

模拟配水管网中悬浮颗粒物对生物膜形成的影响

郑丹¹, 刘文君¹, 徐洪福²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 深圳水务集团公司, 深圳 518000)

摘要: 分别采用 2 μm 、8 μm 醋酸纤维滤膜过滤活性炭柱出水, 滤出水分别通入 BAR 反应器, 以活性炭出水做对照试验通入 BAR 反应器, 加氯(次氯酸钠)量均为 0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (总氯), 对比 3 种水质情况下生物膜的形成过程, 采用颗粒计数仪测定 BAR 进水的颗粒物分布. 结果表明, 悬浮颗粒物能携带大量细菌避开消毒剂的作用, 且对生物膜上的细菌量有直接影响. 生物膜上的细菌量为: 活性炭出水 > 8 μm 滤出水 > 2 μm 滤出水. 颗粒物的存在使生物膜结构不稳定, 推迟了达到最大生物量的时间, 且颗粒物数量越多, 粒径越大, 生物膜稳定性越差, 达最大生物量的时间越长, 试验中 2 号 BAR 生物膜达最大生物量的时间比 1 号 BAR 中生物膜迟 4 d, 3 号 BAR 生物膜达最大生物量的时间比 2 号 BAR 生物膜迟 8 d; 进水颗粒物数量对出水的细菌量影响很大, 颗粒物数量越多, 出水细菌量越多.

关键词: BAR; 悬浮颗粒物; 生物膜; 模拟管网

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1236-05

Effect of Suspended Particles on Biofilms Formation in Simulated Potable Distribution

ZHENG Dan¹, LIU Wen-jun¹, XU Hong-fu²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Shenzhen Water Group, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The effluent of the granular activated carbon in the treatment process was divided into three parts, the first part through 2 μm micro-filtration membrane, the second part through 8 μm micro-filtration membrane, and with the third part being remained itself as comparison. Disinfection assays were performed with chlorine (NaClO) 0.5 mg/L . Studying the biofilms formation process separately in the three parts was performed with the interesting in particles. Particles may transport bacteria which were highly resistant to disinfection by chlorine to the distribution system and became entrained in biofilms, and could make the biofilms instable and put off the maximal biomass of biofilms. During the experiment the time when the 2nd BAR reach maximal biomass of biofilms was later 4 days than that of the 1st BAR, and the time when the 3rd BAR reach maximal biomass of biofilms was later 8 days than that of the 2nd BAR. The size ranges and quantity of particles impacted the effluent biomass. The more and the bigger particles were, the more effluent biomass was.

Key words: BAR; suspended particles; biofilms; simulated potable distribution

悬浮颗粒物给供水生产带来了复杂影响. 悬浮颗粒物造成水体浑浊, 形成感官不适; 悬浮颗粒物吸附水媒致病微生物、各种有机物, 尤其是“三致”性有机物, 降低自来水的卫生安全、卫生程度; 悬浮颗粒物沉降、吸附在管壁上, 易形成腐蚀瘤, 破坏输配水系统的服务功能.

配水系统中广泛存在生物膜, 且构成生物膜的菌种中存在条件致病微生物^[1-3]. 研究表明, 即使常规管网水取样中未检出细菌和大肠杆菌, 实际上管网水仍然存在一定的微生物学风险. 因此, 了解管壁生物膜的形成原因以及生物膜形成的影响因素, 是控制和减少生物膜生成的前提.

本试验通过 BAR(biofilm annular reactor)反应器模拟实际管网中生物膜的形成过程, 研究悬浮颗粒物对生物膜生长过程的影响.

1 材料与方法

1.1 试验装置

活性炭柱高 3 000 mm, 直径 130 mm, 炭层高 2 000 mm, 砂层高 500 mm, 进水流量 80 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, 反冲洗周期为 7 d. 旋片式真空泵由上海飞越真空设备有限公司生产, 型号 FY-1C, 抽气速率 3 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 极限真空 10 Pa. 便携式颗粒计数仪, 美国 IBR 公司生产. BAR 反应器型号为 1120/1320LJ, 有效容积为 1.2 L.

