

净水工艺对饮用水生物稳定性控制的研究

鲁巍^{1,3}, 唐峰¹, 张晓健¹, 何文杰², 韩宏大², 胡建坤²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 天津市自来水集团有限公司, 天津 300040; 3. 北京市市政工程设计研究总院, 北京 100045)

摘要:利用现场中试装置, 系统比较了预处理单元、常规处理单元及深度处理单元中可生物降解有机物 BDOC 和 AOC 的生成和去除特性。结果表明: 常规工艺 + 活性炭过滤对 COD_{Mn} 的去除率仅能达到 30%, 无法有效保证出水水质要求, 而常规工艺 + 臭氧活性炭可以很好地满足水质标准, 去除率可达 50% 以上。以控制生物稳定性为目的时, 氧化剂的投加会增加 AOC 和 BDOC 浓度, 降低生物稳定性。不投加氧化剂, 直接采用常规工艺 + 普通活性炭过滤可将出水 AOC 含量控制在 $50 \mu\text{g/L}$ 以下。但要实现对 COD_{Mn} 和生物稳定性的同时控制, 常规工艺 + 臭氧 + 生物活性炭的工艺组合是本研究中的最佳工艺组合。

关键词: 饮用水; 生物稳定性; 臭氧; 活性炭

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0071-04

Controlling of Biological Stability in Drinking Water by Purification Processes

LU Wei^{1,3}, TANG Feng¹, ZHANG Xiao-jian¹, HE Wen-jie², HAN Hong-da², HU Jian-kun²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tianjin City Drinking Water Limited Company, Tianjin 300040, China; 3. Beijing Civil Engineering Design and Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: In a pilot scale system, the formation and removal of BDOC and AOC were compared in the pre-treatment unit, traditional treatment unit and advanced treatment unit. The experimental results indicate that the COD_{Mn} removal in a traditional process plus active carbon filter system is 30% and in a traditional process plus ozone and active carbon filter system is more than 50%. The AOC contents in the effluent of a traditional process plus active carbon filter system is below $50 \mu\text{g/L}$. The optimum process combination in the research is: traditional process plus ozonation plus biological active carbon.

Key words: drinking water; biological stability; ozone; active carbon

饮用水的生物稳定性是指饮用水中微生物生长的潜力。饮用水生物不稳定会造成配水管网中异养细菌等微生物的再生长 (regrowth), 会对饮水水质安全带来一定的微生物安全风险, 同时还会对输水过程带来一系列的不利影响, 如引起管网的腐蚀, 使饮用水产生臭味, 导致色度及浊度的增加等等, 最终造成饮用水水质下降^[1]。

通过去除饮用水中含有的微量可生物降解有机物来提高饮用水的生物稳定性是目前控制细菌再生长的主要方法之一。目前, 国内外围绕着预处理工艺、常规处理工艺、深度处理工艺 3 方面已经分别进行了广泛地研究。本研究在此基础上, 利用现场中试试验装置, 系统比较了预处理单元、常规处理单元及深度处理单元中可生物降解有机物的生成和去除特性。综合评价了各处理单元对于饮用水生物稳定性的控制作用, 并以 COD_{Mn} 和生物稳定性的同时控制为目的, 提出了工艺单元的优化组合方案。

工艺流程如图 1 所示, 虚线框内工艺单元可选择性运行。整套工艺分为 2 个系统并列运行, 每个系统进水量 5 t/h 。

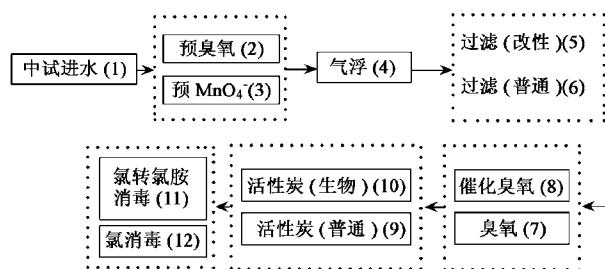


图 1 中试工艺流程

Fig. 1 Pilot-scale flow process diagram

本研究中比较的不同工艺单元的组合方式如表 1 所示。

1 材料和方法

1.1 中试工艺

收稿日期: 2004-09-07; 修订日期: 2004-10-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2002 AA601140)

