

生物操纵与非经典生物操纵的应用分析及对策探讨*

刘恩生

(安徽农业大学, 合肥 230036)

摘要: 分析了生物操纵(biomanipulation)和非经典生物操纵(non-traditional biomanipulation)理论的原理、应用条件及局限性,提出了在局部水体治理湖泊富营养化的对策. 分析认为:生物操纵的核心内容是利用浮游动物控制藻类;但浮游动物不能有效控制丝状藻类和形成群体的蓝藻水华;我国的大型浅水湖泊浮游动物数量一般并不多,对浮游植物摄食压力不大;在浅水湖泊,浮游动物摄食藻类后很快分解、释放又进入物质循环,因此不能治理湖泊富营养化;浮游动物是浮游植物和鱼类等经济水生动物之间重要的营养通道,过分追求保护浮游动物是值得思考和研究的问题. 而非经典生物操纵的核心内容是利用鱼类直接控制蓝藻水华;当鲢、鳙鱼达到阈值密度可以控制蓝藻水华,但很难控制所有藻类和降低N、P治理湖泊富营养化. 在局部水体治理湖泊富营养化的对策是:把鱼类控藻、水生植被恢复和局部水域生态系统重建相结合,形成具有利用与控制蓝藻生产鱼类、吸收氮磷净化水质功能的“水质生物调控单元”.

关键词: 生物操纵;非经典生物操纵;对策;富营养化

Analysis on biomanipulation, non-traditional biomanipulation and discussion of the countermeasures of biomanipulation application in waters

LIU Ensheng

(Anhui Agricultural University, Hefei 230036, P. R. China)

Abstract: The principle, the application conditions and the localization of biomanipulation and non-traditional biomanipulation were analyzed. The countermeasure of biomanipulation of water quality was carried out in Lake Chaohu. The results were: The key mechanism of biomanipulation is to use zooplankton to control phytoplankton, but zooplankton can not effectively control filar alga and cyanobacterial blooms; generally, there are not plentiful zooplankton in large-scale shallow lakes, so the stress of zooplankton on alga is usually littler. Moreover, the alga fed by zooplankton grow more rapidly than before. Besides, zooplankton is the important energy path between alga and fishes which can not directly feed on alga, so zooplankton should not be protected excessively. However, The main content of non-traditional biomanipulation is that cyanobacterial blooms was controlled by silver carp and bighead. Silver carp and bighead are able to control cyanobacterial blooms only in threshold biomass, but can not control all kind of alga and reduce N and P. The countermeasure to deal with eutrophication in local area should be that the measurement such as non-traditional biomanipulation, restoration of aquatic vegetation and renewedly construct of ecosystem were combined into a unite which have the function of controlling cyanobacterial blooms to produce fishes and reducing N and P to deplete pollution water.

Keywords: Biomanipulation; non-traditional biomanipulation; countermeasure; eutrophication

我国湖泊已经面临富营养化问题,富营养化已成为我国水环境最为重要的问题^[1]. 湖泊和水库的富营养化是与植物营养主要是磷和氮的富集造成的结果^[2]. 导致湖泊富营养化的根本原因是氮、磷过量积累,富营养化湖泊最普遍的现象是蓝藻水华的暴发. 从理论上说,治理湖泊富营养化的关键是控制氮、磷排放,或去除水体中过量氮、磷. 由于蓝藻暴发造成的危害很大,因此,如何控制水体富营养化及伴随的蓝藻水华暴发一直是环境科学、淡水生态学和湖沼学研究的热点之一^[3]. 国内外科学家一直在探索着治理湖泊富营养化和控制蓝藻的方法和理论.

* 科技部巢湖水专项项目(2008ZX07103-005-4)和安徽农业大学引进与稳定人才项目(wd2007-2)联合资助.
2009-05-18 收稿;2009-10-08 收修改稿. 刘恩生,男,1957年生,博士,教授;E-mail:liues13579@163.com.

有关治理湖泊富营养化和控制蓝藻的方法和理论有很多,其中和鱼类有关的两个重要理论是生物操纵(biomanipulation)和非经典生物操纵(non-traditional biomanipulation). Shapiro提出的生物操纵^[4]是治理富营养化湖泊藻类的重要理论之一,而谢平提出的非经典生物操纵^[3]无疑是控制富营养化湖泊蓝藻水华的有效方法.然而,生物操纵与非经典生物操纵两个理论的应用在有的情况下偏离了科学家的本意,被当做灵丹妙药.为此,有必要对这两个重要理论的原理、应用条件及局限性进行分析,试图提出新的设计思路.

