

沉水植物在浅水富营养湖泊中的生态修复作用

邓仁昌^{1,2}, 黄月华¹, 姜 波³

(1. 海南大学环境与植物保护学院, 海南 儋州 571737; 2. 环境保护部华南环境保护督查中心, 广东 广州 510655; 3. 湖北省环境监测中心站, 湖北 武汉 430072)

摘要 综述了沉水植物在浅水富营养湖泊生态修复中的作用。在回顾浅水湖泊多稳态理论的基础上, 分析了沉水植物在浅水富营养湖泊生态修复中四个方面的作用, 即沉水植物是维护水生生态系统多样性的基础, 能消耗水体中大量的氮、磷等物质, 对有毒藻类的生长具有明显的抑制作用, 对水生生态系统过程产生影响。最后, 指出恢复沉水植物是实现浅水富营养湖泊生态修复的有效途径。

关键词 沉水植物; 富营养湖泊; 生态修复

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2008)S1-0056-04

随着工农业的不断发展, 湖泊富营养化程度不断加剧。湖泊富营养化已经成为世界范围内一个突出的环境问题, 中国 2/3 的湖泊、水库都面临着日益严重的富营养化危害^[1]。富营养化导致水体溶解氧含量急剧下降, 威胁水生生物的生存。水体富营养化问题正严重影响着人类的生存环境, 因此迫切需要采取有效措施净化污染水体。国内外已广泛开展利用高等水生植物修复技术净化富营养化水体的研究, 并取得了一定的成果。利用大型水生植物富集氮、磷是治理、调节和抑制湖泊富营养化的有效途径之一^[2-3]。

作为湖泊生态系统的—一个重要组成部分和主要的初级生产者之一, 水生植物对湖泊生态系统的物质和能量的循环起着重要的作用, 特别是沉水植物占据了湖泊中水和底质的主要界面, 是水体两大营养库间的有机结合部, 对湖泊生产力及湖泊生态系统过程具有重要的影响^[4]。根据交替稳定态概念, 水生植物特别是沉水植物在生物操纵中的重要性得到越来越多的认可^[5]。大型沉水植物能够通过多种途径影响湖泊生态系统, 首先, 它能消耗水体中大量的氮、磷等物质, 促进营养物质的沉积, 降低湖水的营养物含量, 还能吸收富集污染物质, 提高湖泊的污染自净能力, 此外, 很多水生植物特别是沉水植物对有毒藻类的生长具有明显的抑制作用^[6], 大型沉水植物还能够为固着性藻类生长提供附着表面, 增加

附生植物对养分的吸收, 为水体中部分鱼类、底栖动物、浮游动物等提供饵料和栖息、繁殖场所, 是维护水生生态系统多样性的基础, 在淡水生态系统中具有重要作用^[7]。

1 浅水湖泊的多稳态理论

在相同的外界环境条件下, 有些生态系统有可能出现两种或多种不同的稳定状态, 这就是多稳态现象^[8]。对于浅水湖泊, 当湖水处在较高营养水平时, 就会出现两种替代性稳定状态——即水生植物占优势的清水状态和浮游植物占优势的浊水状态, 两种状态各具有缓冲机制来保持稳定, 抵抗外部条件的变化。不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是这一现象存在的根本原因^[9]。Scheffer^[10]在探讨这些湖泊内湖水的营养水平、湖水浊度、沉水植物多度、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, 提出了浅水湖泊的多稳态理论。

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他们的环境生态功能, 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 生态修复作用

2.1 对营养物质的吸收作用

氮、磷含量过高是导致水体发生富营养化的直接原因。治理水体富营养化最有效的方法是减少水体中氮磷营养盐的含量。水生植物是水环境中重要的初级生产者,能消耗水体中大量的氮、磷等物质^[11]。而且水生植物有过量吸收营养物质的能力,在生长过程中水生植物能固定水中各种溶解性、悬浮性和沉积性的营养物,降低营养物的周转,所以很多人认为水生植物是很好的治理湖泊富营养化的工具。水生植物对营养物质的吸收效果与植物的种类、水体营养水平以及其他因素有关。

