

混凝沉淀对净水工艺中仙女虫的控制研究

黄廷林¹, 张爽^{1*}, 聂小保^{1,2}, 张金松³, 陈慧², 丁立君¹, 刘丽君³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410076; 3. 深圳水务集团, 深圳 518031)

摘要: 为有效应对 O₃-BAC 工艺引起的净水工艺中仙女虫污染风险, 进行了混凝沉淀对仙女虫控制效果研究. 首先进行了自来水厂混凝沉淀单元仙女虫现场采样分析, 再结合仙女虫混凝沉淀去除的烧杯实验和沉淀池迁移模拟实验, 分析探讨混凝沉淀对仙女虫的去除规律和控制效果. 结果表明, 自来水厂混凝沉淀和烧杯实验条件下的混凝沉淀均对仙女虫去除效果明显, 前者可以将仙女虫平均密度由 0.52 ind/m³ 降至 0.17 ind/m³, 后者则基本上能实现对仙女虫 100% 的去除, 且去除率不受混凝操作条件的影响. 仙女虫可以发生从底泥向上覆水的浮游迁移, 温度和水流冲刷可以影响浮游迁移, 20℃ 时浮游率为 18.5%, 高于 30℃ 和 10℃ 时, 水流流速为 2、4 和 8 mm/s 时, 仙女虫的总浮游迁移数量分别为 11、25 和 39 ind. 由于浮游迁移的存在, 混凝沉淀阶段仙女虫在沉淀池的沉底并不意味着仙女虫的真正去除, 只有通过沉淀池排泥才能实现仙女虫从净水工艺中的彻底分离. 可以通过优化沉淀池排泥和抑制仙女虫在沉淀池的浮游迁移来提高混凝沉淀对仙女虫的控制效果.

关键词: 混凝沉淀; 仙女虫; 净水工艺; 控制; O₃-BAC

中图分类号: X174; TU991.25 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2531-06

Controlling Effect of Coagulation and Sedimentation on Naidid in Water Treatment Process

HUANG Ting-lin¹, ZHANG Shuang¹, NIE Xiao-bao^{1,2}, ZHANG Jin-song³, CHEN Hui², DING Li-jun¹, LIU Li-jun³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China; 3. Shenzhen Water (Group) Co. Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: To control naidid pollution in water treatment conducted by O₃-BAC, the removal effects of coagulation and sedimentation to naidid were estimated by field sampling of water plant, jar test and simulation study. The results showed that both coagulation and sedimentation of water plant and jar test had obvious removal efficiency on naidids. In the former the mean population density of naidid was decreased from 0.52 ind/m³ to 0.17 ind/m³, while in the later removal efficiency, which did not be influenced by operation condition of coagulation and sedimentation, reached nearly 100%. Drift migration of naidid from sediment to over-lying water were observed in simulation study and the drift efficiency could be influenced by both temperature and water flow. The drift efficiency of 20℃ was 18.5%, much higher than that of 30℃ and 10℃. While the velocities of water flow were 2, 4 and 8 mm/s, the number of drifting naidid were 11, 25 and 39 ind respectively. Because of the existence of drift migration, the settlement in sedimentation tank does not mean the real remove of naidid and the thoroughly separating of naidid from water treatment process can only be realized by sludge discharge of sedimentation tank. The naidid removal efficiency of coagulation and sedimentation can be increased by optimizing sludge discharge and restraining drift migration of naidid in sedimentation tank.

Key words: coagulation and sedimentation; naidid; water treatment process; controlling; O₃-BAC

水源水体中常见的蠕虫类无脊椎动物(简称蠕虫)包括水生昆虫幼虫、寡毛纲类及线虫纲类动物等, 通常为底栖或阶段性营浮游生活动物. 目前已被证实能够进入到净水工艺, 并最终出现在供水管网的蠕虫包括摇蚊幼虫^[1]、颤蚓^[2]、仙女虫^[3]及线虫^[4]等. 蠕虫自身并不会直接威胁到公众健康, 但其对供水水质的污染显而易见, 首先蠕虫的出现会引起感官上的不适, 其次蠕虫可以携带大量致病菌和机会致病菌^[5,6].