1 生物操纵原理、应用条件及分析

谢平先生在他的著作《鲢、鳙与藻类水华控制》中,对生物操纵的起源、机制、实践意义及局限性进行了透彻分析和高度归纳^[3],无疑,这对我们更完整、系统、深入地理解与应用这一理论有极大帮助.

1.1 生物操纵原理

Shapiro等最早提出了生物操纵概念^[5],此后发展和完善了这一理论^[4].

国外科学家较早把重点从内陆水体生物生产力的开发转移到水环境保护^[6].20世纪50-60年代始,湖沼学家注意到环境中的低营养级生物对高营养级生物有上行作用,高营养级生物对低营养级生物也有控制作用.如Hrbacek等、Brooks较早注意到鱼类通过食物链可以影响生态系统中较低级生物类群(如藻类)^[7-8].20世纪70年代,开始出现有关高营养级生物对生态系统结构与功能影响的研究.Hurlbert等开始意识到鱼类也能成为调节湖泊生态系统中浮游生物群落和水质的重要驱动因子^[9],Zaret和Paine的研究进一步证实了Hurlbert等的观点^[10].Shapiro等提出了生物操纵概念^[5].80年代后有更多报道发表,如Carpenter等提出了营养级联反应假说^[11];Northcote对内陆水体鱼类下行效应的类型、作用机制及结果进行了归纳^[12];McQueen等提出了上行-下行作用模型^[13].此后,Shapiro等明确提出了生物操纵^[4].生物操纵的主要原理是通过调整鱼类群落结构,保护和发展大型牧食性浮游动物,从而控制藻类的过量繁殖^[14],也可以理解为:发挥浮游动物的生态功能控制藻类.

1.2 生物操纵的应用条件及分析

生物操纵的核心内容是利用浮游动物控制藻类.那么,浮游动物是否能控制所有藻类?是否能治理大型浅水湖泊的富营养化?是否一定要完全保护浮游动物?

首先,浮游动物是否可以控制所有藻类?生物操纵的应用有成功的例子,但失败的也不少.国外科学家对此有很多分析,谢平进行了高度归纳^[3]:"对生物操纵的有效性持怀疑态度或否定态度的大多数学者都认为浮游动物无法有效而持久地控制大型藻类.特别是那些形成水华的丝状或群体蓝藻".刘建康等认为,浮游动物不能控制丝状藻类和形成群体的蓝藻水华^[15].其次,在我国的大型浅水湖泊中浮游动物的数量一般并不多,浮游动物对浮游植物的摄食压力不大.因此,在我国大型浅水湖泊并没有应用生物操纵成功的例子.既然浮游动物不能控制丝状藻类和蓝藻水华,那么,从理论上说,如果仅仅降低了除丝状藻类和蓝藻水华以外的浮游植物,会更有利于丝状藻类和蓝藻水华生长.谢平归纳了Wetzel的分析^[3],其中认为:大量研究表明,大型浮游动物的牧食暂时性地导致藻类生物量的下降,却常常导致超微藻和不能被浮游动物有效牧食的蓝藻水华的急速增加.

浮游动物是否可以治理大型浅水湖泊的富营养化?首先,富营养化与蓝藻暴发不是一件事情.氮、磷过量积累是导致湖泊富营养化的根本原因,而蓝藻暴发是富营养化湖泊的普遍现象.只有控制了氮、磷排放,或去除了水体中过量氮、磷,才是治理湖泊富营养化的关键.而浮游动物摄食的藻类的N、P并没有离开水体.那么摄食了藻类的浮游动物哪里去了?在深水湖泊,可以用图1来解释.浮游动物摄食藻类后最终可以沉积到湖底,脱离物质循环.但是,在浅水湖泊,由于水体经常上下搅拌,沉积于湖底的浮游动物尸体很快分解、释放又进入物质循环.甚至在夏季多风条件下,浮游动物尸体还来不及沉积就分解再进入水体中.那么为什么也有利用浮游动物净化水体的例子呢?如果从一个完整生态系统来考察,这一问题就很简单.如果把一个湖泊缩小为一个池塘或一个鱼缸,很容易可以发现这样的现象:当水中藻类被大量浮游动物摄食后,水很快变清.但是,当浮游动物死亡后水体又变黑发臭.有时在局部水体还继续维持清水现象,但其它部分水质更差.通常我们注意了暂时出现的清水现象或还继续维持清水现象的那部分水体.而从整体看,被浮游动物摄食的藻类中的N、P并没有离开这个系统.这相当于藻类中的N、P通过浮游动物这条管道从一端转移

到另一端,水体中的 N、P 还几乎和原来一样. 因此,从理论上说,浮游动物是不能去除 N、P 治理大型浅水湖泊富营养化的. 谢平归纳了 Wetzel 的分析认为:营养盐(特别是磷)只是从湖泊的一个营养库暂时转移到了另一个营养库^[3].

