

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.001

# 基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践

王寿兵<sup>1</sup>, 屈云芳<sup>2</sup>, 徐紫然<sup>1</sup>

(1. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433; 2. 复旦大学生命科学院, 上海 200433)

**摘要:**介绍了复旦大学研究团队负责实施的基于生物操纵的 3 个湖库蓝藻控制成功案例,总结了取得成功的共性理念和关键技术,重点涉及“内外共生源”的概念及其放大作用、控制蓝藻水华对治理湖库富营养化的作用、经典和非经典生物操纵技术的协同作用、从冬季开始的生物持续控藻在富营养化湖库水华控制中的作用、食藻动物的科学投放,以及滤食鱼类粪便二次污染控制的重要性等。

**关键词:**生物操纵;富营养化;蓝藻水华;湖库蓝藻控制;工程案例

**中图分类号:**X171.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2016)05-0001-04

## Algal bloom control in eutrophic lakes and reservoirs based on biomanipulation

WANG Shoubing<sup>1</sup>, QU Yunfang<sup>2</sup>, XU Ziran<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;  
2. School of Life Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** This paper introduces three successful engineering cases of algal bloom control in lakes and reservoirs conducted by a research group from Fudan University based on the theory of biomanipulation. The related knowledge and technological innovations, involving the concept of the *inner-outer symbiosis pollution source* and its amplifying effects, the significance of algal bloom control to treatment of eutrophic water in lakes and reservoirs, the synergies of the traditional and non-traditional biomanipulation technologies, the effects of sustainable bio-control of algae beginning from winter on the algal bloom control of eutrophic lakes and reservoirs, the suitable modes of stocking algivores, and control of the secondary pollution from manure of filter-feeding fish, are described.

**Key words:** biomanipulation; eutrophication; algal bloom; algal control in lakes and reservoirs; engineering cases

自 20 世纪 80 年代以来,富营养化水体中蓝藻水华治理技术已受到国内外研究者的广泛关注,各种化学、生物和物理控藻技术不断涌现<sup>[1]</sup>。生物控藻技术是利用种间竞争和捕食关系,对水体中有害藻类进行摄食、转化、降解以及转移,从而达到控制有害藻华的目的。由于生物技术副作用较小,甚至可以忽略,因此越来越受到重视,目前已有许多景观湖库、饮用水水库都采用此类技术。生物技术中尤以生物操纵(biomanipulation)控藻理论和技术的研究和应用最引人注目。由于各种原因,目前对较大型富营养化湖库蓝藻控制的成功案例还不多。本文

介绍笔者参与的上海宝钢水库、陈行水库、滴水湖等几个稍大型湖库蓝藻控制的成功实践,同时结合国内外研究成果,提出一些基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制的理念和方法,供大家参考和讨论。

## 1 富营养化湖库蓝藻水华控制案例

### 1.1 宝钢水库蓝藻控制工程

宝钢水库位于长江边,面积 1.67 km<sup>2</sup>,总库容 1.09×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,最大水深 7.25 m,以长江原水为蓄水水源。从 20 世纪 90 年代起蓝藻水华一直影响该水库水质,2002 年出现水库因蓝藻水华引发饮用水和

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-004);留学基金(201606105012)

作者简介:王寿兵(1970—),男,教授,博士,主要从事富营养化水体蓝藻控制和生态修复研究。E-mail:sbwang@fudan.edu.cn

工业生产用水停水的重大事件。2003 年对宝钢水库实施生态综合治理,从 2004 年起连续多年蓝藻水华彻底消失,所采用的关键技术是结合水库结构和水文特点,巧妙利用低水位、低换水频率运行的方式,在表层区域形成一个滤食鱼类和藻类共同分布的区域,同时形成一个长 6 km,宽 50 m 左右的适合环棱螺生存的浅水平带,藻类随库流或风生流吹到这一浅水区域,此时藻类和环棱螺的空间分布一致,便于人工定点投放的高密度螺类充分杀灭藻类。

