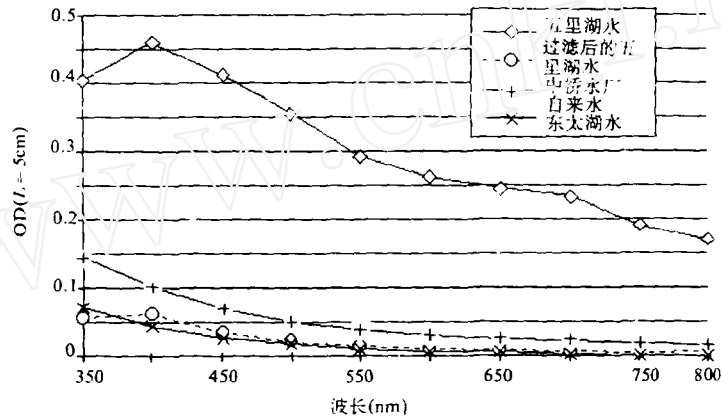


图7 1992年7月4日浮游藻类对五里湖水吸收光谱的影响

Fig. 7 Effect of phytoplankton on absorption spectrum of the lake water in Wuli L. on July 4, 1992

水生高等植物与藻类间的竞争受到温度的强烈影响^[11]。在20℃以下时,水生高等植物的抑藻能力较强,500g/m²的生物量就能获很好的抑藻效果。当水温超过20℃时沉水植物的抑藻能力急剧下降;高于30℃时沉水植物难以生存,而浮叶植物仍具有稳定的抑藻能力。

3.6 水生高等植物群落的组建

在五里湖自然和人工控制条件下先后组建成了挺水植物群落、浮叶植物群落和多种沉水植物群落(表2)。挺水植物群落覆盖沿岸带100m长的岸段,以茭草为主,有少量芦苇,自1992年5月建成后能够自然再生。在2000m²围隔区和网围区均建成过以菱为主的浮叶植物群落,群落发育状况优于野生群落,只是菱易受菱跳甲为害。沉水植物群落都是在围隔内人工控制条件下建成的,发育状况良好。伊乐藻和黑藻能生长过冬,除金鱼藻外,其它种类难以渡过夏季高温期。

3.7 群落稳定性检验

水生高等植物群落的稳定性是指群落对外来干扰的承受能力。这里的群落稳定性检验

表2 1992—1995年五里湖水生植物群落组建实绩

Tab. 2 Aquatic plant communities set up in Wuli Lake from 1992 to 1995

群落类型	生态环境	群落面积(m ²)	优势种类	最大生物量(g/m ²)	生存时间
挺水植物群落	沿岸带自然环境	300	茭草	13000	1992年5月—
浮叶植物群落	围隔内自然环境	2000	菱	8800	1993年6—9月
浮叶植物群落	围隔内人工环境	2000	菱	9300	1992年6—9月
伊乐藻群落	围隔内人工环境	2000	伊乐藻、菹草	14000	1992年9月—1993年5月
伊乐藻群落	围隔内人工环境	4×200	伊乐藻	9700	1994年10月—1995年5月
菹草群落	围隔内人工环境	25	菹草	2600	1993年9月—1994年6月
黑藻群落	围隔内人工环境	25	黑藻	1700	1994年3—6月
金鱼藻群落	围隔内人工环境	25	金鱼藻		1994年5—8月
马来眼子菜群落	围隔内人工环境	25	马来眼子菜	1350	1994年3—6月

是用动态模拟方法检查群落对外来污染的承受能力,即用人工方法以特定的流量给实验区换水,检查湖水进入实验区后的水质变化和停止换水后实验区水质的恢复情况。先后对以下两个植物群落作了稳定性检验。

3.7.1 夏季浮叶植物群落 1992年7--8月对2000m²围隔中的菱群落进行了稳定性检验。以2.8天为换水周期用富营非的五里湖水连续替换出围隔中原有的水,对进水、出水及围隔中央的水定期采样分析。结果表明,随湖水进入围隔中的污染物的大部分被去除净化,对TP和Chl. a去除率达90%左右,对TN和消光物质的去除率超过50%,对COD的去除率也达到了38.4%。在10天的实验期中,围隔内承受的外来污染负荷为TN 15.9g/m²、TP 0.75g/m²、Chl. a 0.117g/m²。实验结束后,围隔内的水质在一周内基本恢复正常,而菱群落在实验前后几乎没有变化。这说明,菱群落具有较高的群落稳定性,对外来污染的冲击有很强的缓冲能力,能有效地控制群落内的水质,在局部性水质改造方面有较高的应用价值。

3.7.2 冬季沉水植物群落 1993年2月对2000m²围隔中的伊乐藻群落进行了稳定性检验,实验方法同上。实验结果,伊乐藻群落在水温低于10℃时仍表现出卓越的污染净化能力。在TP输入浓度高达457mg/m³的情况下去除率达到63.1%,对Chl. a和消光物质的去除率也分别达到了74.4%和64.2%,对TN和COD也有20%以上的去除率。在10天的实验期中,围隔内承受的外来污染负荷为TN 57.4g/m²、TP 2.285g/m²、Chl. a 0.182g/m²。实验结束一周后围隔内的水质基本恢复正常,伊乐藻表面附着物较多。在这样强烈的外来污染冲击下,伊乐藻群落表现出较高的稳定性,这种耐寒性植物在冬季水质保护方面有一定的应用价值。

菱和伊乐藻两种植物在季节上可以相互衔接,组成具有较高稳定性的常绿型人工植被,在水质保护上有较高的实用价值。沿岸带挺水植物在1993年经历了高水位的考验,最大水深达1.7m,没有出现明显的伤害。