蠕虫对净水工艺的污染最初主要集中在慢滤

池^[7,8]. 随着以“混凝-沉淀-过滤”为主体的净水工艺在自来水厂的普及, 蠕虫在净水工艺中的孳生和穿透得到明显抑制, 只是在供水管网中偶有蠕虫检出^[9~11], 因而在一段时期内, 蠕虫污染问题并未引起足够重视. 目前净水工艺面临水源水质污染和供

收稿日期: 2010-10-15; 修订日期: 2011-03-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07423-003)

作者简介: 黄廷林(1962~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水质微污染控制与水资源保护, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhangshuangztw2005@163.com

水水质标准提高的双重压力,以臭氧-活性炭(O_3 -BAC)为代表的深度处理工艺正被逐渐推广,由此引发了新的蠕虫污染风险^[3, 12, 13]。首先臭氧接触提高了BAC滤池内的溶解氧浓度,有利于蠕虫快速生长,其次BAC滤池内丰富的生物膜也为蠕虫的生长繁殖提供了大量食物,蠕虫将大量孳生^[14]。 O_3 -BAC工艺中蠕虫污染控制可以从2个方面进行:一是化学氧化灭活^[15],二是在暴发期加强BAC滤池操作管理或对供水管网进行定期冲洗^[16],但前者在灭活蠕虫的同时,也会杀灭BAC滤池内的功能微生物,严重影响BAC滤池吸附降解功能,后者则控制效果不明显且成本较高。考虑到蠕虫首先须经过混凝沉淀再进入后续过滤单元,若能在混凝沉淀阶段对蠕虫实现有效控制,无疑有助于降低BAC滤池内蠕虫的孳生和泄露风险。

仙女虫属环节动物门寡毛纲颤蚓目^[17, 18],为淡水水体常见底栖生物,头部有明显长吻,腹部和背部有对称刚毛,以藻类和底泥碎屑为食,通常无性裂殖,是珠江下游地区BAC滤池中蠕虫优势种属之一。目前国内外仅见有关混凝沉淀对阶段性浮游的摇蚊幼虫控制研究报道^[19],尚未涉及对仙女虫、颤蚓和线虫等终生底栖类蠕虫的控制研究。本研究采用现场采样分析、混凝沉淀去除的烧杯实验和沉淀池迁移模拟实验相结合的方法,从仙女虫的生活习性和迁移性能分析入手,探讨混凝沉淀对其去除规律和控制效果,旨在为净水工艺,特别是 O_3 -BAC工艺中仙女虫控制提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 混凝沉淀单元仙女虫的现场采样分析

混凝沉淀单元仙女虫的现场采样分析在珠江下游B水厂进行,B水厂源水来自东深供水工程,处理工艺为“预臭氧+机械混合+水力絮凝+平流沉淀+砂滤+ O_3 -BAC”。

分别在该厂设置源水取样点和沉后水取样点,采用挂网拦截方式测定源水和沉后水中仙女虫密度,挂网孔径为45 μm ,每天挂网20 h。每次挂网前先用量筒和秒表测定取样点流量。挂网结束后,用自来水对筛网反复冲洗,将全部冲洗液收集并静置2 h去掉上清液,之后转移至直径为9 cm培养皿。立体显微镜下对仙女虫计数,并由取样点流量得到源水和沉后水中仙女虫密度。

1.2 烧杯实验

烧杯实验在六联搅拌仪上完成,主要考察混凝

搅拌条件、混凝剂投加量和沉淀时间对控制效果的影响。搅拌条件设4个方案:① 100 r/min 1 min、50 r/min 5 min、25 r/min 5 min;② 200 r/min 1 min、100 r/min 5 min、50 r/min 5 min;③ 300 r/min 1 min、150 r/min 5 min、75 r/min 5 min;④ 400 r/min 1 min、200 r/min 5 min、100 r/min 5 min。混凝剂采用聚合氯化铝(PAC),投加量依次为5、10、20和30 mg/L。沉淀时间分别取1、2、3和4 h。