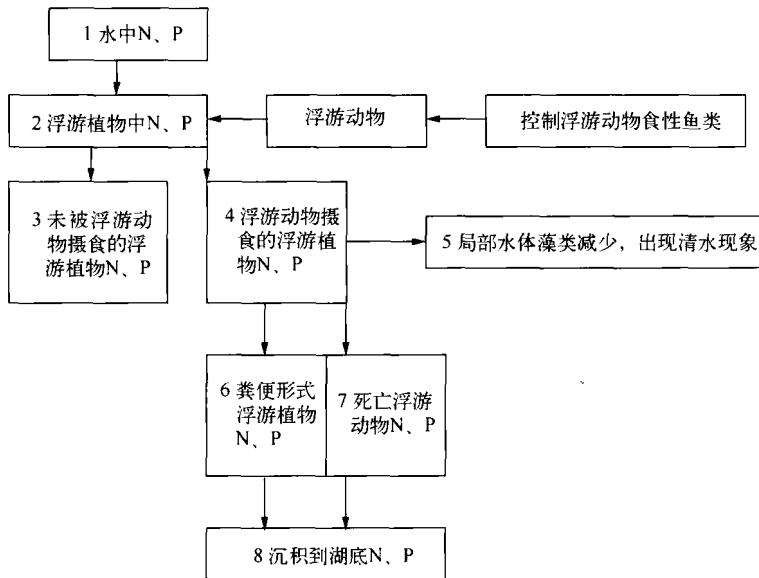


图1 浮游动物摄食藻类后 N、P 的去向

Fig. 1 The fate of N and P in phytoplankton fed on by zooplankton

是否一定要完全保护浮游动物? 浮游动物是浮游植物和鱼类等经济水生动物之间重要的营养通道. 我国的很多湖泊里以浮游植物为主要食物的鱼类数量有限. 例如,在太湖 2003 年浮游植物食性鱼产力为 10234t, 占总鱼产力 37.0%, 而 2004 年实际渔获量中浮游动物食性鱼类占 80%–90%, 浮游植物食性鱼类渔获量仅占 10.9%^[16]. 巢湖的情况和太湖也大体一样. 如果不利用浮游动物, 浮游植物的能量就不会被非浮游植物食性水生动物利用. 因此,在我国的大型浅水湖泊,过分追求保护浮游动物是值得深入思考和研究的问题.

2 非经典生物操纵原理、应用条件及分析

2.1 非经典生物操纵原理

谢平等提出的利用鲢、鳙鱼控制蓝藻技术又叫做非经典生物操纵^[3]. 非经典生物操纵和生物操纵是当今治理湖泊藻类的重要理论和方法之一.

我国科学家日趋重视水域生态系统恢复和重建问题. 在湖泊生态系统恢复工作中,有关鱼类和环境间的研究已有很多^[16-18]. 刘建康等对武汉东湖蓝藻“水华”消失之谜的论述^[19], 谢平等提出了利用鲢、鳙鱼控制蓝藻技术^[3]. 为了与 Shapiro 等提出的生物操纵相区别, 谢平先生把鲢、鳙鱼控藻技术叫做非经典生物操纵^[3].

非经典生物操纵认为: 鲢、鳙鱼能滤食 $10\mu\text{m}$ 至数个毫米的浮游植物, 而枝角类仅能滤食 $40\mu\text{m}$ 以下的较小浮游植物. 与枝角类相比, 鲢、鳙鱼可有效地摄取形成水华的群体蓝藻, 有效控制大型蓝藻. 并提出了这样的结论: 在东湖有效控制蓝藻水华的鲢、鳙生物量的临界阈值是 $50\text{g}/\text{m}^3$, 即“一吨水一两鱼”^[3].

