

可同化有机碳及氯浓度对给水管网中生物膜生长的影响

王 迪¹ 刘文君¹ 顾军农² 张素霞²

(1 清华大学环境科学与工程系,北京 100084; 2 北京市自来水集团有限责任公司,北京 100085)

摘要 以北京市自来水集团有限责任公司第九水厂炭滤池出水为研究对象,通过中试规模的臭氧活性炭工艺控制和改变进入模拟管网水中的可同化有机碳(Assimilable Organic Carbon, AOC)及余氯浓度,确定 AOC 含量、余氯与给水管壁生物膜生长的定量关系。试验表明:AOC 浓度对管网中生物膜的生长有显著的影响,在不加氯的条件下模拟管网进水 AOC 维持在 $100 \mu\text{g/L}$ 左右时,模拟管网中挂片生物量达到 10^7 CFU/cm^2 量级;在进水 AOC 维持在 $40 \sim 50 \mu\text{g/L}$ 时,挂片生物量下降显著,维持在 10^4 CFU/cm^2 量级。在加氯后挂片生物量不超过 10^3 CFU/cm^2 量级,在余氯 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ 下挂片生物量稳定在 10^2 CFU/cm^2 量级,同不加氯时相比生物膜的生长得到很好的抑制。

关键词 AOC BAR HPC 生物稳定性

Influences of assimilable organic carbon on bio-membrane growth inside water supplying pipe

Wang Di¹, Liu Wenjun¹, Gu Junnong², Zhang Suxia²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Waterworks Group, Beijing 100085, China)

Abstract: The outlet water from the carbon filter in the No. 9 Waterworks in Beijing was taken as example to research for the ozone-activated carbon pilot plant experiment. The inlet AOC and residual Cl into the researched network were controlled to investigate the quantitative relationship of membrane growth and the above-mentioned factors. The result showed that the AOC level was evidently effective to the membrane growth inside the pipe. In the condition of no Cl was used, AOC in inlet water at about $100 \mu\text{g/L}$ or $40 \sim 50 \mu\text{g/L}$, the hanging membrane would be at order of magnitude of 10^7 and 10^4 CFU/cm^2 respectively. In the condition of Cl was used, the hanging membrane would be less than order of magnitude of 10^3 CFU/cm^2 . At residual Cl in level of $0.3 \sim 0.5 \text{ mg/L}$, the hanging membrane would be at order of magnitude of 10^2 CFU/cm^2 steadily. Cl could be effective to inhibit the membrane growth.

Keywords: AOC; BAR; HPC; Biological stability

0 概述

近年来的研究表明,饮用水中存在的有机营养物是促进细菌在管网中生长的主要因素^[1,2],而管壁中生物膜的存在及细菌再生长往往会导致饮用水微

生物风险增加,并且产生其他水质问题。目前国内外已在给水管道中检出几十种细菌,除少数硫细菌和铁细菌等自养菌外,主要是以有机物为营养基质的异养菌(Heterotrophic bacteria)^[3,4]。管网中的生物可同化有机碳(AOC)是微生物最容易利用的有机物,目前国际上普遍用其作为生物稳定性的评价指

国家高技术研究发展(863)项目(2006AA06Z301);北京市科委专项(D0605004040521)。

标。据 Van Der Kooij 研究报道,当 $AOC < 10 \mu\text{g/L}$ 时(以乙酸碳计,下同),管网中异养菌几乎不能生长,饮用水生物稳定性好^[5]。LeChevallier 提出在有余氯的条件下保持 AOC 浓度在 $50 \sim 100 \mu\text{g/L}$ 水质能达到生物稳定^[6]。

国际上对 AOC 浓度及生物稳定性之间关系的研究通常采用以下两种方式:方法一是在实际管网中进行取样,对 AOC 浓度和细菌数量进行测定;方法二是通过投加营养物质配水模拟实际管网中的 AOC 浓度,利用管网模拟系统进行试验。方法一由于采用的是实际管网水质,水中 AOC 水平难以人为控制,有较大的随机性,不能精确获得不同 AOC 浓度与管网中细菌生长的定量关系,同时在实际管网中取样时也受到各种客观因素的限制而很不方便。方法二通过配水可以人为控制水中 AOC 浓度,在模拟管网系统中取样也很容易,但配水所投加的有机物通常是乙酸、葡萄糖等,难以模拟实际管网水中所含有机物的特性,而且其他水质指标也与实际管网水质相差较大。为克服以上两种方法的缺点,准确地确定管网水中 AOC 含量与管网中细菌生长的关系,本试验设计通过臭氧活性炭工艺控制和改变水中 AOC 的浓度,以北京市第九水厂炭滤池出水为研究对象,利用生物膜培养反应器(Biofilm Annular Reactors, BAR)模拟饮用水管网中各种水质参数和水力条件对管壁生物膜的影响,对 AOC 和加氯浓度与生物膜生长的关系进行了试验研究。

