

放养鲢鱼预处理高藻原水的除藻效能及特性

范振强¹, 崔福义¹, 马华¹, 何文杰², 阴沛军²

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 天津自来水集团有限公司, 天津 300040)

摘要:为减轻藻类对水厂常规处理工艺净水效能的影响, 在某水厂预沉池中进行了放养滤食性鲢鱼去除高藻水中藻类的生产性试验研究. 结果表明, 以水华微囊藻为优势种的高藻原水经过在水厂预沉池放养鲢鱼进行预处理之后, 藻类总量、蓝藻和水华微囊藻含量分别下降了 61.8%、76.1% 和 78.2%. 原水藻类含量的大幅降低有效减轻了后续常规工艺的藻类负荷, 为水处理创造了有利条件. 分析认为鲢的滤食选择和不同的藻类规格是对蓝藻和绿藻不同去除效率的原因. 试验表明, 放养鲢鱼的生物控制技术适用于处理群体性蓝藻占优势地位的高藻原水.

关键词: 鲢; 高藻原水; 预沉池; 生物控制; 蓝藻

中图分类号: X52; TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0632-06

Effectiveness and Characteristics of Treating Algae-Laden Raw Water by Stocking Silver Carp

FAN Zhen-qiang¹, CUI Fu-yi¹, MA Hua¹, HE Wen-jie², YIN Pei-jun²

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Tianjin Waterworks Group Co. Ltd., Tianjin 300040, China)

Abstract: To reduce the negative effect of algae on conventional water treatment, a full-scale research of removing algae from algae-laden raw water by stocking filter-feeding silver carp was processed. After the pretreatment in a presedimentation tank with silver carp, the concentration of phytoplankton, the biomass of cyanobacteria and *Microcystis flos-aquae* in algae-laden raw water with *Microcystis flos-aquae* its dominant species decreased 61.8%, 76.1% and 78.2% respectively. This effective decrease of algae load on conventional process created favorable conditions for water treatment. Analysis indicates that food habit of silver carp and algae size are two causes of different removal efficiency between cyanobacteria and green algae. The results show that biomanipulation of silver carp is applicable for treating algae-laden raw water in which colonial cyanobacteria is dominant.

Key words: silver carp; algae-laden raw water; presedimentation tank; biomanipulation; cyanobacteria

原水含藻量高是困扰水厂安全供水的问题之一. 饮用水常规处理工艺中, 在沉淀池不易沉降的藻类可造成滤池堵塞, 穿透滤池的藻类加氯消毒后会产生产物^[1~3], 进入供水管网的藻类繁殖又对供水水质构成严重影响. 并且, 某些蓝藻产生的微囊藻毒素(microcystin, MC)对水生动物及人类健康构成的威胁已为大量的研究所证明^[4]. 所以, 当蓝藻(特别是微囊藻)成为高藻原水中的优势藻类时, 饮用水处理中对藻类的去除就更为迫切.

目前常规的饮用水除藻方法主要集中于对厂内工艺的改进, 有以强氧化剂^[5]和杀藻剂为除藻手段的化学方法、以气浮^[6]和膜过滤^[7]为代表的物理化学方法, 以及采用微滤机^[8]的物理方法等. 化学方法、物化方法和物理方法的共同优点是除藻效率高, 不过也各有不足. 化学方法以投加药剂达到除藻目的, 但在处理过程中可能会产生对人体有害的副产物, 特别是氧化剂的使用可引起有毒蓝藻藻体破裂从而导致胞内毒素释放^[9]. 气浮和膜过滤等方法虽

然没有副产物问题, 但操作复杂、运行成本较高^[10]. 无论何种方法, 在高藻期为了达到期望的除藻程度, 都要求有很高的去除率, 这往往是很困难的.

