

马华, 崔福义, 刘志泉, 等. 2009 鲢鱼联合常规水处理工艺除藻特性 [J]. 环境科学学报, 29(12): 2519-2524

Ma H, Cui F Y, Liu Z Q, et al. 2009. Removal of algae by silver carp combined with conventional drinking water treatment processes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(12): 2519-2524

## 鲢鱼联合常规水处理工艺除藻特性

马华<sup>1</sup>, 崔福义<sup>1\*</sup>, 刘志泉<sup>1</sup>, 范振强<sup>1</sup>, 何文杰<sup>2</sup>, 阴沛军<sup>2</sup>

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 天津市自来水集团有限公司, 天津 300040

收稿日期: 2009-03-20 修回日期: 2009-07-23 录用日期: 2009-10-29

**摘要:** 将鲢鱼引入到某水厂预沉池中用以去除藻类, 并对该水厂从原水到滤后水中藻类种类和数量进行监测. 结果表明, 鲢鱼对水华微囊藻可进行有效滤食, 但对单细胞绿藻滤食效果不佳, 从而导致预沉池出水中水华微囊藻数量和比例大幅下降, 使单细胞绿藻获得了更大的生长优势. 预加氯对叶绿素 a 氧化作用显著. 混凝沉淀过程对杆状藻类去除明显. 具有较长突起尖刺的藻类会阻碍混凝沉淀效果. 少量个体较小和突起物带有尖刺的藻类能够深入滤池. 当原水中微囊藻浓度较高时, 鲢鱼联合常规水处理工艺能够对藻类实现较为彻底的去除.

**关键词:** 鲢鱼; 水处理; 微囊藻; 滤食; 预氯化

文章编号: 0253-2468(2009)12-2519-06 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

## Removal of algae by silver carp combined with conventional drinking water treatment processes

MA Hua<sup>1</sup>, CUI Fuyi<sup>1\*</sup>, LIU Zhiqun<sup>1</sup>, FAN Zhenqiang<sup>1</sup>, HE Wenjie<sup>2</sup>, YIN Peijun<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090

2 Tianjin Waterworks Group Co., Ltd., Tianjin 300040

Received 20 March 2009 received in revised form 23 July 2009 accepted 29 October 2009

**Abstract** Silver carp were introduced into the pre-sedimentation tank in a water plant with the aim to remove algae. The algal species and amount in the samples from the raw water and the main treatment processes were determined. The results showed that *Microcystis flos-aquae* could be removed effectively by silver carp, but single cell green algae could not be effectively filtered and digested, so single cell green algae had greater growth potential while the amount and proportion of *Microcystis flos-aquae* decreased in the pre-sedimentation tank. Chlorophyll a was observably oxidized by chlorine in the prechlorination step. The rod-shaped algae were effectively removed in coagulation and sedimentation processes while algae with many prominences hindered the effectiveness of the coagulation and sedimentation processes. A small quantity of algae of smaller size or with spiny prominences could penetrate the filtering layers. When *Microcystis* was the dominant species in raw water, algae could be well removed by silver carp combined with conventional drinking water treatment processes.

**Keywords** silver carp; water treatment; *Microcystis*; filter-feeding; prechlorination

### 1 引言 (Introduction)

我国的江河湖库都存在不同程度的富营养化, 由此带来的藻类大量滋生使水质严重恶化 (马经安等, 2002). 2007 年 6 月太湖局部暴发的蓝藻水华和 2008 年 2 月汉江小环藻水华都严重地威胁到了自来水管的正常供水. 因此, 原水中过高浓度藻类的

控制和去除成为水处理研究的热点和难点之一 (Chow et al., 1999). 如果原水中藻类浓度过高, 会严重地影响常规水处理效果, 增加药耗, 提高制水成本, 而且受工艺本身的限制使自来水厂出水水质难以保证. 研究表明, 很多自来水水厂采用的常规水处理工艺对藻类产生的生物毒素 (Hoger et al., 2005) 和致臭味产物 (Hu et al., 1996) 去除率较低.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50821002, 50778048); 国家科技支撑项目 (No. 2006BAJ08B09)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50821002, 50778048) and the National Key Technology R&D Program (No. 2006BAJ08B09)