### 1.2 上海陈行水库蓝藻控制工程

陈行水库也位于长江边,面积 1.53 km<sup>2</sup>,有效库容 8.3×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,平均水深 3~4 m,最深处达 7 m,以长江原水为蓄水水源。从建库起,蓝藻水华出现波动性发展,1994—1995 年是蓝藻水华暴发高峰;1996—2003 年为低峰,2004—2005 年又出现蓝藻水华暴发高峰。作为当时上海市重要饮用水源地,陈行水库的蓝藻水华是市政府最关注的问题之一。从 2006 年实施生态控藻后已连续多年彻底消除蓝藻水华发生,所采用的主要技术手段是:人为构建以滤食性鱼类为主的控藻食物网,通过构建“生态陷阱”式的高强度滤食区,改变流场,将水流中的微囊藻带至鲢鱼的自然聚集区,大幅提升鱼类的控藻效率;同时利用水库短期的水位变化和水动力特征,根据蓝藻分布的时空规律,在不同季节实施不同的调控策略,包括冬季(1—3 月)间歇性低水位时进行排藻,利用水位变化形成的消落带进行干化灭藻,以及夏季(6—9 月)综合利用水位控制和风场进行排藻等。

### 1.3 上海浦东新区滴水湖蓝藻控制工程

滴水湖面积 5.16 km<sup>2</sup>,是国内最大的人工淡水湖。新建的临港新城中心是上海市重要的新城开发区项目,项目的发展直接受滴水湖水质的影响。滴水湖 2004 年引水、2006 年暴发数平方千米的蓝藻水华一直持续到冬季;2007 年实施生态控藻后,滴水湖连续 3 年蓝藻水华彻底消失。上海市水质监测中心报告已证明,连续数年滴水湖全湖内没有监测到微囊藻颗粒。所采用的主要技术手段仍然是巧妙构建“鱼藻共存”的生态陷阱,充分发挥非经典生物操纵技术的作用。

## 2 富营养化湖库蓝藻控制的理念与方法

依据“一湖一策”的原则<sup>[1]</sup>,上述 3 个湖库的成功控藻虽然采取的综合技术手段并不完全相同,但对富营养化湖库的蓝藻控制和生态修复而言,有一些带共性的理念问题和关键技术值得重视、探讨和总结。

### 2.1 “内外共生源”的放大作用值得关注

造成湖库水体富营养化的污染来源往往很多,既有来自入湖河流、排污口、地表径流以及干湿沉降的外源污染,也有来自湖体底泥、异养生物、水中悬浮物的内源污染,同时还有一种借助内源、外源营养物和能量(如太阳能)不断增殖的自养生物源(笔者称之为“内外共生源”)。无论是高等水生植物,还是低等的浮游藻类,均可通过光合作用利用水体 N、P 等营养物积累有机物,从表面上看好像具有一定的水体净化功能,但如果不能有效管控并适时从湖库中带走其不断积累的有机物,任其发展,特别是当蓝藻等浮游藻类大量繁殖成为优势种时,则不但不能削减水体中的营养物质,反而还会对内源污染和外源污染产生剧烈的放大作用,其危害往往难以估量。对富营养化水体来说,蓝藻水华暴发一次,就可能抵消以往内外污染源控制若干年的努力。滇池外海大量暴发的蓝藻水华就是一个很好的例子。

目前,人们对外源污染和内源污染及其相关治理技术已有较大关注,并取得了重要进展<sup>[2-3]</sup>,但对蓝藻等浮游藻类在富营养化水体中的放大作用则重视不够。基于对蓝藻内外共生源放大作用的认识,笔者认为,对于大型富营养化水体的生态治理和修复,仅仅依靠控制内外污染源来控制蓝藻水华和修复生态系统,必将是一个缓慢而艰巨的过程,更为有效的策略是既要对外源污染和内源污染开展针对性的治理,更要把“内外共生源”的控制放在更加突出的地位。

### 2.2 控制蓝藻水华是治理富营养化的有效手段

蓝藻水华暴发是水体富营养化后的一种表现,后果是进一步造成水体更加富营养化。蓝藻水华暴发后,水体透明度急剧下降,有时几近于零,沉水植物常遭受重大打击;藻体死亡分解后释放大量有机物和其他有毒有害物质,水体可再次利用的营养物快速增加,水生动物常因藻毒素的毒害或者兼 DO 缺乏而遭受灭顶之灾。每一次水华暴发都可能打破原有的生态系统平衡,使所有之前的生态修复努力几乎化为乌有。因此,对于尚未富营养化的水体,有效控制进入水体的 N、P 等营养物质和有机污染物是防止水体富营养化行之有效的手段之一;但对于已经富营养化的湖库,尤其在短期内难以大幅度削减富营养化物质的大中型湖库,仅靠传统的除氮去磷的方法是很难从根本上扭转“蓝藻水华暴发—富营养化加重—水华愈发暴发—富营养化愈加严重”这种恶性循环趋势的。一方面,因为蓝藻水华在很低的 N、P 浓度下就可暴发,因此,要将大中型湖库水体中的 N、P 削减到蓝藻水华不暴发的水平是不