除上述方法之外, 人们尝试采用生物方法解决藻类问题. 国内外针对水体富营养化、藻类繁殖问题, 方满足水环境质量标准为目的, 在湖泊水库等大水体开展了很多生物控制研究. Kajak 等^[11]的研究表明, 在波兰富营养化的 Wamiak 湖中放养鲢之后浮游植物总生物量和蓝藻所占的比例大大减少. 刘建康等^[12]和谢平^[13]在武汉东湖所进行的围隔试验证明, 东湖蓝藻水华消失的原因是由于湖中高密度鲢、鳙的放养. 虽然也有成功实例, 但是在大型水体中实施生物控制措施有几点不利因素. 湖泊水库等大型水生生态体系构成复杂, 生物种类繁多、关系复杂, 对这些生物的种类及密度进行人工调整难度较

收稿日期: 2007-04-04; 修订日期: 2007-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778048)

作者简介: 范振强(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为给水处理, E-mail: fan96@126.com

大.另外,湖泊水库等大型水体水力条件复杂、外界影响因素众多,不易控制.因此,在湖泊水库等大型水体中实施生物控制较难达到预期效果.而在饮用水处理领域,崔福义等^[14]进行的生物控制技术去除浮游动物的研究表明,鲢、鳙在有效去除水中剑水蚤的同时,对藻类也有一定去除效果.借鉴上述经验,将大型水体生物控制的基本思想移植于饮用水处理,作为传统水处理工艺的前处理,以降低原水中藻类含量、为厂内除藻处理创造条件为目的,采用运行成本极低而且不产生有害副产物的生物控制技术对高藻原水进行预处理,是一条可行的途径.但是饮用水处理领域中以除藻为目的的生物控制技术研究和应用还鲜见报道.

本研究以某高藻原水为对象进行了生产性试验,考察了放养鲢鱼的生物控制技术在 实际生产应

用中的除藻效能,并对其除藻特性及在水处理中的适用范围进行了初步探讨.

1 材料与方法

1.1 生产试验场地及鲢鱼投放

试验在天津某水厂进行,处理水量12 000 m³/d.以引滦水为原水,试验期间原水主要水质及相关参数情况如表 1 和图 1 所示.根据中国环境监测总站制定的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规范》,计算原水的 TLI 指数.计算结果,原水 TLI(TP)介于 42.49 ~ 59.09 之间,TLI(TP)平均值为 48.67,属于中营养~轻度富营养状态.

水厂处理工艺流程为:原水首先进入预沉池,预沉池出水经泵提升进入常规处理工艺(泵前投药→机械搅拌絮凝→斜管沉淀→虹吸过滤→消毒).

表 1 试验期间原水主要水质及相关参数情况

Table 1 Raw water quality and associated parameters during the experimental period							
数值	水温/℃	光照时间/h	浊度/NTU	pH 值	高锰酸盐指数/mg•L ⁻¹	总磷/mg•L ⁻¹	藻类细胞密度 × 10 ⁴ /cells•L ⁻¹
平均值	26.0	14.3	12.05	7.90	4.19	0.060	3 255