作者简介: 马华 (1983—), 男, E-mail: water-mh@163.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: cuifuy@hit.edu.cn

Biography: MA Hua (1983—), male, E-mail: water-mh@163.com; \* Corresponding author, E-mail: cuifuy@hit.edu.cn

所以,在原水进入常规工艺之前降低原水中藻类浓度是保证自来水厂安全供水的有效手段之一。

鲢鱼是一种主要滤食浮游藻类的植食性鱼类,被认为是控制藻类的有效工具之一 (Smith 1989, 陈少莲等, 1990). 国内外已有将鲢鱼用于湖泊和水库等富营养化水体藻类控制的相关研究和实例 (Domazon *et al.*, 1999; Radke *et al.*, 2002; 谢平, 2001; 陆开宏等, 2002), 并取得了较好的效果. 范振强等 (2008) 曾于 2005 年将利用鲢鱼控制水厂原水藻类的实验研究应用于天津某自来水厂, 结果发现, 运行 3 年来, 鲢鱼在蓝藻占优势时期对原水中藻类有明显的去除效果. 然而, 鲢鱼在控制原水中藻类的同时, 也改变了藻类种群结构, 使原水中藻类优势种属发生变化, 而水厂的常规混凝-沉淀-过滤工艺对不同种藻类去除效果差别较大 (Petersen *et al.*, 1997; Ma *et al.*, 2007; Drikas *et al.*, 2001; 梁恒等, 2005). 认识鲢鱼预处理高浓度藻类原水后, 藻类数量、种群变化及该变化对后续预加氯和常规水处理工艺除藻特性的影响显得尤为必要. 鉴于此, 本文以天津某自来水厂原水和各处理单元中的水质为考察对象, 对各处理单元内藻类数量和优势种属进行调查研究, 以期对鲢鱼联合常规水处理工艺除藻特性研究提供参考。

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 预沉池及水厂工艺

本研究选取的自来水厂日处理水量为  $12000\text{m}^3$ . 沉淀池排泥水和滤池反冲洗水混合后, 排入回用池做简单的沉淀处理, 上清液排入预沉池中, 具体水处理工艺流程见图 1. 其中, 预沉池为矩形 ( $210\text{m} \times 86\text{m}$ ), 水深  $3.5\text{m}$ , 中间有导流墙, 容量为  $50000\text{m}^3$ , 流量为  $12000\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , 水力停留时间约为  $4\text{d}$ . 于 2005 年 5 月向预沉池投放鲢鱼约 9000 尾, 单尾重  $150\text{g}$  左右. 至 2007 年 4 月, 预沉池中单尾鲢鱼重约  $360\text{g}$ , 放养密度约为  $65\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 预沉池出水加氯后进入吸水井, 氯投量为  $2 \sim 3\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 通过泵提升进入常规水处理工艺流程. 絮凝池为垂直轴式机



图 1 水处理工艺流程

Fig 1 Drinking water treatment processes

械絮凝池, 沉淀池为同向流斜板沉淀池, 滤池为虹吸滤池, 滤料为双层滤料, 上层为无烟煤, 下层为石英砂. 滤后水进入清水池. 混凝剂采用三氯化铁, 助凝剂为活化硅酸, 采样期间水厂混凝剂投加量为  $10 \sim 12\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### 2.2 水样采集及藻类计数

本次调查采样时间为 2007 年 7 月和 8 月, 每次采样点为 5 个, 分别在原水、预沉池出水、吸水井水、滤前水 (混凝沉淀池出水) 和滤后水中进行采样. 对所采集的水样进行藻类计数和叶绿素 a 测定, 藻类计数方法和叶绿素 a 测定方法参见《水和废水分析监测方法》(第 4 版). 在对水样中藻类分类计数的同时, 通过显微镜目镜内的测微尺测定单细胞藻类粒径, 藻类种属鉴定参考《中国淡水藻类: 系统、分类及生态》。

