

预氧化与水处理工艺协同去除剑水蚤

张敏¹, 崔福义¹, 刘冬梅¹, 何文杰², 韩宏大²

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

摘要: 利用不同水处理工艺中试系统, 研究在液氯、氯胺、高锰酸盐复合药剂和 O_3 这 4 种预氧化剂不同投量下, 去除剑水蚤的方法以及 4 种预氧化药剂对原水中剑水蚤的实际灭活效果, 并分析各工艺单元的除蚤机制。结果表明, 预氧化阶段, 液氯灭活率(25%)比氯胺(21%)、 O_3 (9%)和高锰酸盐复合药剂(8%)都高; 但滤后去除率发生变化, 由高至低为氯胺(90%)>液氯(88%)> O_3 (83%)>高锰酸盐复合药剂(80%), 采用氯胺与水处理工艺协同可达到 100% 去除效果。最高的预氧化灭活率并没有取得 100% 的去除效果, 剑水蚤的去除取决于预氧化剂与澄清水处理工艺的合理配合, 剑水蚤个体尺寸和预氧化后的生命活性也对去除效果有影响。其中过滤单元除蚤效率最高, 单独去除率不低于 50%; 气浮池的除蚤性能受水蚤个体大小和活性影响。

关键词: 剑水蚤; 中试试验; 协同去除作用; 预氧化剂; 氯胺

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3568-05

Removing Efficiency Study on Cyclops Cooperating with Water Treatment Process by Alternative Oxidants

ZHANG Min¹, CUI Fu-yi¹, LIU Dong-mei¹, HE Wen-jie², HAN Hong-da²

(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: The synergic removal effect on Cyclops was studied with 4 kinds of dosages of pre-oxidants such as chloramines, chlorine, O_3 and potassium permanganate composite followed by different sets of clarification treatment process pilot systems. The removal mechanisms of Cyclops in different treatment units were analyzed. The experiments results show that the inactivation rate of chlorine (25%) is the highest compared with the chloramines (21%), potassium permanganate composite (8%) and O_3 (9%) in the pre-oxidation stage, while the removal rate is changed after the filtration and the sequence is chloramines (90%) > chlorine (88%) > O_3 (83%) > potassium permanganate composite (80%). Only chloramines can remove Cyclops by 100% of removal rate with the treatment process with the conventional active carbon unit. The 100% of removal effect doesn't depend on the highest inactivation rate, but the reasonable cooperation between the pre-oxidation and the clarification treatment process. The size of Cyclops and its life activity are the important influencing factors. The individual removal rate of filtration unit is the highest with no lower than 50%. The removal effect of air-floatation unit is influenced by the size of Cyclops and its life activity.

Key words: Cyclops; pilot test; cooperation; pre-oxidation; chloramines

剑水蚤因其抗氧化性和游动性可以穿透滤池, 常规水处理工艺无法将其完全去除, 在国内外一些大中城市水厂的清水池和管网中都有出现^[1~3], 甚至在处理后水中发现有大量存留^[4], 给用水安全带来了威胁和隐患^[5~7]。以前, 国内外较常见的方法是通过改进絮凝和过滤工艺来去除浮游动物, 但是这些方法在控制上存在困难, 尤其是在蚤类过度繁殖时期^[8]。近些年, 我国在有效控制剑水蚤的问题上取得了较好的进展, 主要是利用预氧化药剂氧化将其彻底灭活^[9,10], 如投加 1.0 mg/L 二氧化氯^[11]或者 3.0 mg/L 氯胺(氯氨比例为 1:1)^[12]均可完全灭活剑水蚤, 此种方法除蚤安全性较高, 但是药剂的投加量也较高。

改进上述方法, 减少氧化剂投量, 使水蚤部分灭

活或者降低活性, 再在后续澄清工艺的协同作用下, 对其进行彻底去除, 也是去除剑水蚤的一条可能途径。若采用减少预氧化剂投量且与澄清工艺协同除蚤的方法, 一可以节省药剂, 二可以降低因高药量带来的风险, 三能充分发挥各水处理单元的除蚤效能, 提高各单元的处理效率, 可为水厂提供有效的处理措施。

本试验研究了几种常用的氧化药剂与澄清水处理工艺协同作用对剑水蚤类浮游动物的去除效果, 并对各水处理单元的去除效果与机制进行了探讨。

收稿日期: 2009-04-10; 修订日期: 2009-04-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z311)

作者简介: 张敏(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水处理工艺及处理过程优化, E-mail: zmin_2008@163.com

1 材料与方法

1.1 原水条件

中试试验在天津市自来水公司 J 水厂进行, 试验用原水和该水厂相同, 均为引黄济津工程引来的黄河水. 水质情况列于表 1.