2.2 非经典生物操纵的应用条件及分析

谢平先生在他的著作《鲢、鳙与藻类水华控制》中明确提出: 非经典生物操纵的核心目标定位在控制蓝藻水华^[3]. 但是, 在有的情况下, 应用非经典生物操纵理论时偏离了科学家的本意.

非经典生物操纵是直接利用鲢、鳙控制蓝藻. 那么, 鲢、鳙鱼是否可以控制蓝藻? 是否可以控制所有藻

类? 是否可以降低 N、P 治理湖泊富营养化?

鲢、鳙鱼是否可以控制蓝藻? 大量实践证明, 如果鲢、鳙鱼达到阈值密度控制蓝藻是完全可以做到的 (当然, 在不同的水域这个阈值密度是不同的). 从理论上, 可以用逻辑斯蒂尔方程 (logistic curve equation, $dN/dt = N \cdot r(1 - N/K)$) 进行解释. 这一方程反映的是, 一个种群的增长速度主要取决于这个种群的密度 (N). 当 $N = K/2$ 时种群的增长速度最大; 当种群密度 N 很小时, 种群的增长速度也很小. 蓝藻的生产量也可以用公式: $P_i = B_i \times P/B$ 表示, P_i 为蓝藻生产量, B_i 为蓝藻生物量, P/B 为蓝藻周转率. 当 B_i 很小时, P_i 也会很低. 而鱼类的密度可以导致藻类密度 N 或者 B_i 发生变化. 当鱼类的摄食量超过蓝藻生物量或者生产量时, 蓝藻数量当然会开始减少. 但是, 如果鱼类的密度导致蓝藻密度接近 $N = K/2$ 时, 当然容易引起蓝藻数量增加. 其道理和种庄稼一样: 如果适当稀疏禾苗就会提高产量. 分析唐汇娟和谢平在武昌东湖的围隔实验结果^[21]可以发现, 鲢鱼密度 (x) 和浮游植物的数量 (y) 间有这样的关系: $y = -0.0002x^2 + 0.0869x + 1.5007$ $R^2 = 0.9696$, y 为浮游植物量, x 为鲢鱼密度 (图 2). 在这个试验中, 当鲢鱼密度低于 $217\text{g}/\text{m}^2$ 时, 随着鱼类密度增加, 浮游植物量增加了. 当鲢鱼密度大于 $217\text{g}/\text{m}^2$ 时, 浮游植物量才开始降低. 这说明并不是只要放养鲢、鳙鱼就可以控制蓝藻, 如果达不到阈值密度会导致蓝藻增加. 因此, 谢平先生提出的有效控制蓝藻水华的鲢、鳙生物量的临界阈值是非常重要的.

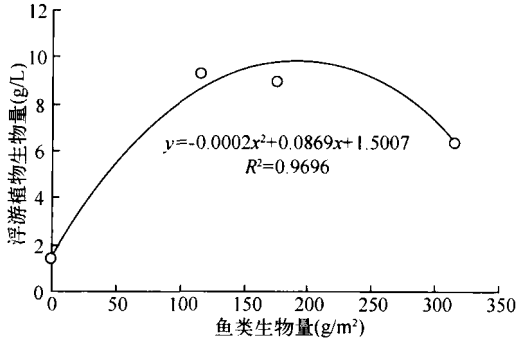


图 2 鲢鱼密度和浮游植物数量间的关系 (根据唐汇娟 2006 年在武昌东湖实验数据)
Fig. 2 The relationship between the density of silver carp and the quantity of phytoplankton

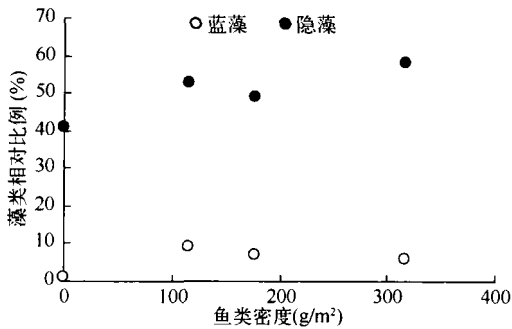


图 3 鲢鱼密度对蓝藻和隐藻相对比例的影响 (根据唐汇娟 2006 年在武昌东湖实验数据)

Fig. 3 Effects of the different density of silver carp on the proportion of Cyanophyta and Cryptophyta

鱼密度达到控制蓝藻水华, 在一定条件下是可以做到的, 但鲢、鳙鱼很难控制所有藻类, 有时还会引起浮游植物数量增加. 如 Smith 的研究结果表明, 滤食性鱼类促进了浮游植物的增加^[23]. Smith 统计了 14 个放养鲢鱼的水体中, 有 11 个水体的浮游植物增加了^[24].

