

水生植被对富营养化湖泊生态恢复的作用^{*}

王海珍 陈德辉 王全喜 刘永定

(上海师范大学应用生态研究所, 中国科学院水生生物研究所)

* 科技部和云南省重点攻关项目

关键词 水生植被 富营养化 组建恢复

湖泊富营养化是指氮、磷等营养物质大量进入水体,浮游植物建立优势导致水生生态系统的结构破坏和功能异化的过程,它导致水体的溶氧下降、透明度降低、水质恶化、鱼类及其他生物大量死亡。据调查我国湖泊普遍受到 N、P 等营养物的污染,1996 年全国有 80 % 的湖泊总 N、总 P 超标,16 个被调查湖泊有 8 个耗氧有机物超标,且情况仍在恶化,湖泊的治理成了当务之急^[1]。治理湖泊的方法有物理方法如疏浚底泥、机械过滤、引水稀释等;化学方法如杀藻剂杀藻等;物化法如木炭吸附藻毒素等;生物方法如放养鱼等,均取得一定的成效。但是水生高等植物与藻类同处于初级生产者的地位,与藻类竞争营养、光照和生长空间等生态资源,所以水生植被组建及其恢复,对于富营养化水体的生态修复具有极其重要的地位和作用。

一、引言

在浅水湖泊中生长的大型水生植物,具有净化水质、保护生态环境、提供植物产品等生态功能。下面从大型水生植物对湖泊外源营养物质的吸收净化作用和对内源营养物质的净化及克藻效应等,来反映近期有关水生植物与湖泊环境之间关系的研究近况。

二、对外源营养物质的吸收净化作用

随着工农业生产的发展,大量未经处理的工业废水和生活污水排入湖内,引起了湖泊生态环境的恶化。如何净化工业废水和生活污水,是治理富营养化湖泊必须解决的问题,水生植物成了重要的研究对象。研究较多的是凤眼莲:利用凤眼莲处理生活污水、利用凤眼莲净化印染、造纸和石油化工等废水。多项研究表明,它对重金属具有极佳的富集能力,已被用于处理多种重金属、污染水体^[2]等。

另外,对水生植物构成的水陆交错带对陆源营养物质截流作用的研究^[3],如在白洋淀进行的野外实验,表明其湖周水陆交错带中的芦苇群落和群落间的小沟都能有效地截流陆源营养物质。其中,植被长 290 m 的小沟对地表径流总 N 的截流率是 42 %、对总 P 的截流率是 65 %,4 m 芦苇根区土壤对地表下径流总 N 的截流率是

64 %、对总 P 的截流率是 92 %,被截流比率最大的是无机态的正磷酸根态 P 和铵态氮。这说明了水生植物构成的湖周水陆交错带对营养物质的截流非常有效。还有以水生维管束植物为核心的氧化塘系统^[4],对净化工业废水,控制湖泊的点源污染,也取得了一定的成效。

三、对内源营养物质的吸收及克藻效应

1. 对内源营养物质的吸收

湖泊的富营养化,内源营养物质(如底泥 N、P)的释放是一个重要因素。因此,对内源营养物质的去除,也是不可忽略的。采用物理方法——疏浚底泥等,固然可行,但有不足之处,如大湖泊要花费很大的人力、物力,且淤泥的处理也是一个问题。利用大型水生植物竞争性地吸收内源营养,具有优先占领有利于高等水生植物优势的生态位,且易于实施、节省资金。

(1) 室内研究

关于菹草(*Potamogeton crispus*)对水中氮磷的吸收研究^[5]表明,菹草对水中氮磷的吸收与 pH、光照、水温等有关,在 pH 为 8.0~9.5,水温为 19~28 的条件下,水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度低于 0.35 mg/L 左右时,菹草茎叶优先吸收 $\text{NO}_3^- - \text{N}$;水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度大于 0.35 mg/L 左右时,菹草则优先吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,这一优先选择吸收与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