作者简介: 鲁巍 (1978 ~), 男, 博士, 主要从事饮用水生物稳定性方面研究。

表 1 工艺组合方式列表¹⁾

Table 1 List of process units combination

工艺单元编号	工艺组合方式	图例
1 + 2 + 4 + 5 + 7 + 9 + 11	预臭氧 + 气浮 + 过滤(改性) + 臭氧 + 活性炭(普通) + 氯转氯胺消毒	图 2 和图 6
1 + 2 + 4 + 5 + 8 + 10 + 11	预臭氧 + 气浮 + 过滤(改性) + 催化臭氧 + 活性炭(生物) + 氯转氯胺消毒	图 2 和图 6
1 + 4 + 6 + 9 + 12	气浮 + 过滤(普通) + 活性炭(普通) + 氯消毒	图 3 和图 7
1 + 4 + 6 + 10 + 12	气浮 + 过滤(普通) + 活性炭(生物) + 氯消毒	图 3 和图 7
1 + 3 + 4 + 6 + 10 + 12	预 MnO ₄ ⁻ + 气浮 + 过滤(普通) + 活性炭(生物) + 氯消毒	图 4 和图 8
1 + 4 + 5 + 7 + 10 + 11	气浮 + 过滤(改性) + 臭氧 + 活性炭(生物) + 氯胺消毒	图 5 和图 9
1 + 4 + 5 + 8 + 10 [*] + 11	气浮 + 过滤(改性) + 催化臭氧 + 活性炭(生物) + 氯胺消毒	图 5 和图 9

1) 表中编号与图 1 对应;10^{*} 也表示生物活性炭单元与 10 表示的生物活性炭单元运行条件相近

1.2 水样的采集

水样均用无菌、无炭化磨口玻璃瓶采集。水样采集后立即放入冷却箱中保存,4h 内测定。

1.3 试验仪器

所有玻璃仪器都要保证无炭化。酸洗后浸泡过夜,然后分别用自来水、蒸馏水和高纯水润洗 3 次。通过 550℃下加热 2h 来去除痕量炭。采样瓶加入硫代硫酸钠以中止余氯反应。

1.4 可同化有机炭(AOC)测试^[2-4]

取待测 40 mL 水样,经 70℃ 30 min 水浴巴氏消毒后冷却至室温,接种荧光假单胞菌 P17 (*fluorescent pseudo monas*) 在 22~25℃下培养 2 d,取培养液进行平板计数,计算水样中的 AOC-P17 浓度;然后再次对水样进行巴氏消毒,接种 NOX (*spirillum*) 作为测试菌种在 22~25℃下培养 3 d,再对培养液进行平板计数,计算水样中的 AOC-NOX 浓度;AOC-P17 与 AOC-NOX 之和即为所测水样 AOC 含量。产率系数为试验期间在实验室测得的数据: $Y_{P17} = 2.6 \times 10^7$ 个/ μg , $Y_{NOX} = 4.0 \times 10^7$ 个/ μg 。

1.5 可生物降解溶解性有机炭(BDOC)测试^[5,6]

采用悬浮生长法进行测定,先将待测水样 500 mL 经 0.45 μm 超滤膜过滤去除微生物,测定水样 TOC,然后接种一定量的含土著细菌的接种液(水样体积的 1%)。将加好接种液的水样放入恒温箱中,在 20℃培养 28 d,28 d 后再经 0.45 μm 超滤膜过滤,测定水样 TOC 值,前后差值即为 BDOC。

2 结果与讨论

2.1 COD_{Mn} 的去除特性

COD_{Mn} 为评价水体中有机物总量的综合指标,在各种工艺组合流程中随着各工艺单元的去除而逐步降低。从图 2~图 5 可以看出,以控制出水 COD_{Mn} 浓度为目标时,氧化工艺单元的加入可大大降低出

水的 COD_{Mn} 浓度,去除率基本可达 50% 以上(图 2~图 5),未使用氧化工艺时出水 COD_{Mn} 去除率仅为 30%(图 3)。因此,以控制出水 COD_{Mn} 浓度为目的深度处理,臭氧 + 活性炭工艺是最佳的组合。