原水中剑水蚤含量一般为 1~ 10 个/L, 本研究选取原水中剑水蚤含量较高, 在 21~ 33 个/L 时期进

行试验. 原水中水蚤的大小尺寸和生命活性不完全一致, 按照剑水蚤个体大小尺寸和生命活性进行分类, 体长> 1 mm 的水蚤占总数的 7. 31%, 生命活性较差、受水力作用影响较大; 体长 1 mm 左右的成熟水蚤占 79. 12%, 其生命活性较强, 生命力旺盛, 游动性很强; 体长< 1 mm 的水蚤占 12. 57%, 主要是无节幼体或者桡足幼体, 这部分水蚤活性相差较大, 抗水力干扰性有差异.

表 1 试验期间原水水质情况
Table 1 Raw water quality during the experiment

数值	高锰酸盐指数 /mg•L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	浊度 /NTU	pH	氨氮 /mg•L ⁻¹	含蚤量 /个•L ⁻¹	水温 /℃	碱度 /mg•L ⁻¹	氯化物 /mg•L ⁻¹	硬度 /mg•L ⁻¹
最大值	8 16	0. 15	12. 17	8. 67	0 23	33	8. 90	254	247	372. 0
最小值	6 82	0. 11	8. 15	8. 06	0 11	21	5. 60	232	203	349. 0
平均值	7. 74	0. 13	10. 59	8. 19	0 18	26	7. 10	248	226	360. 5

1.2 水处理工艺

采用 2 套中试系统同时进行对比研究. 中试系统工艺流程见图 1. 在中试系统 I 内, 原水先进入预氧化器内, 与预氧化剂氧化接触 30 min, 之后进入机械混合 絮凝池中进行混凝, 接着流入气浮池中, 然后进入无烟煤-石英砂双层滤料滤池中进行过滤, 滤后水再分别进入普通活性炭滤池和生物活性炭活滤池, 经处理后出水. 根据研究需要, 采用不同预氧化药剂进行试验.

试验同时利用现场的中试系统 II, 在不加入任何预氧化药剂条件下进行混凝-气浮-过滤-出水-普通活性炭工艺的除蚤性能对比研究. 2 套系统对应单元的工艺参数相同.

中试系统采用 24 h 连续运行方式, 试验每 1 h 取 1 次水样, 每次取 3 个平行水样, 3 个平行水样的平均值作为此次取样的试验结果. 每 6 次取样试验结果的平均值作为一组试验结果. 每天共有 4 组试验结果, 每组记录试验 6 h 时间内的平均试验结果, 每种试验条件下进行试验 2 d. 在每两单元之间设置取样口. 取样时放出水样 1 min 后开始取样. 剑水蚤去除率按累积去除率计, 即从原水进入第一个水处理单元开始到所研究单元为止的各单元本身去除率之和, 预氧化单元采用剑水蚤灭活率计. 各工艺单元的相关参数如表 2 所示. 其中液氯、高锰酸盐复合药剂、O₃ 预氧化药剂投量为 2. 50 mg/L, 氯胺投量为 2. 50 mg/L(氯: 氨= 5: 1) .