## 3 结果 (Results)

### 3.1 水样中藻种类及分布

两次采样藻种类、数量级及分布近似, 表 1 列出了 7 月份采样时各采样点水样中优势藻种类及分布. 由表 1 可知, 在原水中共检出藻类 5 门 51 种, 其中, 蓝藻门 8 种, 占总数的  $86.6\%$ ; 硅藻门 18 种, 占总数的  $7.7\%$ ; 绿藻门 21 种, 占总数的  $5.4\%$ ; 金藻门 1 种, 占总数的  $0.23\%$ ; 裸藻门 3 种, 占总数的  $0.13\%$ . 在原水中, 占优势的藻类有蓝藻门的微囊藻属 (*Microcystis*)、平裂藻属 (*Merismopedium*)、楔形藻属 (*Gamphosphaeria*) 和胶球藻属 (*Gloeocapsa*) 等; 绿藻门有衣藻属 (*Chlamydomonas*)、丝藻属 (*Ulothrixaceae*) 和栅藻属 (*Scenedesmus*) 等; 硅藻门有小环藻属 (*Cyclotella*) 和脆杆藻属 (*Fragilaria*) 等. 能够产生毒素的微囊藻、颤藻等在原水中也均有检出.

从表 1 中还可以看出, 原水经过预沉池后, 数量上减少最为明显的藻类为水华微囊藻, 其次是粉末微囊藻、广缘小环藻和星芒小环藻等, 增加的藻类主要有四角角星鼓藻和不对称衣藻等. 预沉池出水经过预氯化后进入吸水井, 预氯化过程并没有大幅度降低藻类含量, 仅能去除部分含量相对较少的单细胞微小藻类. 混凝沉淀对水华微囊藻去除效果明显, 对部分绿藻和大部分硅藻的去除效果也较好. 过滤后, 出水中绝大部分藻类被去除, 仅剩余少量尺寸较小的池生胶球藻、淡红金椰藻, 还有部分四角角星鼓藻. 其中, 四角角星鼓藻含量在吸水井和滤前水中均保持在  $10^6 \text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$  数量级左右, 且在滤

后水中也有检出. 研究表明, 该藻种尺寸较大 (20 $\mu$ m), 且喜好铁元素, 因此, 具有较强的耐氯性;

同时, 该藻四角形的形态特征也使其能够进入滤层深处, 甚至穿透滤池 (刘泉志, 2008).

表 1 各水样中优势藻种类及分布  
Table 1 Dominant algae species and distribution in samples

藻种类	原水	预沉池出水	吸水井水	滤前水	滤后水	藻种类	原水	预沉池出水	吸水井水	滤前水	滤后水
蓝藻门						绿藻门					
池生胶球藻	++	++	++	+	+	星芒衣藻	++	+++	++		
马孙平裂藻	++	++	++	++		不对称衣藻	++	+++	++	+	
微小平裂藻	++	++	++			多型丝藻	++				
细微颤藻	++	+	+			四角角星鼓藻	+	+++	+++	+++	+
湖生楔形藻	++	+	+	+		柱状栅藻	+	++	+		
粉末微囊藻	+++	++				四尾栅藻	++	++	++	++	
水华微囊藻	++++	+++	+++			异粒鼓藻	++	+	+	+	
硅藻门						金藻门					
广缘小环藻	+++	+	+	+		淡红金椰藻	+	++	+	+	+
星芒小环藻	+++	++	+	+							
细小曲壳藻	+	++	++	+							
比索曲壳藻	+	++	++								
缢缩脆杆藻	++	+	+								
近缘针杆藻	+	++	++								

注: 表中“+”、“++”、“+++”、“++++”分别表示藻类数量级为  $10^4$ 、 $10^5$ 、 $10^6$ 、 $10^7$  cells  $L^{-1}$ , 空格表示未检出.