现实的,也是没有必要的;另一方面,蓝藻暴发后新生成的有机物还可能远远超过人们去除的营养盐数量。因此,更为适宜的方法应该是找到更加有效的除藻方法,尽早切断这种恶性循环,否则难免会出现“越治越差”的结果。我国有些湖库治理了很多年,投入了很多钱,却未见根本好转,社会上常常有人抱怨“越治越差”,这种现象值得人们深思。

对于已经富营养化的大中型湖库,在治理上应转变传统观念,充分认识到治理富营养化的目的不仅是控制蓝藻水华,但控制蓝藻水华是治理湖库富营养化的一种有效手段。

### 2.3 充分发挥经典和非经典生物操纵技术的协同作用

生物操纵技术是通过浮游动物、鱼类、底栖动物等水生动物对有害藻类的摄食行为达到控制有害藻华的一种方法,包括经典生物操纵(traditional biomanipulation)技术和非经典生物操纵(nontraditional biomanipulation)技术。

经典生物操纵技术是通过放养肉食性鱼类或直接捕(毒)杀等方法去除以浮游动物为食的鱼类,保护和发展大型牧食性浮游动物,使其生物量增加和体型增大,提高其对浮游植物的摄食效率,从而降低浮游植物的数量,控制其过量繁殖<sup>[4-5]</sup>。近几十年来的研究和应用实践表明,经典的生物操纵技术在控制湖库水体浮游植物总量方面具有一定效果,但浮游动物只能控制小型藻类,本身难以直接利用微囊藻、颤藻和束丝藻等大型蓝藻群体<sup>[6-7]</sup>。同时,伴随着大量大型肉食性浮游动物的出现,水中植食性浮游动物如轮虫、小型枝角类等会遭到高强度攻击,从而降低了对浮游植物的捕食能力<sup>[7]</sup>。

非经典生物操纵技术则是通过投放鲢鳙等滤食性鱼类来直接摄食蓝藻等浮游生物。许多实验结果表明,当鲢鳙等滤食性鱼类达到阈值密度时,对蓝藻等大型藻类或群体确有较好的控制作用<sup>[7-11]</sup>。但同时也发现,该技术在其他浮游藻类的控制和水体营养盐循环方面存在一些不足。鲢鱼一般滤食 30  $\mu\text{m}$  以上的大型浮游植物、小型浮游植物群体以及一部分浮游动物;而鳙鱼则主要滤食大型轮虫、枝角类、桡足类等浮游动物,因此,鲢鳙对非群体的微小浮游植物不但无法滤食,反而会因为减少了大型藻类的竞争和浮游动物的摄食,促进小型藻类的发展,致使水体浮游植物总生物量难以减少,有的甚至还会增加,而不利于水质改善<sup>[11-16]</sup>。

由此可见,无论是经典的生物操纵技术,还是非经典的生物操纵技术,它们都各有长处,同时也不可避免地存在着一些不足。因此,需要将经典生物操

纵技术和非经典生物操纵技术进行有机整合,取长补短,从而更好地发挥其控藻作用。

### 2.4 从冬季开始的生物持续控藻是富营养化湖库水华控制的关键

我国许多流域都有一个冬季低温季节,而此时水华藻类群体多数已死亡,仅残留有部分沉底越冬或生存于上浮水中。即使是在云南昆明滇池,冬季气温达到过接近 0℃ 的记录,水温低至 10℃ 左右,此时尽管水体中还有不少水华藻类存在,但已比暴发季节减少了 95% 以上。由于蓝藻属于生态学上典型的“r-对策者”,当生存条件允许,且种群量达到一定的阈值后,蓝藻的增殖速度是非常惊人的。蓝藻水华一旦暴发,再想通过生物操纵等方法来进行持续控藻是无济于事的。况且从成本角度以及鲢、鳙鱼本身对生态系统的影响来看,也不可能无限制地增加投放量来控制已暴发的蓝藻水华。而对大中型湖库而言,采用化学方法一次性投入杀藻,即使在局部地区有效,也不可能从根本上解决全湖的问题,而且还极易蓝藻复发。这也是许多小型景观水体经常面临的问题。因此,必须从冬季开始就开展对蓝藻的持续控制,而不是等其发展到一定密度后再采取措施,这既是控藻的关键,也是目前许多湖库水体蓝藻控制中较为忽视的地方。