NO_3^-/N 比值无关. 在自然条件下, 菹草根部主要从底泥中吸收 NO_3^-/N 、 $\text{PO}_4^{3-}/\text{P}$, 对 NO_3^-/N 吸收甚微, 茎叶主要从水层中吸收 NO_3^-/N , 对 $\text{PO}_4^{3-}/\text{P}$ 吸收甚少. 另外实验测得凤眼莲每年每平方米可去除 BOD_5 42.82 kg、氮 9.92 kg、磷 2.94 kg. 其他研究的植物还有香蒲、浮萍等, 分别说明了水生植物吸收氮磷的生理特征. 室内研究定性、定量地反映了水生植物吸收营养物质的特点, 是野外研究的基础.

(2) 野外研究

在 20 世纪 90 年代中期研究了沉水植物在治理滇池草海污染中的作用^[6]. 论证了在滇池草海恢复沉水植被, 建立以沉水植物为基础的湖泊生态系统, 是利用水生植物治理草海的最佳防治措施.

20 世纪 90 年代后期利用大型围隔研究沉水植物对水体富营养化的影响^[7]. 其结果表明: 菹草的恢复, 使两个大型围隔中的各种营养盐水平都显著地低于围隔外围的湖水, 溶解氧浓度、pH 和透明度显著升高, 电导率明显下降, 水质得到了明显的改善. 这可能是因为菹草对水体中营养物质的吸收利用以及茎叶对水体悬浮物的吸附作用, 有效地降低了水体营养物的浓度和悬浮物的含量, 从而使水体透明度提高, 电导率降低. 另一方面, 可能是因为菹草的恢复在易受风浪涡流及低层鱼类扰动影响的底层, 形成了一道屏障, 使底泥中营养物溶出明显受到抑制. 而当围隔中的菹草被人工收割后导致的营养盐浓度的上升, 则可能主要是由于菹草的消失导致了底泥中营养盐溶出速度加快的缘故.

(3) 水稻净化水质的研究

河床水稻(水体浮床无土种植技术)对富营养化水体中氮磷的去除效应^[8], 以人工模拟池为试验场, 所在池内的富营养化水体表面(TN 和 TP 含量分别为 2.084 和 0.248 mg/L)种植水稻, 在收获农产品、美化水域景观的同时, 通过植物根系的吸收和吸附作用, 去除水体中的氮磷元素以实现变废为宝, 净化水体并使水体产生良性循环. 研究表明, 在水深 1.4 m 左右, 水面浮床覆盖率分别为 20%、40%、60%条件下, 通过水稻自分蘖至成熟历时 84 d 的处理, 对全池水体中 TN 的净去除率分别为 29.0%、49.8%、58.7%, TP 的净去除率分别为 32.1%、42.0%、49.1%. 另外, 还可在富营养化水域表面种植蔬菜、花卉等各种适宜的陆生植物. 这为建立浮床陆生植物净化富营养化水域提供科学依据, 打破水生维管束植物净化污水的局限, 进而扩展到陆生植物, 拓宽了净化富营养化水域的植物领域.

