

# 饮用水中磷与细菌再生长的关系

姜登岭<sup>1,2</sup>, 张晓健<sup>1</sup>

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084, E-mail: jdl01@mails.tsinghua.edu.cn; 2. 河北理工学院土建系, 唐山 063009)

**摘要:**采用改进的可同化有机碳(AOC)和微生物可利用磷(MAP)方法, 针对 T 市 J 水厂水源水、处理工艺以及一条配水干管中磷对细菌生长的限制作用进行了研究. 结果表明: ①水源水与处理工艺中 MAP 较高(5~38 μg/L), 配水管网中 MAP 较低(<5 μg/L), 且管网水中的 MAP 随着管线的延长基本保持不变. ②常规处理工艺能够有效地去除水中的 MAP(去除率为 34.0%~83.7%). ③在水源水和处理工艺中, 水样的 AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 与 AOC<sub>native</sub> 没有显著差别, 说明 AOC 是微生物生长繁殖的决定因素. 该研究配水干管中, 水样的 AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 为 AOC<sub>native</sub> 的 2~8.7 倍, 磷成为细菌再生长的限制因子.

**关键词:**磷限制作用; 潜在 AOC(AOC<sub>potential</sub>); 微生物可利用磷; 细菌再生长

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)05-0057-04

## Relationship Between Phosphorus and Bacterial Regrowth in Drinking Water

JIANG Deng-ling<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-jian<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: jdl01@mails.tsinghua.edu.cn; 2. Department of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Tangshan 063009, China)

**Abstract:** Limitation of phosphorus on bacterial regrowth was studied in source water, water treatment process and a main distribution pipe of J waterwork in T city, by modified assimilable organic carbon(AOC) method and microbially available phosphorus(MAP) analysis. Based on the study, the result showed that: ①Concentration of MAP was higher in source water and water treatment process, which was 5~38 μg/L(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P). However in water distribution system, concentration of MAP was lower, which was less than 5 μg/L(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P). It changed very little in distribution system. ②Traditional treatment process can remove MAP efficiently 34.0%~83.7% of MAP can be removed in the process. ③Generally in source water and water treatment process, there was no evident difference between AOC<sub>potential</sub>, AOC<sub>P</sub> and AOC<sub>native</sub>. So AOC was the most important factor of bacterial growth. In the main distribution pipe, the concentration of AOC<sub>potential</sub> and AOC<sub>P</sub> were 2~8.7 times of the concentration of AOC<sub>native</sub>. So phosphorus limited bacterial regrowth.

**Key words:** phosphorus limitation; AOC<sub>potential</sub>; microbially available phosphorus(MAP); bacterial regrowth

长期以来, 有机物尤其是易被微生物降解的可同化有机碳(Assimilable Organic Carbon, AOC)被认为是控制饮用水中异养菌生长繁殖的最主要营养物质<sup>[1]</sup>. 人们就无机元素对微生物生长的影响关注非常少. 然而最近几年有研究表明, 在北半球(例如北欧、俄罗斯和北美洲), 自然水体(例如湖泊、河流, 甚至地下水)中含有大量的有机碳. 饮用水中微生物生长不是受到 AOC 的限制, 而是受到无机元素磷的限制<sup>[2,3]</sup>. 饮用水中磷对微生物生长的限制作用的研究在国内外逐渐开展. 现有的研究成果表明, 我国大部分地区饮用水 AOC 浓度高, 饮用水生物稳定性难以保证. 如果磷是微生物生长的限制因素, 有可能为控制饮用水生物稳定性提供另一条途径. 本研究采用改进的 AOC 方法(AOC<sub>potential</sub>)和 MAP 方法, 针对 T 市 J 水厂水源水、处理工艺以及一条配水干管中, 根据各取样点的 AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 和 AOC<sub>native</sub> 的差别是否显著, 结合各点 MAP 浓度, 研究了磷对

微生物生长的限制作用.

### 1 材料与方法

#### 1.1 水厂工艺与管网取样点

T 市 J 水厂水源为滦河水, 引滦河水至 Y 水库, 然后由 Y 水库到 T 市水源厂, 通过泵站加压后输送至西河预沉池, 预沉池总容积为 36 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 经过预沉的水通过管道送往 J 水厂.

