

卫立现,张君枝,郭召海,等. 2007. 预臭氧对砂滤过滤性能的影响 [J]. 环境科学学报, 27(12): 1957 - 1961

Wei L X, Zhang J Z, Guo Z H *et al* 2007. The effects of pre-ozonation on sand filter performance [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27(12): 1957 - 1961

预臭氧对砂滤过滤性能的影响

卫立现^{1,2}, 张君枝¹, 郭召海¹, 杨敏^{1,*}, 徐东耀², 刘起峰^{1,3}, 山口太秀⁴, 唐升卿⁵

1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083

3. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083

4. 富士电机有限公司研发部, 日本

5. 北京市自来水集团公司田村山净水厂, 北京 100049

收稿日期: 2007-09-26 录用日期: 2007-10-11

摘要:通过规模为 $200\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的连续动态实验,研究了臭氧预处理对砂滤出水浊度、颗粒数以及运行周期的影响. 实验结果表明,投加低剂量 $0.12\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的臭氧,就可以显著改善砂滤的运行性能. 臭氧预处理可以使砂滤出水浊度和粒径范围为 $3\sim 7\mu\text{m}$ 的颗粒物(与隐孢子虫大小相当)含量分别从平均 0.25NTU 和 $584\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 下降到 0.05NTU 和 $72\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$,其它粒径范围的颗粒数也显著下降,砂滤周期延长了 1 倍.

关键词:预臭氧;砂滤;浊度;颗粒;过滤周期

文章编号: 0253-2468(2007)12-1957-05

中图分类号: X131.2

文献标识码: A

The effects of pre-ozonation on sand filter performance

WEI Lixian^{1,2}, ZHANG Junzhi¹, GUO Zhaohai¹, YANG Min^{1,*}, XU Dongyao², LIU Qifeng^{1,3}, YAMAGUCHI Dabide⁴, TANG Shengqing⁵

1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083

3. School of Water Resources and Environment China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083

4. Development Department, Fuji Electric Systems Co., Ltd, 1, Fujimachi, Hino-city, Tokyo, 191-8502, Japan

5. Tiancunshan Water Treatment Plant, Beijing Waterworks Group, Beijing 100049

Received 26 September 2007;

accepted 11 October 2007

Abstract: The effects of pre-ozonation treatment on sand filtration were investigated from the aspects of the removals of turbidity and particle number in filtrate and filtration duration using a pilot-scale experimental setup with a capacity of $200\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$. The results showed that even at an ozone dose as low as $0.12\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, significant improvement of sand filtration performance was achieved. The average turbidity and particle number of $3\sim 7\mu\text{m}$ in the filtrate were decreased from 0.25NTU and $584\text{count}\cdot\text{mL}^{-1}$ to 0.05NTU and $72\text{count}\cdot\text{mL}^{-1}$, and the number of other measurable particles was also decreased significantly. The filtration duration was nearly doubled.

Keywords: pre-ozonation; sand-filtration; turbidity; particle removal; filtration duration

1 引言 (Introduction)

水中悬浮颗粒是各种污染物的载体,有些颗粒

物本身就是病原微生物. 因此,水中颗粒物是饮用水处理的主要对象之一,颗粒物的有效去除对提高水质安全性、生物稳定性、消毒效率以及管道输水

基金项目: 北京市科学技术委员会资助 (No. D0605004040421)

Supported by the Beijing Municipal Science & Technology Commission (No. D0605004040421)

作者简介: 卫立现 (1981—),男,硕士研究生, E-mail: wei-lynn@hotmail.com; *通讯作者 (责任作者): E-mail: yangnin@mail.rcees.ac.cn, Tel: 010-62923475

Biography: WEI Lixian (1981—), male, E-mail: wei-lynn@hotmail.com; * Corresponding author: E-mail: yangnin@mail.rcees.ac.cn, Tel: 010-62923475