实验用仙女虫采自水厂BAC滤池反冲洗水,每次反应仙女虫投放密度均为60 ind/L,混凝沉淀结束后,采用虹吸方式快速吸去上清液直至有少量絮体被带出,剩余液体转移至9 cm培养皿,在立体显微镜下计数,从而得到混凝沉淀对仙女虫的去除率。每次实验均重复3次。

1.3 模拟实验装置及方法

沉淀池迁移模拟装置如图1所示。装置沿长度方向由穿孔配水板和挡板依次分为配水区、迁移区和排水区,长度分别为5、20和5 cm,其中迁移区放置2 cm厚水源水库底泥。迁移实验分静态和动态2组:静态实验时,进水口不进水,封堵穿孔配水板上孔眼,在迁移区完成静态迁移;动态实验时,装置进水来自水厂中试基地沉前水,出水口包缠45 μm 尼龙筛网用以拦截可能随水流流出的仙女虫。

对静态迁移,在迁移区放入适量沉水植物,将仙女虫的迁移分布分为底栖(附着在底泥表面或泥层内)、着生(附着在沉水植物表面)和浮游(浮游于上覆水中)3类。具体实验过程为:迁移区底泥投放完毕后放入沉水植物,之后加入水厂源水再静置3 d,以利于仙女虫可能在沉水植物表面的着生行为。静置结束后,在迁移区均匀投放1 000条取自水厂BAC滤池反冲洗水的仙女虫,仙女虫开始迁移,迁移时间为24 h。迁移结束后采用虹吸方式将上覆水取出,对其中的仙女虫进行计数,计数方法同1.1节。其迁移方式视为浮游迁移。将沉水植物转移至500 mL烧杯,用50 mg/L的含氯水浸泡5 min并不断轻甩沉水植物,使着生仙女虫脱落,采用1.1中方法对浸泡液中仙女虫计数,其迁移方式视为着生。其余仙女虫迁移方式均视为底栖。

对动态迁移,在迁移区投放3 000条取自水厂BAC滤池反冲洗水的仙女虫,静置24 h后制造动水条件,控制迁移区断面流速分别为2、4和8 mm/s,仙女虫进行水流引起的被动浮游迁移。迁移1 min后,每30 min更换1次出水口包缠筛网,并

对筛网拦截仙女虫计数，得到动态条件下仙女虫的浮游迁移规模。

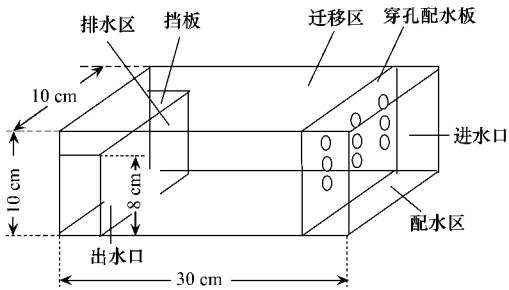


图1 仙女虫迁移模拟装置示意
Fig.1 Simulation device of naidid migration



图2 净水工艺中检出的仙女虫
Fig. 2 Picture of naidid detected in water treatment

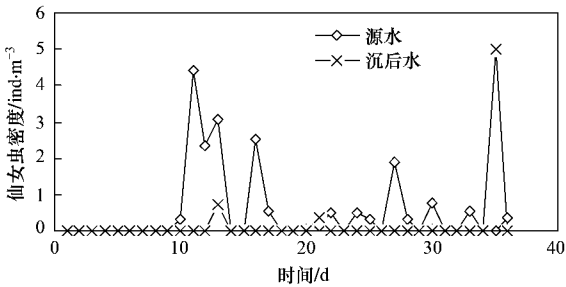


图3 B水厂源水和沉后水中仙女虫检出结果
Fig.3 Detect results of naidid in source water and settled water of water plant B