J 水厂日供水量为 30 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 采用传统处理工艺, 预加氯除藻, 为保证出厂水余氯量在 1.0 mg/L 左右, 清水池前补氯加氨, 氯氨比为 4:1. 工艺流程图见图 1.

为研究管网中 AOC 和微生物可利用磷(Micro-

收稿日期: 2003-09-28; 修订日期: 2003-12-08

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

作者简介: 姜登岭(1975 年~), 男, 河北吴桥人, 硕士研究生, 研究方向为给水理论与技术.

bially Available Phosphorus, MAP)的变化情况,有代表性地选取了 J 水厂的一条配水干管,取样点依次为微电机厂、通津电缆厂、密封件厂、医疗器械厂、聚友饭庄(管网末梢),各取样点距离 J 水厂分别为 5、7、10、11 和 14 km。

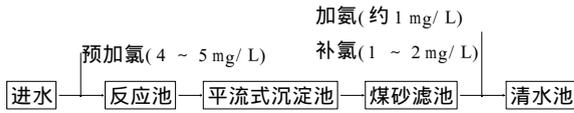


图 1 J 水厂工艺流程

Fig.1 Water treatment process of J Waterwork

水样收集于预先处理好的取样瓶中,如果水样中含有余氯,加入适量硫代硫酸钠(按照摩尔比:硫代硫酸钠:余氯=1.2:1)以中和水中的余氯。所有水样 7h 内送回实验室分析,微生物试验 12h 内进行。由于微生物试验工作量大、周期长,测定水样未作平行样,细菌平板计数过程中每个水样做 3 个平行。

## 1.2 AOC 测定方法

AOC 采用荷兰 Van der Kooij 博士提出的测定方法<sup>[4,5]</sup>,P17 菌和 NOX 菌采用先后接种法。本试验水样的 AOC 记为  $AOC_{native}$ 。试验采用 P17 菌的产率系数为  $1.7 \times 10^7$  CFU/ $\mu$ g 乙酸碳,NOX 菌的产率系数为  $4.1 \times 10^7$  CFU/ $\mu$ g 乙酸碳。本试验中 AOC 测定方法的相对标准偏差为 24.3%。

## 1.3 改进 AOC 方法

为了研究磷对饮用水中微生物生长的影响,Miettinen 等对 AOC 的测定方法进行了改进,即测定 AOC 时水样中加入足够的无机盐营养(磷、氮、镁、钾等)以消除无机元素对细菌生长的限制,这种方法得到的 AOC 称为  $AOC_{potential}$ (潜在 AOC)。标准方法得到的 AOC 称为  $AOC_{native}$ (本底 AOC)<sup>[3]</sup>。如果同一水样加入无机营养后测得的  $AOC_{potential}$  明显高于未加无机营养的  $AOC_{native}$ ,说明该水样中无机元素限制了 P17 菌和 NOX 菌的生长, $AOC_{native}$  低于水样中实际 AOC 的含量。为了判断磷是否起到主要的限制作用,本试验测定了水样中只加入 P 而不加入其他无机元素得到的 AOC,记为  $AOC_P$ 。

$AOC_{potential}$  测定方法:水样培养时向 40 mL 水样中加入  $40 \mu$ L 浓度  $4.55$  g/L ( $(NH_4)_2SO_4$ 、 $0.2$  g/L  $KH_2PO_4$ 、 $0.1$  g/L  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、 $0.1$  g/L  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 、 $0.2$  g/L NaCl 的无机盐营养,消除无机营养对 P17 菌和 NOX 菌的生长限制<sup>[5]</sup>。