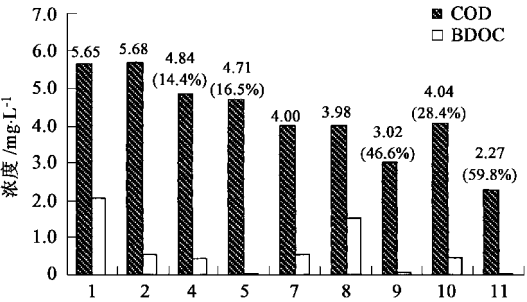


图 2 预臭氧 + 气浮过滤 + 臭氧活性炭组合中 COD 和 BDOC 的去除特性
(横坐标编号与图 1 对应,余图同)

Fig. 2 The removal of COD and BDOC in pre-ozonation + floatation and filtration + ozone and active carbon process
(the number of X-axis is corresponded to Fig. 1)

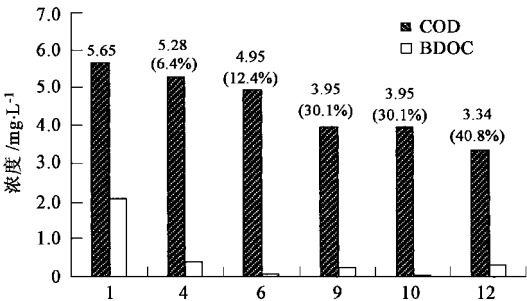


图 3 气浮过滤 + 活性炭组合中 COD 和 BDOC 的去除特性

Fig. 3 The removal of COD and BDOC in floatation and filtration + active carbon process

2.2 AOC 和 BDOC 的生成及去除特性

2.2.1 AOC

AOC 指标评价的是饮水中最易被微生物同化的那一部分有机炭,自 20 世纪 90 年代开始被广泛

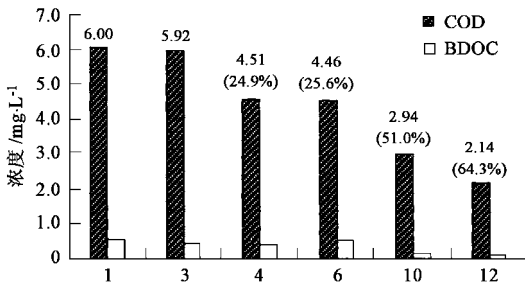


图 4 预 MnO_4^- 气浮过滤 + 活性炭组合中 COD 和 BDOC 的去除特性

Fig. 4 The removal of COD and BDOC in pre- MnO_4^- + flotation and filtration + active carbon process

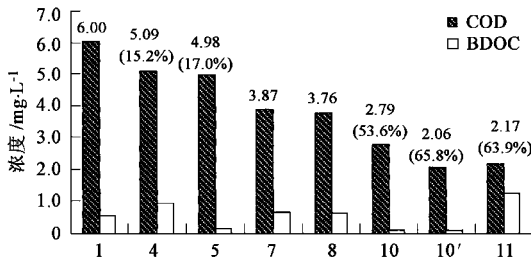


图 5 气浮过滤 + 臭氧活性炭组合中 COD 和 BDOC 的去除特性

Fig. 5 The removal of COD and BDOC in flotation and filtration + ozone and active carbon process

应用于评价饮用水的生物稳定性。

图 6 ~ 图 9 为不同工艺单元组合运行方式对 AOC 的去除情况,从中可以看出:在未使用预氧化工艺单元时,改性滤料出水 AOC 含量要明显低于普通滤料出水(分别为 $55\mu\text{g/L}$ 和 $161\mu\text{g/L}$,图 7、图 9),而使用预氧化工艺单元后,改性滤料出水 AOC 含量与普通滤料出水无明显区别(分别为 $72\mu\text{g/L}$ 和 $75\mu\text{g/L}$,图 6、图 8)。这可能是因为预氧化处理