冬季蓝藻数量少、无增殖或少增殖,具有沉底、毒性小、不成团的特性,此时进行生物控藻,往往可以起到“四两拨千斤”的功效。因此,应在冬季开始前即大量投放螺、蚌、蚬、螃蟹等底栖性食藻动物和鲢鳙鱼类,尤其是一些有冬季滤食行为的冷水性鱼类和底栖动物,让其尽量多地摄食冬季越冬藻种或初春刚复苏、增殖的藻体,这样始终将种群数量控制在暴发阈值之下。

### 2.5 食藻动物的投放必须高度集中于蓝藻易于集聚和可能率先暴发的“热点区域”

虽然非经典生物操纵理论提出了可用滤食性鱼类来控制蓝藻的可能性,并在一些围隔实验和小型水体中得到了验证,但在较大水域中的实践应用却少有真正成功的案例。这与食藻动物的投放不当不无关系。传统的投放方式是将食藻动物随机投放到湖库水体中,而研究发现,鲢、鳙等摄食浮游生物鱼类投放后,与水华蓝藻在水体中存在时空分布不一致的现象,蓝藻随风场、流场漂浮聚集,而鱼群常逆风场、流场聚集,鱼、藻呈现空间上的严重分离(空间生态位不重叠),常常是藻多的地方鱼并不多,而鱼多的地方藻并不多,因此,即使按非经典生物操纵理论投放了大量的滤食性鱼类,单位体积水体内的存鱼量很高,也不能很好地发挥鱼类对蓝藻

的滤食功能。这就是许多利用非经典生物操纵技术控藻失败的原因之一。

为克服较大水域中出现的“鱼、藻分离”问题,一种行之有效的办法就是利用蓝藻的垂直与漂移特性,以及滤食鱼类的活动规律,运用水体流场设计,创造能让鱼类集中活动的场所,同时引导蓝藻漂移进入该区域,或寻找蓝藻复苏期易于集聚的“热点”地区集中投放滤食动物,达到鱼、藻共同分布,为滤食性鱼类提供食藻的场所与机会,最终实现高效清除蓝藻的目的。

上述方法不但解决了大水域中鱼、藻分离的问题,极大地提高了使用非经典生物操纵技术的控藻效率,同时,将滤食性鱼类限制在一个较小的范围内,减少了外部广大区域滤食性鱼类的数量,为食藻浮游动物种群的发展壮大创造了条件,从而实现了运用经典生物操纵技术控藻的目标。

## 2.6 加强滤食鱼类粪便二次污染控制十分重要

非经典生物操纵技术常常被人批评的一点,就是尽管鲢、鳙能够通过滤食方式有效摄食水华蓝藻,但由于多数组成水华的蓝藻细胞具有较厚的公共或个体衣鞘,鲢、鳙对水华蓝藻(微囊藻)的消化利用率很低,一般只有 25%~30%<sup>[17]</sup>。浮性的鲢、鳙粪便中往往还存在着大量未消化的具有生命力的蓝藻。这些蓝藻细胞回到水体后还能继续增殖,甚至由于超补偿生长,其光合作用及生长活性在短期恢复并显著增强,其他有机废物也随之被很快分解利用,而加速了系统中营养物的再生,造成“鱼类富营养化(ichthyo-eutrophication)”现象<sup>[18]</sup>。

因此,要让非经典生物操纵技术更好地发挥作用,就必须克服浮性鱼粪所造成的二次污染问题。复旦大学研究团队率先在国内提出了利用水文条件、风力作用,以及底栖鱼类扰动等,来增加水体浊度,增加鲢、鳙鱼泥沙摄入量,使其排泄可沉底的鱼粪,并投放底栖动物及时将其摄食。这种“鱼粪沉底控藻”技术首次在面积超过 1 km<sup>2</sup> 的宝钢水库蓝藻治理中得到成功验证,后来在面积超过 5 km<sup>2</sup> 的上海滴水湖和其他水体蓝藻治理中多次得到成功应用。鱼粪沉底后,有 2 种命运:一是在被摄食之前,其中未消化的藻类或残体由于水底光线较弱,水温较低,死亡或处于发育停滞状态;二是被投放的底栖动物和底层鱼类再次摄食,因而其影响被大大削弱。