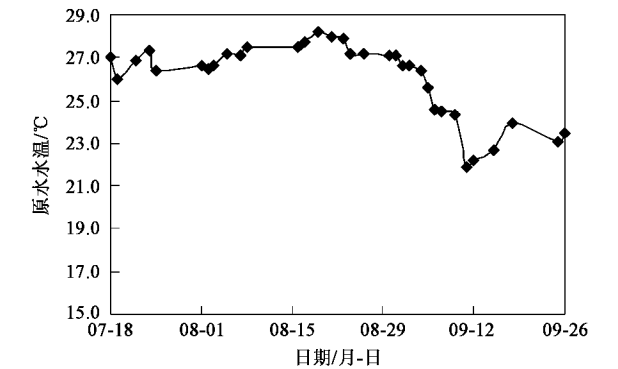


图 1 试验期间原水水温

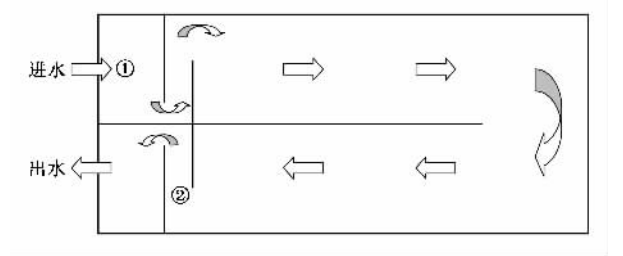


图 2 A 预沉池示意
Fig.2 Configuration of presedimentation tank A

Fig.1 Temperature of raw water during the experimental period

该预沉池为矩形,中间有导流墙,池长 210 m,宽 86 m,水深 3.3 m,容量50 000 m³,水力停留时间约为 3.5 d,如图 2 所示.在预沉池内实施生物控制措施(以该放养鲢鱼的预沉池为 A 预沉池,下同).2005 年 5 月向池中投放鲢鱼苗约9 000尾,单位鲢鱼重(120 ± 21.8) g,放养密度约 22 g/m³.此后至 2006 年 7 月高藻期间,经过 1 a 的自然生长,池中单尾鲢鱼重达到(360 ± 32.3) g,放养密度达到约 65 g/m³.其间未观察到有鱼类死亡.本研究是对 2006 年 7 月起,放养鲢鱼除藻效能的分析.

1.2 空白试验

为讨论预沉池中放养鲢鱼是否对藻类含量的影

响,选定一个未放养鲢鱼的预沉淀池作为空白(以该未放养鲢鱼的预沉池为 B 预沉池,下同).B 预沉池同样以引滦水为原水,原水水质与 A 预沉池极为相似.B 预沉池长 200 m,宽 200 m,水深 6 ~ 9 m,容量 30 万 m³,水力停留时间 24 h,没有放养鲢鱼.

1.3 水样采集及水质参数定量分析方法

定期在 A 预沉池(见图 2)进口①点、出口②点,以及 B 预沉池的进出口采集水样.水质参数中温度、浊度、pH 值、高锰酸盐指数和磷含量等的测定采用《水和废水分析监测方法(第四版)》中所规定的国家标准分析方法.

藻类的定量分析:取水样量为 1 L,加鲁哥氏碘液固定.从该水样中取 500 mL,用醋酸纤维膜(孔径 0.65 μm)过滤.然后将带有浮游植物的滤膜放入 50 mL 烧杯中,加高纯水定容至 30 mL.将该盛有滤膜

的烧杯放入超声波清洗器中(CBL, C5860A 型)振荡 10 min, 取出. 以微量移液器吸取 0.1 mL 样品注入 0.1 mL 藻类计数框(中国科学院武汉水生所定制), 在显微镜(OLYMPUS, BX41 型)10 × 40 倍镜下分类计数, 其中, 对群体水华微囊藻也是按细胞计数. 镜检 50 个视野, 分别计数各门藻类的数量, 再折算出 1 L 水样中的藻类数量.

2 结果与分析

2.1 预沉池进水藻类含量及组成

试验期间 A 预沉池进水藻类含量平均为 $3\,255 \times 10^4$ cells/L, 最高达 $5\,425 \times 10^4$ cells/L, 大大高于《含藻水给水处理设计规范》(CJJ32-89)对“含藻水”的规定限制(100×10^4 cells/L).