$AOC_P$  测定方法:水样培养时,只向水样中加入

等量的  $KH_2PO_4$  不投加其他无机营养,使得水样中添加的磷为  $46 \mu$ g/L 的  $PO_4^{3-}-P$ 。

如果同一水样的  $AOC_{potential}$  与  $AOC_P$  相差不多,而  $AOC_{potential}$ 、 $AOC_P$  明显大于  $AOC_{native}$ ,说明 P 是水样中限制细菌生长的主要因素。本试验判别差别是否显著的标准如下:如果  $AOC_{potential}$  或  $AOC_P$  与  $AOC_{native}$  差别大于 48.6%,则认为它们有差别(差别不显著);如果  $AOC_{potential}$  或  $AOC_P$  与  $AOC_{native}$  差别大于 97.2%(误差范围的 2 倍),则认为它们有明显差别(差别显著)。

## 1.4 微生物可利用磷(MAP)的测定方法<sup>[6]</sup>

取 50 mL 水样于 50 mL 经过无碳化处理的磨口三角瓶中,向待测水样中加入足够的碳(乙酸钠)和其他无机营养以消除碳和其他无机元素对微生物生长的限制,使磷成为唯一限制性因素。在 50 mL 水样中加入  $50 \mu$ L 无机营养液(氮、镁、钙、钾等)和  $50 \mu$ L  $2$  g/L 的乙酸碳溶液,使得加入的营养为  $250 \mu$ g/L 的 N、 $53 \mu$ g/L 的 K、 $10 \mu$ g/L 的 Mg、 $27 \mu$ g/L 的 Ca、 $40 \mu$ g/L 的 Na、 $157 \mu$ g/L 的 Cl 和  $2000 \mu$ g/L 的乙酸碳。在  $70^\circ C$  水浴中巴氏灭菌 30 min 以破坏植物细胞和灭活非芽孢细菌,水浴后冷却至室温,然后按照  $10^3$  CFU/mL 的接种浓度接种荧光假单胞菌 P17,在  $15^\circ C$  条件下黑暗培养,分别在培养第 3、4d 对水样中的 P17 采用平板计数法进行细菌计数。取 2d 的菌落数的最大值,利用产率系数计算水样的 MAP(以  $PO_4^{3-}-P$  计)。本试验中采用的 MAP 产率系数为  $1.10 \times 10^9$  CFU/ $\mu$ g。

## 2 结果与讨论

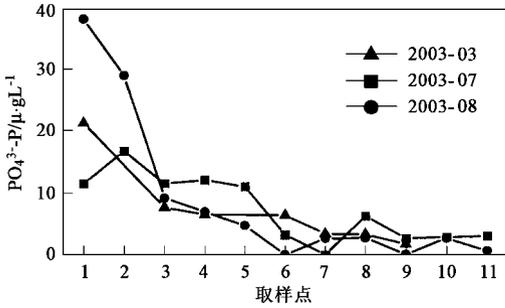
### 2.1 水样中的微生物可利用磷(MAP)

MAP 分别在 2003 年 3 月、7 月和 8 月共取样检测 3 次,试验数据如图 2。

3、7、8 月份 MAP 数据表明,水源水中 MAP 含量较高,一般高于  $10 \mu$ g/L,在 8 月份水源水中的 MAP 甚至高达  $38.21 \mu$ g/L(这一数值高于 MAP 检测方法的上限  $10 \mu$ g/L<sup>[6]</sup>),该 MAP 数据采用 MAP 产率系数计算而来。就处理工艺对 MAP 的去除而言,常规工艺能够有效地去除水中的 MAP。7、8 月份滤池出水的 MAP 比 J 水厂进水分别下降了 34.0% 和 83.7%。常规工艺中,混凝对于 MAP 的去除率最高,7、8 月份分别为 31.1% 和 68.4%。这说明饮用水中的磷主要通过溶解性的磷与混凝剂形成沉淀以及非溶解性的磷形成矾花而被去除。

J 水厂配水管网中的 MAP 保持在比较低的水

平,一般低于  $5\mu\text{g/L}$ . 比较低的 MAP 含量(有研究表明磷的含量低于  $10\mu\text{g/L}$ <sup>[7,8]</sup>)使得磷有可能成为管网水中细菌再生的限制因子. 管网水中的 MAP 随着管线的延长基本保持不变,这说明 MAP 在管网水中只能被细菌所利用,没有其他的代谢途径. 微生物利用只能引起 MAP 的微量变化,所以配水管网中 MAP 基本保持不变.