鲢、鳙鱼是否可以降低 N、P 治理湖泊富营养化? 回答这一问题需用图 4 来解释. 导致湖泊富营养化的关键因素是图 4 中“1 水中 N、P”增加. 因此, 我们关注的问题应该是放养鲢、鳙鱼后 N、P 的去向. 按照图 4 的分析发现, “1 水中 N、P”被蓝藻大量吸收后转移为“2 蓝藻 N、P”; 此时人为放养“3 食蓝藻鱼类”后, “2 蓝藻 N、P”有两个转移方向: “4 未被鱼类摄食蓝藻 N、P”和“5 鱼类摄食蓝藻 N、P”; 而“5 鱼类摄食蓝藻 N、P”也有两个去向: “6 利用蓝藻形成鱼类产品中 N、P”和“7 粪便形式蓝藻 N、P”. “6 利用蓝藻形成鱼类产品中

N、P”是很少的。根据姚宏绿等^[25]和陈少莲等^[26]的研究结论,这个部分大约是“2 蓝藻 N、P”的 3%—5%。从整体水生生态系统看,“5 鱼类摄食蓝藻 N、P”其主要部分“7 粪便形式蓝藻 N、P”又回到水中。甚至有报道认为,放养鲢、鳙鱼使水中 N、P 增加。如陈少莲等在东湖的研究发现,鲢、鳙鱼的放养大量摄食了浮游动物和加快了水体营养物质的分解释放过程^[26]。国外有很多研究认为滤食性鱼类的放养可以加速湖泊的富营养化^[11,27-28]。

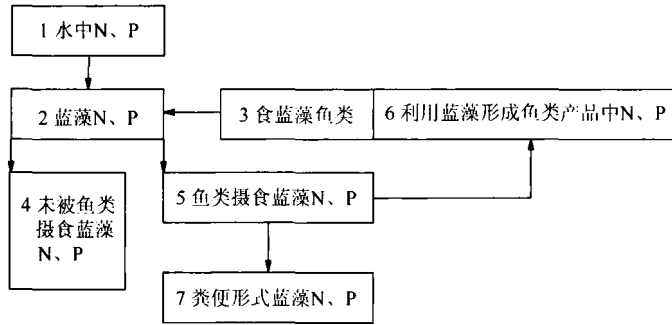


图4 鲢、鳙鱼摄食蓝藻后 N、P 的去向

Fig. 4 The fate of N and P in phytoplankton fed on by silver carp and bighead

那么,为什么也有的实验结果显示放养鲢、鳙鱼降低了水体中 N、P 呢?可以根据图 4 进行解释:(1)“7 粪便形式蓝藻 N、P”成团块状,很容易随水流漂离原地。这就很容易在原地出现低藻和清水区域;(2)“7 粪便形式蓝藻 N、P”由于是团块状,其光合作用能力下降,即使不漂离原地,蓝藻的生产能力也会降低;(3)团块状“7 粪便形式蓝藻 N、P”有的散失回到水中,有的沉入底泥。而沉入底泥的这个部分是脱离光合作用的。而认为放养鲢、鳙鱼降低了 N、P 的很多结论仅仅是考察了水中的部分,并没有把沉入底泥那个部分考虑进去。无论如何,从整个生态系统看,又回到水中的“7 粪便形式蓝藻 N、P”并没有离开生态系统。这一分析在一个小型封闭水体里很容易得到检验:根据唐汇娟和谢平在武昌东湖的围隔实验结果^[21],不同鱼类密度的围隔里,水中 N、P 变化的差别没有达到显著水平(图 5)。因此,放养鲢、鳙鱼对水中 N、P 的影响,就相当于把“2 蓝藻 N、P”的一部分——“5 鱼类摄食蓝藻 N、P”——经过一个管道从一端转移到另一端,在转移的过程里,仅减少了很小一部分,而主要部分又回到原来的水生生态系统里。