原水藻类组成中, 以蓝藻(cyanobacteria)为优势藻类, 占进水藻类总量的比例最大为 98.1%, 平均 94.9%, 占绝对优势. 蓝藻之外的其他藻类中, 除绿藻占一定比例(平均为 4.0%)之外, 其他藻类(隐藻, 裸藻和硅藻等)所占比例都极低, 见表 2 及图 3. 藻类分析表明, 原水中蓝藻主要有以下几种: 水华微囊藻 *Microcysts flos-aquae* (Wittr.) Kirchner、圆胞束球藻 *Gomphosphaeria aponina* Kütz.、点形平裂藻 *Merismopedia punctata* Meyen.、细小平裂藻 *Merismopedia minima* G. Beck 和铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* Kutzing 等, 其中, 以水华微囊藻 *Microcysts flos-aquae* (Wittr.) Kirchner 为优势蓝藻. 高藻期间, 水华微囊藻占蓝藻比例为 71% ~ 99%, 平均为 91%, 是原水中藻类的优势种, 见图 5. 有研究表明, 25 ~ 30℃ 是微囊藻生长的最适温度^[15], 此时微囊藻的比增长率最大. 由图 1 可知, 试验期间, 原水水温平均为 26.0℃, 恰好处于微囊藻生长的最适温度范围, 这为水华微囊藻成为水中的优势藻类并产生微囊藻毒素提供了条件. 以 8 月 24 日为例, A 预沉池进水中, 水华微囊藻占藻类总数的比例为 96.3%, 为绝对优势种, 如图 6 所示.

表 2 试验期间 A 预沉池进出水藻类比例/%

数值	蓝藻		绿藻		其他藻类	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水
最小值	86.7	28.7	0.9	15.0	0.4	1.6
最大值	98.1	80.9	11.6	61.1	2.5	13.1
平均值	94.9	54.1	4.0	38.5	1.1	7.4

2.2 放养鲢鱼的预沉池进出水藻类总量变化

由图 4 可知, 试验期间 A 预沉池出水的藻类含

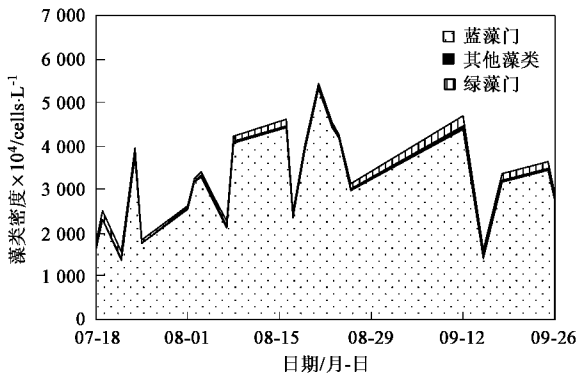


图 3 A 预沉池进水藻类组成

Fig.3 Phytoplankton composition of raw water of presedimentation tak A

量平均为 $1\,215 \times 10^4$ cells/L, 最低为 577×10^4 cells/L, 并且, 在大部分时间内出水藻类含量在 $1\,500 \times 10^4$ cells/L 以下. A 预沉池对藻类总量的去除率为 28.8% ~ 84.1%, 平均去除率为 61.8%. 在原水藻类含量较高的情况下, 放养鲢鱼的预沉池表现了稳定高效的除藻能力. 预沉池出水藻类含量的大幅减少有效降低了后续处理工艺的藻类负荷, 有利于改善后续工艺处理条件, 稳定出水水质, 降低生产成本.

对比图 3 与图 4 可知, A 预沉池出水藻类总量的降低是因为蓝藻含量的减少. 而结合图 3、图 4 及表 3 发现, 与藻类总量和蓝藻的大幅下降不同, A 预沉池出水中绿藻与其他藻类的含量相对原水是增加的. 出现这种现象的原因将在下文中进行探讨.