- 1. T市水源水; 2. J水厂进水; 3. 混凝出水; 4. 沉淀出水;
- 5. 滤池出水; 6. 出厂水; 7. 微电机厂; 8. 通津电缆厂;
- 9. 密封件厂; 10. 医疗器械厂; 11. 聚友饭庄

图2 J水厂水源水、处理工艺及配水干管中的 MAP

Fig.2 Concentration of MAP in source water, water treatment process and the main distribution pipe of J Waterwork

### 2.2 磷对微生物生长的限制

采用改进的 AOC 方法,在 2003 年 2、7 和 8 月对 T 市 J 水厂的水源水、处理工艺和配水干管中磷对细菌再生的限制作用进行了研究. 3 月份试验点较多,7、8 月份只对水源水、微电机厂和管网末梢进行了试验. 同时 7、8 月份由于 NO<sub>x</sub> 平板计数时遭受污染,这 2 个月的 AOC<sub>native</sub>、AOC<sub>potential</sub> 和 AOC<sub>P</sub> 均为 AOC<sub>P17</sub>. 2 月份数据 AOC<sub>native</sub>、AOC<sub>potential</sub> 和 AOC<sub>P</sub> 如图 3.

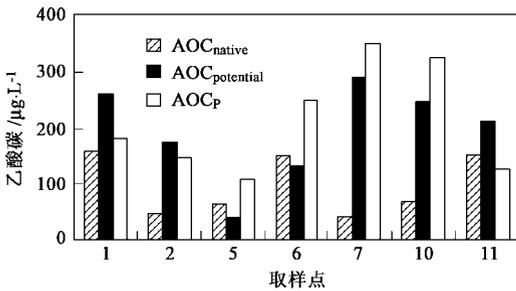


图3 2003年2月份J水厂及配水干管中 AOC 浓度 (取样点编号如图2)

Fig.3 Concentration of AOC in source water, water treatment process and the main distribution pipe of J Waterwork, February, 2003

从 2 月份数据可以看出, J 水厂水源水以及处理工艺中 AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 与 AOC<sub>native</sub> 没有显著差别,而 J 水厂进水 AOC<sub>native</sub>、AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 分别

为  $50.2$ 、 $170.6$  和  $146.1\mu\text{g/L}$  (以乙酸碳计),说明无机元素而非 AOC 限制微生物生长;又因为该水样的 AOC<sub>potential</sub> 与 AOC<sub>P</sub> 差别不显著,说明磷对该水样的细菌生长存在明显限制因子作用. 但是该水样的 MAP 应高于工艺中其他处理单元,充足的磷不应该对微生物生长起限制作用,因此不排除该水样 AOC<sub>native</sub> 检测存在误差. 可以初步推断,一般情况下在水源水以及水处理工艺中基本上不存在磷限制细菌生长的情况.

在 J 水厂配水干管中情况却不相同,管网点微电机厂水样的 AOC<sub>native</sub>、AOC<sub>potential</sub> 和 AOC<sub>P</sub> 分别为  $40.1$ 、 $289.4$  和  $349.1\mu\text{g/L}$ , AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 分别是 AOC<sub>native</sub> 的  $7.2$  和  $8.7$  倍,而 AOC<sub>potential</sub> 与 AOC<sub>P</sub> 差别不明显,所以磷是该水样中细菌生长的限制因子. 在管网点医疗器械厂 AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 分别是 AOC<sub>native</sub> 的  $3.5$  和  $4.6$  倍,磷同样是该水样中细菌再生的限制因子. 但是在管网末梢, AOC<sub>native</sub>、AOC<sub>potential</sub> 和 AOC<sub>P</sub> 分别为  $149.9$ 、 $209.44$  和  $124.0\mu\text{g/L}$ ,说明磷不是限制因子. 但是管网水中不存在磷再次进入配水管网,因此管网末梢磷的限制性问题从 2 月份数据还难以得出结论,可以在 7、8 月份试验中进一步分析.