能力都有很大的影响(罗岳平,2000)。

混凝沉淀是水中颗粒物去除的关键过程,过滤则是保证饮用水卫生、安全的重要屏障。近年来,随着隐孢子虫等耐氯性病原微生物通过饮用水传播事件的不断发生,人们越来越关注砂滤对于颗粒物的屏障作用。

一般来说,隐孢子虫卵囊直径为 $4\sim 6\mu\text{m}$ (Dai X J *et al*, 2003)。Li等(1997)用名义孔径 $1\mu\text{m}$ 的袋式过滤器做实验,得出 $4\sim 6\mu\text{m}$ 聚苯乙烯颗粒的对数去除率与隐孢子虫卵囊对数去除率之间有很好的相关性。Emelko等(2000)在中试实验中,采用双层滤料,最优条件下观察到福尔马林灭活的隐孢子虫卵囊和颗粒都有99.999%的去除率, R^2 达到0.96。Mark W等(1992)认为,去除 $>5\mu\text{m}$ 的颗粒、浊度与去除两虫有很好的相关性,90%的颗粒和浊度去除率分别对应59.4%和80.1%两虫的去除率,且当水中粒径 $>2\mu\text{m}$ 的颗粒超过 $100\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,

水中存在两虫的概率很大。因此,美国有些水厂对滤池出水的管理目标是使 $>2\mu\text{m}$ 颗粒的数量控制在 $50\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 以下,而宾州则规定出水中 $3\sim 18\mu\text{m}$ 的颗粒 $<10\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ (何元春,许超伟,2004)。因此,一些水厂开始采用在线设备实时监测滤池出水颗粒物的数量以及粒径分布情况。

本文作者采用预臭氧和后续常规工艺在北京市自来水集团田村山净水厂进行了中试研究,着重考察了预臭氧对砂滤过滤性能的影响,并简要探讨了产生影响的原因。

2 实验装置与实验方法 (Materials and methods)

2.1 原水水质

实验期间水温在 $5\sim 7^\circ\text{C}$,浊度和颗粒数相对稳定。浊度平均值在 2.5NTU 左右。实验中原水的主要常规指标见表1。

表1 原水的常规指标

Table 1 Quality of raw water

$\text{COD}_{\text{Mn}} /$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TDS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硬度 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	碱度 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	电导率 / ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	藻类 / ($\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$)	浊度 / NTU	pH
1.3	243.0	192.5	167.5	0.4×10^3	1.4×10^5	2.5	8.2

2.2 中试装置

中试采用预臭氧和后续常规工艺,设计水量 $200\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。臭氧反应柱有效高度 1.5m ,直径 130mm ,体积 18L ,臭氧停留时间 5min ;混合池有效高度 0.35m ,直径 130mm ,体积 3.3L ,混合时间 1min ;机械搅拌式絮凝反应池有效高度 0.4m ,体积 16L ,反应时间 15min ,搅拌机转速依次为 150 、 100 、 $50\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$;沉淀池有效高度 0.9m ,体积 16.2L ,采用异向流斜板沉淀,沉淀时间 48min ,斜板沉淀区表面负荷 $8\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,沉淀区斜板倾角 60° ;砂滤柱有效高度 0.7m ,直径 180mm ,体积 16.6L ;石英砂滤料,直径 $0.95\sim 1.35\text{mm}$,不均匀系数 $K_{80}<1.5$,滤速 $8\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$;承托层为粗砂,直径 $4\sim 8\text{mm}$,高度 200mm ;滤池的水冲洗强度 $20\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,反冲洗时间 5min 。

2.3 实验过程及分析方法

实验连续进行,臭氧投加量依次为 0 、 $0.12\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。混凝剂采用PAC(液态,密度 $=1.2\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$,北京万水净水剂有限公司),用蠕动泵连续投加,投加量 $1.8\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 Al_2O_3 计)。