因此,利用鱼类控制蓝藻是可以做到的。但利用鱼类控制所有藻类和降低 N、P 治理湖泊富营养化是很难做到的。我们在应用非经典生物操纵理论时不能偏离了科学家的本意。

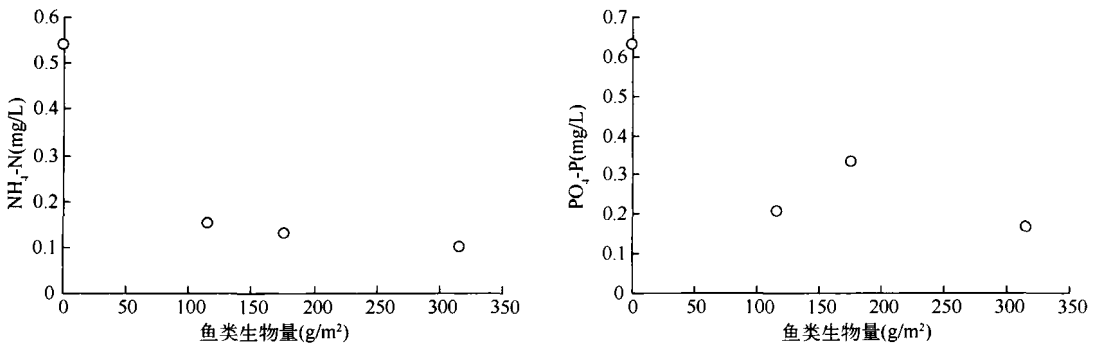


图5 不同鱼类密度围隔 N、P 的变化(根据唐汇娟 2006 年在武昌东湖实验数据)

Fig. 5 The changes of N and P in enclosure with different fish densities

3 生物操纵、非经典生物操纵的局限性分析及对策

3.1 生物操纵、非经典生物操纵的局限性分析

根据以上分析:经典的生物操纵并不完全适用于我国的大型浅水湖泊.在浅水湖泊,浮游动物摄食藻类后很快分解又进入物质循环;在我国的大型浅水湖泊浮游动物的数量一般并不多,浮游动物对浮游植物摄食压力不大;浮游动物也不能有效控制丝状藻类和形成群体的蓝藻水华.此外,浮游动物是浮游植物和鱼类等经济水生动物之间重要的营养通道.如果不利用浮游动物,浮游植物的能量就不会被非浮游植物食性水生动物利用.因此,在我国的浅水湖泊不应过分追求完全保护浮游动物.

非经典生物操纵控制蓝藻是可以做到的,但控制所有藻类和降低 N、P 治理湖泊富营养化是很难做到的.并且,在大型湖泊进行鱼类控藻还存在一些技术问题:(1)难以在大型湖泊实施:以巢湖为例,巢湖的水量达到 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$.如果按照 50 g/m^3 鱼类密度标准需要 $12 \times 10^4 - 15 \times 10^4 \text{ t}$ 鲢、鳙鱼才可以控藻,如果在太湖则需要 $20 \times 10^4 - 30 \times 10^4 \text{ t}$ 鲢、鳙鱼才可以控藻,显然这是不可能的;(2)并且大型富营养化湖泊蓝藻的分布是不均匀的.在蓝藻严重堆积区域,因氧气等条件的恶化并不适合鱼类生存.那么可能会产生这样的情况:蓝藻需要控制的区域鱼类可能较少,起不到控制效果;(3)不同的鱼类密度会对浮游植物产生相反的影响.并非放养鲢、鳙鱼就可以控制蓝藻,如果达不到阈值密度可能会导致蓝藻增加.(4)鱼类可以控制蓝藻,却不能控制所有藻类,也不能削减 N、P 治理富营养化,更不能形成稳定良性生态系统.

3.2 对策:在局部水体治理湖泊富营养化的设计思路

众所周知,水生植被恢复是湖泊生态修复的重要内容之一,但在蓝藻暴发和浪浪很大的开敞水面,通常很难恢复水生植被.在富营养化湖泊,蓝藻水华的控制是恢复水生植被的重要技术环节.蓝藻水华会降低湖水的透光率,减少水下可供水生植物利用的光资源;同时蓝藻能粘附在水生植物表面,不仅会严重妨碍光合作用和水生植物与湖水间的物质交换,还能招致微生物的大量繁殖,严重时会引起水生植物的腐烂死亡.水生植被的恢复需要控制风浪的作用.强烈的风浪能造成水生植物的机械损伤,影响水生植被恢复的进程;风浪扰动湖底能引起沉积物再悬浮,污染水质,降低湖水透明度,并容易在植物表面形成附着层^[1].

如果把鱼类控藻和水生植被恢复相互结合,是否可以找到解决途径呢?如何解决蓝藻的控制和水生植被的恢复问题呢?如何削减富营养化湖泊不断增加的 N、P 呢?能不能在局部水域形成稳定良性生态系统?