1 试验设备与方法

1.1 BAR

采用国际通用的 BAR 模拟实际管网, BAR (1320 LJ 型) 由美国 BioSurface Technologies 公司生产。BAR 由一个结实的鼓状圆筒构成,该圆筒在电机的驱动下围绕在固定玻璃管中的垂直轴旋转。鼓状圆筒里装了 20 个可移动的挂片,挂片可以通过 BAR 上部的取样口取出进行检测(见图 1)。采用 PVC 和不锈钢两种材料挂片进行试验。

1.2 试验工艺流程

为研究不同 AOC 浓度下的生物膜生长情况,在北京市第九水厂搭建试验设备。滤池出水先后经过臭氧接触柱和生物活性炭柱处理,以生物活性炭柱

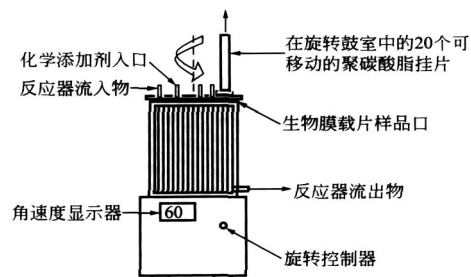


图 1 BAR 示意

出水作为 BAR 的进水,通过控制不同的臭氧浓度和活性炭柱停留时间来改变 BAR 的进水 AOC 浓度。臭氧接触柱为不锈钢柱,内径 40 cm,高为 3.5 m;活性炭柱为有机玻璃柱,内径 20 cm,高 2 m。活性炭(ZI-15 型粒状活性炭,粒径 1 mm,长 2~3 mm)填装高度为 1.25 m。加氯设备为日本三洋(SANYO)公司提供的电解产氯水箱,余氯量为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ 。工艺流程见图 2。

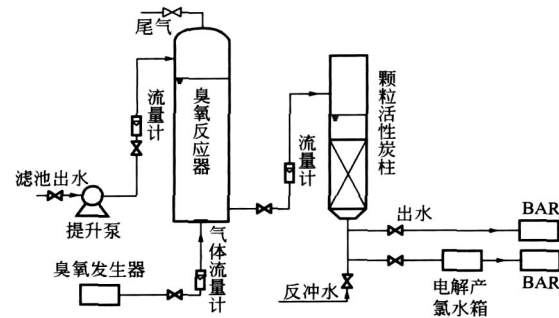


图 2 试验流程示意

1.3 研究方法

根据本组以前的研究结果,挂片试验的生物膜通常在 1 个月左右达到稳定状态,因此试验确定每一试验周期, BAR 在设定的 AOC 浓度下运行 $30 \sim 50 \text{ d}$,每隔一定时间取出不同材料挂片各一片,对其上的生物量分离进行计数,同时测定水中的 AOC 指标。在挂片上生物膜达到稳定后,进行下一组试验。在加氯试验的条件下,利用三洋公司提供的电解产氯水箱进行电解产氯,先通过预试验确定达到一定余氯的加氯量,然后根据预试验结果在 BAR 进水前投加一定的氯,每一试验周期也为 $30 \sim 50 \text{ d}$ 。

清华大学的鲁巍等^[7]指出, BAR 挂片生物膜的分离采用棉签擦拭,超声波振荡 20 min 的方法,可最大程度地清洗分离棉签上的细菌,基本不会造成生物量的损失。试验即采用棉签 + 超声波的方法进

行生物量分离,生物量采用异养菌平板计数法(Heterotrophic Plate Counts, HPC)进行计数^[8]。

AOC 的测定采用 van der Kooij 的改进方法^[9],主要采用先后接种法,先接种 P17 于水样进行培养, P17 达到稳定后平板计数,同时将水样进行巴氏灭菌(70℃, 30 min)杀死 P17,然后接种 NOX,达到稳定后平板计数,将两者相加得到水中的 AOC 浓度。