水生植物修复富营养化水体的效果与植物物种有关,不同的植物,生长速率不同,对营养物质的需求和吸收能力不同,对微生物生长的促进作用不同,因而净化水体的能力也各不相同。例如伊乐藻、茆草、石菖蒲和水芹菜等4种水生植物在冬季都能较好地吸收水中的营养物质。其中水芹菜(挺水植物)和伊乐藻(沉水植物)对环境适应性较强,在相同条件下脱氮除磷的效果也更好^[12]。大型水生植物可以直接从水层和底泥中吸收氮、磷,并同化为自身的结构组成物质,对这些物质的固定能力非常强^[13]。特别是沉水植物可以通过根部吸收底质中的氮、磷,加上植物体吸收水中的氮、磷,从而具有比浮水植物更强的富集氮、磷的能力。实验表明,水生植物组织内氮和磷含量以沉水植物最高,浮叶植物次之,挺水植物最低^[14]。利用沉水植物净化底泥和水体中的污染物是生物净化措施中的重要一环,沉水植物的生长可以起到控制水中营养元素的作用,适当恢复沉水植被确实是解决湖泊富营养化问题的一条有效途径^[15]。

2.2 对藻类的化感作用

在一个植物群落里,植物(包括微生物)通过释放化学物质促进或抑制其他个体或自体的现象称为生物化感作用,这些物质被称为化感物质。大型水生植物产生的化感物质可以抑制水体中有害藻类的生长^[16]。在水生植物占优势的水体中,水生植物通过分泌化学物质抑制浮游植物的生长而保持水体的清澈。其产生的化感物质主要有脂肪酸、酚酸和羟

基酸。脂肪酸、酚酸和羟基酸广泛存在于植物体中^[17]。脂肪酸尤其是不饱和脂肪酸对藻类的生长有明显的抑制作用^[18]。羟基酸可以通过过氧化氢酶的作用氧化生成不饱和脂肪酸,酚酸是一种主要化感物质,能通过聚合、氧化等途径抑制藻类光合作用的进行^[19]。

在水生态环境中,水生高等植物对藻类的抑制作用主要表现在两个方面,一是藻类数量急剧下降,二是藻类群落结构改变^[20]。中国学者在水生植物对藻类的生长抑制方面进行了一系列的研究。在实验条件下石菖蒲、凤眼莲、金鱼藻、伊乐藻和苦草都对浮游藻类具有生化抑制作用。不仅活体水生植物对藻类有化感作用,而且其收获后干燥的水生植物对藻类也具有化感作用,并且不同植物对藻类的抑制强度不同^[21]。同种植物随着生物量的增加,对藻类的抑制作用也更明显^[22]。进一步研究发现,植物的不同部位对化感作用的贡献不同,凤眼莲和石菖蒲的化感作用主要是通过植物的根向水体释放的^[23]。有研究发现水生植物对藻类的生长抑制是有选择性的,轮藻(*Chara globularis*)对月牙藻和小球藻具有抑制作用而对斜生栅藻没有抑制作用,穗花狐尾藻和金鱼藻分别被证实抑制浮游植物的生长;而篦齿眼子菜则没有效果,生长的抑制取决于穗花狐尾藻的生物量,不同的浮游植物和蓝藻对穗花狐尾藻的响应差别很大,巨颤藻(*Oscillatoriales*)和铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)比水华束丝藻(*Aphanizomenon flosaquae*)、星形冠盘藻(*Stephanodiscus minutulus*)、斜生栅藻(*Scenedesmus armatus*)更敏感。因此水生植物将直接影响浮游生物的组成。而藻类对水生植物同样存在着化感作用,尤其是当藻类形成大量水华时,水生大型植物的生长率、叶绿素含量和营养繁殖能力等均呈下降趋势^[24]。