1.2 试验方法

收稿日期: 2006-06-05; 修订日期: 2006-08-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601120)

作者简介: 郑丹(1980 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为管网生物稳定性、水体中颗粒物对管网水质的影响等, E-mail: zhengd04@mails.tsinghua.edu.cn

1.2.1 试验流程

试验在深圳市大涌水厂中试基地进行. 原水采用实际水厂的砂滤池出水, 引入中试基地后进入试验装置中的活性炭柱, 试验流程如图 1 所示.

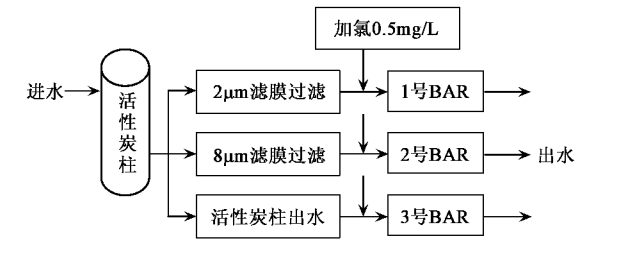


图 1 试验流程
Fig.1 Schematic flow chart

1.2.2 BAR 反应器进水水质

1 号 BAR 进水为活性炭出水过 2 μm 滤膜滤出水; 2 号 BAR 进水为活性炭出水过 8 μm 滤膜滤出水; 3 号 BAR 进水为活性炭出水. 各 BAR 进水水质如表 1 所示.

表 1 各 BAR 进水水质
Table 1 Influent water quality of each BAR

项目	BAR		
	1 号	2 号	3 号
水温/℃	20 ~ 30	20 ~ 30	20 ~ 30
浊度/NTU	0.256	0.298	0.225
加氯量(次氯酸钠)/mg·L ⁻¹	0.5	0.5	0.5
AOC(乙酸碳)/μg·L ⁻¹	123	69	62
异养菌数/CFU·mL ⁻¹	0 ~ 15	0 ~ 15	1 ~ 30

1.2.3 水样过滤及颗粒物测定

采用醋酸纤维素滤膜、实验室抽滤瓶及真空抽滤泵对活性炭出水进行过滤. 滤前用超纯水对过滤装置清洗, 对滤膜浸泡、冲洗, 减少外界颗粒物质的干扰.

采用便携式颗粒计数仪对颗粒物进行测定, 正式测定前将进样管通入超纯水中, 待读数稳定后再进行样品测定, 测定完毕后, 用超纯水对仪器进行反冲洗.

1.2.4 BAR 安装运行

BAR 运行前全部拆卸, 用 H₂O₂ 进行彻底消毒, 然后安装通水. BAR 内桶悬挂生物膜附着生长的挂片, 挂片采用镀锌钢材质; 内桶旋转时挂片与水体界面产生剪切力, 模拟管网水力条件, 剪切力大小通过调节电机转速来控制, 试验中选用“137”的转速显示值, 模拟直径为 50 mm 配水管网中 0.3 m·s⁻¹ 左右

的水流速度; BAR 进水流量为 0.6 L·h⁻¹, 有效容积是 1.2 L, 水力停留时间约为 2 h.

1.2.5 取样周期和方法

每台 BAR 运行 1 个周期约 40 d, 从第 4 d 开始每隔一段时间取挂片及反应器进、出水. 取挂片时, 准备一灭菌具塞大试管, 加入 60 mL 无菌水, 采用 BAR 专用取样器将挂片钩出放入大试管中, 通过超声波振荡将挂片细菌振入无菌水中, 具体操作方法为: 振荡 5 次, 每次 1 min, 间隔 1 min.

1.2.6 HPC 试验

BAR 进水可直接进行异养菌平板计数(HPC), 出水和挂片细菌需要进行一定的稀释方可进行. 计算挂片上异养菌总数及挂片表面积, 两者相比得到单位面积挂片上异养菌数量. 培养基采用平板计数琼脂(PCA), 35℃培养 48 h.

2 结果与分析

2.1 以 2 μm 滤出水为原水

1 号 BAR 以 2 μm 滤出水为原水, 研究 < 2 μm 的小粒径悬浮颗粒物对生物膜形成过程的影响. 图 2 和图 3 是 1 号 BAR 中生物膜细菌量的变化曲线和出水细菌量的变化.