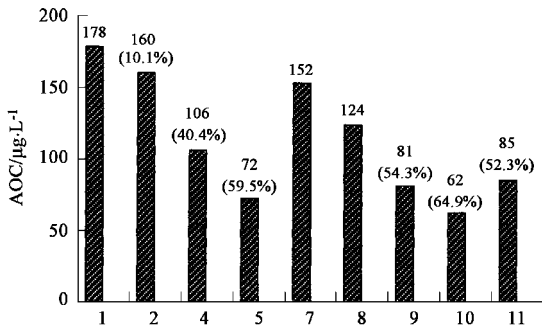


图 6 预臭氧 + 气浮过滤 + 臭氧活性炭组合中 AOC 的去除特性

Fig. 6 The removal of AOC in pre-ozonation + flotation and filtration + ozone and active carbon process

后,有机物被氧化为分子量更小的有机物,而改性滤料对于分子量较大的有机物去除效果更佳。

在未投加臭氧,直接使用活性炭工艺单元的情况下,炭柱出水 AOC 含量较低(图 7 和图 8)。而投加臭氧氧化会导致系统 AOC 含量的明显增加(图 6 和图 9)。

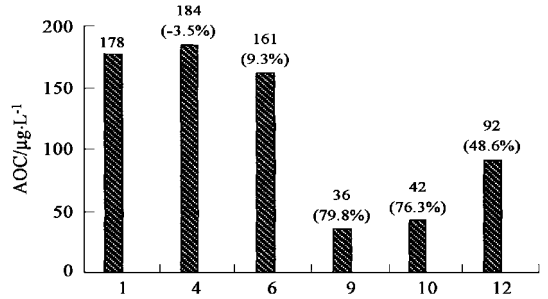


图 7 气浮过滤 + 活性炭组合中 AOC 的去除特性

Fig. 7 The removal of AOC in flotation and filtration + active carbon process

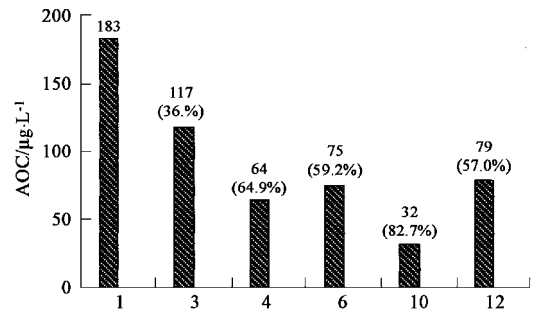


图 8 预 MnO_4^- 气浮过滤 + 活性炭组合中 AOC 的去除特性

Fig. 8 The removal of AOC in pre- MnO_4^- + flotation and filtration + active carbon process

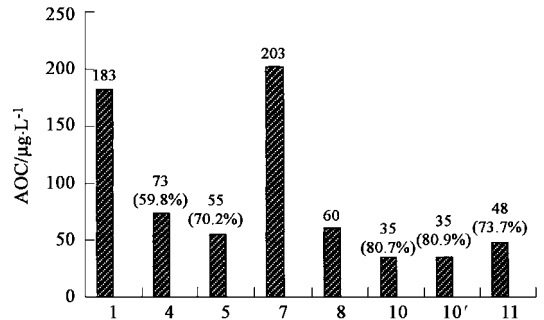


图 9 气浮过滤 + 臭氧活性炭组合中 AOC 的去除特性

Fig. 9 The removal of AOC in flotation and filtration + ozone and active carbon process

在所有使用了氧化剂的组合运行方式中,生物活性炭出水的 AOC 含量均低于普通活性炭出水(图

6 和图 8),而未投加氧化剂的组合运行方式中 2 种炭的区别不明显(图 7).这是因为氧化剂的投加使高分子有机物氧化成为低分子醛、酮、酸等,它们不易被活性炭直接吸附去除,而生物活性炭中微生物的存在可改善吸附环境,通过微生物的呼吸代谢作用可以降解低分子有机物,从而出水 AOC 的含量较低^[7,8].

消毒剂的投加会增加炭柱出水中 AOC 的含量,其中氯消毒会使活性炭出水的 AOC 含量增加 25 % 左右(图 7,8),而氯转氯胺消毒会使活性炭出水 AOC 含量增加 10 % 左右,AOC 生成量比氯消毒低(图 6,9).这是由于消毒剂的氧化作用将大分子有机物氧化成为低分子,易生物降解有机物引起的.而氯转氯胺氧化性更强,因此 AOC 生成量更高.