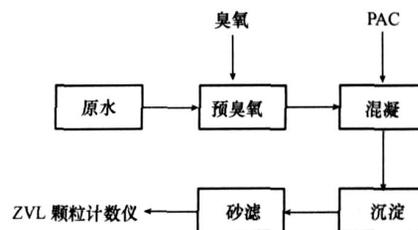


图1 实验工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

采用在线颗粒计数仪ZVL(1A1A1—A1BAA, Fuji Electric System s)对砂滤出水进行连续检测,利用台式颗粒计数仪ZVM(Fuji Electric System s)对原水、臭氧预处理出水和沉后水进行手动检测。在线颗粒计数仪可以同时自动监测 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 、 $2\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $5\sim 7\mu\text{m}$ 、 $7\sim 10\mu\text{m}$ 、 $10\sim 15\mu\text{m}$ 、 $15\sim 20\mu\text{m}$ 、 $20\sim 30\mu\text{m}$ 和 $>30\mu\text{m}$ 等10个粒径范围,并把颗粒数转换为浊度;台式颗粒计数仪,采取人工取样和人工测试。在测试前,台式颗粒计数仪ZVM先用超纯水(去离子水经Mitsubishi Rayon Co., Ltd生产的Sterapore膜组件后产生,颗粒物含量很低,

其型号为 QRX0928T)清洗 10 遍,以确保测试结果的准确性.采用 Mitsubishi Electric 生产的 OS-1N 型臭氧发生器来产生实验所需的臭氧.

3 实验结果 (Results)

3.1 原水中颗粒物的粒径分布

利用台式颗粒计数器 ZVM 对原水中各粒径范围颗粒物进行了多次检测,其平均值见图 2 从图 2 (纵坐标为对数坐标)可以看出,原水中存在大量粒径为 $0.5 \sim 1\mu\text{m}$ 的小颗粒,占到总颗粒数的 89.4%,大于 $30\mu\text{m}$ 颗粒很少,每毫升水中不到 10 个.

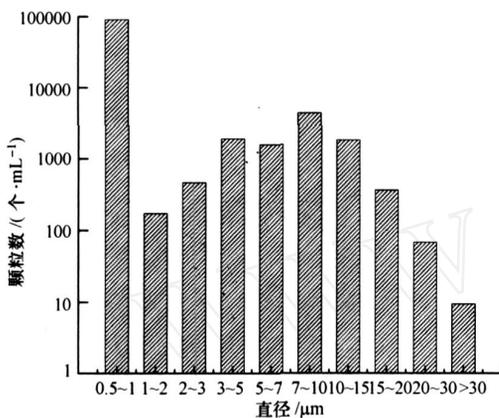


图 2 原水中颗粒物粒径分布

Fig. 2 The particle size distribution of raw water

3.2 预臭氧对砂滤出水浊度的影响

图 3 比较了投加臭氧和不投加臭氧 (常规处理)条件下砂滤出水浊度的变化情况.从图 3 可以看出,常规处理滤后水浊度基本保持在 0.20NTU 以上,平均为 0.33NTU ,反冲洗后的初滤水浊度较高,

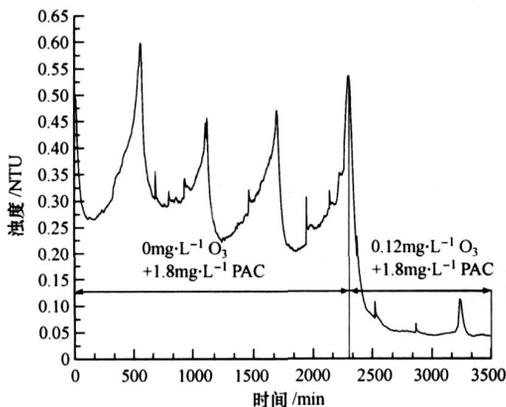


图 3 砂滤出水浊度变化

Fig. 3 Variations of turbidity in filtrated water

有时甚至能达到 0.60NTU 以上.在投加 $0.12\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的臭氧 (按实际消耗量计)后,臭氧预处理可以明显改善砂滤出水浊度,并显著延长过滤周期 (从 8h 到 16h 左右).可以看出,砂滤出水平均浊度为 0.05NTU 左右,并且浊度非常稳定,反冲洗后初滤水浊度也基本在 0.10NTU 以下.