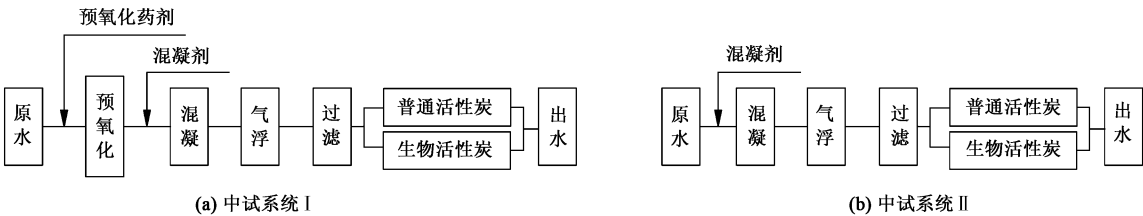


图 1 中试系统工艺流程
Fig. 1 Pilot scale technology process flowchar

表 2 中试系统工艺参数
Table 2 Parameters of each process

工艺	参数	备注
设计流量	5. 0 m ³ /h	
混凝	FeCl ₃ : 15 45~ 17. 30 mg/L; 其中含 Na ₂ SiO ₃ : 6~ 8 50 mg/L	混合池停留时间 1 min; 絮凝池停留时间 9 min
气浮	回流比: 8 L/min	停留时间 15 min
双层滤料过滤	石英砂+ 无烟煤双层滤料, 滤速 8 m/h, 反冲洗周期 18~ 24 h, 滤上水头 1. 1 m	无烟煤: d= 1. 2 mm, H= 600 mm; 石英砂: d 为 0. 5~ 1. 0 mm, H= 400 mm
活性炭过滤	CJ15 颗粒炭, 滤速 4 m/h, 反冲洗周期: 7~ 10 d	活性炭: φ1. 5 mm×1. 5 mm, H= 1500 mm, 生物活性炭接种预培养菌种, 停留时间: 19 min

2 结果与讨论

2.1 水处理工艺单元除蚤效果

利用中试系统 II, 研究水处理工艺对剑水蚤的去除性能, 图 2 为各单元出水中水蚤的去除情况.

气浮单元出水中, 剑水蚤的去除率在 10% ~ 20% 之间, 平均去除率约 16%, 去除效果保持稳定. 出水中的剑水蚤存在特定规律, 即出水中没有 > 1 mm 的水蚤, 所出现的水蚤为 1 mm 大小的和 < 1 mm 的水蚤, 它们各占水蚤总数的 85% 和 15%, 其共同特点为生命特征较强, 游动性较强. 结合图 2 发现被气浮池去除的是占原水中 7% 的 > 1 mm 水蚤和部分 < 1 mm 且生命活性较差的剑水蚤, 说明气浮单元主要是去除尺寸较大的剑水蚤和生命活性较差的剑水蚤.

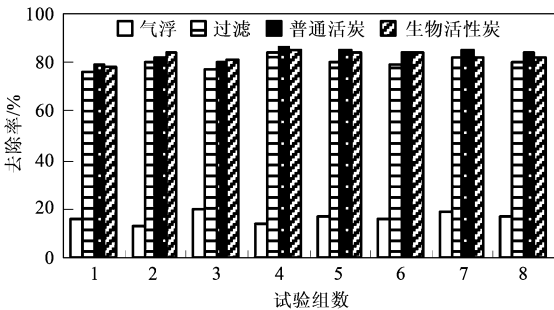


图 2 水处理工艺去除剑水蚤效果

Fig.2 Effect of killing cyclops by pilot scale technology process

气浮池是靠大量微小气泡与水中污染微粒粘附, 从而形成气泡-颗粒复合体, 在浮力作用下向上浮至水面形成浮渣, 达到固液/液液分离的目的. 剑水蚤的密度约为 1, 与水很接近, 当水蚤与气泡-颗粒复合体粘附到一起后, 整体的密度变小, 因此能够上浮进入浮渣中被清除. 至于去除的是何种剑水蚤, 则与剑水蚤的生命活性强弱有非常重要的关系. 尺寸 > 1 mm 的较大个体和部分 < 1 mm 的无节幼体或者桡足幼体, 它们游动性较差、受水力作用影响较大, 能够很容易地与气泡-颗粒复合体粘合进而被去除; 而大部分 1 mm 左右的成熟个体, 其生命活性较强, 能够不断地游动抵抗水流, 干扰气泡-颗粒复合体与其粘合. 因此气浮池出水中的剑水蚤多为 1 mm 大小、活性较强的剑水蚤, 而生命力弱活性较低成体和幼体则进入浮渣中后被去除.

气浮出水中的水蚤经双层滤料滤池过滤后, 平均去除率达 79%, 上升了 63 个百分点, 证明过滤是

去除剑水蚤的重要单元. 滤池除蚤作用主要依靠滤料对剑水蚤的截留过滤作用. 由于滤料采用石英砂 + 无烟煤双层滤料, 大大增加了剑水蚤穿透滤层的难度, 加之此时剑水蚤个体尺寸大多在 1 mm 左右, 对剑水蚤的截留效果也大为增加. 但是过滤无法完全去除剑水蚤, 仍有一部分剑水蚤可以穿透滤层, 进入后续水处理单元. 可以穿透滤层的剑水蚤基本为 2 种: 占大多数的尺寸为 < 0.1 mm 的剑水蚤无节幼体和生命活性较强尺寸较小的桡足幼体. 但是滤后出水中 79% 的除蚤率说明仅依靠常规的水处理工艺无法完全去除剑水蚤.