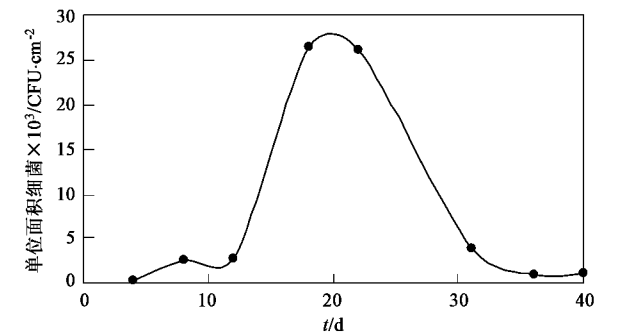


图 2 1 号 BAR 中生物膜形成过程的细菌量变化
Fig.2 Biomass alteration of biofilms in the 1st BAR

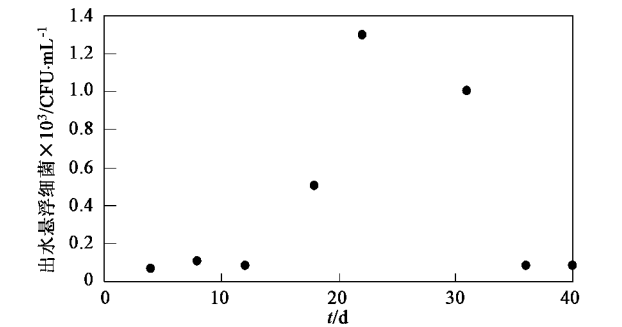


图 3 1 号 BAR 出水悬浮细菌的数量
Fig.3 Effluent biomass from the 1st BAR

试验运行过程中镀锌钢腐蚀较为严重, BAR 中水体变浑浊, 出水呈红色. 挂片上的细菌量最初数量较少, 随着悬浮细菌的不断吸附和附着细菌的繁殖, 细菌量增加, 当达到挂片吸附的最大生物量后生物膜开始脱落.

2.2 以 8 μm 滤出水为原水

2 号 BAR 以 8 μm 滤出水为原水, 研究粒径 < 8 μm 的颗粒物对生物膜形成过程的影响. 图 4 和图 5 是 2 号 BAR 中生物膜细菌量的变化曲线和出水细菌量的变化.

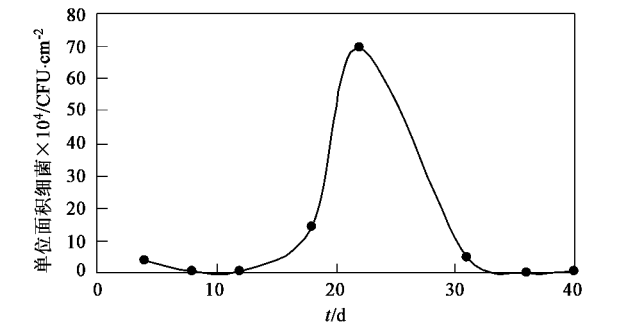


图 4 2 号 BAR 中生物膜形成过程的细菌量变化
Fig.4 Biomass alteration of biofilms in the 2nd BAR

试验运行过程中 BAR 内镀锌钢挂片腐蚀速度很快, 水体很快变成红色, 且出水的浑浊程度远大于 1 号 BAR 出水的混浊程度. 从 2 组的试验数据也可看出, 2 号 BAR 的生物膜细菌量和出水细菌量远大于 1 号 BAR.

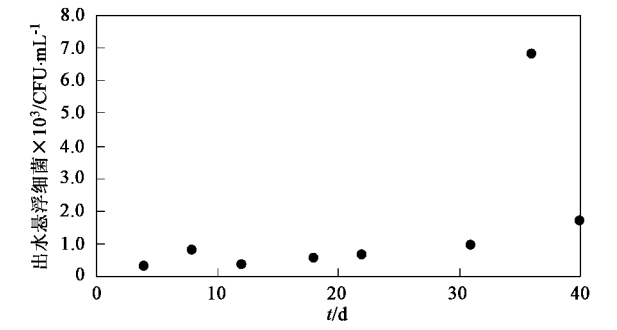


图 5 2 号 BAR 出水悬浮细菌的数量
Fig.5 Effluent biomass from the 2nd BAR

2.3 以活性炭出水为原水

3 号 BAR 以活性炭出水为原水, 目的是为了与上面 2 组试验做对比. 图 6 和图 7 是 3 号 BAR 中生物膜细菌量的变化曲线和出水细菌量的变化.