Lipp P 等 (2000) 发现,投加 $0.4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 臭氧后,滤池的运行周期从 56h 减少为 50h,这与本研究的结果正好相反.这种差异可能与原水的浊度组成有很大的关系.

3.3 预臭氧对砂滤出水中 $3 \sim 7\mu\text{m}$ 颗粒物去除的影响

砂滤被认为是对粒径范围为 $4 \sim 6\mu\text{m}$ 的隐孢子虫卵囊进行拦截的有效屏障.因此,本研究重点考察了有无预臭氧条件下砂滤对粒径范围为 $3 \sim 7\mu\text{m}$ 的颗粒物的去除效果.如图 4 所示,常规处理滤后水中粒径范围为 $3 \sim 7\mu\text{m}$ 的颗粒物含量基本保持在 $400\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 以上,反冲洗后的初滤水中颗粒最高达到 $1000\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 以上.同样,臭氧预处理可以明显改善砂滤出水的颗粒物含量.由图 4 可以看出,砂滤出水中粒径范围为 $3 \sim 7\mu\text{m}$ 的颗粒物含量为 $70\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$,而且非常稳定,反冲洗后初滤水中颗粒最高值也在 $200\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 以下.对 1 个典型周期里的滤后水中粒径范围为 $3 \sim 7\mu\text{m}$ 的颗粒物含量进行平均,常规处理颗粒物含量平均为 $584\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$,臭氧预处理后颗粒物含量平均为 $72\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$,颗粒物含量减少了 $512\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$,显著提高了砂滤出水的安全性.

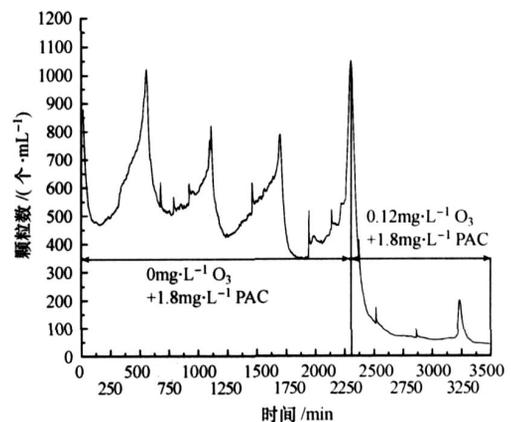


图 4 砂滤出水中 $3 \sim 7\mu\text{m}$ 颗粒分布

Fig. 4 Variations of particles of $3 \sim 7\mu\text{m}$ in filtrated water

另外,本研究还对其它粒径范围的颗粒物变化进行了分析.结果发现,在仪器可以分析的整个粒

径范围内,臭氧预处理均显著提高了砂滤对颗粒物的去除效果,其中粒径 $>1\mu\text{m}$ 的颗粒物从常规工艺的 959 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 减少到 117 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$.

4 讨论 (Discussion)

以上结果表明,臭氧预处理显著改善了浊度和颗粒物的去除率.但是,臭氧预处理改善过滤效果的内在机制是什么?许多研究人员研究了臭氧对颗粒物去除的影响,并提出了各种解释.有研究 (Grasso *et al*, 1988)认为,臭氧氧化 NOM,使其聚合成高聚物,提高了混凝效果,减少了混凝剂的需要量,因此,臭氧发挥了一定的助凝作用.有研究 (Edwards *et al*, 1991)认为,臭氧化使水的 pH 值发生了变化,从而提高了混凝效率,改善了沉淀效果.还有人认为 (Chandrananth *et al*, 1996; 1998),只有在 Ca^{2+} 存在时,臭氧才能发挥一定的助凝作用,并指出臭氧诱导颗粒脱稳还与原水中天然有机物的种类有关.可见,臭氧对颗粒物去除的影响非常复杂,可能存在多种机制的交叉作用.