图 4 中 7 月份 T 市水源水不存在限制磷细菌生长的情况. 对于管网末梢 7 月份水样的 AOC<sub>native</sub>、AOC<sub>potential</sub> 和 AOC<sub>P</sub> 分别为  $91.2$ 、 $452.9$  和  $385.3\mu\text{g/L}$ ,可以看出磷是该水样细菌再生的限制因子. 图 5 中 8 月份 T 市水源水和微电机厂 2 个水样的磷限制性难以判断. 8 月份 T 市水源水和微电机厂水样的 MAP 浓度分别为  $38.2$ 、 $2.6\mu\text{g/L}$ ,可以初步判断水源水不具有磷限制,而微电机厂水样可能具有磷限制性. 管网末梢 AOC<sub>native</sub>、AOC<sub>potential</sub> 和

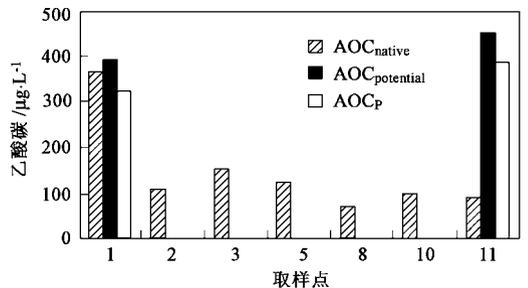


图4 2003年7月份J水厂及配水干管 AOC 浓度 (只含有 AOC<sub>P17</sub>, 取样点编号如图2)

Fig.4 Concentration of AOC (only AOC<sub>P17</sub>) in source water, water treatment process and the main distribution pipe of J Waterwork, July, 2003

AOC<sub>P</sub> 分别为 42.9、114.3、85.7 μg/L, 同样存在磷的限制。

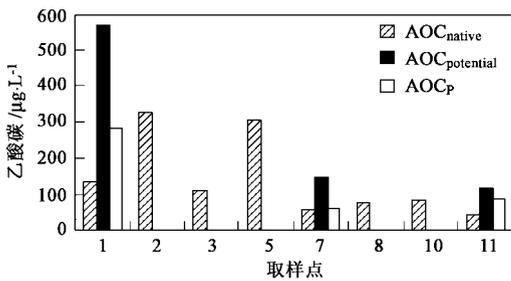


图 5 2003 年 8 月份 J 水厂及配水干管 AOC 浓度 (只含有 AOC<sub>P</sub>, 取样点编号如图 2)

Fig. 5 Concentration of AOC (only AOC<sub>P</sub>) in source water, water treatment process and the main distribution pipe of J Waterwork, August, 2003

水源水以及水处理工艺中, MAP 含量较高(5 ~ 38 μg/L), 有充足的磷源提供细菌生长繁殖, 磷不应该限制细菌的生长; 而在配水干管中 MAP 的含量一般较低(< 5 μg/L), 不能够为细菌再生长提供足够的磷源, 磷就可能成为管网水中细菌再生长的限制因子。综合 AOC 与 MAP 数据可以初步推断, J 水厂水源水以及水处理工艺中, 磷不是细菌生长的限制性因子; 而在研究的配水干管中, 磷对细菌再生长起到限制作用。

### 2.3 讨论

配水管网中细菌再生长会导致饮用水的色度浊度增加、致病微生物风险加大以及管道的腐蚀等一系列问题。目前控制的措施有加大投氯量和去除饮用水中的 AOC。加大投氯量会使得饮用水中的消毒副产物增多, 对人体健康造成威胁<sup>[9]</sup>; 而常规处理工艺对于 AOC 的去除并不理想。对于我国大多数地区, 水源水遭受污染比较严重(主要是有机物和氨氮污染), 饮用水中 AOC 浓度大多超过生物稳定性控制浓度(AOC < 100 μg/L<sup>[10]</sup>)。如果磷是管网水中细菌再生长的限制因子, 而且磷在水处理工艺中容易被去除, 那么就有可能为我国控制饮用水生物稳定性问题提供新的途径。在管网水中 AOC 浓度较高的情况下, 低浓度的磷限制了管网水中细菌再繁殖, 从而控制了饮用水的生物稳定性。