2.4 进水悬浮颗粒物的测定

活性炭出水经过醋酸纤维滤膜过滤后, 作为 1

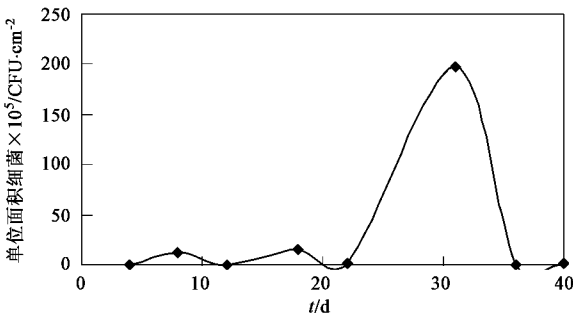


图 6 3 号 BAR 中生物膜形成过程的细菌量变化
Fig.6 Biomass alteration of biofilms in the 3rd BAR

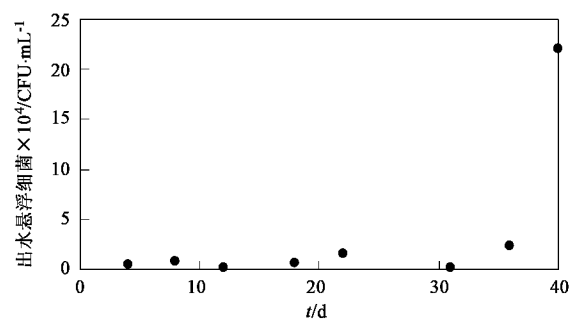


图 7 3 号 BAR 出水悬浮细菌的数量
Fig.7 Effluent biomass from the 3rd BAR

号和 2 号 BAR 的进水, 活性炭出水作为 3 号 BAR 的进水. 图 8 是 3 个 BAR 进水的颗粒物数量及粒径分布图.

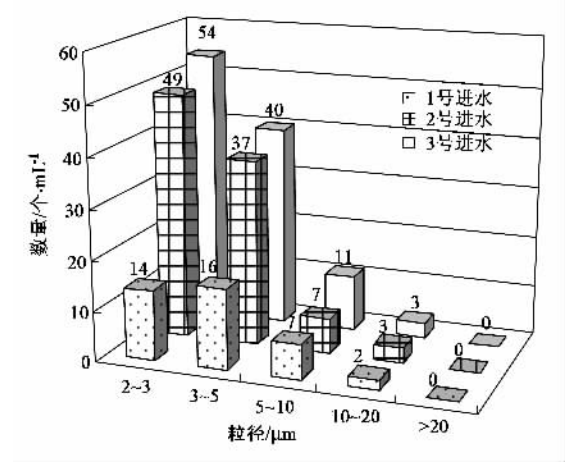


图 8 3 个 BAR 进水中悬浮颗粒物数量及粒径分布
Fig.8 Particle quantities and the size range of each BAR influent

图 8 中过 2 μm 滤膜的滤出水中仍然含有 > 2 μm 的颗粒物, 原因可能是醋酸纤维膜的质量本身有问题, 即使质量本身没有问题醋酸纤维滤膜也会存在少量溶出物, 同时在水体转移过程中空气中的悬浮颗粒也会造成误差. 活性炭出水的颗粒物数量与

8 μm 滤膜滤出水的相差并不大,只有 12 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$,说明活性炭出水中粒径 $> 8 \mu\text{m}$ 的颗粒物数量很少,大部分都分布在 $< 8 \mu\text{m}$ 的粒径范围内,从活性炭出水的柱状图中也可说明这一点.