在富营养化湖泊,当 N、P 不断增加,蓝藻暴发很难阻止.湖泊富营养化的关键问题是 N、P.那么换个角度思考会发现:蓝藻是湖泊中吸收 N、P 的有效工具.再深入思考非经典生物操纵的过程可以发现:鲢、鳙鱼等滤食性鱼类是收集蓝藻很好的生物工具.根据以上分析,可以发现以下解决途径:如果收集图 6 中的“7 粪便形式蓝藻 N、P”,那么,回到水中蓝藻 N、P、沉入底泥蓝藻 N、P、死亡有机质 N、P 和直接溶入水中的 N、P 会大量减少;很容易形成一个低藻、低 N、P 区域;在这个区域里,风浪减小、透明度增加,为水生植被生长创造了条件;而水生植被也是吸收或收集 N、P 的有利生物工具,可以进一步降低和吸收这个区域里的蓝藻和 N、P;区域里的生态条件得到改善,通过重建生态系统进一步改善和稳定这个区域(图 6).

根据图 6 的分析,可以产生这样的对策:把鱼类控藻、水生植被恢复和局部水域生态系统重建相结合,在局部水域建立一个水质生物调控单元.可以根据湖泊中蓝藻分布情况,在局部水体进行鱼类控藻,收集团块状鱼类藻粪、转移上岸;上岸蓝藻经发酵成为蓝藻液体肥料;在鱼类控藻过程中,形成了鱼类产品,并形成低藻区域,为水生植被恢复创造了条件;通过恢复水生植被又可以吸收 N、P,改善局部水域的生态条件;在局部水域重建生态系统.

根据以上对策,针对巢湖富营养化的治理,产生了这样的思路:

通过组装鱼类藻粪拦截网、鱼类拦截、捕获蓝藻模块、生态浮岛水质净化模块、在局部水域重建生态系统,形成具有利用与控制蓝藻生产鱼类、吸收氮磷净化水质功能的水质生物调控单元.

(1) 鱼类藻粪拦截网.功能定位:阻止鱼类藻粪漂移、聚集团块状鱼类藻粪便于机械收集;具体方法:用网片进行环形布设,形成一个正方形区域;在网片上加一个可随水位变化人工调节的密眼网片,用于阻止鱼类藻粪漂移、聚集团块状鱼类藻粪.

(2) 鱼类拦截、捕获蓝藻模块.功能定位:在鱼类藻粪拦截网形成的正方形区域内,利用高密度鱼类拦

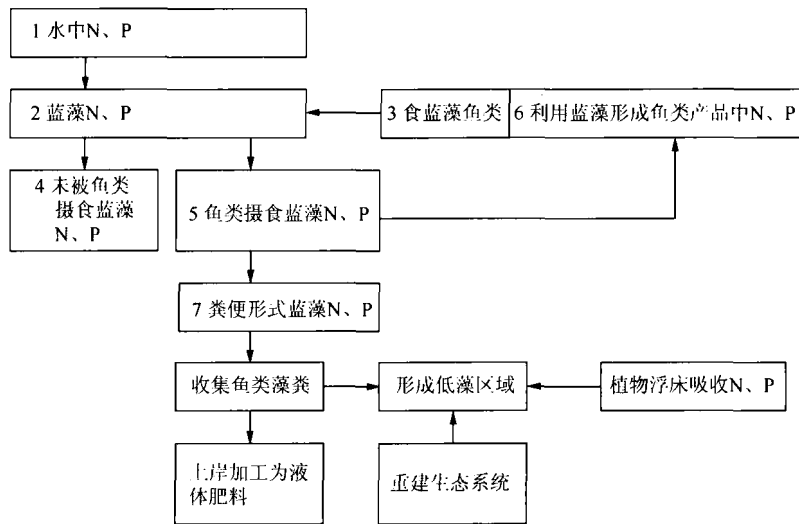


图6 鱼类控制蓝藻存在的问题及解决途径

Fig. 6 The problems in fish controlling algae and the countermeasure of solving the problems

截、捕获蓝藻形成低藻区域、消浪、形成鱼类产品;具体方法:在鱼类藻粪拦截网形成的正方形区域内,用网箱进行环形布设,形成正方形低藻区域。

(3) 生态浮岛水质净化模块. 功能定位:在鱼类拦截、捕获蓝藻模块形成的低藻区域里,通过设置生态浮岛,进一步控制蓝藻、吸收氮磷、净化水质;具体方法:在鱼类拦截蓝藻模块内形成的正方形低藻区域里,配置生态浮岛水质净化模块。