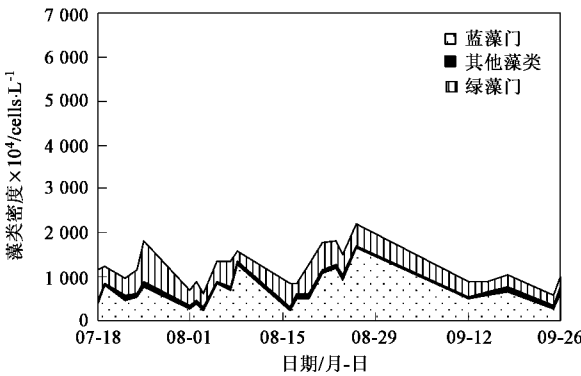


图 4 A 预沉池出水藻类组成

Fig.4 Phytoplankton composition of outflow of the presedimentation tank A

2.3 放养鲢鱼的预沉池对蓝藻的去除效能

水华微囊藻是 A 预沉池进水藻类中的优势种, 所以放养鲢鱼对高藻原水中蓝藻控制去除的关键就是对水华微囊藻的控制和去除. 在整个高藻期期间,

表3 A 预沉池与 B 预沉池的进出水藻类含量对比 × 10⁴/cells·L⁻¹

Table 3 Comparison of algae density between the inflow and outflow of the presedimentation tank A and B × 10 ⁴ /cells·L ⁻¹							
日期	预沉池	水样	水华微囊藻	非水华微囊藻的蓝藻	绿藻	其他藻类	藻类总量
08-24	A 预沉池	进水	4 107	76	39	42	4 263
		出水	900	44	442	125	1 511
	B 预沉池	进水	4 034	269	64	34	4 400
		出水	5 693	242	54	29	6 019
9-11	A 预沉池	进水	1 455	59	169	7	1 689
		出水	658	301	232	95	1 286
	B 预沉池	进水	1 807	161	134	22	2 124
		出水	2 569	225	152	22	2 968
9-18	A 预沉池	进水	3 046	139	159	29	3 374
		出水	413	257	257	108	1 034
	B 预沉池	进水	2 405	5	103	39	2 552
		出水	3 114	5	134	42	3 295
9-25	A 预沉池	进水	3 161	288	139	32	3 620
		出水	271	7	222	76	577
	B 预沉池	进水	3 053	325	137	10	3 525
		出水	3 381	142	142	12	3 677

放养鲢鱼的 A 预沉池对蓝藻(尤其是水华微囊藻)的控制和去除是高效稳定的.由图 5 可知,试验期间原水蓝藻含量最高达5 319 × 10⁴ cells/L,平均3 107 × 10⁴ cells/L;其中水华微囊藻含量最高达4 980 × 10⁴ cells/L,平均2 835 × 10⁴ cells/L.经过放养鲢鱼的 A 预沉池预处理之后,出水中蓝藻含量平均降为 675 × 10⁴ cells/L,最低达 230 × 10⁴ cells/L;其中水华微囊藻含量平均降为 555 × 10⁴ cells/L,最低达 147 × 10⁴ cells/L.放养鲢鱼使水中蓝藻含量大幅降低,对蓝藻的去除率为 43.2% ~ 94.6%,平均 76.1%;其中对水华微囊藻的去除率为 40.5% ~ 94.9%,平均 78.2%.以 8 月 24 日为例,A 预沉池进水蓝藻含量为4 182 × 10⁴ cells/L,出水蓝藻含量 944 × 10⁴ cells/L,对蓝藻的去除率为 77.5%;其中预沉池进水水华微囊藻含量为4 107 × 10⁴ cells/L,出水水华微囊藻含量 900 × 10⁴ cells/L,水华微囊藻去除率为 78.1%,如图 6 所示.

放养鲢鱼的 A 预沉池对原水中蓝藻,特别是水华微囊藻的有效去除,使藻毒素的潜在生成量大大减少,这对保证饮用水水质安全有重要意义.

2.4 空白对比试验

试验期间进行的 4 次空白对比试验有相似的结果,即放养鲢鱼的 A 预沉池对水中的藻类进行了有效的去除,而未放养鲢鱼的 B 预沉池出水中藻类含量不仅没有下降,反而有所升高,如表 3 所示.以 8 月 24 日为例,如图 6 所示,A 预沉池进水藻类含量为4 263 × 10⁴ cells/L,其中水华微囊藻含量4 107 × 10⁴ cells/L,占进水藻类含量的 96.3%;B 预沉池进水藻类含量为4 400 × 10⁴ cells/L,其中水华微囊藻含量