分别采用普通活性炭和生物活性炭工艺单元对滤后水再进行深度处理, 两单元出水中剑水蚤的平均去除率分别为 85% 和 84%, 单组试验中最高平均去除率分别为 88% 和 86%. 采用常规水处理工艺协同普通活性炭或生物活性炭处理单元无法达到 100% 的除蚤效果.

2.2 各种预氧化剂协同去除剑水蚤效果比较

以高锰酸盐复合药剂、O₃、液氯、氯胺 4 种预氧化剂, 在中试系统 I 中进行除蚤试验, 4 种药剂投加量在前人工作的基础上有所降低, 其中 O₃ 采用现场制备, 液氯与氯胺均采用与水厂相同药剂.

图 3 为采用不同预氧化剂时预氧化单元出水中剑水蚤灭活效果. 采用高锰酸盐复合药剂和 O₃ 预氧化时, 两者的剑水蚤平均灭活率均不超过 10%, 分别为 8% 和 9%, 说明 2 种预氧化剂灭活剑水蚤的效果不明显. 液氯为预氧化剂时, 灭活效果有明显的提高, 灭活率平均达到 25%, 单组最高可以到 30%, 超过高锰酸盐复合药剂和 O₃ 平均去除率 17 个百分点以上. 氯胺预氧化时平均灭活率稍低于液氯, 为 21%, 单组最高灭活率为 30%. 4 种药剂对剑水蚤的灭活效果都不超过 30%, 原因一是与投药量高低有关系, 因为此次投药量都有所减少, 二是中试设备与试验室试验不同, 对于一些稳定较差的预氧化药剂有很大影响. 但是所有试验中都有部分剑水蚤活体活性降低的情况出现, 这对后续单元的除蚤工作非常有利.

图 4 和图 5 分别为采用高锰酸盐复合药剂和 O₃ 进行预氧化时除蚤效果曲线. 气浮池出水中剑水蚤的平均去除率都在 20% 左右, 单组试验结果不超过 30%, 与图 2 对比, 仅上升了 4 个百分点. 经石英砂 + 无烟煤双层滤料过滤后剑水蚤的平均去除率分别为 85% 和 82%, 虽然比前述常规工艺处理效果略