2.3 维护生物多样性的基础

沉水植物作为水体的初级生产者,为水体中部分鱼类、底栖动物、浮游动物等提供饵料和栖息、繁殖场所,是维护水生生态系统多样性的基础,在淡水生态系统中具有重要作用。有研究发现,水草丰富的东太湖底栖硅藻、底栖动物种类与数量和价值高的经济鱼种类与产量均较水草受破坏的西太湖多^[25]。在浅水富营养湖泊恢复水生植物的实验中,水草的净化作用不但使围隔内的水质得到改善,也使得生物多样性指数升高,出现多种螺类和无齿蚌,且每点采集到的底栖动物均在30种以上,多样性指数均高于对照^[26]。水生植物对维护鱼类的多样性也有重要作用,鱼苗的健康生长不仅需要充足的饵

料和溶解氧, 还需要保持优良的水质环境。而栽培水生植物是维持鱼池正常物质循环和能量循环的重要措施, 适量的沉水植物可以提高仔鱼的成活率、减低畸形率, 还是加强鱼苗体质、减少病害的关键^[27]。而水生植物的衰败与消亡, 将导致水体中与水草相克的浮游藻类大量繁殖, 使浮游动物、底栖动物乃至鱼类等水生动物群落结构趋于简单化、小型化, 使得系统的生物多样性指数降低^[28]。

2.4 对生态系统过程的影响

水生植物是水域生态系统中重要的组成部分。在这一生态类群中, 沉水植物与水的关系最为密切, 占据着湖泊生态系统的关键界面, 对湖泊生产力及湖泊生态系统过程、生物地球化学循环具有重要的影响。水生植物对湖泊生态系统过程的影响主要通过挥发、吸附和沉降等物理化学作用过程来达到修复富营养湖泊的目的。沉水植物一般具有发达的根系而形成较大的接触面积, 当水流经过时, 不溶性胶体、附着于根系的细菌(部分凝集的菌胶体)会被根系黏附或吸附而沉积, 从而导致水生植物群落区沉积物中含磷量较高, 而减少沉积物中磷向上覆水的释放, 达到对湖泊水体的净化作用^[29]。水生植物的生长能有效地抑制风浪, 有利于植物残体和悬浮物沉降、淀积以及自身对矿质元素的吸附作用, 使部分矿质元素脱离湖泊内的营养循环, 进入地球化学循环过程^[30]。同时水生植物能有效抑制底泥中总氮、总磷、硝态氮和氨态氮的释放, 显著降低沉积物的再悬浮速率, 对于控制湖泊内源氮负荷、促进湖泊生物地球化学良性循环具有重要的意义^[31-32]。

3 在富营养湖泊生态修复实践中的应用

沉水植物对湖泊生态修复技术具有低投资、低能耗等优点, 对去除湖泊体系中氮、磷具有明显的效果^[33]。因此恢复水生高等植物是富营养湖泊生态恢复和水华控制的主要内容。实验证明, 在有沉水植物存在的水域, 底泥营养盐的释放可以得到有效的控制, 水质得到改善, 国外已广泛开展利用高等水生植物修复技术净化富营养化水体的研究, 并取得了一定的成果^[3]。根据湖泊中不同生态类型水生高等植物的微生境特点, 设计建造了由漂浮、浮叶、沉水植物为优势种的斑块小群丛构成的镶嵌组合水生植物群落(Mosaic Community of Macrophytes, MCM)结果表明, 富营养化湖水经 MCM 净化后, 藻类生物量(以 Chla 计)下降 57.7%, 藻类数量下降 2~3 个数量级, 氨氮下降 66.7%, 总氮下降 60.0%, 水质得到明显改善^[34]。进一步的研究发现, 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。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, 而且能够有效快速地提高水体透明度, 改善富营养化水质感观指标^[35]。建立以优化的沉水植物为基础的湖泊生态系统是利用水生植物治理富营养湖泊的最佳生物防治措施。这种以优化的沉水植物为基础的湖泊生态系统优于以浮游植物或以漂浮植物为基础的湖泊生态系统, 沉水植物重建后, 氮、磷营养水平显著降低, 防止了水体富营养化的发生^[36-37]。