现象,则沉后水中仙女虫密度仅为 0.03 ind/m³. 说明水厂混凝沉淀对仙女虫去除效果明显。

2.2 混凝沉淀操作条件对仙女虫去除效果的影响

控制投药量为 10 mg/L，沉淀时间为 1 h，搅拌条件对仙女虫去除效果的影响如图 4(a) 所示；搅拌条件取方案 2，沉淀时间为 1 h，混凝剂投加量对去除效果的影响如图 4(b) 所示；图 4(c) 给出了搅拌方案 2 条件下，混凝剂投加量为 10 mg/L 时，沉

2 结果与分析

2.1 净水厂混凝沉淀单元对仙女虫的控制效果

图 2 给出了源水[图 2(a)]和沉后水[图 2(b)]中检测到的仙女虫图片。图 3 给出了实验期间源水和沉后水中仙女虫密度分布情况。源水和沉后水中仙女虫检出天数分别为 15 d 和 3 d，占实验天数的 41.7% 和 8.3%。第 35 d 沉后水中密度出现异常，高达 5 ind/m³。甚至高于实验期间源水的最大检出密度(4.41 ind/m³,第 11 d)。

实验期间源水和沉后水中仙女虫的平均密度分别为 0.52 和 0.17 ind/m³，如不考虑第 35 d 的异常

淀时间对去除效果的影响。

图 4 表明，烧杯实验条件下混凝沉淀操作对仙女虫去除效果显著，各次实验的去除率均接近 100%。同时混凝沉淀对仙女虫去除效果与操作条件无关，无论搅拌条件、混凝剂投加量和沉淀时间，均对去除率影响不显著($p > 0.05$)。

2.3 沉淀池中仙女虫的迁移

仙女虫静态迁移结果如图 5 所示。可以看出，不同温度下底栖、着生和迁移 3 种迁移方式均有发生。底栖方式为仙女虫的最主要迁移分布方式，特别是在低温(10℃)时，底栖发生率高达 97.5%。20℃时仙女虫的着生率和浮游率分别为 7.5% 和 18.5%，均明显高于高温(30℃)和低温(10℃)时。

图 6 给出了仙女虫的动态迁移结果。除 2 mm/s 的 30~90 min 段和 4 mm/s 的 120~150 min 段外，其余时段各流速条件下，仙女虫均有持续的浮游迁移发生，表明水流冲刷作用是仙女虫发生浮游迁移的主要动力之一。随着流速的增加，仙女虫的浮游规模也有明显的增加，2、4 和 8 mm/s 时，最终仙女虫的总浮游迁移数量分别为 11、25 和 39 ind。