(4) 在局部水域重建生态系统。

4 参考文献

- [1] 金相灿主编. 湖泊富营养化控制和管理技术. 北京:化学工业出版社,2001:1-2.
- [2] 刘建康译. 湖泊与水库富营养化防治与实践. 北京:科学出版社,2003:1-3.
- [3] 谢平. 鲢、鳙与藻类水华控制. 北京:科学出版社,2003:103-129.
- [4] Shapiro J. Biomanipulation: The next phase-making it stable. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**: 13-27.
- [5] Shapiro J, Lamarra V, Lynch M. Biomanipulation: an ecosystem approach to lake restoration. In: Brezomik PL, Fox JL eds. Proceedings of a symposium on water quality management through biological control. Gainesville: University of Florida, 1975:85-89.
- [6] 许木启,黄玉瑶. 受损水域生态系统恢复与重建研究. *生态学报*,1998,**18**:547-558.
- [7] Hrbacek J, Dvorakova M, Korinek V *et al.* Demonstration of the effect of the fish stock on the species composition of zooplankton and the intensity of metabolism of the whole plankton assemblage. *Verh Int Ver Theoret, Angew Limnol*, 1961,**14**: 192-195.
- [8] Brooks JL, Dodson SJ. Predation, body size, and composition of plankton. *Science*, 1965, **150**: 28-35.
- [9] Hurlbert SH, Zedler J, Fairbanks D. Ecosystem alteration by mosquitofish (*Gambusia affinis*) predation. *Science*, 1972, **175**: 639-641.
- [10] Zaret TM, Paine RT. Species introduction in a tropical lake. *Science*, 1973, **182**: 449-455.
- [11] Carpenter SR, Kitchell JF, Hodgson JR. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience*, 1985, **35**(10): 634-639.
- [12] Northcote TG. Fish in the structure and function of freshwater ecosystems: a "top-down" view. *Can J Fish Aquat Sci*, 1988, **45**: 361-379.
- [13] McQueen DJ. Manipulating lake community structure: where do we go from here? *Freshwater Biol*, 1990, **23**: 613-620.

- [14] 刘恩生. 鱼类与水环境间相互关系的研究回顾和设想. 水产学报, 2007, 31(3): 391-399.
- [15] 刘建康, 谢平. 用鲢、鳙鱼直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践. 生态科学, 2003, 22(3): 193-196.
- [16] 刘恩生. 太湖主要鱼类食物组成. 水产学报, 2008, 32(3): 395-401.
- [17] 刘建康主编. 东湖生态学研究(一). 北京: 科学出版社, 1990.
- [18] 刘建康主编. 东湖生态学研究(二). 北京: 科学出版社, 1995.
- [19] 刘建康, 谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜. 长江流域资源与环境, 1999, 8(3): 312-319.
- [20] Xie P, Liu K. Practical success of biomanipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms: a synthesis of decades of research and application in a subtropical hypereutrophic lake. *The Scientific World Journal*, 2001, 1: 337-356.
- [21] 唐汇娟, 谢平. 围隔中不同密度鲢对浮游植物的影响. 华中农业大学学报, 2006, 25(3): 277-280.
- [22] 董双林. 鲢鱼的放养对水质影响的研究进展. 生态学杂志, 1994, 13(2): 66-68.
- [23] Smith DW. Biological control of excessive phytoplankton growth and enhancement of aquacultural production. *Can J Fish Aquat Sci*, 1985, 42: 1940-1945.
- [24] Smith DW. Phytoplankton and catfish culture: a review. *Aquaculture*, 1988, 74: 167-189.
- [25] 姚宏绿, 吴乃薇, 顾月兰等. 主养青鱼高产池塘的初级生产力及其能量转化为鲢、鳙产量的效率. 水生生物学报, 1990, 14(2): 114-127.
- [26] 陈少莲, 刘肖芳, 华俐. 鲢、鳙在东湖生态系统的氮、磷循环中的作用. 水生生物学报, 1991, 15(1): 8-26.
- [27] Carpenter SR, Kitchell JF, Hodgson JR *et al.* Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecology*, 1987, 68: 1863-1876.
- [28] Carpenter SR, Kitchell JF. Consumer control of lake productivity. *Bioscience*, 1988, 38: 764-769.