4 成果与展望

本研究是在“富营养水体中的水质控制与水生植被恢复”这一研究领域里的初步探索,取得了一些进展,某些阶段性研究成果可供推广应用。但这仅仅是个开始,还有许多问题

需要深入研究。

4.1 可应用的研究成果

(1) 富营养水体中的水质控制技术。对于小型水体或大型水体中的局部水域,可实现周年控制,可用于水源保护及游览型水体的水质保护。

(2) 富营养水体中的挺水植被恢复技术。可实现永久性恢复。

(3) 富营养水体中的沉水植物快速营养繁殖与栽培技术。可用于浅型小水体的沉水植被恢复。

(4) 浅型富营养水体中的沉水植被恢复技术。可在水深不超过 1m 的浅水环境中恢复永久性沉水植被。

(5) 浅型富营养水体的生态恢复技术。包括水体内部生态环境改造、水质控制和水生植被恢复的方案设计与实施。

4.2 需要深入研究的问题

(1) 草型水体的营养盐负荷能力。水体的富营养化有一个逐渐的积累过程和最终的突变过程。草型水体具有永久性去除营养盐的能力,即通过生物吸收和收获输出、永久性沉积及分解转化(如硝酸盐氮通过反硝化途径转化成氮气)等途径使得营养盐离开水体,这一能力是有限的。当外来营养盐污染负荷超过草型水体永久性去除营养盐的能力时,水体中就会出现生物有效营养盐的积累,最终导致富营养化。研究草型水体的营养盐负荷能力,不论对于草型水体的富营养化预防还是富营养水体的水生植被恢复,都可作为外源污染限制量的依据。

(2) 沉水高等植物与藻类间的竞争及其与水深和湖水营养盐含量间的定量关系。研究这些定量关系,可以为水生植被恢复中的水位控制和水质控制提供依据。

(3) 水生植被的空间结构与时间更替模式及其与环境生态功能间的关系。在重建水生植被时,对水生植被的空间结构及时间更替的优化设计可提高其稳定性,增加成功的机会,易于实现永久性自然更替。

参 考 文 献

- 1 S E Jorgensen and R A Vollenweider. Guidelines of Lake Management, Vol 1: Principles of lake management. Tokyo: ILEC & UNEP Press. 1988
- 2 李文朝. 太湖湿地的生态功能与利用. 见: 陈宜瑜等著. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 191-201
- 3 金相灿等. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1990
- 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 Scheffer M. Multiplicity of stable states in freshwater systems. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**: 475-486
- 6 Hosper H and Marie-Louise Meijer. Biomanipulation, will it work for your lake? A simple test for the assessment of chances for clear water, following drastic fish-stock reduction in shallow, eutrophic lakes. *Ecological Engineering*, 1993, **2**: 63-72
- 7 Juha Keto and Ilkka Sammalkorpi. A fading recovery: a conceptual model for Lake Vesijarvi management and research. *Aqua Fennica*, 1988, **18**(2): 193-204
- 8 李文朝等. 五里湖营养化过程中生物及生态环境的演变. *湖泊科学*, 1996, **8**(增刊): 37-45

- 9 李文朝等. 五里湖底质条件与水生高等植物的适应性研究. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 30-36
- 10 连光华等. 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
- 11 杨清心. 富营养条件下沉水植物与浮游藻类相互抑制关系的研究. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 17-24
- 12 李文朝等. 几种沉水植物营养繁殖体萌发的光需求研究. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 25-29
- 13 May R M. Thresholds and break points in ecosystems with a multiplicity of stable states. *Nature*. 1977, **269**: 471-477
- 14 Hoser S H. Biomanipulation, new perspective for restoring shallow, eutrophic lakes in the Netherlands. *Hydrobiol Bull*, 1989, **23**: 5-11
- 15 Timms R M & B Moss. Prevention of growth of potential dense phytoplankton populations by zooplankton grazing in the presence of zooplanktivorous fish in a shallow wetland ecosystem. *Limnol Oceanogr*, 1989, **29**: 472-486
- 16 伍献文等. 五里湖 1951 年湖泊学调查. 水生生物学集刊, 1962, (1): 63-113
- 17 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

ECOLOGICAL RESTORATION OF SHALLOW, EUTROPHIC LAKES—EXPERIMENTAL STUDIES ON THE RECOVERY OF AQUATIC VEGETATION IN WULI LAKE

Li Wenchao

(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

According to the theory of multiple stable states of shallow lake ecosystems, it is possible to speed the ecological restoration process by recovering aquatic vegetation in eutrophic lakes. In Wuli Lake, both emerged plant and floating-leaved plant could adapt to the eutrophic habitat, but submerged plant was limited by low light intensity at the lake bottom. Permanent emerged plant community and floating-leaved plant community was built under natural conditions of Wuli Lake, and some submerged plant communities were set up in the enclosures where the water quality was improved and the underwater light intensity increased. The submerged plant community could not survive the summer for the high water temperature and high water level in the season. To make the habitat in Wuli Lake suitable to submerged plant, one possible way is to control the water level and build shallow littoral zone by moving the fertile mud from the center area to the littoral zone. In the present studies, some usable techniques have been mastered for water quality control and aquatic vegetation recovery in shallow eutrophic lakes, and more detailed quantitative studies were needed on the relationship of structure and environmental function of aquatic vegetation.

Key Words Wuli Lake, shallow lakes, eutrophication, ecological restoration, aquatic vegetation