2. 大型水生植物对藻类的他感作用

湖泊水华(被人们称为湖泊的癌症)的发生, 又使人

们将大型水生植物的另一个作用——对藻类的他感作用进行了研究. 他感作用是指植物生长在一起存在着相互之间的作用, 分为两方面: 一方面是对环境因子如光、营养物质、生长空间的竞争; 另一方面是植物能够向环境中释放化学物质并对另一植物产生影响. 近几年高等水生植物对藻类的他感作用的研究, 发展得较快. 1949 年 Hasler 等人首次发现了水生植物对藻类的克制效应. Kogan 等对五刺金鱼藻进行了分析^[9], 特别指出它们对蓝藻有非常好的抑藻效果, 但对绿藻却无任何影响, 说明其克藻作用有一定的专一性. 近期国内的研究有: 凤眼莲对多种藻类有不同程度的克制作用^[10]; 水生植物水花生、水浮萍、满江红、紫菜和西洋菜对雷氏衣藻的相克相生的关系^[11], 并和水葫芦的作用进行了比较, 研究表明前五种水生植物对雷氏衣藻有克制作用, 但它们的克藻效能不如水葫芦强, 西洋菜没有克制作用, 甚至稍有促进效应. 另外还分别证明, 沉水植物金鱼藻^[12]、马来眼子菜^[13]和苦草^[14]对栅藻、月芽藻等藻类具有抑制作用. 通过比较发现不同的大型水生植物对藻有不同的效应, 同一大型水生植物对不同的藻类也有不同的作用, 并且大型水生植物的根分泌物有浓度效应, 即在不同的分泌物浓度下对藻有不同的他感结果.

大型水生植物对藻的克制效应, 从藻的细胞结构被破坏的角度来分析, 有凤眼莲根系分泌物对栅藻超微结构及生长代谢的影响^[15], 结果显示凤眼莲对栅藻有明显的克生作用, 当藻的数量逐渐减少时, 栅藻生长受到影响, 它的细胞叶绿体片层肿胀甚至解体, 线粒体嵴消失, 质膜、核膜受破坏, 光合放氧的速度明显下降, 可溶性蛋白的含量 4 天后直线下降, 超氧阴离子(O_2^-)、丙二醛(MDA)的含量上升, 峰值都出现在处理后第 6 天, 超氧化物歧化酶(SOD)活性和比活性有应激性升高, 但随处理天数的延长又呈急剧下降趋势, 过氧化物酶(POD)的活性则持续上升. 用培植石菖蒲的水培养藻类^[16], 可破坏藻类的叶绿素 a, 使其光合速率、细胞还原 TTC 能力显著下降; 在荧光显微镜下可看到藻细胞从鲜红色变为淡蓝色, 表明石菖蒲对藻类有显著的克制效果.

另外, 还进行了大型水生植物的提取液对藻效应的研究, 并对提取液进行分离、鉴定. 如: 荸荠属水草的提取液的克藻有效成分为二十碳的三羟基环戊基脂肪酸和十八碳的三羟基环戊烯酮脂肪酸^[17]. 该物质在低浓度下能刺激藻类的生长, 高浓度则有抑制作用, 它们对蓝藻抑制效果最为显著. 从石菖蒲提取的苯丙烷类化合物对绿藻、蓝绿藻有抑制作用等^[18], 说明了可以用大型水生植物克藻有效成分来治理小型湖泊藻类的大量繁殖.

四、水生植被的组建、恢复规划研究

基于大型水生植物的作用:水生植物是湖泊的初级生产者,吸收湖泊中的营养物质的同时,对藻类亦有他感作用,特别是抑制作用等。人们尝试水生植被的组建和恢复研究。

在20世纪70年代,国内外许多湖泊通过大量放养草鱼来消灭水生植物,以防止湖泊衰老;进入20世纪80年代以后,随着湖泊的普遍富营养化和随之而来的藻类水华的发生,人们对过去破坏水生植物的行为有所认识,20世纪90年代则进行富营养水体中组建和恢复水生植被的研究,并试图在已经丧失了水生植物的富营养水体中重建水生植被。

1. 水生植被组建及净化效果研究

1992~1993年在富营养湖泊五里湖中开展了常绿型水生植被组建实验^[19],在面积为2000 m²的半封闭式围隔区中,选用耐寒植物伊乐藻(*Elodea nuttallii*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、沉水植物和喜温植物菱(*Trapa spp.*)及凤眼莲(*Eichhonia crassipes*),组建成常绿型人工水生植被,形成了生长期和净化功能的季节性交替互补。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。它可用于污水净化和小型富营养化水体的生态恢复等。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。

前面提到的在白洋淀进行组建的湖周水陆交错带,是关于挺水植物等的组建效果试验,是大型水生植物组建的又一方面,其中的芦苇群落和群落间的小沟都能有效地截流陆源营养物质。