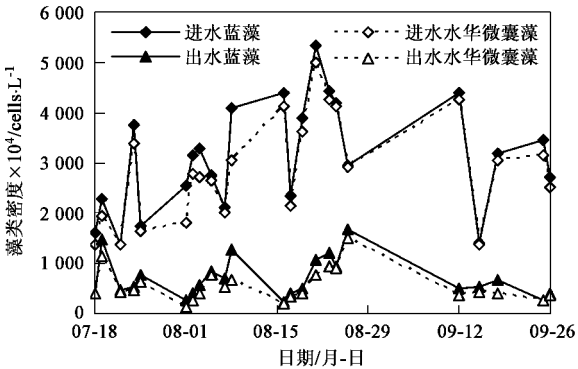


图5 A 预沉池进出水蓝藻含量变化

Fig.5 Changes in the blue-green algae density of inflow and outflow of the presedimentation tank A

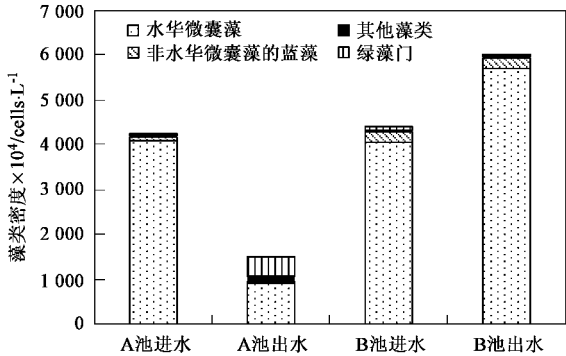


图6 8月24日 A 预沉池与 B 预沉池进出水藻类组成对比

Fig.6 Comparison of phytoplankton composition between presedimentation tank A and B on Aug. 24th

4 034 × 10⁴ cells/L,占进水藻类含量的 91.7%,可知 A 预沉池与 B 预沉池进水藻类含量及组成相当,都以

水华微囊藻为优势种.经过放养鲢鱼预处理之后,A 预沉池出水藻类含量下降 64.7%,蓝藻含量下降 77.4%,其中水华微囊藻含量下降 78.1%;而未放养鲢鱼的 B 预沉池出水藻类含量上升 36.8%,蓝藻含量上升 38.0%,其中水华微囊藻含量上升 41.1%. 试验期间,A 预沉池与 B 预沉池进水水质相似,藻类含量相当,且 A 预沉池在放养鲢鱼之外未采取其他除藻措施,而 B 预沉池未采取除藻或增藻措施.因此,根据试验数据和文献[11~13]分析,可以认为 A 预沉池对藻类的良好去除是由于放养鲢鱼的原因.

2.5 放养鲢鱼的预沉池对水质参数的影响

表 4 A 预沉池进出水各项水质参数

数值	浊度/NTU		pH 值		高锰酸盐指数/mg•L ⁻¹		总磷/mg•L ⁻¹		溶解性总磷/mg•L ⁻¹		非溶解性总磷/mg•L ⁻¹	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
最小值	4.22	2.26	7.58	8.01	3.24	3.08	0.041	0.016	0.004	0.000	0.024	0.016
最大值	30.40	8.03	8.43	8.51	6.01	5.00	0.114	0.085	0.057	0.053	0.094	0.045
平均值	12.05	4.57	7.90	8.24	4.19	3.91	0.060	0.038	0.015	0.009	0.046	0.028

使出水各项水质指标的波动幅度都小于进水.

3 讨论

原水进入放养鲢鱼的 A 预沉池之后,出现了蓝藻得到有效去除而绿藻含量相对增加的现象,这应是鲢鱼对藻类滤食选择与藻类的自发生长及竞争的共同作用结果.