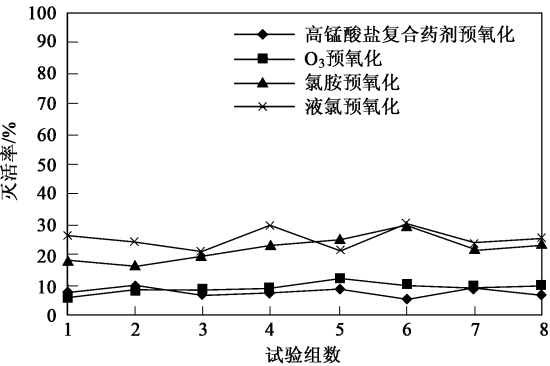


图 3 不同药剂进行预氧化的除蚤效果
Fig.3 Effect of inactivation on cyclops by pre-oxidations

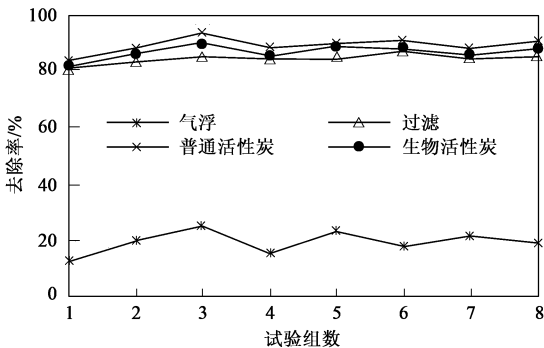


图 4 O₃ 预氧化协同工艺除蚤效果
Fig. 4 Killing effect on cooperating process with O₃

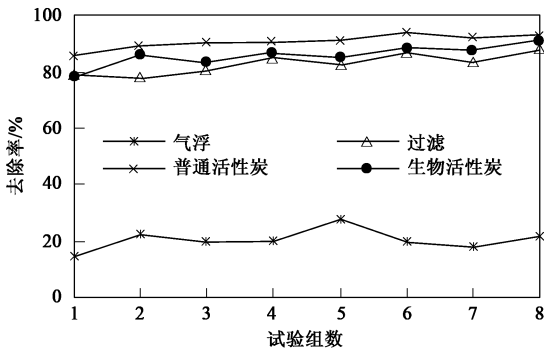


图 5 高锰酸盐复合药剂预氧化协同工艺除蚤效果
Fig. 5 Killing effect on cooperating process with PPC

高, 除蚤效能仍不佳。
经普通活性炭单元和生物活性炭单元过滤后, 出水中除蚤率平均值又提高了 7 个百分点以上, 分别达到 89% 和 86%, 所剩的剑水蚤绝大多数为 < 0.1 mm 的剑水蚤无节幼体。说明该工艺对剑水蚤的去除具有较好效果。分析原因可能是由于在剑水蚤数量已经很少的条件下, 活性炭滤池滤速比砂、煤滤

池要低, 更有利剑水蚤去除, 使得除蚤效率大幅提高。2 种活性炭滤池除蚤效果相差 3 个百分点, 出现这种情况的原因: ①进水中剑水蚤浓度已经很低, 导致去除率相差悬殊的空间不大; ②2 种活性炭工艺对于剑水蚤的去除主要依靠截留过滤作用。另外生物活性炭层中有利剑水蚤二次繁殖的环境, 对其去除率有一定的影响。

由图 6 可以看出, 液氯为预氧化药剂时的除蚤效果, 比高锰酸盐复合药剂和 O₃ 药剂有明显的提高。气浮单元出水中平均除蚤率为 35%, 超过高锰酸盐复合药剂和 O₃ 15 个百分点。过滤后除蚤率达到 88%, 最高单组除蚤率达到 93%, 与未经预氧化时相比提高了 9 个百分点, 与高锰酸盐复合药剂和 O₃ 相比分别高出了 6 个百分点和 3 个百分点, 说明采用液氯预氧化可以提高除蚤效果。经普通活性炭和生物活性炭单元处理后, 出水中除蚤率分别达 94% 和 92%, 好于高锰酸盐复合药剂和 O₃ 药剂。

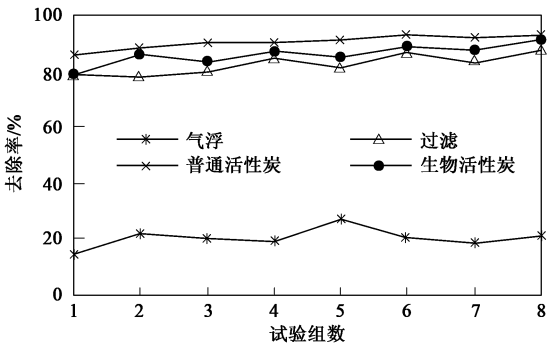


图 6 液氯预氧化协同工艺除蚤效果
Fig. 6 Killing effect on cooperating process with chlorate

图 7 数据表明采用氯胺进行预氧化时可以达到 100% 的除蚤效果。与液氯相比, 液氯在预氧化单元的灭蚤效果略好于氯胺, 但是后面的过滤、生物活性炭和普通活性炭单元的去蚤率分别提高了 2、6、4