2. 水生植被的重建、恢复研究

水生植被的重建、恢复,不同于上述水生植被的组建的概念。它是指湖泊原有已被破坏的植被的重新恢复。相关的研究有五里湖水生植被重建实验、武汉东湖(水果湖、汤林湖和后湖)水生植被的恢复试验研究^[20]、滇池水生植被恢复规划研究^[21]等,取得一定成效。如:挺水植物莲(*Nelumbo nucifera*)和芦苇(*Phragmites communis*)、浮叶植物菱(*Trapa sp.*)和r-选择型的沉水植物苦草(*Vallisneria sp.*)、菹草(*Potamogeton crispus*)等在东湖水果湖、汤林湖和后湖三个水生植被恢复示范区均可以恢复。这说明了水生植被的组建、恢复是可行的。但是也存

在一些问题,如黄丝草(*Potamogeton maackianus*)、伊乐藻(*Elodea canadensis*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)等在后湖示范区可以恢复,在水果湖恢复未能成功,黑藻在汤林湖示范区也未能恢复,这些也说明了在重建、恢复水生植被时应考虑变化了的环境,同时也证明了水生植被组建的复杂性和艰巨性:不同于原有的水生植被可能更适于变化的环境。

五、水生植被对富营养化湖泊生态恢复的前景

综上所述,大型水生植物具有拦截外源营养、吸收富营养化湖泊中的氮磷元素的功能,某些植物的根茎能抑制底泥中营养物的释放,而在生长后期又能较方便地去除,带走湖泊中过多的营养物。另外,一些植物对藻类(包括形成水华的微囊藻)有抑制作用。因此水生植被的组建及其恢复正日益受到人们的关注。

但是水生高等植物的生理生态研究(如水生植物吸收氮磷的半饱和常数研究、高等水生植物对藻的抑制作用等)是水生植物组建和水生态恢复的基础,以达到水生生态系统功能恢复的最终目的。水生植被的恢复应该是一个循序渐进的过程。只有在研究了水深、透明度、悬浮物、光、底质和波浪等因素对大型水生植物的生长和分布的影响之后,并结合该湖景观方面因素,才能决定什么样的湖泊应种植什么类型的水生植物,湖内应如何组建水生植物群落等。

水体富营养化使水生生态系统的能量流动过程不彻底,在食物链的底部就发生了短路,直接进入非生物环境中,改变了水体中营养的生物地化循环途径,导致生态系统的群落结构的逆演替和自我调控功能的损失。蓝藻水华的大量发生使水体的透明度下降,水中光强急剧衰减,而使光线极少或不能到达底层,沉水植物便逐渐减少直至消失。沉水植被区的减少,导致溶氧下降,引起附植生物和着生动物的减少;最终致使水生生态系统的生物多样性下降。所以富营养化湖泊的生态恢复的重点是水生生态系统功能的恢复;尤其是水生高等植被的恢复,具有清淤固沙、净化水质、增加周丛生物和克制藻类大量繁殖等生态学效应,使系统内部的物质循环和能量流动处于动态平衡之中。

因此,富营养化湖泊水生植被恢复时应按功能划分:在浑浊的风浪地带,建立消浪带,种植速生型的漂浮植物或耐阴性的沉水植物;在净化区进行水生植被高密度种植;在小型湖泊可应用中盆景(在湖底放置可种植水生植物的花盆或构建一定形状的花盆架等)种植水

生植物;也可用水生植物的有效提取成分,来控制水华。总之以生态系统理论为基础,用生态工程方法作技术保证是今后富营养化湖泊水生植物群落组建和恢复研究的基本方向和出发点。

湖泊水生植被的恢复、组建在理论上是可行的,在实践上是可操作的,所以水生植被在控制并解决湖泊的富营养化方面具有光明的前景。(2001年4月25日收到)