4 结 语

水生高等植物在水体生态系统中起着不可忽视的作用, 但是, 环境污染和不合理的开发利用等, 使得水生高等植物在许多湖泊水库中消失, 水体的富营养化不断加剧^[38]。由于浅水湖泊富营养化可以表现为蓝藻水华频发的藻型湖泊, 也可以表现为水生植物茂盛的草型湖泊。前者湖水混浊, 后者水质清澈。水生植物占优势时有多种机制来保持水质的清澈。比如水生植物有过量吸收营养的特性, 可降低水体营养水平, 创造遮荫和脱氧环境(不利于鱼类捕食), 为植食性浮游动物提供逃避鱼类摄食的隐蔽所, 减少因为风和摄食底栖生物鱼类所引起的沉积物再悬浮, 降低浊度, 水生大型植物对藻类的相生相克作用等。为此, 重新审视水生高等植物在湖泊生态系统中的功能与作用, 恢复水生高等植物可能是水体富营养化防治研究的一个重要方向。但是, 影响水生植物生长的因素很多, 风浪、沉积物、光照和透明度、氧化还原环境、营养盐和鱼的捕食等都会对水生植物产生影响。因此在现阶段, 通过改善基础环境恢复水生植物是实现富营养湖泊生态恢复的有效途径。

参考文献:

- [1] 尚士友, 杜健民, 李旭英, 等. 草型富营养化湖泊生态恢复工程技术的研究[J]. 生态学杂志, 2003, 23(6): 57-62.
- [2] 濮培民, 李正魁, 王国祥. 提高水体净化能力控制湖泊富营养化[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2757-2763.
- [3] JEPPESEN E, SØNDERGAARD M, KRONVANG B, et al. Lake and catchment management in Denmark[J]. Hydrobiologia, 1999, 395-396: 419-432.
- [4] BAYLEY S E, PRATHER C M. Do wetland lakes exhibit alternative stable states? Submersed aquatic vegetation and chlorophyll in western boreal shallow lakes[J]. Limnol Oceanogr, 2003, 48(6): 2335-2345.