鲢鱼是典型以浮游生物为食的滤食性鱼类,主要靠鳃耙、腭褶与鳃耙管组成的滤食器官滤食水中的浮游生物及有机碎屑.鲢鱼鳃耙细长密集,类似具有机械过滤作用的筛网,滤取通过口腔中的浮游生物,其鳃耙间距为 8~20 μm,侧突起间距为 15~33 μm^[16].由于一般水体中的浮游植物个数多于浮游动物,且鲢鳃耙致密、对水流的阻力相应增大,从而滤水速度较慢,因此鲢鱼肠管中的食物以浮游植物为主.在多种藻类共存的水体中,鲢对每一种藻类的滤取效率随藻类规格的增大而增大^[17~20].而在试验期间通过显微镜观察到的各种藻类规格(藻类规格以相当体积的球体直径表示)之间是有差异的.水华微囊藻是典型的以群体形式存在的蓝藻种类^[21],其藻细胞直径为 5~7 μm,而水华微囊藻群体直径一般都在 50~100 μm 以上,甚至肉眼可见.与水华微囊藻群体相比,试验期间原水中常见的几种绿藻的规格则较小,如小球藻、单角盘星藻、四尾栅藻的直径分别 5~7 μm、16~18 μm、12~15 μm.上述可知,水

放养鲢鱼的 A 预沉池构成一个简单的生态系统,它对常规水质参数有良好的控制和稳定作用.A 预沉池中缓慢的水平流速(约1 mm/s)使水中的悬浮物易于沉降,原水进入放养鲢鱼的 A 预沉池之后,浊度、高锰酸盐指数、总磷和非溶解性总磷等水质指标均有大幅下降,去除率分别为 62.1%、6.7%、36.7%和 39.1%,如表 4 所示,其中放养鲢鱼对水中藻类等不易沉降的颗粒性物质的去除有助于对总磷和非溶解性总磷浓度的控制.由于藻类对溶解性磷的吸收,放养鲢鱼的 A 预沉池出水的溶解性总磷浓度下降了 40%.同时,A 预沉池对水质的稳定作用

华微囊藻群体规格远远大于单个的水华微囊藻细胞和相对分散独立的绿藻.这是放养鲢鱼的 A 预沉池对水华微囊藻的去除率远高于绿藻的原因.因此,在 A 预沉池中放养的鲢鱼对藻类的去除主要体现为对群体性蓝藻,即水华微囊藻的去除.

藻类是自养型生物.原水进入预沉池之后,由于水温、光照、停留时间、营养盐浓度等条件的允许,藻类自发生长、藻类含量增加.如表 3 和图 6 所示,原水进入没有放养鲢鱼的 B 预沉池之后藻类含量是增加的,而且增加量主要由水华微囊藻构成.这显示了水华微囊藻的竞争优势.陈德辉等^[22]的研究表明,在共培养试验中,微囊藻对栅藻(绿藻门的一个属)的抑制能力相对而言是栅藻对微囊藻抑制能力的 7 倍.正是由于对绿藻和其他藻类的生长抑制及其他竞争优势的共同作用,水华微囊藻成为了原水中的优势藻类并且在 B 预沉池中优先增长.而在 A 预沉池中放养鲢鱼则有效遏制了水华微囊藻的增长趋势,并且使之含量大幅降低.这降低了绿藻的竞争压力,使绿藻获得了较大的增殖空间.因此,放养鲢鱼的 A 预沉池中绿藻含量的增加幅度明显高于未放养鲢鱼的 B 预沉池,如表 3 所示.

试验期间,放养鲢鱼的生物控制技术对高藻原水中水华微囊藻的控制去除效率远高于绿藻和其他藻类.可以初步认为,放养鲢鱼的生物控制技术适用于处理群体性蓝藻占优势地位的高藻原水.

4 结论

(1)对于以群体性蓝藻为优势藻类的高藻原水,在水厂预沉池放养鲢鱼进行预处理可使水中的蓝藻含量得到大幅下降,同时藻类总量也有显著降低.针对高藻原水,该生物预处理技术有效降低了后续常规工艺的藻类负荷,给后续处理创造了更好的条件,对保证出水水质、降低生产成本有重要意义.