对于饮用水中的磷能否控制在比较低的水平, 从 J 水厂常规水处理工艺对 MAP 的去除数据可以看出, 该常规工艺能够有效地去除水中的 MAP, 去除率高达 83.7%, 管网水中 MAP 浓度低于 5 μg/L。国外有研究表明, 采用混凝、臭氧活性炭工艺的出水 MAP 能够降低到 0.6 μg/L<sup>[11]</sup>。针对常规水处理工

艺, 如果对混凝工艺进行强化控制, 有可能达到更高的去除率, 保证饮用水的生物稳定性。

### 3 结论

(1) J 水厂水源水与处理工艺中 MAP (以 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 计) 较高(5 ~ 38 μg/L), 该配水干管中 MAP 较低(< 5 μg/L), 而且管网水中的 MAP 随着管线的延长基本保持不变。

(2) J 水厂水源水与水处理工艺中, 因为 MAP 的浓度较高, 水样的 AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 与 AOC<sub>native</sub> 没有显著差别, 说明有机碳(AOC)是微生物生长繁殖的决定因素; 在配水干管中, 由于 MAP 的浓度较低, 水样的 AOC<sub>potential</sub>、AOC<sub>P</sub> 为 AOC<sub>native</sub> 的 2 ~ 8.7 倍, 磷成为细菌再生长的限制因子。

(3) 常规水处理工艺对 MAP 的去除率较高(34.0% ~ 83.7%), 混凝沉淀对 MAP 的去除效果最好(去除率为 31.1% ~ 68.4%)。

#### 参考文献:

- [1] Isabel C Escobar, Andrew A Randall, James S Taylor. Bacterial growth in distribution systems: Effect of assimilable organic carbon and biodegradable dissolved organic carbon[J]. Environ. Sci. Technol., 2001, 35(17): 3442 ~ 3447.
- [2] Markku J Lehtola, Miettinen Ilkka T, Terttu Vartiainen, et al. Microbially Available Organic Carbon, Phosphorus, and Microbial Growth in Ozonated Drinking Water[J]. Wat. Res., 2001, 35(7): 1635 ~ 1640.
- [3] Ilkka T Miettinen, Terttu Vartiainen, Pertti J Martikainen. Detritation of Assimilable organic Carbon in Humus-rich Drinking Waters[J]. Wat. Res., 1999, 33(10): 2277 ~ 2282.
- [4] Van der Kooij D, Visser A, Hijnen W A M. Determination the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water[J]. Journal A WWA, 1982b, 74: 540 ~ 545.
- [5] 刘文君, 王亚娟, 张丽萍, 等. 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 ~ 5.
- [6] Markku J Lehtola, Miettinen I T, Vartiainen T, et al. A New Sensitive Bioassay for Determination of Microbially Available Phosphorus in Water[J]. Appl. Environ. Microbiol., 1999, 65(5): 2032 ~ 2034.
- [7] Miettinen I T, Vartiainen T, Martikainen P J. Phosphorus and bacterial growth in drinking water[J]. Appl. Environ. Microbiol., 1997, 63(8): 3242 ~ 3245.
- [8] Sathasivan A, Ohgaki S, Yamamoto K, et al. Role of Inorganic Phosphorus in Controlling Regrowth in Water Distribution System[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 35(8): 37 ~ 44.
- [9] Bull R J, Birnbaum L S, Cantor K P, Rose J B, Butterworth B E, Pegram R, Tuomisto J. Water chlorination-essential process or cancer hazard[J]. Fund. And Appl. Toxicol., 1995, 23(2): 155 ~ 166.
- [10] LeChevallier M W, Welch N J, Smith D B. Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water[J]. Appl. Environ. Microbiol., 1996, 62(7): 2201 ~ 2211.
- [11] Markku J Lehtola, Miettinen I T, Vartiainen T, et al. Changes in Content of Microbially Available Phosphorus, Assimilable Organic Carbon and Microbial Growth Potential During Drinking Water Treatment Processes[J]. Wat. Res., 2002, 36: 3681 ~ 3690.