3 讨论

表 1 中 3 个 BAR 进水细菌量每 mL 在几个到几十个之间变化,但 3 组挂片生物膜的细菌量分别为 10^4 、 10^5 、 10^7 数量级,如图 2、图 4 和图 6 所示. BAR 进水的悬浮颗粒物会携带细菌,单个悬浮颗粒物上可能携带几千个甚至上万个细菌^[4],而且多数都生长在颗粒物质的空隙或夹缝内,能够避开消毒剂的杀伤作用.但是在 HPC 测定时单个悬浮颗粒物只作为 1CFU 来计数.对比 3 组试验中生物膜的细菌量变化曲线,以达最大生物量时的细菌量为对比值,2 号 BAR 中生物膜细菌量是 1 号生物膜细菌量的 26 倍左右,而 3 号生物膜细菌量是 1 号生物膜细菌量的 750 倍左右.2 号进水颗粒物数量比 1 号进水颗粒物数量多 57 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$,而 3 号进水颗粒物含量比 1 号进水颗粒物含量多 69 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$.3 种进水水质除了悬浮颗粒物数量的差别外,其它水质指标基本相同,因此造成生物膜细菌量差别的主要原因是悬浮颗粒物,而且悬浮颗粒物数量越多,所携带的细菌量也越多,生物膜上的细菌量也就越多.

如图 2、图 4 和图 6 所示,1 号 BAR 中生物膜达最大生物量的时间是 18 d 左右,2 号 BAR 中生物膜达最大生物量的时间是 22 d 左右,而 3 号 BAR 中生物膜达最大生物量的时间是 30 d 左右.2 号比 1 号达最大生物量的时间迟了 4 d,3 号比 2 号迟了 8 d.水中悬浮颗粒物的粘合能力比胞外聚合物差,虽然水中存在的颗粒物极易成为生物膜的成分,但其形成的生物膜结构稳定性比胞外聚合物形成的生物膜稳定性差,生物膜不稳定易于脱落,因此达到最大生物量的时间就会延长.在悬浮颗粒物数量上,3 号 > 2 号 > 1 号,生物膜达最大生物量的时间,3 号 > 2 号 > 1 号,因此颗粒物数量越多,生物膜达最大生物量的时间越长,生物膜的稳定性越差.

如图 3、图 5 和图 7 所示,出水悬浮细菌与生物膜细菌量有相似的变化趋势,开始生物膜处于增殖阶段,释放细菌很少,因此出水悬浮细菌也较少,随着生物膜达到最大生物量后,生物膜开始大量脱落,出水悬浮细菌迅速增加,往往在生物膜达最大生物量之后出现出水悬浮细菌的高峰值,此后出水细菌又不断减少.3 个 BAR 出水的细菌量分别是其进水

细菌量的 57 倍、104 倍、3 544 倍(以进出水细菌量的平均值作为对比值).出水悬浮细菌远远大于进水悬浮细菌,说明出水悬浮细菌大部分来自生物膜的脱落.细菌在 BAR 内的停留时间只有 2 h,与其自身的生长周期(1 ~ 10 d)相比很短^[5],进水悬浮细菌不可能在短时间内迅速生长到如此巨大的数量.而且 3 个 BAR 出水细菌量 3 号 > 2 号 > 1 号,说明悬浮颗粒物数量的差别对出水悬浮细菌量有直接的影响,悬浮颗粒物数量越多,出水的细菌量越大.

表 1 中进水浊度 2 号 > 1 号 > 3 号,与颗粒物数量不呈同样的变化趋势.这与 2 种指标所代表的含义和测量仪器的工作原理有关.浊度是指水样的相对澄清程度,浊度仪测量的是水样中悬浮颗粒散射的总光强,不直接反映颗粒物的物理参数.而颗粒计数仪直接反映颗粒物的物理参数,即颗粒物的总量(个 $\cdot\text{mL}^{-1}$)和粒径分布.浊度值和颗粒计数值在一定程度上都反映水中颗粒物的含量,但前者对于粒径小于 $1 \mu\text{m}$ 的胶体颗粒比较灵敏,而后者对于粒径大于 $1 \mu\text{m}$ 的悬浮颗粒比较灵敏^[6].