## 3 结 语

无论是经典生物操纵技术还是非经典生物操纵技术,其原理已越来越为人们所熟知,其应用中存在的优缺点也逐渐为人们所认识。尽管实际控藻效果

在不同的实践应用中表现不一,有人成功了说它好,有人失败了说它不行,但毋庸置疑的是,无论行还是不行,在我国现有的富营养化水体蓝藻控制技术体系 and 实践应用中,“生物操纵”仍然是一个绕不开的话题和不容忽视的领域。笔者从取得成功的几个工程案例出发,结合国内外研究进展,从不同侧面提出了一些体会和初步认识,旨在抛砖引玉。

## 参考文献:

- [1] 王寿兵,徐紫然,张洁. 大型湖库富营养化蓝藻水华防控技术发展述评[J]. 水资源保护,2016,32(4):88-99. (WANG Shoubing, XU Ziran, ZHANG Jie. A review of the technologies for prevention and control of cyanobacteria blooms in large-scale eutrophicated lakes and reservoirs [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4):88-99. (in Chinese))
- [2] 王寿兵,钱晓雍,赵钢,等. 环淀山湖区域污染源解析[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(3):331-336. (WANG Shoubing, QIAN Xiaoyong, ZHAO Gang, et al. Contribution analysis of pollution sources around the Dianshan Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(3):331-336. (in Chinese))
- [3] 朱俊,董辉,王寿兵,等. 长江三峡库区干流水体主要污染负荷来源及贡献[J]. 水科学进展,2006,17(5):709-713. (ZHU Jun, DONG Hui, WANG Shoubing, et al. Sources and quantities of main water pollution loads released into Three-Gorge Reservoir of the Yangtze River [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5):709-713. (in Chinese))
- [4] SHAPIRO J, LAMARRA V, LYNCH M. Biomanipulation: an ecosystem approach to lake restoration [J]. Proceedings of the Symposium on Water, 1975, 21(6):85-96.
- [5] STARLING F L R M. Control of eutrophication by silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in the tropical Paranao Reservoir (Brasilia, Brazil): a mesocosm experiment [J]. Hydrobiologia, 1993, 257:143-152.
- [6] 刘建康,谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(3):312-319. (LIU Jiankang, XIE Ping. Unraveling the enigma of the disappearance of the water bloom from the East Lake (Lake Donghu) of Wuhan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999, 8(3):312-319. (in Chinese))
- [7] 谢平. 鲢、鳙与藻类水华控制[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [8] SMITH D W. Biological control of excessive phytoplankton growth and the enhancement of aquacultural production [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1985, 42:1940-1945. (下转第 23 页)