- [5] STRAND J A ,WEISNER S E. Dynamics of submerged macrophyte populations in response to bio-manipulation[J]. Freshwater Biology ,2001 ,46 :1397-1408.
- [6] CRUM S J H ,VAN KAMMEN-POLMAN A M M ,LEISTRA C. Sorption of nine pesticides to three aquatic macrophytes[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology ,1999 ,37(3) 310-316.
- [7] 赵红雪 ,任青峰. 沉水植物资源在渔业上的合理利用[J]. 宁夏农林科技 ,2003(4) :11-12.
- [8] MAY R M. Thresholds and break points in ecosystems with a multiplicity of stable states[J]. Nature ,1977 ,269 :471-477.
- [9] HOSPER H ,MARIE-LOUISE M. Bio-manipulation ,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 lake[J]. Ecological Engineering ,1993 ,2 :63-72.
- [10] SCHEFFER M. Multiplicity of stable states in freshwater systems[J]. Hydrobiologia ,1990 ,200/201 :475-485.
- [11] 刘健康. 高级水生生物学[M]. 北京 :科学出版社 ,1999.
- [12] 黄蕾 ,翟建平 ,王传瑜 ,等. 4 种水生植物在冬季脱氮除磷效果的试验研究[J]. 农业环境科学学报 ,2005 ,24(2) 366-370
- [13] 种云霄 ,胡洪营 ,钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备 ,2003 ,4(2) 36-40.
- [14] 吴爱平 ,吴世凯 ,倪乐意. 长江中游浅水湖泊水生植物氮磷含量与水柱营养的关系[J]. 水生生物学报 ,2005 ,29(4) 406-412.
- [15] 马凯 ,蔡庆华 ,谢志才 ,等. 沉水植物分布格局对湖泊水环境 N、P 因子影响[J]. 水生生物学报 ,2003 ,27(3) 232-237.
- [16] 李锋民. 胡洪营生物化感作用在水处理中的应用[J]. 中国给水排水 ,2003 ,19(7) 38-40.
- [17] 鲜启鸣 ,陈海东 ,邹惠仙 ,等. 3 种沉水植物水浸提液中有有机酸成分分析[J]. 植物资源与环境学报 ,2004 ,13(3) 57-58.
- [18] YASUSHI K ,YASUNORI ,KYOJI S. Acute toxicity of fatty acids to the freshwater green-alga *Selenastrum capricornutum* [J]. Environ Toxicol ,2003 ,18 :289-294.
- [19] SÜTFELD R. Polymerization of resorcinol by a Cryptophycean exoenzyme[J]. Phytochemistry ,1998 ,49(2) 451-459.
- [20] 孙文浩. 凤眼莲无茵苗培养及其克藻效应[J]. 植物生理学报 ,1989 ,16 :301-305.
- [21] 李锋民 ,胡洪营. 大型水生植物浸出液对藻类的化感抑制作用[J]. 中国给水排水 ,2004 ,20(11) :18-21.
- [22] 顾林娣 ,陈坚 ,陈卫华 ,等. 苦草种植水对藻类生长的影响[J]. 上海师范大学学报 :自然科学版 ,1994 ,23(1) :62-68.
- [23] 孙文浩 ,余叔文 ,杨善元. 凤眼莲根系分泌物中的克藻化合物[J]. 植物生理学报 ,1993 ,19(1) 92-96.
- [24] 鲜启鸣 ,陈海东 ,邹惠仙 ,等. 淡水水生植物化感作用研究进展[J]. 生态学杂志 :B ,2005 ,24(6) 664-669.
- [25] 曹萃禾. 水生维管束植物在太湖生态系统中的作用[J]. 生态学杂志 ,1987 ,1(1) 37-39.
- [26] 刘保元 ,邱东茹 ,吴振斌. 富营养浅湖水生植被重建对底栖动物的影响[J]. 应用与环境生物学报 ,1997 ,3(4) :323-327
- [27] 许秋瑾 ,颜昌宙 ,刘力亚 ,等. 沉水植物对斑马鱼鱼卵孵化及仔鱼生长的影响[J]. 环境科学研究 ,2004 ,17(S) :74-76.
- [28] 苏胜齐 ,姚维志. 沉水植物与环境关系评述[J]. 农业环境保护 ,2002 ,21(6) 570-573.
- [29] 朱广伟 ,秦伯强 ,高光 ,等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. 环境科学学报 ,2004 ,24(3) 281-288.
- [30] 史建君 ,杨子银 ,陈晖. 水生植物对水体中低浓度⁹⁵Zr(锆)的富集效应[J]. 核农学报 ,2004 ,18(1) 51-54.
- [31] HORPPILA J ,NURMINEN L. The effect of an emergent macrophyte(*Typha angustifolia*) on sediment resuspension in a shallow north temperate lake[J]. Freshwater Biology ,2001 ,46 :1 447-1 455.
- [32] 黄沛生 ,刘正文 ,韩博平. 太湖湖滨带浮叶植物菱(*Trapa quadrispinosa* Roxb)对氮素再悬浮的影响[J]. 长江流域资源与环境 ,2005 ,14(6) 750-753.
- [33] 胡春华 ,濮培民 ,王国祥 ,等. 冬季净化湖水的效果与机理[J]. 中国环境科学 ,1999 ,19(6) 561-565.
- [34] 王国祥 ,濮培民 ,张圣照等用镶嵌组合植物群落控制湖泊饮用水源区藻类及氮污染[J]. 植物资源与环境 ,1998 ,7(2) 35-41.
- [35] 成小英 ,王国祥 ,濮培民 ,等. 冬季富营养化湖泊中水生植物的恢复及净化作用[J]. 湖泊科学 ,2002 ,14(2) :139-144.
- [36] 黄文成. 沉水植物在治理滇池草海污染重的应用[J]. 植物资源与环境 ,1994 ,3(4) 29-33.
- [37] 吴振斌 ,邱东茹 ,贺锋 ,等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报 ,2003 ,14(8) :1351-1353
- [38] 熊秉红 ,侯浩波 ,熊治廷 ,等. 水体富营养化生态学机制研究[J]. 生态科学研究进展 ,2005 ,1 :243-265.

(收稿日期 2008-08-05 编辑 徐娟)