### 3.2 各处理单元藻类去除特性分析

图 2 为两次采样中藻类及叶绿素 a 在各处理单元出水中的数量变化. 从图 2 可以看出, 虽然 8 月份蓝藻数量增加了 1 倍, 但两次采样藻类各门种类数量在各处理单元的变化趋势却基本相同, 最为明显的是预沉池出水中蓝藻数量大幅度下降, 绿藻数量小幅上升. 硅藻和其他藻类数量相对较少, 在各水样中所占比例也较小. 由于水华微囊藻在数量上占有绝对优势, 因此, 藻类总数的变化趋势基本和蓝藻数量变化趋势相近. 水华微囊藻的减少使得藻类总数在预沉池中有大幅度降低, 虽然水华微囊藻在后续处理单元中逐级减少, 但是减少幅度均没有预沉池单元大. 从图 2 还可以看出, 叶绿素 a 的变化趋势与藻类总数并不一致, 特别是在预沉池单元, 微囊藻数量的大幅降低使藻类总数减少, 然而叶绿素 a 并没有大幅减少. 这可能是由于出水中绿藻有明显的增加, 虽然增加的这部分绿藻数量不大, 但它们引起的叶绿素 a 增加量却与水华微囊藻减少部分引起的叶绿素 a 减少量相当. 与之形成对比的是, 藻类在吸水井经过预氯化后, 叶绿素 a 明显减少.

值得注意的是, 水华微囊藻的增加导致 8 月份原水中蓝藻数量比 7 月份增加了 1 倍. 同时, 8 月份原水中绿藻的数量比 7 月份减少了近 34%, 硅藻数量相近, 但是两个月原水叶绿素 a 数量较为接近. 这

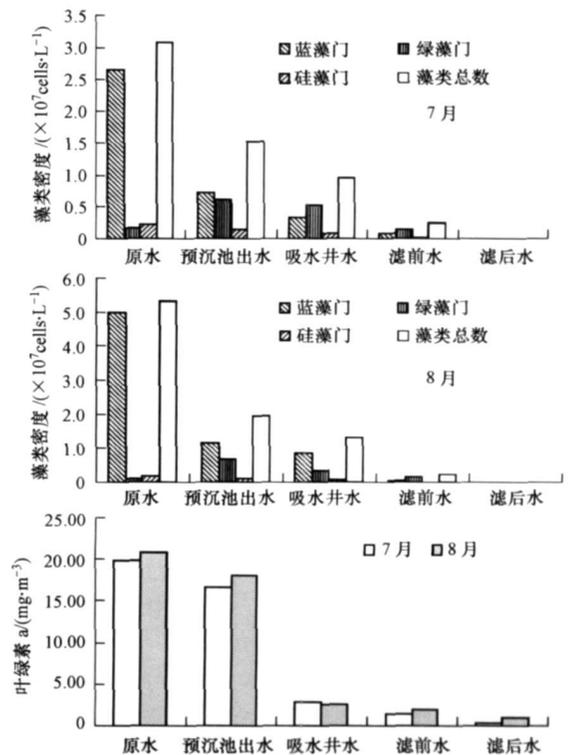


图 2 藻类和叶绿素 a 在各处理单元中的含量变化

Fig 2 Changes of algae density and chlorophyll a in water treatment units

表明绿藻减少部分带走的叶绿素 a 与水华微囊藻增加部分产生的叶绿素 a 数量相当, 这与上述预沉池叶绿素 a 变化情形类似. 由此可以推断, 叶绿素 a 值对绿藻数量变化的响应值要远高于对蓝藻数量变化的响应值.

表 2 为原水和预沉池出水中不同粒径藻类在单细胞藻类中所占比例. 从表 2 可以看出, 预沉池内藻类粒径也有较大的变化, 出水中小于  $10\mu\text{m}$  藻类在单细胞藻类中的比例明显增加. 这与绿藻在预沉池内的增加是对应的, 因为绿藻中的衣藻属尺寸大部分小于  $10\mu\text{m}$ .

表 2 原水和预沉池出水中不同粒径藻类在单细胞藻类中所占比例  
Table 2 Size distribution of single cell algae in the raw water and in the outflow of the pre-sedimentation tank

藻类 粒径	在单细胞藻类中所占比例			
	原水 (7月)	预沉池出水 (7月)	原水 (8月)	预沉池出水 (8月)
$< 10\mu\text{m}$	76.9%	98.0%	80.3%	93.5%
$\geq 10\mu\text{m}$	23.1%	2.0%	19.7%	6.5%

