

饮用水中磷与细菌再生长的关系

姜登岭^{1,2}, 张晓健¹

(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($5 \sim 38 \mu\text{g/L}$), 配水管网中 MAP 较低($< 5 \mu\text{g/L}$), 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 $34.0\% \sim 83.7\%$)。③在水源水和处理工艺中, 水样的 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 、 AOC_{P} 与 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 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 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 、 AOC_{P} 为 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 的 $2 \sim 8.7$ 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($\text{AOC}_{\text{potential}}$); 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^{1,2}, ZHANG Xiao-jian¹

(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 $5 \sim 38 \mu\text{g/L}(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$. However in water distribution system, concentration of MAP was lower, which was less than $5 \mu\text{g/L}(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$. It changed very little in distribution system. ②Traditional treatment process can remove MAP efficiently $34.0\% \sim 83.7\%$ of MAP can be removed in the process. ③ Generally in source water and water treatment process, there was no evident difference between $\text{AOC}_{\text{potential}}$, AOC_{P} and $\text{AOC}_{\text{native}}$. So AOC was the most important factor of bacterial growth. In the main distribution pipe, the concentration of $\text{AOC}_{\text{potential}}$ and AOC_{P} were $2 \sim 8.7$ times of the concentration of $\text{AOC}_{\text{native}}$. So phosphorus limited bacterial regrowth.

Key words: phosphorus limitation; $\text{AOC}_{\text{potential}}$; 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^[1]。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^[2,3]。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($\text{AOC}_{\text{potential}}$)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 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 、 AOC_{P} 和 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 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 $36 \times 10^4 \text{m}^3$, 经过预沉的水通过管道送往 J 水厂。

J 水厂日供水量为 $30 \times 10^4 \text{m}^3$, 采用传统处理工艺, 预加氯除藻, 为保证出厂水余氯量在 1.0mg/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14km.

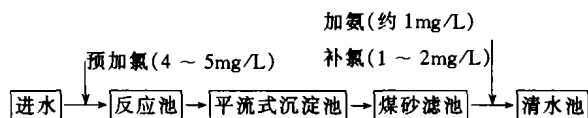


图1 J水厂工艺流程

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^[4,5],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 1.7×10^7 CFU/ μ g乙酸碳,NOX菌的产率系数为 4.1×10^7 CFU/ μ 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)^[3].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40mL水样中加入40 μ L浓度4.55g/L (NH₄)₂SO₄、0.2g/L KH₂PO₄、0.1g/L MgSO₄·7H₂O、0.1g/L CaCl₂·2H₂O、0.2g/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^[5].

AOC_P测定方法:水样培养时,只向水样中加入

等量的KH₂PO₄不投加其他无机营养,使得水样中添加的磷为46 μ g/L的PO₄³⁻-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^[6]

取50mL水样于50mL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50mL水样中加入50 μ L无机营养液(氮、镁、钙、钾等)和50 μ L 2g/L的乙酸碳溶液,使得加入的营养为250 μ g/L的N、53 μ g/L的K、10 μ g/L的Mg、27 μ g/L的Ca、40 μ g/L的Na、157 μ g/L的Cl和2000 μ g/L的乙酸碳.在70℃水浴中巴氏灭菌30min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10³CFU/mL的接种浓度接种荧光假单胞菌P17,在15℃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PO₄³⁻-P计).本试验中采用的MAP产率系数为 1.10×10^9 CFU/ μ g.

2 结果与讨论

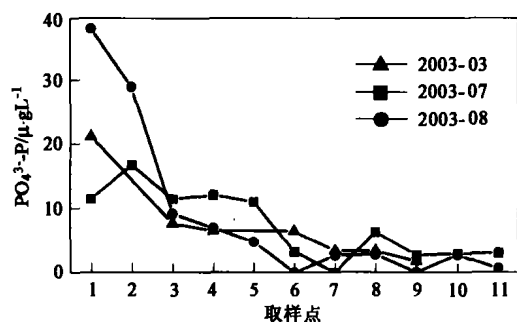
2.1 水样中的微生物可利用磷(MAP)

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 μ g/L,在8月份水源水中的MAP甚至高达38.21 μ g/L(这一数值高于MAP检测方法的上限10 μ g/L^[6],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 $10\mu\text{g/L}$ ^[7,8])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 NOX 平板计数时遭受污染,这 2 个月的 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 、 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 和 AOC_{P} 均为 AOC_{P17} . 2 月份数据 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 、 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 和 AOC_{P} 如图 3.

