

# 高铁酸盐对 2 种水源水中藻类的去除效果

苑宝玲<sup>1</sup>, 曲久辉<sup>1</sup>, 张金松<sup>2</sup>, 葛旭<sup>2</sup>, 梁明<sup>2</sup>, 田宝珍<sup>1</sup> (1. 中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室, 北京 100085, E-mail: yuanbl@hotmail.com; 2. 深圳市自来水公司水技术研究所, 深圳 518031)

**摘要:**研究了高铁酸盐对深圳 2 种原水水中藻类的去除效能. 实验结果表明, 在处理以小球藻为主的东湖水时, 单纯 PAC 混凝就可有效地去除水中的藻类, 藻类去除率均在 95% 左右. 在处理含藻量多, 以颤藻为主的铁岗原水时, 单纯 PAC 混凝除藻效果不理想, 投加少量高铁酸盐进行预氧化, 再投加 PAC 混凝, 可使水中藻的去除率提高 10%~20%, 去除率高达 97.85%. 而且用高铁预氧化除藻法明显优于传统预氯化方法.

**关键词:**藻类去除; 高铁酸盐; 预氧化

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)02-04-0078

## The Efficiency of Algae Removal from Drinking Water by Ferrate

Yuan Baoling<sup>1</sup>, Qu Jiuhui<sup>1</sup>, Zhang Jinsong<sup>2</sup>, Ge Xu<sup>2</sup>, Liang Ming<sup>2</sup>, Tian Baozhen<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China E-mail: yuanbl@hotmail.com; 2. Institute of Water Technologies, Shenzhen Water Supply (group) Co., LTD., Shenzhen 518031, China)

**Abstract:** This paper studied the efficiency of algae removal by ferrate from two kinds of raw water which were collected from Donghu and Tiegang reservoir respectively. The experimental results showed that the removal efficiency of algae reached about 95% only through PAC coagulation when the raw water was extracted from Donghu reservoir in which most of algae was *Chlorella*. But dealing with Tiegang raw water in which the majority of algae were *Oscillatoria*, ferrate was used as pre-oxidant coupling with PAC coagulation not only using PAC to flocculate and the efficiency of algae removal could be up to 97.85%. However this treatment method using ferrate as pre-oxidant overmatched the traditional method prechlorination for algae removal.

**Key words:** algae removal; ferrate; pre-oxidation

处理高藻水目前研究最多的是从给水处理工艺上加以改进, 如微絮凝-直接过滤法<sup>[1]</sup>、气浮-过滤法<sup>[2~3]</sup>, 需改进常规水处理工艺, 工程花费高. 简单的方法是采用预氧化方法, 如臭氧和 UV 辐射<sup>[4]</sup>、预氯化、二氧化氯预氧化<sup>[5]</sup>等. 但用臭氧和 UV 辐射处理自来水, 水价昂贵; 而采用预氯化法和二氧化氯预氧化方法, 由于藻类是典型的氯化消毒副产物前驱物质, 在消毒过程中将与氯作用形成三卤甲烷等多种有害副产物. 对本文所研究的深圳自来水原水, 其水质具有低浊度、低硬度、低碱度、低 pH 值的特点, 根据水的饱和指数和稳定性指数计算, 对金属有

腐蚀性的不稳定水, 采用前加氯, 会加强水的腐蚀性.

采用高铁酸盐预氧化既可克服以上缺点又能达到除藻的目的. 高铁酸盐是铁的六价存在形态, 其主要化合物为高铁酸钾 ( $K_2FeO_4$ ), 具高氧化性, 可有效去除水中的过剩藻类, 而且具有药剂投加量少、见效快、无残留毒性和不对饮用水造成二次污染等突出优点<sup>[6]</sup>.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (59838300)

作者简介: 苑宝玲 (1973~), 女, 博士生.

收稿日期: 2000-05-22

## 1 实验部分

### 1.1 实验背景

研究在深圳市大涌水厂水处理实验基地进行.大涌水厂不定期采用 2 种主要水源(东湖、铁岗水)供水.铁岗水中主要以颤藻(*Oscillatoria*)为主,颤藻隶属于蓝藻门(*Cyanobacteria*),藻类个体较小,细胞密度高.其中小颤藻是铁岗水优势种,它经常被作为 $\beta$ -中污水体、 $\alpha$ -中污水体和多污水体的指示种;东湖水中主要以小球藻(*Chlorella*)为主,属于绿球藻目(*Chlorococcales*)小球藻科(*Chlorellaceae*).小球藻细胞没有鞭毛或纤毛,只能悬浮在水中而不能游动,当环境条件不良时,往往会产生下沉现象,但当环境条件变得适宜时,又会自然浮起.本文以这 2 种主要原水作为研究对象,考察了这 2 种原水中藻的种类、数量差异,进行高铁酸钾对这 2 种原水中藻类去除效能的研究,同时监测了其它的常规指标.