(2)由于鲢鱼的摄食选择性及藻类规格的不同,放养鲢鱼对原水中群体性蓝藻的去除效率远高于绿藻.

(3)放养鲢鱼的生物控制技术适用于处理群体性蓝藻占优势地位的高藻原水.

参考文献:

[1] Graham N J D, Wardlaw V E, Perry R, *et al.* The significance of algae as trihalomethane precursors[J]. *Water Sci Technol*, 1998, **37** (2): 83-89.

[2] Hoehn R C, Barnes D B, Thompson B C, *et al.* Algae as sources of trihalomethane precursors[J]. *J Am Water Works Assoc*, 1980, **72** (6): 344-350.

[3] Oliver B G, Shindle D B. Trihalomethanes from the chlorination of aquatic algae[J]. *Environ Sci Technol*, 1983, **17**(2): 80-83.

[4] 谢平.水生动物体内的微囊藻毒素及其对人类健康的潜在威胁[M].北京:科学出版社,2006.3-8.

[5] 王立宁,方晶云,马军,等.化学预氧化对藻类细胞结构的影响及其强化混凝除藻[J].东南大学学报,2005, **35**(增刊): 182-185.

[6] 李永红,汪立飞,李彦春,等.气浮处理含藻水库水的工艺设计[J].中国给水排水,2006, **22**(6): 38-41.

[7] 董文艺,范洁,张金松.微滤膜与活性炭联用工艺去除富营养化水源水中藻类[J].环境污染治理技术与设备,2004, **5**(3): 74-79.

[8] 余国忠,李灵芝,赵明云,等.纤维直接过滤去除原水藻类[J].环境污染治理技术与设备,2003, **4**(1): 14-18.

[9] 侯翠容,贾瑞宝.化学预氧化破坏藻体及胞内藻毒素释放特性研究[J].中国给水排水,2006, **22**(13): 98-101.

[10] 王静超,马军,王静海.气浮净水技术在给水处理中的应用及研究概况[J].工业水处理,2004, **24**(7): 9-12.

[11] Kajak Z, Rybak J I, Spodniewska I, *et al.* Influence of the planktivorous fish *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.) on the plankton and benthos of the eutrophic lake[J]. *Pol Arch Hydrobiol*, 1975, **22**: 301-310.

[12] 刘建康,谢平.用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J].生态科学,2003, **22**(3): 193-196.

[13] 谢平.鲢、鳙与藻类水华控制[M].北京:科学出版社,2003. 54-69.

[14] 崔福义,林涛.水体治理中鲢鳙生物操纵作用的试验研究[J].南京理工大学学报,2006, **28**(6): 668-672.

[15] 刘玉生,韩梅,梁站彬,等.光照、温度和营养盐对滇池微囊藻生长的影响[J].环境科学研究,1995, **8**(6): 7-11.

[16] 刘焕亮,李梦河,李立萍,等.鲢滤食器官胚后发育生物学的研究[J].大连水产学院学报,1993, **8**(2,3): 1-17.

[17] 李德尚,董双林.鲢、鳙滤食器官结构与功能的研究[J].动物学报,1996, **42**(1): 10-14.

[18] Smith D W. The feeding selectivity of Silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* Val. [J]. *J Fish Biol*, 1989, **34**(6): 819-828.

[19] Dong S, Li D, Bing X, *et al.* Suction volume and filtering efficiency of Silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix* Val.) and Bighead carp (*Aristichthys nobilis* Rich.) [J]. *J Fish Biol*, 1992, **41** (5): 833-840.

[20] Books J L, Dodson S I. Predation, Body Size, and Composition of Plankton [J]. *Science*, 1965, **150**(3692): 28-35.

[21] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类[M].北京:科学出版社,2006. 27-89.

[22] 陈德辉,刘永定,袁峻峰,等.微囊藻和栅藻共培养试验及其竞争参数的计算[J].生态学报,1999, **19**(6): 908-913.