本研究中考查了臭氧预处理对原水中颗粒物粒径变化的影响,结果见图 5.由图 5 可以看出,臭氧预处理后,水中颗粒物粒径分布发生了一定的变化,粒径范围为 $3\sim 30\mu\text{m}$ 之间的颗粒物减少,减少率在 $12.7\%\sim 35.0\%$ 之间, $2\sim 3\mu\text{m}$ 的颗粒物基本不变, $1\sim 2\mu\text{m}$ 的颗粒物增加了 28.4% .而 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 的颗粒物在臭氧预处理后发生了明显的增加,由于颗粒数太多,超出仪器上限 (100000 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$),无法给出其准确数值.

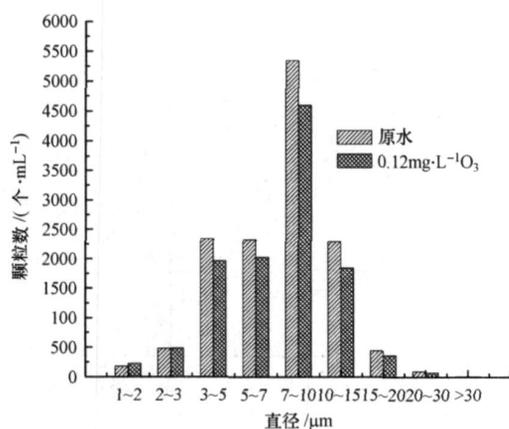


图 5 预臭氧对原水中颗粒的影响

Fig 5 Effect of pre-ozonation on particle distribution in raw water

沉淀池出水中颗粒物粒径的变化见图 6.由图 6 可以看出,经过臭氧预处理后,沉淀池出水中 $3\sim 5$ 、 $5\sim 7$ 、 $7\sim 10$ 、 $10\sim 15\mu\text{m}$ 颗粒数与常规处理出水相比,数量分别减少了 32.9% 、 46.1% 、 44.6% 、 30.0% ,而 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 的颗粒物数量有了明显增加.显然,与滤后水中颗粒数相比,沉淀出水中颗粒数的变化并不是很明显.可见,臭氧对大颗粒的直接破坏作用应该不是砂滤出水水质改善的主要原因.

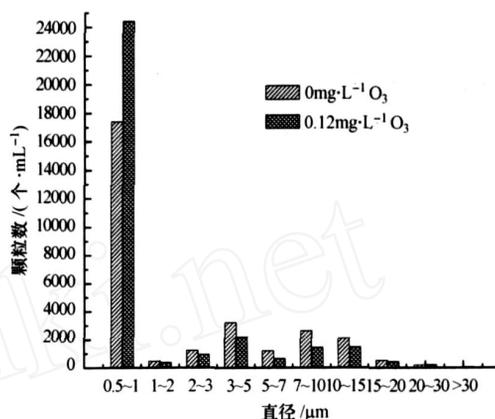


图 6 预臭氧对沉淀池出水中颗粒的影响

Fig 6 Effect of pre-ozonation on particle distribution in water after sedimentation

另外,图 5、图 6 的结果表明,臭氧作用下 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 颗粒物有了一定程度的增加.但是,图 7 的结果表明,对于砂滤出水来说,预臭氧处理可以显著降低这类小粒径颗粒物的数量.常规处理滤后出水中粒径范围为 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 的颗粒数基本在 20000 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$,平均为 20766 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$,且在运行中有逐渐升高的趋势,特别是反冲洗后能达到 40000 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$;而投加 $0.12\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的臭氧后,颗粒物降