浊度一直以来是作为水中悬浮颗粒监测的重要参数,但是完全依赖浊度控制颗粒物数量是不可靠的.直径 $\leq 0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒不产生明显的浊度读数,直径 $< 1 \mu\text{m}$ 的颗粒产生的浊度读数偏高,而直径再大的颗粒对光的反应又下降^[7].水中致病原生物个体的尺寸 $> 1 \mu\text{m}$,例如隐孢子虫在 $4 \sim 7 \mu\text{m}$ 之间、贾第虫在 $7 \sim 11 \mu\text{m}$ 之间^[8],因此仅以浊度作为水质的监控参数,难以有效地保证水中致病原生物体的卫生安全性.为了弥补浊度的不足,一些国家已经开始采用颗粒计数仪对水质进行监测,并提出了颗粒物的相关标准.美国对水中“两虫”与颗粒物数量的相关性进行研究,经过大量的水样调查后发现,当水中粒径 $> 2 \mu\text{m}$ 的颗粒物超过 100 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 时水中存在“两虫”的几率很大^[9],美国地表水处理条例要求除去 99.9% 的贾第虫和 99.99% 的病毒,主要是通过降低出厂水中悬浮颗粒物来实现的^[7].美国很多水厂对滤池出水中大于 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒物数量都控制在 50 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 以下,而宾州则规定出水中 $3 \sim 18 \mu\text{m}$ 的颗粒数 < 10 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[9],目前国内在这方面的研究还处于起步阶段,还未提出控制颗粒物数量的相关标准.

4 结论

(1)水中的悬浮颗粒物能携带大量的细菌避开消毒剂的作用,黏附在生物膜上生长,并且颗粒物粒

径越大、数量越多携带的细菌量越多,对生物膜细菌量的影响越大.

(2)黏附在生物膜上的颗粒物导致生物膜结构不稳定,推迟了生物膜达最大生物量的时间,且颗粒物粒径越大,数量越多,达生物膜最大生物量的时间越长,生物膜稳定性越差. 试验中,2 号 BAR 生物膜达最大生物量的时间比 1 号 BAR 迟 4 d,3 号 BAR 生物膜达最大生物量的时间比 2 号 BAR 迟 8 d.

(3)BAR 出水悬浮细菌大部分来自生物膜的脱落. 进水悬浮颗粒物对出水细菌量影响很大,悬浮颗粒物数量越多,出水的悬浮细菌数越多.

致谢: 本试验场所由深圳水务集团提供, 谨致谢意.

参考文献:

[1] Kalmbach S, Manz W, Bendinger B, *et al.* *In situ* probing reveals aqua-bacterium commune as a widespread and highly abundant bacterial species in drinking water biofilms[J]. *Wat Res*, 2000, **34**(2):575 ~ 581.

[2] 贺北平. 水中有机物特性与饮用水净化工艺相关性的研究

[D]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 1996.

[3] Macdonald R, Brozel V S. Community analysis of bacterial biofilms in a simulated recirculating cooling-water system by fluorescent *in situ* hybridization with RNA-targeted oligonucleotide probes[J]. *Wat Res*, 2000, **34**(9):2439 ~ 2446.

[4] Camper A K, LeChevallier M W, Broadway S C, *et al.* Bacteria Associated with Granular Activated Carbon Particles in Drinking Water[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1986, **52**(3): 434 ~ 438.

[5] Tsai Y P, Pai T Y, Qiu J M. The impacts of the AOC concentration on biofilm formation under higher shear force condition[J]. *Journal of Biotechnology*, 2004, **111**(2):155 ~ 167.

[6] 杨艳玲, 李星, 李圭白, 等. 优化监测与净水工艺提高致病原生动物去除率[J]. *给水排水*, 2003, **29**(6):22 ~ 26.

[7] 罗岳平, 李宁, 李建国, 等. 自来水中悬浮颗粒物的检测和控制[J]. *给水排水*, 2000, **26**(3):26 ~ 31.

[8] O' Shaughnessy P T, Barsotti M G, Fay J W, *et al.* Evaluating particle counters[J]. *Journal American Water Works Association*, 1997, **89**(12):60 ~ 76.

[9] LeChevallier M W, William D N. Examining relationships between particle counts and giardia, cryptosporidium and turbidity[J]. *Journal American Water Works Association*, 1992, **84**(12): 54 ~ 60.