- 2006, 22 ( 12 ): 65-71. ( WANG Yunqiang, ZHANG Xingchang, CONG Wei, et al. Spatial variability of soil moisture on slope-land under different land uses on the Loess Plateau [ J ]. Transactions of the CSAE, 2006, 22 ( 12 ): 65-71. ( in Chinese ) )
- [ 13 ] 王军,傅伯杰.黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[ J ].地理学报,2000,55( 1 ):84-91. ( WANG Jun, FU Bojie. The impact of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture on the Loess Plateau [ J ]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55 ( 1 ):84-91. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] QIU Yang, FU Bojie, WANG Jun, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China [ J ]. Journal of Hydrology, 2001, 240( 3/4 ): 243-246.
- [ 15 ] LIN H S, KOGELMANN W, WALKER C, et al. Soil moisture patterns in a forested catchment: a hydropedological perspective [ J ]. Geoderma, 2006, 131: 345-368.
- [ 16 ] LIN H, ZHOU X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment [ J ]. European Journal of Soil Science, 2008, 59:34-49.
- [ 17 ] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[ M ].北京:中国农业出版社,2000:266-295.
- [ 18 ] 冯益明,唐守正,李增元.空间统计分析在林业中的应用[ J ].林业科学,2004,40( 3 ):149-155. ( FENG Yiming, TANG Shouzheng, LI Zengyuan. Application of spatial statistic analysis in forestry [ J ]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40( 3 ):149-155. ( in Chinese ) )
- [ 19 ] DEUTSCH C V, JOURNAL A G. GSLIB geostatistical software library and user' s guide [ M ]. 2nd Edition. Oxford:Oxford University Press, 1998.
- [ 20 ] 王孟本,李宏建.晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[ J ].生态学报,1995,15( 2 ):178-184. ( WANG Mengben, LI Hongjian. Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantations in the Loess Plateau region in northwestern Shanxi [ J ]. Acta Ecol Sin, 1995, 15( 2 ):178-184. ( in Chinese ) )
- [ 21 ] YIN J, Young M, YU Z. Effects of paleoclimate and time-varying canopy structures on paleowater fluxes [ J ]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113 ( D6 ): 304-312. doi:10. 1029/2007JD009010.
- [ 22 ] FAMIGLIETTI J S, RUDNICKI J W, RODELL M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [ J ]. Journal of Hydrology, 1998, 210:259-281. ( 收稿日期:2015 - 10 - 15 编辑:彭桃英)
- 
- ( 上接第 4 页 )
- [ 9 ] 李琪,李德尚,熊邦喜,等.放养鲢鱼对水库围隔浮游生物群落的影响[ J ].生态学报,1993,13( 1 ):30-37. ( LI Qi, LI Deshang, XIONG Bangxi, et al. Influence of silver carp ( *Hypophthalmichthys molitrix* ) on plankton community in reservoir enclosures [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 1993, 13( 1 ): 30-37. ( in Chinese ) )
- [ 10 ] DOMAIZON I, DEVAUX J. Experimental study of the impacts of silver carp on plankton communities of eutrophic Villerest reservoir ( France ) [ J ]. Aquatic Ecology, 1999, 33: 193-204.
- [ 11 ] KAJAK Z, RYBAK J, SLXXTNIEWSKA I, et al. Influence of the planktivorous fish, *Hypophthalmichthys molitrix*, on the plankton and benthos of the eutrophic lake [ J ]. Pol Arch Hydrobiol, 1975, 22:301-310.
- [ 12 ] LAZZARO X. A review of planktivorous fishes: their evolution, feeding behaviours, selectivities, and impacts [ J ]. Hydrobiologia, 1987, 146:97-167.
- [ 13 ] 刘焕亮. 鲢鱼、鳙鱼的滤食器官[ J ]. 大连水产学院学报, 1981, 6 ( 11 ): 13-33. ( LIU Huanliang. The filtering apparatus of silver carp and bighead carp [ J ]. Journal of Dalian Ocean University, 1981, 6 ( 11 ): 13-33. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 王丽卿,许莉,陈庆江,等. 鲢鳙放养水平对淀山湖浮游植物群落影响的围隔实验[ J ]. 环境工程学报, 2011, 5 ( 8 ): 1790-1794. ( WANG Liqing, XU Li, CHEN Qingjiang, et al. Stocking level effects of silver and bighead carps on the phytoplankton community in enclosures in Dianshan Lake [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5( 8 ):1790-1794. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] SOSNOVSKAYA A, QUIRO R. Effects of fish manipulation on the plankton community in small hypertrophic lakes from the Pampa Plain ( Argentina ) [ J ]. Limnologica, 2009, 39:219-229.
- [ 16 ] DRENNER R W, BACA R M. Community responses to piscivorous largemouth bass: a biomanipulation experiment [ J ]. Lake and Reservoir Management, 2002, 18 ( 1 ): 44-51.
- [ 17 ] 陈少莲,刘肖芳,胡传林,等.论鲢、鳙对微囊藻的消化利用[ J ].水生生物学报,1990,14( 1 ):49-59. ( CHEN Shaolian, LIU Xiaofang, HU Chuanlin, et al. On the digestion and utilization of microcystis by fingerlings of silver carp and bighead [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1990, 14( 1 ):49-59. ( in Chinese ) )
- [ 18 ] OPUSZYNSKI K. The influence of silvercarp (*Hypophthalmichthys molitrix* Val.) on eutrophication of the environment of carp ponds [ J ]. Roczniki Nauk Rolniczych, 1978, 99H: 127-151. ( 收稿日期:2016 - 08 - 02 编辑:彭桃英)