### 1.2 仪器和试剂

(1)高铁酸钾制备方法 在强碱条件下通氯气得到饱和的次氯酸钠溶液,加入硝酸铁氧化成高铁,反应结束后,过滤去掉溶液中不溶的残渣.由于高铁酸钾的溶解度小于高铁酸钠,所以向溶液投加氢氧化钾至饱和,在低温下使高铁酸钾沉淀下来,抽滤得到高铁酸钾晶体,使用异丙醇洗去残存在产物中的氢氧化钾,真空干燥除去残留的水分和异丙醇,最后分析纯度.本研究中,采用的高铁酸钾为粉末状固体,纯度 90%以上.

(2)高铁酸钾使用方法 把高铁酸钾固体配制成 1g/L 的浓溶液,由于高铁酸钾中残留有微量碱固体,配制好的溶液 pH 在 9~10 之间,此溶液必须在 1 min 内使用,否则视为失效.

(3)主要仪器与试剂 10%聚合氯化铝原液;Lugol 碘液;JTZ1-6 混凝试验搅拌器;莱卡显微镜.

### 1.3 实验方法

烧杯搅拌试验在 JTZ1-6 混凝试验搅拌器上进行.将含藻水转移至一系列 2L 的玻璃方

杯中,依次投加不同量的高铁酸钾进行预氧化,以 500r/min 的转速快搅 1 min,再投加一定量 PAC 进行混凝,以 250r/min 的转速搅拌 2 min,然后以 50r/min 的转速慢搅 22 min,静置沉淀 1 h.在水面下 1 cm 抽取上清液 1 L 置于浮游生物沉降器中,加入 10~15 ml Lugol 碘液固定,沉降 40 h 以上.在液面 1 cm 以下将上层固定液抽掉,剩余大约 20 ml 时,将其从下端放入小烧杯中,用蒸馏水冲洗沉降筒,冲洗液并入小烧杯中,将小烧杯中液体转移至 50 ml 容量瓶中,定容至刻度,放冰箱冷藏备用.吸取固定液 0.1 ml,用浮游生物计数框计算藻类个数.

### 1.4 计数方法

藻细胞用浮游生物计数框计数,计算公式:

$$N = \frac{C_s}{F_s \cdot F_n} \cdot \frac{V}{v} \cdot P_n$$

式中,  $C_s$  为计数框面积,  $\text{mm}^2$ ;  $F_s$  为每个视野面积,  $\text{mm}^2$ ;  $F_n$  为每片计数的视野数;  $V$  为藻样体积, ml;  $v$  为计数框体积, ml;  $P_n$  为每片计数视野计数得到的藻细胞总个数.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 水源水质

表 1 列出 2 种主要原水的一些常规指标.从藻类总量看,铁岗水中藻类总量为  $3.2 \times 10^7$  个/L,比东湖水中藻类总量多出 2~3 倍,而且铁岗水的藻类,以颤藻为主,约占 80%~90%,其次有球藻、星杆藻等;东湖水的藻类种类较丰富,优势藻种为球藻,约占 60%~70%,其次有栅列藻、弯月藻、平板藻、纤维藻等.

表 1 深圳市东湖水库的水质情况

Table 1 Water quality of Donghu reservoir, Shenzhen

指标	最小值	平均值	最大值
pH	6.0	6.6	7.5
色度	10	20	35
浊度/NTU	2.1	4.9	15.9
高锰酸盐指数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.80	2.89	5.80
细菌总数/ $\text{个} \cdot \text{ml}^{-1}$	140	230	290
大肠菌群数/ $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$	940	1800	2400
藻总数/ $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.1 \times 10^7$	$1.4 \times 10^7$	$1.8 \times 10^7$

表 2 深圳市铁岗水库的水质情况

Table 2 Water quality of Teigang reservoir, Shenzhen

指标	最小值	平均值	最大值
pH	6.7	7.56	7.7
色度	15	21	30
浊度/NTU	7.07	9.53	11.8
高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.4	3.41	3.7
细菌总数/ $\text{个}\cdot\text{ml}^{-1}$	110	230	350
大肠菌群数/ $\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$	40	70	90
藻类总数/ $\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$	$2.4\times 10^7$	$3.2\times 10^7$	$4.0\times 10^7$