2 试验结果与讨论

2.1 AOC 浓度对生物膜生长的影响

试验分别在 100 $\mu\text{g/L}$ 、60 $\mu\text{g/L}$ 、50 $\mu\text{g/L}$ 、40 $\mu\text{g/L}$ 4 种不同的 AOC 水平下进行。由于给水厂进水的 AOC 存在变化,臭氧活性炭的前处理也不能精确控制 AOC,因此每个周期中活性炭柱的出水 AOC 仍有着较小的波动,试验中以各自周期内 AOC 的平均浓度作为本周期 AOC 的评价标准。从图 3 中可以看到,在这个运行周期中,进水 AOC 基本在 (60 ± 10) $\mu\text{g/L}$ 变化。图 4 为该周期中挂片生物量的变化曲线。由图 4 可见,在进水 AOC 为 60 $\mu\text{g/L}$ 时,不锈钢和 PVC 挂片上生物量在第 2 天开始迅速增加,第 7 天左右达到 10^4 CFU/cm² 量级且持续上升,在 15 天后达到最高,之后生物量不断减少,这说明生物膜在 BAR 中虽然会不断生长,但随着厚度的增加,内层生物膜由于不能得到足够的营养物质和溶解氧而逐渐老化,达到一定厚度后生物膜在剪切力作用下就会自行脱落。Lawrence 等^[10]通过共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)发现,由于 BAR 中剪切力的作用,生物膜厚度限制在约 150 μm 。

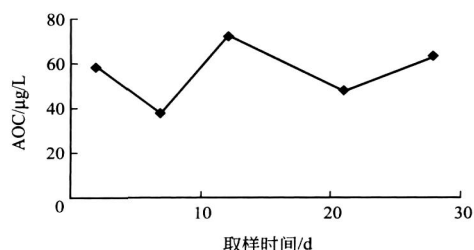


图3 一个周期内BAR进水AOC随时间的变化

当进水 AOC 在 40 $\mu\text{g/L}$ 左右时,挂片上生物膜变化见图 5。与图 4 相比,当 AOC 降低后,可以看出生物量在第 7 天便提前达到最高点,之后开始缓慢下降。在整个周期中微生物量基本稳定在 10^4 CFU/cm² 量级,与图 4 相比生物量有所减少。

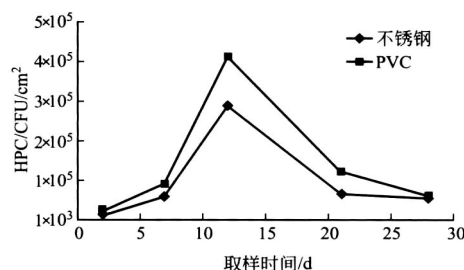


图4 AOC为60 $\mu\text{g/L}$ 时BAR挂片生物量的变化

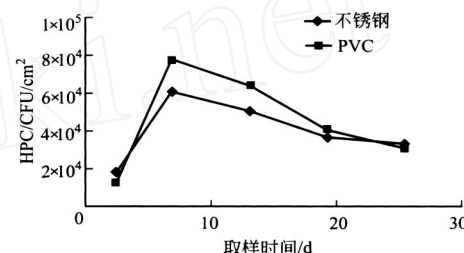


图5 AOC为40 $\mu\text{g/L}$ 时BAR挂片生物量的变化

图 6 标出了不同 AOC 条件下, BAR 运行一个周期内挂片细菌达到稳定期时的生物量。由图 6 可见,系统内 AOC 越低,达到稳定期时挂片上的生物量也越少。当 AOC 为 100 $\mu\text{g/L}$ 时,挂片上的生物量稳定在 10^7 CFU/cm² 量级;而当 AOC 降低到 40~50 $\mu\text{g/L}$ 时,挂片生物量则在 10^4 CFU/cm² 量级达到稳定。这是由于水中较低的营养物质浓度限制了微生物的生长,使得整个系统内的微生物较早便达到生长稳定期,并且稳定在较低的生物量水平。

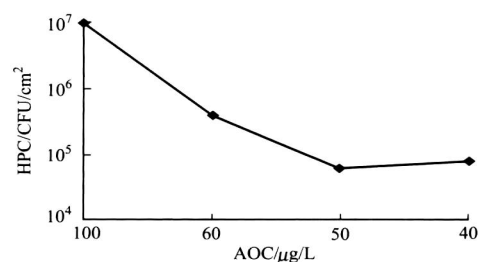


图6 AOC变化时BAR挂片生物量的变化

2.2 加氯浓度对生物膜生长的影响

在 AOC 为 60~70 $\mu\text{g/L}$ 时进行了两个周期的加氯试验,以 30 d 为一个周期,加氯浓度分别为 0.2~0.3 mg/L 和 0.3~0.5 mg/L。

将图 7 与图 4 进行对比,可发现在同一 AOC 水

平(60 $\mu\text{g/L}$)时,与不加氯相比较,加氯后在细菌的整个生长周期中不锈钢挂片和 PVC 挂片的生物量均有很大降低,稳定期的挂片生物量由 10^5 CFU/cm^2 量级下降到 10^3 CFU/cm^2 量级。