#### 4 讨论 (Discussion)

鲢鱼对藻类群落结构的直接影响主要表现为两方面, 一方面, 鲢鱼的鳃耙能够滤食  $10\mu\text{m}$  至数 mm 的浮游藻类, 但不能有效滤食  $10\mu\text{m}$  以下的小型浮游藻类 (Smith, 1989; Crömer *et al.*, 1980; Vörös *et al.*, 1997). 对于像以群体方式存在的微囊藻 (*Microcystis*)、楔形藻 (*Gamphosphaeria*)、丝藻 (*Ulothrixaceae*) 和个体尺寸较大的小环藻 (*Cyclotella*)、脆杆藻 (*Fragilaria*) 等能够有效截留, 而像绿藻中的衣藻 (*Chlamydomonas*) 等尺寸较小的藻类则能够穿过鲢鱼的鳃耙, 不能或不完全能被鲢鱼滤食. 另一方面, 被鲢鱼滤食的藻类能否被鲢鱼充分消化与鲢鱼肠内消化液的消化特异性也有很大关系, 鲢鱼体内消化酶能够对蓝藻进行快速分解, 对硅藻和隐藻分解也很有效, 但对于大部分绿藻不能进行很好的消化 (Vörös *et al.*, 1997). 在预沉池出水中, 粒径小于  $10\mu\text{m}$  的单细胞藻类占有单细胞藻类的比例明显增加, 而这部分藻类主要为单细胞的绿藻 (主要是四角角星鼓藻和不对称衣藻等), 还有部分硅藻, 这也表明在预沉池内, 对尺寸小于  $10\mu\text{m}$  的单细胞藻类去除效果不佳. 因此, 预沉池内放养鲢鱼可有效地降低微囊藻数量, 并去除部分硅藻, 但同时会使单细胞绿藻数量有所增加, 造成藻类向小型化转变. 单细胞绿藻数量的增加可以

从鲢鱼的滤食特性和不同种藻类对营养物质的利用两方面进行解释: ①鲢鱼不能有效滤食单细胞绿藻, 即使对于能被滤食的少部分绿藻也不能进行很好的消化, 这就意味着鲢鱼所能滤食的单细胞绿藻在通过鲢鱼的肠管排入水中后仍能够生长; ②鲢鱼对群体性微囊藻和大尺寸藻类的有效滤食会造成藻类种群中缺少与单细胞绿藻进行营养竞争的藻类, 即单细胞绿藻能够获得更大的生长优势. 由于叶绿素 a 对绿藻数量变化响应要高于蓝藻, 因此, 微囊藻的急剧减少并没有使预沉池出水叶绿素 a 明显降低. 预沉池中藻类的去除效果还依赖于预沉池鲢鱼的放养密度、鲢鱼随环境条件而改变的滤食特性、原水中藻类数量、优势藻种属及不同藻类的生长特性. 适用于水厂预处理的鲢鱼最佳放养密度和放养方式还需进一步的探索研究.

经过预氯化处理, 吸水井中叶绿素 a 数量明显降低, 而藻类数量却并没有明显减少, 这与预氯化杀藻机理和藻类计数方法有关 (马华等, 2007). 氯对叶绿素 a 氧化作用明显, 导致大部分藻类失去活性, 使藻类不具备光合作用能力, 但藻类细胞并没有完全溶裂, 还残留在吸水井中, 而藻类计数只是通过藻细胞外观来判别计数. 所以, 很多失去活性、不具备光合作用的藻类也被计算在内. 预氯化对尺度较小的单细胞绿藻灭活更为有效 (马华等, 2007), 从而导致吸水井水中叶绿素 a 数量明显降低, 相应的藻类数量并没有减少.

藻体表面的电负性对藻类的去除产生着重要的影响 (Pieterse *et al.*, 1997), 然而更多的研究发现, 藻类形态结构 (如形状、尺寸、细胞排列、尖刺和鞭毛等特殊结构)、藻类活性、藻类多样性和藻类种群结构也会严重影响不同种藻类的去除效果 (Pieterse *et al.*, 1997; Ma *et al.*, 2007; Henderson *et al.*, 2008). 原水通过预沉池和预氯化处理后, 藻类种群结构和藻类活性都发生了变化, 也使后续混凝沉淀过滤单元对藻类的去除方式和效果有所改变. 后续常规水处理工艺主要去除的藻类也由群体性微囊藻转变为单细胞藻类. 具有特殊形状的藻类, 如脆杆藻、针杆藻等杆状藻类、群体性的微囊藻及细胞数量较多且整齐排列的平裂藻, 它们的个体相对较大, 氯化使其活性降低, 因此, 更容易在混凝沉淀过程中被去除 (表 1). 滤前水中还含有较大比例的绿藻, 这部分藻类耐氯性较强, 具有活性和较多突起的尖刺 (如栅藻、角星鼓藻等), 这些尖刺阻