### 2.2 PAC 混凝对 2 种原水藻类去除效果

单纯 PAC 混凝对 2 种原水藻类的去除效果不同,如图 1 所示.东湖水中的藻类易于去除,投加 18 mg/L 的 PAC,藻类去除率达 94.21%,藻类总量从  $1.2\times 10^7$  减少到  $6.9\times 10^5$  个/L,不属于高藻水.而处理铁岗水时,PAC 投加量增加到 60 mg/L,藻类去除率仅为 81.08%,藻类总量仅从  $4.0\times 10^7$  减少到  $7.7\times 10^6$  个/L,仍高于  $10^6$  个/L,还属于高藻水.原因是由于铁岗原水中藻类总量绝对值比东湖水多 3 倍,也就是在 1L 的水中,铁岗水藻类总数比东湖水多出几千万个藻,相应就需加大 PAC 的投加量;二是因为铁岗水中的优势藻种为颤藻,其形状如同细竹竿,细胞密度高、藻丝长、体积大难以被 PAC 絮凝、吸附除去.而东湖水中藻种丰富,多为细胞密度低,个体体积小,易于被吸附沉降的小球藻,再加之环境不良时,小球藻自身有下沉现象,故容易去除.

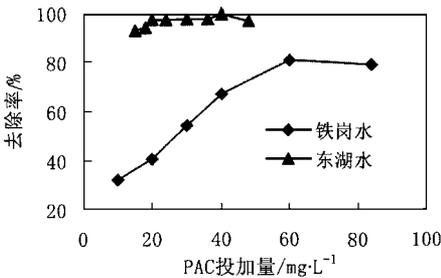


图 1 单纯 PAC 对藻类去除的影响

Fig.1 Effect of PAC coagulation on algae removal

### 2.3 高铁酸盐与 PAC 联合使用对藻类去除效

果

东湖水单纯投加 PAC 就可达到很好的去除效果,再加入高铁酸盐进行预氧化,对藻类的去除效果没有明显提高,处理铁岗水时,将高铁酸盐与 PAC 联合使用,与单纯 PAC 混凝相比,可显著提高对藻类的去除效果,说明高铁酸盐对藻类的去除十分有效,而且随着高铁酸盐投加量的增加,藻类去除率增大,如图 2 所示.如高铁酸盐投加 1.2 mg/L, PAC 投加 84 mg/L 时,藻类去除率达到 97.85%,原水藻类总量降低了 2 个数量级,即从原来的  $2.4\times 10^7$  个/L 降到  $5.2\times 10^5$  个/L,低于高藻水含藻量,达到水质标准.

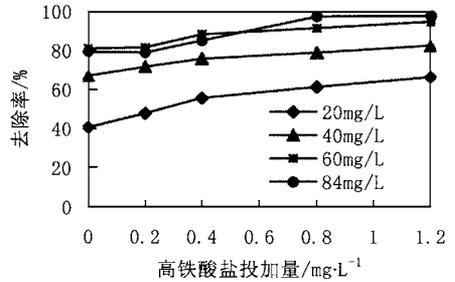


图 2 高铁酸盐预氧化对去除藻类的影响

Fig.2 Effect of ferrate pre-oxidation on algae removal

### 2.4 高铁酸盐预氧化、高锰酸钾预氧化及预氯化除藻效果的对比

利用氧化剂除藻或预氧化与絮凝结合是目前常用的饮用水去藻方法,如深圳即采用预氯化然后进行常规絮凝除藻,有一定的效果,但预氯化产生三氯甲烷等物质,对水质产生不良影响,本文通过实验比较了高铁与氯和高锰酸钾 2 种氧化剂的除藻效果,结果如图 3 和图 4 所示.

结果表明,当原水含藻量为  $4.0\times 10^7$  个/L, pH = 7.48, 浊度 10.9 NTU, PAC 投加量为 60 mg/L,高铁酸盐投加量小于 0.4 mg/L 时,其氧化作用不明显,投加量为 0.4 mg/L 时,藻类去除率为 88.30%,剩余藻类为  $4.7\times 10^6$  个/L;当高铁酸盐的投加量增加到 1.6 mg/L,藻类去除率可达到 96.48%.与氯对照,氯投加量为