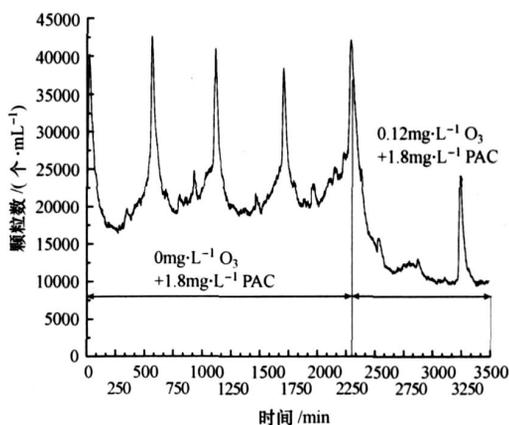


图 7 砂滤出水中 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 颗粒分布

Fig 7 Variations of particles of $0.5\sim 1\mu\text{m}$ in filtrated water

至约 10000 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 左右, 平均为 11704 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$, 减少了 9062 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$, 并且颗粒数相对稳定, 同时, 随着过滤时间的延长, 也没有发现滤池被穿透的现象. 由此可见, 臭氧预氧化不仅改善了砂滤对大粒径颗粒物的去除, 也改善了对小粒径颗粒的去除. 但是, 其作用机理需要更进一步的探讨.

5 结论 (Conclusions)

1) 在投加 $0.12\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 臭氧的条件下, 臭氧预处理可以使砂滤出水浊度和粒径范围为 $3\sim 7\mu\text{m}$ 的颗粒物含量分别从 0.25NTU 和 584 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 下降到 0.05NTU 和 72 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$, 显著地改善了水质, 提高了饮用水针对隐孢子虫的生物安全性.

2) 臭氧预处理还使过滤周期延长了 1 倍, 提高了产水量. 但是, 具体的机理需要进一步研究.

通讯作者简介: 杨敏 (1964—), 男, 研究员. 主要研究领域为饮用水安全保障技术和微生物生态学技术. E-mail: yangmin@mail.ices.ac.cn, Tel: 010-62923475.

References:

- Chandrakanth M S, Amy G L. 1996. Effects of ozone on the colloidal stability and aggregation of particles coated with natural organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 30: 431—443
- Chandrakanth M S, Amy G L. 1998. Effects of NOM source variations and calcium complexation capacity on ozone-induced particle destabilization [J]. *Water Research*, 32: 115—124
- Dai X J, Hozalski R M. 2003. Evaluation of micro spheres as Surrogates for *Cryptosporidium* parvum Oocysts in Filtration Experiments [J]. *Environmental Science & Technology*, 37: 1037—1042
- Edwards M, Benjamin M M. 1991. A mechanistic study of Ozone-induced particle destabilization [J]. *J Am Water Works Assoc*, 6: 96—105
- Emelko M B, Huck P M, Douglas I P, et al. 2003. *Cryptosporidium* and micro sphere removal during late in-cycle filtration [J]. *J Am Water Works Assoc*, 95 (5): 173—182
- Grasso D, Walter J, Weber J. 1988. Ozone-induced particle destabilization [J]. *J Am Water Works Assoc*, 80 (8): 73—82
- He Y C, Xu C W. 2004. Application of particle counter in BAC process [J]. *China Water & Waste Water*, 20 (4): 71—73 (in Chinese)
- LeChevallier M W, Norton W D. 1992. Examining relationships between particle counts and *Giantia*, *Cryptosporidium*, and turbidity [J]. *J Am Water Works Assoc*, 84 (12): 54—60
- Li S Y, Goodrich J A, Owens J H, et al. 1997. Reliability of non-hazardous surrogates for determining *Cryptosporidium* removal in bag filters [J]. *J Am Water Works Assoc*, 89: 90—99
- Lipp P, Baldauf G. 2000. Enhanced particle removal in drinking water treatment plants—case studies [J]. *Water Science & Technology*, 41 (7): 135—142
- Luo Y P, Li N. 2000. Measurement and Control of Suspended Substances in Drinking Water [J]. *Water & Waste Water Engineering*, 26 (3): 26—31 (in Chinese)

中文参考文献:

- 何元春, 许超伟. 2004. 颗粒物计数仪在生物活性炭工艺中的应用 [J]. *中国给水排水*, 20 (4): 71—73
- 罗岳平, 李宁. 2000. 自来水中悬浮颗粒物的检测和控制 [J]. *给水排水*, 26 (3): 26—31