碍了大絮体的形成, 造成絮体不密实, 从而降低了藻类的去除率。过滤作为保障饮用水卫生安全的重要措施, 在对剩余藻类的去除上发挥了关键的作用, 滤池本身的水力负荷、反冲洗方式及反冲强度对藻类去除效率起着决定性的作用。从各处理单元的藻类去除率来看, 过滤对硅藻去除率为 100%, 对绿藻和蓝藻的去除率都在 96% 以上, 而淡红金椰藻和池生胶球藻去除率较低。淡红金椰藻和池生胶球藻不能被彻底去除的主要原因是这两种藻类个体较小 (4~8 $\mu\text{m}$ ), 容易穿透滤池。绿藻中的四角角星鼓藻等这种个体较大藻类能够穿透滤池则是由于其特殊的形态结构。对滤料内藻类组成的分析研究 (Liu 2008) 表明, 四角角星鼓藻滤层藻类的比例超过 60%, 在滤料表层中的比例更高。显微镜下观测发现, 该藻具有 4 个突起物, 且在突起物尖端和表面有尖刺, 这样的表面特征更有利于其与滤料的粘附, 使其难以被冲洗下来, 且会在反冲洗结束时随滤料沉降, 进而进入滤层深处。所以, 在原生藻类含量较高的时期, 除少量个体较小或具有特殊表面形态的藻类外, 绝大部分单细胞藻类均能够在混凝沉淀过滤单元中得到较为彻底的去 除。

## 5 结论 (Conclusions)

1) 在预沉池内放养鲢鱼可大幅度减少原水中微囊藻数量, 对尺度较大的硅藻也有一定的去除效果, 但对于绿藻去除效果较差, 同时会造成藻类向小型化转变的趋势。这与鲢鱼的滤食和消化特性及各种藻的生长特性有关, 鲢鱼对微囊藻的有效滤食和对单细胞绿藻的滤食效果不佳造成了单细胞绿藻具有更大的生长优势, 导致预沉池出水中单细胞绿藻数量有所增加, 尺寸小于 10 $\mu\text{m}$  藻类比例增大, 但出水叶绿素 a 数量并未明显减少。

2) 预加氯对预沉池出水中单细胞藻类的灭活更为有效, 氯对叶绿素 a 氧化作用显著; 混凝沉淀过程对具有特殊形状的藻类, 如杆状藻类等的去除效果明显, 而表面具有较长突起和尖刺的藻类会阻碍混凝效果, 极少量个体较小的藻类和表面突出物带有尖刺的藻类甚至能够穿透滤池。