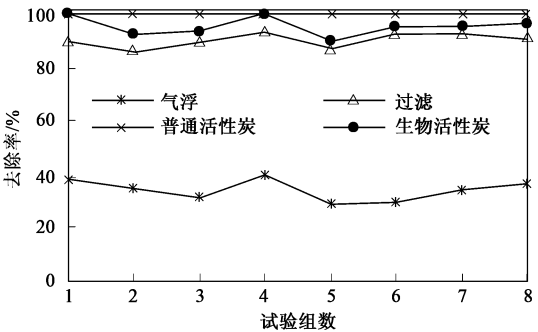


图 7 氯胺预氧化协同工艺除蚤效果
Fig. 7 Killing effect on cooperating process with chloramines

个百分点,其中普通活性炭单元增幅最大,达到100%去除率。

分析图3~图7可以看出,采用适合的预氧化药剂,即使在预氧化阶段的灭蚤效率较低(灭活率低于30%),但是与澄清水处理工艺相结合,就可以达到较好的剑水蚤去除效果。

试验证明,氯胺适合做除蚤的预氧化药剂,虽然氯胺的氧化能力要低于液氯,但是氯胺的持续时间比较长,比液氯能更长时间存在于系统中持续发挥作用,能与后面澄清环节更好地进行协同去除剑水蚤。图3预氧化阶段中液氯的除蚤效果稍好于氯胺,但是从过滤单元开始到最终处理结束,氯胺的除蚤率一直比液氯要高,也是这一原因所致。 O_3 和高锰酸盐复合药剂不适宜作为除蚤药剂。分析原因, O_3 是一种气态氧化剂,本身具有不稳定性,入水即快速分解,在水处理系统中持续性较差,因此尽管它的氧化能力比其他3种氧化剂强,即使在2.5 mg/L的高投量下,对水蚤的去除效果仍然不好,另外系统运行的稳定性对于 O_3 也有很大的影响。高锰酸盐复合药剂虽然在除藻、助凝、除污染等方面取得了良好的效果,但对剑水蚤灭活效果差。

从上面分析看出,为了去除剑水蚤,不一定要达到很高的氧化灭活率,采用适当的预氧化剂降低剑水蚤的活性,同时选择有效的澄清水处理工艺进行协同作用,可以达到完全去除剑水蚤的目的,形成有效的除蚤方案。另外,灭活率高的预氧化剂不等于会有最高的去除率,最终去除率取决于预氧化剂与后续水处理工艺的合理配合,二者的有效协同是获得最佳去除效果的关键。

3 结论

(1)采用液氯、氯胺、高锰酸盐复合药剂和 O_3 预氧化剂与水处理工艺结合,并选择适当的运行参数,可以有效提高剑水蚤的去除效果。

(2)当原水中剑水蚤含量21~33个/L时,采用氯胺2.5 mg/L(氯:氨=5:1)作为预氧化剂,与气浮石英砂+无烟煤过滤-普通活性炭过滤工艺相结合,可实现剑水蚤的全部去除。

(3)剑水蚤类浮游动物的去除主要取决于预氧化剂与澄清水处理工艺的合理配合,较高的预氧化灭活率并没有取得较高的除蚤效果。

参考文献:

- [1] 邢宏,陈艳萍,张清,等. 水处理工艺中的浮游甲壳动物的控制[J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 77-79.
- [2] 王新华,吕昀,秦保平,等. 引滦入津输水工程流域浮游动物和水质评价[J]. 南开大学学报(自然科学), 2002, 35(1): 16-22.
- [3] 赵帅营,韩博平. 大型深水贫营养水库——新丰江水库浮游动物群落分析[J]. 湖泊科学, 2007, 19(3): 305-314.
- [4] Bernhardt H, Lusse B. Elimination of Zooplankton by Flocculation and Filtration[J]. Aqua AQUAAA, 1989, 38(1): 23-31.
- [5] Pasternak A F, Pulkkinen K, Mikheev V N, et al. Factors affecting abundance of *Triaenophorus* infection in *Cyclops* sternums and parasite-induced changes in host fitness[J]. International Journal for Parasitology, 1999, 29: 1793-1801.
- [6] Anosike J C, Azoro V A, Nwoke B E B, et al. Dracunculiasis in the north eastern border of Ebonyi State south eastern Nigeria[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2003, 206(1): 45-51.
- [7] 王彦海. 台湾海峡鱼类绦虫种类、季节动态及两种假叶目绦虫生活史早期发育阶段的观察[D]. 厦门: 厦门大学, 2001. 90-103.
- [8] Bernhardt H F R. Elimination Zooplankton in the Context of Drinking Water Treatment[R]. French: Final Report, 1988. 77.
- [9] 崔福义,吴雅琴,刘冬梅,等. O_3/H_2O_2 法灭活水中剑水蚤类浮游动物[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 89-94.
- [10] Lin T, Cui F Y, Liu D M, et al. Full scale study of removal effect on *Cyclops* of zooplankton with chlorine dioxide[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(5): 746-750.
- [11] 崔福义,林涛,安东,等. 二氧化氯对剑水蚤的去除效果[J]. 中国给水排水, 2006, 19(5): 46-47.
- [12] 崔福义,张敏,刘冬梅,等. 氯胺灭活剑水蚤类浮游动物的试验研究[J]. 河海大学学报, 2005, 33(5): 485-489.