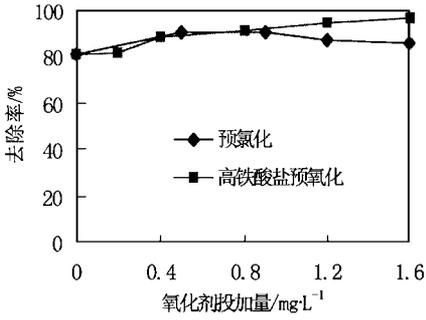


图 3 高铁酸盐预氧化与预氯化除藻效果对比

Fig. 3 Comparison between the effect of  $\text{FeO}_4^{2-}$  pre-oxidation and prechlorination on the algae removal

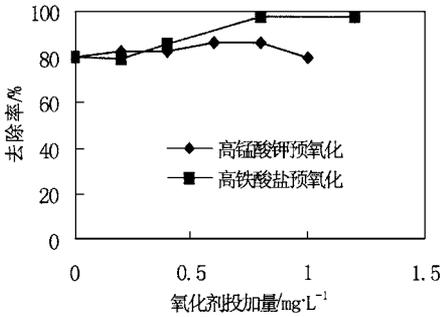


图 4 高铁酸盐与高锰酸盐预氧化除藻效果对比

Fig. 4 Comparison between the effect of  $\text{FeO}_4^{2-}$  and  $\text{KMnO}_4$  pre-oxidation on the algae removal

0.5 ~ 0.9 mg/L, 藻类去除率达到 90% 以上, 剩余藻类为  $3.9 \times 10^6$  个/L, 但是再加大氯的投加量, 藻类去除率不再增高, 保持在 90% 左右. 当投加高剂量时, 高铁酸盐对藻类的去除效果明显优于氯, 又由于高铁酸盐预氧化除藻不会对环境造成二次污染, 所以采用高铁酸盐预氧化代替预氯化除藻是完全可行的. 将高铁酸盐与高锰酸钾预氧化除藻效果进行的对比实验进一步证明(如图 4), 当原水含藻量为  $2.4 \times 10^7$  个/L, pH = 7.51, 浊度 8.2 NTU, PAC 投加量为 84 mg/L, 高锰酸钾投加量 0.8 mg/L, 藻类去除率为 86.25%, 再加大投加量, 藻类去除率也不会增高, 而且高锰酸钾颜色深, 反应速度慢, 极

难褪色, 不适宜投加高剂量. 高铁酸盐量投加到 0.8 mg/L, 对藻类的去除率 97.49%, 而且反应速度快, 明显比高锰酸钾的去除效果好.

### 3 结论

本研究模拟深圳市大涌水厂生产工艺, 进行静态烧杯搅拌试验, 初步探讨了高铁酸盐去除 2 种水体中藻类的效能, 同时将其与氯、高锰酸钾预氧化除藻进行了对比. 结果表明, 当水体中含藻量较高, 藻种多为难以去除的蓝绿藻, 高铁投加量大于 0.8 mg/L 时, 高铁酸盐预氧化对藻类的去除就明显优于高锰酸钾和氯, 而且从二次污染角度考虑, 高铁酸盐预氧化后, 自身分解产生氢氧根离子和分子氧, 对水质无副作用, 这也优于传统预氯化工艺.

铁岗原水中的优势藻种为颤藻, 其形如细竿, 在显微镜计数时可以清晰地观察到高铁酸盐预氧化和预氯化的杀藻方式, 而且高铁酸盐的氧化杀藻能力明显大于氯, 它使更多的藻类断裂成细小的片段, 这可从宏观除藻率上得到验证.

### 参考文献:

- Petrusevski B, van Bree man A N, Alaerts G J. Optimization of coagulation conditions for direct filtration of impounded surface water. *Aqua.*, 1995, 44(2): 93 ~ 102.
- Edzwald J K, Winger B J. Chemical and physical aspects of dissolved air flotation for the removal of algae. *Aqua.*, 1990, 39(1): 24 ~ 35.
- Le Roux J D. The treatment of odorous algae-laden water by dissolved air flotation and powered activated carbon. *Water Quality Bulletin*, 1988, 13(2 ~ 3): 72 ~ 77.
- Intabon Keo. Repression of water bloom by ozone and UV irradiation. *Tsukuba Daigaku Gijutsu Hokoku*, 1995, 15(6): 7 ~ 11.
- Steynberg M C, Guglielmi M M, Geldenhuys J C, Pieterse A J H. Chlorine and chlorine dioxide: pre-oxidants used as algacide in potable water plants. *Aqua.*, 1996, 45(4): 162 ~ 170.
- DeLuca S J, Chao A C, Smallwood C. Ames test of ferrate treated water. *Journal of Environmental Engineering*, 1983, 109(5): 1159 ~ 1167.