王海珍 硕士研究生,上海师范大学应用生态研究所,上海 200234

陈德辉 副研究员,上海师范大学应用生态研究所,上海 200234

王全喜 教授,上海师范大学应用生态研究所,上海 200234

刘永定 研究员,中国科学院水生生物研究所,武汉 430072

- 1 王建华等. 农业环境与发展,1999;16(1):8-12
- 2 李宝林. 环境保护,1994;(6):32-33
- 3 尹澄清等. 应用生态学报,1995;6(1):76-80
- 4 丁树荣. 中国环境科学,1984;4(2):10-15
- 5 金送笛等. 生态学报,1994;14(2):168-173
- 6 黄文成. 植物资源与环境,1994;3(4):29-33
- 7 戴莽等. 水生生物学报,1999;23(2):97-101
- 8 宋祥甫等. 环境科学学报,1998;18(5):489-494
- 9 庄源益等. 环境科学进展,1995;3(6):44-49

- 10 孙文浩等. 环境科学学报,1989;9(2):188-195
- 11 俞子文等. 水生生物学报,1992;16(1):1-7
- 12 袁俊峰等. 生态学报,1993;13(1):45-50
- 13 陈坚等. 上海师范大学学报,1994;23(1):69-73
- 14 顾林娣等. 上海师范大学学报,1994;23(1):62-68
- 15 唐萍等. 环境科学学报,2000;20(3):335-339
- 16 何池全等. 生态学报,1999;(5):754-758
- 17 Van Aller R. T. et al. *American Chemical Society*. Washington D. C., 1985:337-386
- 18 Della G. M. et al. *Phytochemistry*,1990;29:1797-1798
- 19 李文朝. 中国环境科学,1997;17(1):53-57
- 20 邱东茹. 湖泊科学,1997;9(2):168-174
- 21 张秀敏. 云南环境科学,1998;17(3):38-40

The Effect of Aquatic Vegetation on Ecological Restoration of Eutrophication Lake

Wang Hai-zhen, Chen De-hui, Wang Quan-xi, Liu Yong-ding

Graduate Student, Associate Professor, Professor, Institute of Applied Ecology, Shanghai Teachers University, Shanghai 200234

Research Professor, Institute of Hydrobiology, CAS, Wuhan 430072

Key words aquatic vegetation, eutrophication, construction and restoration

原子力显微镜及其应用

刘小虹 颜肖慈 罗明道 李伟 (武汉大学化学与分子科学学院)

关键词 原子力显微镜 针尖 微悬臂 扫描探针显微镜

本文简要介绍了原子力显微镜的发展史,评述了原子力显微镜的工作原理、工作模式及技术,并对其在众多科研领域的应用以及所取得的成果作一概述。

一、基于 STM 概念上的 AFM 的发展概述

在当今的科学技术中,如何观察、测量、分析尺寸小于可见光波长的物体,是一个重要的研究方向。1933年德国 Ruska 和 Knoll 研制了第一台电子显微镜。继后,许多用于表面结构分析的现代仪器问世。如透射电子显微镜(TEM)、扫描电子显微镜(SEM)、场离子显微镜(FIM)、俄歇电子能谱仪(AES)、光电子能谱(ESCA)等,但是多数技术都无法真正地直接观测物体的微观世界。1982年,

Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 在 IBM 公司苏黎世实验室共同研制成功了第一台扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope,STM)^[1],使人们首次能够真正实时地观察到单个原子在物体表面的排列方式和与表面电子行为有关的物理、化学性质^[2]。1986年,Binnig 和 Rohrer 被授予诺贝尔物理学奖。STM 是继高分辨透射电子显微镜、场离子显微镜之后,第三种以原子尺寸观察物质表面结构的显微镜,其分辨率水平方向可达 0.1 nm,垂直方向可达 0.01 nm。STM 不受其他表面结构分析仪器的真空测试环境的限制,可在大气、液体环境下,直接观察到物质的表面特征。目前 STM 已在化学、物理、生命科学和材