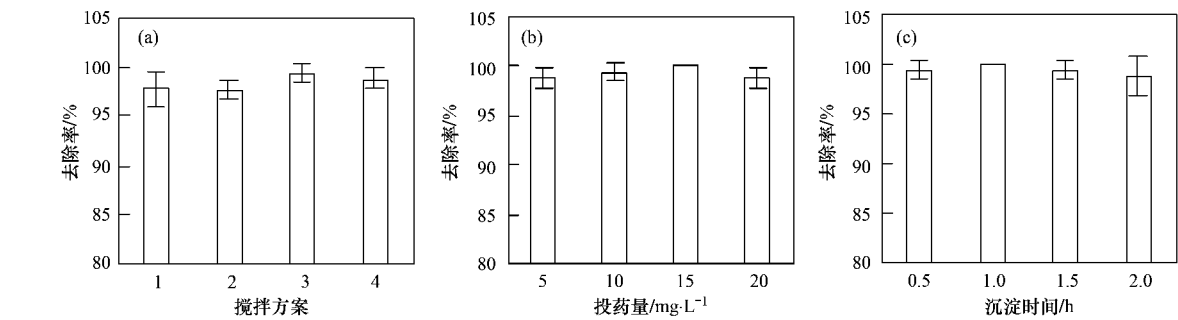


图 4 混凝操作条件对仙女虫去除效果的影响

Fig. 4 Effects of coagulation and sedimentation on naidid removal efficiency

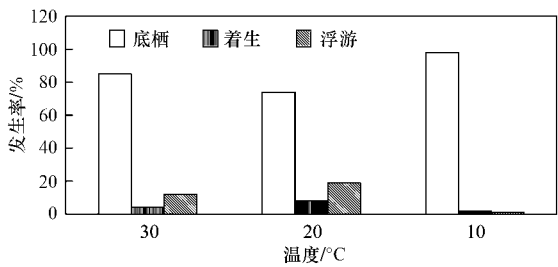


图 5 模拟装置中仙女虫静态迁移结果

Fig. 5 Static migration results of naidid in simulation device

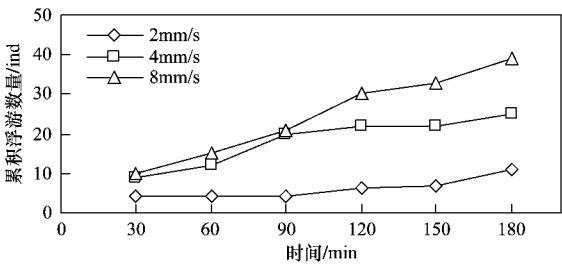


图 6 模拟装置中仙女虫动态迁移结果

Fig. 6 Kinesis migration results of naidid in simulation device

3 讨论

B 水厂的现场取样分析结果和烧杯实验结果均表明, 混凝沉淀对仙女虫的去除效果明显, 特别是烧杯实验中, 仙女虫去除率均接近 100%. 混凝沉淀对仙女虫表现出的高效去除效果与仙女虫的生活习性有关. 仙女虫体长一般在 10 mm 左右, 体宽也不超过 0.1 mm^[20]. 尽管体型较小, 但由于是终生底栖动物, 即便是在天然水体中, 也会迅速沉底. 因此在流态相对稳定的沉淀池, 仙女虫也容易发生沉降. 一些体型特别小的仙女虫或者新生幼虫, 虽然自身沉降速度可能较慢, 但混凝过程中其体表将

吸附混凝生成的矾花, 在矾花的携裹作用下也容易沉降. 与此相反, 混凝沉淀对净水厂中浮游型无脊椎动物如甲壳类、枝角类和 1 龄摇蚊幼虫去除效果有限, 如刘冬梅等^[21]研究表明, 混凝沉淀对剑水蚤的平均去除率仅为 13.3% 左右, 孙兴滨^[19]发现混凝沉淀对 1 龄摇蚊幼虫的平均去除率在 50% 左右. 因此可以认为混凝沉淀对无脊椎动物的去除效果主要决定于生物自身的生活习性, 对浮游型, 重力沉降方式去除效果有限, 采用气浮方式进行控制可能效果更好; 而对底栖型如仙女虫, 重力沉降去除效果显著, 且不宜采用气浮形式去除.

混凝沉淀对仙女虫去除作用的另一个特点是去除效果稳定, 不受包括搅拌条件、混凝剂投加量和沉淀时间等在内的操作条件影响. 而对于浮游型无脊椎动物如 1 龄摇蚊幼虫, 搅拌条件优化后去除率可以从 45.5% 提高到 55.5%^[19]. 由于混凝沉淀对仙女虫的去除率高, 去除效果稳定, 因此即使是在仙女虫污染高发期, 对净水工艺而言也不必采用如增加混凝剂投量等强化措施来进一步提高混凝沉淀对仙女虫的去除效果. 这也是仙女虫控制有别于浮游型无脊椎动物的另外一个特点.

尽管混凝沉淀对仙女虫去除效率高, 效果稳定, 但 B 水厂的现场采样结果表明, 仍有部分仙女虫将在沉后水中出现并进入砂滤池, 甚至出现沉后水中仙女虫密度远高于源水的情况 (图 3 中第 35 d). Beaudet 等^[3]对水厂仙女虫的调查分析也得到过类似的结果. 图 5 和图 6 表明, 无论是静态还是动态条件下, 沉入模拟装置底泥中的仙女虫均可发生浮游迁移, 重新由底泥中返回上覆水. 动态条件下仙女虫浮游现象更为明显. 仙女虫的这种浮游迁移在自然水体或人工水体中也经常被观察到^[22,23]. 仙女虫被认为是一类特殊的底栖动物, 其