3) 在原生藻类浓度较高时, 特别是原水中微囊藻浓度较高时, 鲢鱼联合常规水处理工艺能够对藻类实现较为彻底的去 除。

责任作者简介: 崔福义 (1958-) 男, 教授, 研究领域为水处理工艺理论与技术。Tel 0451-86416786, E-mail cuifuyi@

hit.edu.cn

## 参考文献 (References):

- 陈少莲, 刘肖芳, 胡传林, 等. 1990 论鲢、鳙对微囊藻的消化利用 [J]. 水生生物学报, 14(1): 49-58
- Chen S L, Liu X F, Hu C L, *et al*. 1990 On the digestion and utilization of *Microcystis* by fingerlings of silver carp and big head [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica* 14(1): 49-58 (in Chinese)
- Chow C W K, Drikas M, House J *et al*. 1999. The impact of conventional water treatment processes on cells of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Research* 33(15): 3253-3262
- Cramer M, Smitheman R O. 1980 Food habits and growth of silver carp and bighead carp in cages and ponds [J]. *Aquaculture*, 20(1): 57-64
- Dumazon J, Devaux J. 1999. Impact of experimental study of the silver carp on plankton communities of eutrophic Villers reservoir (France) [J]. *Aquatic Ecology*, 33(2): 193-204
- Drikas M, Chow C W K, House J *et al*. 2001. Using coagulation, flocculation, and settling to remove toxic cyanobacteria [J]. *Journal American Water Works Association*, 93(2): 100-111
- 范振强, 崔福义, 马华, 等. 2008 放养鲢鱼预处理高藻原水的除藻效能及特性 [J]. *环境科学*, 29(3): 632-637
- Fan Z Q, Cui F Y, Ma H, *et al*. 2008. Effectiveness and characteristics of treating algae-laden raw water by stocking silver carp [J]. *Environmental Science*, 29(3): 632-637 (in Chinese)
- Henderson R, Parsons S A, Jefferson B. 2008. The impact of a legal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae [J]. *Water Research*, 42(8-9): 1827-1845
- Hoger S J, Hitzfeld B C, Dietrich D R. 2005. Occurrence and elimination of cyanobacterial toxins in drinking water treatment plants [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 203(3): 231-242
- Hu T L, Chiang P C. 1996. Odorous compounds from a cyanobacterium in a water purification plant in central Taiwan [J]. *Water Research* 30(10): 2522-2525
- 梁恒, 李圭白, 李星, 等. 2005. 不同水处理工艺流程对除藻效果的影响 [J]. *中国给水排水*, 21(3): 5-7
- Liang H, Li G B, Li X, *et al*. 2005. Effect of water treatment process selection on algae removal efficiency [J]. *China Water & Wastewater* 21(3): 5-7 (in Chinese)
- 刘志泉. 2008. 饮用水处理流程中四角角星鼓藻异常增殖研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 20-26
- Liu Z Q. 2008. Research on abnormal reproduction of *Staurastrum tetraerum* Rafts in water treatment processes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 20-26 (in Chinese)
- 陆开宏, 晏维金, 苏尚安. 2002. 富营养化水体治理与修复的环境生态工程——利用明矾浆和鱼类控制桥墩水库蓝藻水华 [J]. *环境科学学报*, 22(6): 732-737
- Lu K H, Yan W J, Su S A. 2002. Environmental and ecological engineering on control and remediation of eutrophicated water

- bodies by using an elaborated alga plan and fishes to control blue-green blooms of qiaodun reservoir [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 22(6): 732—737( in Chinese)
- 马华, 王振江, 贾柏樱, 等. 2007 预氯化处理高藻原水的特性分析 [ J ]. *供水技术*, 1(4): 23—26
- Ma H, Wang Z J, Jia B Y, *et al.* 2007. Analysis on characteristics of prechlorination of algae-laden raw water [ J ]. *Water Technology*, 1(4): 23—26( in Chinese)
- Ma J, Lei G Y, Fang J Y. 2007. Effect of algae species population structure on their removal by coagulation and filtration processes: A case study [ J ]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 56(1): 41—54
- 马经安, 李红清. 2002 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况 [ J ]. *长江流域资源与环境*, 11(6): 575—578
- Ma J A, Li H Q. 2002. Preliminary discussion on eutrophication status of lakes reservoirs and rivers in China and overseas [ J ]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 11(6): 575—578( in Chinese)
- Pieterse A J H, Cloot A. 1997. Algal cells and coagulation flocculation and sedimentation processes [ J ]. *Water Sci Technol* 36(4): 111—118
- Radke R J, Kah I U. 2002. Effect of a filter-feeding fish ( silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* Val ) on phyto- and zooplankton in a mesotrophic reservoir: results from an enclosure experiment [ J ]. *Freshwater Biology*, 47(12): 2337—2344
- Smith D W. 1989. The feeding selectivity of silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* Val [ J ]. *Journal of Fish Biology*, 34(6): 819—828
- Vörös L, Oklál I, Prising M, *et al.* 1997. Size-selective filtration and taxon-specific digestion of plankton algae by silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix* Val ) [ J ]. *Hydrobiologia* 342-343: 223—228
- Xie P, Liu J K. 2001. Practical success of bio-manipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms: A synthesis of decades of research and application in a subtropical hypereutrophic lake [ J ]. *The Scientific World Journal* 1: 337—356