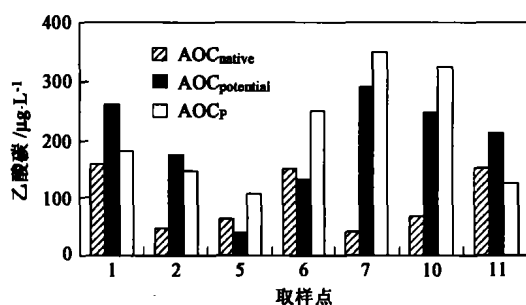


图3 2003年2月份J水厂及配水干管中 AOC 浓度

(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 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 、 AOC_{P} 与 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 没有显著差别,而 J 水厂进水 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 、 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 、 AOC_{P} 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 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 与 AOC_{P} 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 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 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 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 、 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 和 AOC_{P} 分别为 40.1、289.4 和 $349.1\mu\text{g/L}$, $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 、 AOC_{P} 分别是 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 的 7.2 和 8.7 倍,而 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 与 AOC_{P} 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 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 、 AOC_{P} 分别是 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 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, $\text{AOC}_{\text{native}}$ 、 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 和 AOC_{P} 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 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 、 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 和 AOC_{P} 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 $\text{AOC}_{\text{native}}$ 、 $\text{AOC}_{\text{potential}}$ 和

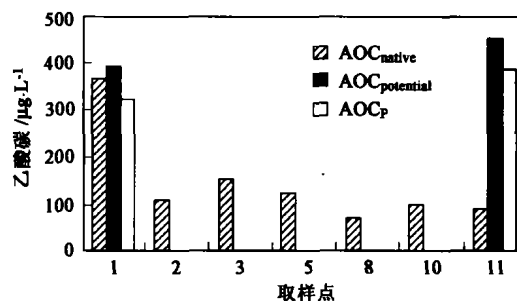


图4 2003年7月份J水厂及配水干管 AOC 浓度

(只含有 AOC_{P17} , 取样点编号如图2)

Fig.4 Concentration of AOC (only AOC_{P17}) in source water, water treatment process and the main distribution pipe of J Waterwork, July, 2003

AOC_P 分别为 42.9、114.3、85.7 $\mu\text{g/L}$, 同样存在磷的限制。

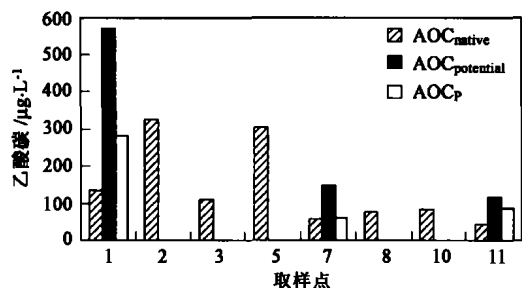


图 5 2003 年 8 月份 J 水厂及配水干管 AOC 浓度
(只含有 AOC_{P17}, 取样点编号如图 2)

Fig. 5 Concentration of AOC(only AOC_{P17}) 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 $\mu\text{g/L}$), 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 $\mu\text{g/L}$), 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^[9]; 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 $\mu\text{g/L}$ ^[10])。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 $\mu\text{g/L}$ 。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 $\mu\text{g/L}$ ^[11]。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 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 计) 较高(5~38 $\mu\text{g/L}$), 该配水干管中 MAP 较低(<5 $\mu\text{g/L}$), 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_{potential}、AOC_P 与 AOC_{native} 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_{potential}、AOC_P 为 AOC_{native} 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. Determination 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 AWWA, 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.