体表刚毛数量较多且较长,因而具备一定的自由游动能力,可以脱离底栖环境生存,扰动条件下甚至可以通过游动方式迅速逃离^[24]。净水工艺条件下,当沉底的仙女虫未被排泥及时排出沉淀池时,仙女虫同样可能发生浮游,回到上覆水中并随沉淀池水流向前迁移至沉淀池指型槽出水区,最终进入到砂滤池。此外,相对于自然水体,特别是湖库类水体,沉淀池中仙女虫的浮游现象可能更为明显:首先在沉淀池排泥阶段,排泥引起的扰动作用可能会促进仙女虫的浮游;其次沉淀池中的水平流速一般在 5~20 mm/s 之间^[25],由于水平流速的存在,仙女虫的浮游规模得到提高。至于图 3 中第 35 d 沉后水中仙女虫密度高于源水,可能是由于此时一些外界环境条件如沉淀池内风浪等引起的浮游迁移规模骤增所致。

以上表明,从净水工艺仙女虫污染风险控制角度看,由于浮游迁移的存在,混凝沉淀阶段仙女虫在沉淀池的沉底并不意味着仙女虫的真正去除,只有通过沉淀池排泥才能实现仙女虫从净水工艺中的彻底分离,因此为提高混凝沉淀单元对仙女虫的控制效果,可以从以下 2 个方面入手:一是优化沉淀池排泥操作,如在污染暴发期,适当缩短排泥周期,增大排泥量,以提高仙女虫的去除率;排泥车变速行进,在沉淀池中后部降低行进速度,以避免排泥操作对底泥的扰动;定期排除出水导流面积泥,防止仙女虫在积泥过高导致的“跑矾花”过程中发生浮游。另外一个方面是通过控制混凝沉淀过程或增设预处理操作如化学预氧化,来尽量削减仙女虫的浮游迁移规模。

4 结论

(1) 自来水厂混凝沉淀和烧杯实验条件下的混凝沉淀均对仙女虫去除效果明显,前者可以将仙女虫平均密度由 0.52 ind/m³ 降至 0.17 ind/m³,后者则基本上能实现对仙女虫 100% 的去除,且去除率不受混凝操作条件的影响。

(2) 仙女虫的底栖、着生和浮游迁移 3 种迁移方式在模拟实验中均有发生,温度能够影响迁移运动,20℃ 时着生率和浮游率分别为 7.5% 和 18.5%,均高于 30℃ 和 10℃。水流冲刷作用能够促进仙女虫的浮游迁移,2、4 和 8 mm/s 时,仙女虫的总浮游迁移数量分别为 11、25 和 39 ind。

(3) 混凝沉淀对仙女虫去除效果明显,不必采用强化混凝方式来进一步提高其去除率;由于浮游

迁移的存在,混凝沉淀阶段仙女虫在沉淀池的沉底并不意味着仙女虫的真正去除,只有通过沉淀池排泥才能实现仙女虫从净水工艺中的彻底分离。可以通过优化沉淀池排泥和抑制仙女虫在沉淀池的浮游迁移来提高混凝沉淀对仙女虫的控制效果。

参考文献:

- [1] Sun X B, Cui F Y, Zhang J S, *et al.* Pilot-scale study of removal effect on Chironomid larvae with chlorine dioxide[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(2): 248-253.
- [2] 黄廷林,武海霞,陈千娇. 水中颤蚓灭活试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, **38**(2): 263-268.
- [3] Beaudet J F, Prévost M, Niquette P, *et al.* Simple methods for evaluating the population of naids in drinking water treatment plants[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, **27**(4): 601-609.
- [4] Bichai F, Barbeau B, Dulemont Y, *et al.* Role of predation by zooplankton in transport and fate of protozoan (oo) cysts in granular activated carbon filtration[J]. *Water Research*, 2009, **44**(4): 1072-1081.
- [5] Wolmarans E, Du-Preez H H, De-Wet C M E, *et al.* Significance of bacteria associated with invertebrates in drinking water distribution networks[J]. *Water Science & Technology*, 2005, **52**(8): 171-175.
- [6] Bichai F, Barbeau B, Payment P. Protection against UV disinfection of *E. coli* bacteria and *B. subtilis* spores ingested by *C. elegans* nematodes[J]. *Water Research*, 2009, **43**(14): 3397-3406.
- [7] Wotton R S, Armitage P D, Aston K, *et al.* Colonization and emergence of midges (Chironomidae: Diptera) in slow filter beds[J]. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 1992, **26**(2-4): 331-339.
- [8] Ratsak C H, Kooiman S A L M, Kooi B W. Modelling the growth of an oligochaete on activated sludge[J]. *Water Research*, 1993, **27**(5): 739-747.
- [9] Broza M, Halpern M, Teltsch B, *et al.* Shock chloramination: potential treatment for Chironomidae (Diptera) larvae nuisance abatement in water supply system[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1998, **91**(4): 834-840.
- [10] Van-Lieverloo J H M, Bosboom D W, Bakker G L, *et al.* Controlling invertebrate in distribution systems with zero or low disinfectant residual[J]. *Water Supply*, 1998, **16**(3-4): 199-204.
- [11] Locas A, Barbeau B, Gauthier V. Nematodes as a source of total coliforms in a distribution system[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2007, **53**(5): 580-585.
- [12] Matsumoto N, Aizawa T, Ohgaki S, *et al.* Removal methods of nematode contained in the effluent of activated carbon[J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2002, **2**(3): 183-190.
- [13] Castaldelli G, Mantovani S, Benvenuti M R, *et al.* Invertebrate

colonisation of GAC filters in a potabilisation plant treating groundwater [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2005, **54**(8): 561-568.

[14] 李小伟, 刘丽君, 杨宇峰, 等. BAC 滤池无脊椎动物滋生对饮用水安全性的影响 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2008, **35**(12): 64-69.

[15] Sun X B, Cui F Y. Inactivation of Chironomid larvae with ozone [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2008, **8**(3): 355-361.

[16] Weeks M A, Leadbeater B S C, Callow M E. Effects of backwashing on the prosobranch snail *Potamopyrgus jenkinsi* Smith in granular activated carbon (GAC) adsorbers [J]. Water Research, 2007, **41**(12): 2690-2696.

[17] Bely A E, Wray G A. Molecular phylogeny of naidid worms (Annelida: Clitellata) based on cytochrome oxidase 1 [J]. Molecular Phylogenetics & Evolution, 2004, **30**(1): 50-63.

[18] Erséus C, Gustavsson L. A proposal to regard the former family Naididae as a subfamily within Tubificidae (Annelida, Clitellata) [J]. Hydrobiologia, 2002, **485**(1-3): 253-256.

[19] 孙兴滨. 摇蚊幼虫生态学特征及其在水处理过程中去除技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[20] Learner M A, Lochhead G, Hughes B D. A review of the biology of British Naididae (Oligochaeta) with emphasis on the lotic environment [J]. Freshwater Biology, 1978, **8**(4): 357-375.

[21] 刘冬梅, 崔福义, 吴雅琴, 等. 预氧化协同常规水处理工艺去除剑水蚤 [J]. 供水技术, 2007, **1**(1): 32-34.

[22] Principe R E, Corigliano M C. Benthic, drifting and marginal macroinvertebrate assemblages in a lowland river: temporal and spatial variations and size structure [J]. Hydrobiologia, 2006, **553**(1): 303-317.

[23] Mochizuki S, Kayaba Y, Tanida K. Responses of benthic invertebrates in an experimental channel to artificial flushes [J]. Hydrobiologia, 2008, **603**(1): 73-81.

[24] Cellot B, Juget J. Oligochaete drift in a large river (French Upper Rhone): the effect of life cycle and discharge [J]. Hydrobiologia, 2006, **389**(1-3): 183-191.

[25] 许保玖. 给水处理理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 226.