2.2.2 BDOC

BDOC 也是评价饮用水生物稳定性的指标,代表的是饮用水中所有可被微生物降解的溶解性有机物,因此其测定值高于 AOC.如图 2 ~ 图 5 所示,BDOC 在各工艺单元中的去除和生成情况与 AOC 基本类似,氧化剂的投加会增加可生物降解有机物的含量,降低出水的生物稳定性.

2.3 工艺组合的比较及选择

根据表 2 中各工艺组合对有机物的去除率可以看出,要保证出水水质 COD_{Mn} 含量达标 (< 3 mg/L),气浮过滤 + 活性炭过滤去除率仅 30 %,无法达到要求,而气浮过滤 + 臭氧活性炭可以很好地

+ 普通活性炭过滤即可将出水 AOC 含量控制在 50μg/L 以下.因此,既要满足 COD_{Mn} 的出水要求又要实现对生物稳定性的控制,气浮过滤 + 臭氧 + 生物活性炭的工艺组合是本研究中的最优选择.

3 结论

(1)未使用预氧化工艺单元时,滤料是过滤出水生物稳定性控制的关键因素,改性滤料出水 AOC 含量要明显低于普通滤料出水.使用预氧化工艺单元后 2 种滤料差别不大.

(2)氧化剂的投加会降低出水的生物稳定性,在未投加臭氧的情况下活性炭的使用可明显提高 AOC 去除率.使用臭氧氧化会导致系统 AOC 含量的明显增加.臭氧 + 生物活性炭可有效去除 AOC,而臭氧 + 普通活性炭无法有效控制臭氧氧化后生成的 AOC.

(3)氯消毒会使活性炭出水的 AOC 含量增加 25 % 左右,而氯转氯胺消毒会使活性炭出水 AOC 含量增加 10 % 左右,AOC 生成量较氯消毒低.

(4)要实现对 COD_{Mn} 和生物稳定性的同时控制,气浮过滤 + 臭氧 + 生物活性炭的工艺组合是本研究中的最佳组合.

参考文献:

[1] 王占生,刘文君.微污染源饮用水处理[M].北京:中国建筑工业出版社,1999. 236 ~ 243 .

[2] Van Der Kooij. Determining the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water[J], J. AWWA, 1982, 74(10) : 540 ~ 545 .

[3] Van Der Kooij. Substrate utilization by an Oxalate consuming spirillum species in relation to its growth in ozonated water[J], Appl. Environ. Micro., 1984, 47(3) : 551 ~ 559 .

[4] 刘文君,王亚娟.饮用水中可同化有机碳(AOC)的测定方法研究[J].给水排水,2000, 26(11) : 1 ~ 6 .

[5] Joret J C. Biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) content of drinking water and potential regrowth of bacteria[J], Wat. Sci. Tech., 1991, 24(2) : 95 ~ 101 .

[6] 刘文君,吴红伟.饮用水中 BDOC 测定动力学研究[J].环境科学,1999, 7(4) : 20 ~ 23 .

[7] 吴红伟, AOC 在净水工艺中的去除与在管网中的变化和影响[D].北京:清华大学,2002 .

[8] 吴红伟,刘文君.水厂常规工艺去除可生物同化有机碳的研究[J].中国给水排水,1999, 15(9) : 7 ~ 9 .

表 2 不同工艺组合对出水中有机物含量的去除率/ %

Table 2 The removal of organic matter in different process combinations/ %

工艺组合 ¹⁾	AOC 去除率	COD _{Mn} 去除率	BDOC 去除率
①②③⑤	54.3	46.6	96.4
①②③④	64.9	28.4	77.0
②④	76.3	30.1	97.6
②⑤	79.8	30.1	89.1
②③④	80.9	65.8	77.3
①②④	82.7	51	72.2

1) ①预氧化;②气浮过滤;③臭氧氧化;④生物活性炭;⑤普通活性炭

满足水质标准.而如果单纯以控制生物稳定性为目的,氧化剂的投加是不利的,直接采用气浮过滤工艺