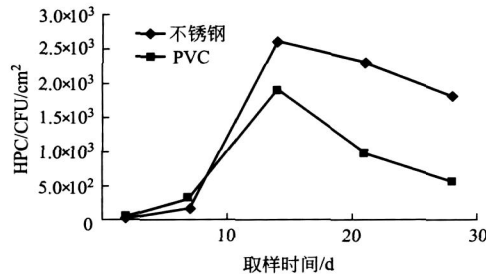


图7 加氯浓度为0.2~0.3 mg/L 时 BAR 挂片生物量的变化

进一步可以由表1中看到,较低 AOC 下(40 $\mu\text{g/L}$ 、50 $\mu\text{g/L}$ 、60 $\mu\text{g/L}$)的 HPC 要明显低于较高 AOC(100 $\mu\text{g/L}$)下的 HPC 水平;而 60 $\mu\text{g/L}$ 以下时随着 AOC 的降低 HPC 变化并不明显,这说明在 AOC 保持在 60 $\mu\text{g/L}$ 以下时 BAR 中水质达到生物稳定状态。在加氯后挂片生物量得到很好的控制,均不超过 10^3 CFU/cm^2 量级。氯浓度控制在 0.3~0.5 mg/L 时,挂片生物量稳定在 10^2 CFU/cm^2 量级;与此相比,氯浓度控制在 0.2~0.3 mg/L 时,HPC 增加了一个 log。也就是说通过加氯,挂片 HPC 降低了 2~3 个 log,生物膜的生长得到了很好的控制。

表1 不同 AOC 水平和加氯条件下挂片的生物量稳定水平

AOC/ $\mu\text{g/L}$	加氯量/ mg/L	HPC/ CFU/ cm^2
100	0	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^7$
60	0	$1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^5$
50	0	$2 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$
40	0	$1.5 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$
60	0.2~0.3	$< 3.3 \times 10^3$
60~70	0.2~0.3	$< 2.6 \times 10^3$
60~70	0.3~0.5	$< 2.1 \times 10^2$

3 结论与建议

通过改变臭氧活性炭工艺运行条件,将 BAR 进水的 AOC 控制在不同的浓度范围,同时在相应条件下通过加氯水箱调节余氯浓度,对反应器中生物膜生长情况进行分析研究,得到以下结论:

(1) 试验证明,AOC 浓度对管网中生物膜的生

长有着显著的影响。当 AOC 维持在 100 $\mu\text{g/L}$ 时,挂片生物量较高,在 10^7 CFU/cm^2 量级达到稳定;AOC 维持在 40~50 $\mu\text{g/L}$ 时,生物量有明显的下降,维持在 10^4 CFU/cm^2 量级;而当 AOC 在较低水平(40~60 $\mu\text{g/L}$)时生物量变化差异不大。

(2) 加氯后挂片生物量得到很好的控制,不超过 10^3 CFU/cm^2 量级,在较高的氯浓度(0.3~0.5 mg/L)下挂片生物量稳定在 10^2 CFU/cm^2 量级;与不加氯时相比生物膜的生长得到了很好的抑制。

(3) 在实际管网中为减少微生物的繁殖和管道内壁生物膜的形成,在保证加氯量的同时,应尽量将 AOC 控制在 100 $\mu\text{g/L}$ 以下,试验中 AOC 低于 60 $\mu\text{g/L}$ 时生物稳定性良好。

参考文献

- van der Kooij. Biological stability: a multidimensional quality aspect of treated water. Water, Air and Soil Pollution, 2000, 123: 25~34
- Gibbs R A, Scutt J E, Croll B T. Assimilable organic carbon concentrations and bacterial numbers in a water distribution system. Water Science and Technology, 1993, 27(3): 159~166
- Jain D K. Microbial colonization of the surface of stainless steel coupons in a deionized water system. Wat Res, 1995, 29(8): 1869~1876
- Percival S L, Knapp J S, Edyvean R, et al. Biofilm development on stainless steel in mains water. Wat Res, 1998, 32(1): 243~253
- Van Der Kooij. Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth. Journal of AWWA, 1992, 84(2): 57~65
- LeChevallier M W, Shaw N E, Kaplan L A, et al. Development of a rapid assimilable organic carbon method for water. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(5): 1526~1531
- 鲁巍,王云,张晓健. BAR 反应器中生物膜的分离及定量. 中国给水排水, 2005, 21(2): 91~94
- 俞毓馨,吴国庆,孟宪庭. 环境工程微生物检验手册. 北京:中国环境科学出版社,1990. 136~144
- 王占生,刘文君. 微污染水源饮用水处理. 北京:中国建筑工业出版社, 1999. 238~239
- Lawrence J R, Swerhone G D W, Neu T R. A simple rotating annular reactor for replicated biofilm studies. Journal of Microbiological Methods, 2000, 42(3): 215~224

☎电话:(010)62782196

E-mail: wjliu@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2007-11-21