

磷与水中细菌再生长的关系

桑军强¹, 余国忠², 张锡辉¹, 王占生² (1. 清华大学深圳研究生院环境工程与管理研究中心, 深圳 518057, E-mail: zhlysjq@netease.com; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 利用细菌再生长潜力(Bacterial Regrowth Potential, BRP)的微生物分析方法, 研究了水中的磷对其生物稳定性的限制因子作用. 试验测试水样为经过净水工艺处理后的出水, 净水工艺处理的原水取自我国北方某水库. 结果表明, 在测试水样中添加 $50\mu\text{g/L}$ 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (NaH_2PO_4) 后, 水样的 BRP 增加了 $100\% \sim 235\%$. 在水样中添加各种无机盐后得到的 BRP 同仅添加 NaH_2PO_4 得到的结果相差不大, 而在水样中添加 1mg/L 的乙酸碳(NaAc)后 BRP 只增加了 $30\% \sim 40\%$, 大大小于只添加磷的水样, 这表明在该水样中磷是细菌生长的限制因子. 本试验说明, 有效地去除水中的磷可以作为限制饮用水中细菌再生长, 提高饮用水生物稳定性的一个重要途径.

关键词: 细菌再生长; 磷; 可同化有机碳; 饮用水; 生物稳定性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)04-04-0081

Relation Between Phosphorus and Bacterial Regrowth in Drinking Water

Sang Junqiang¹, Yu Guozhong², Zhang Xihui¹, Wang Zhansheng² (1. Research Center for Environmental Engineering & Management, Shenzhen Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518057; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: zhlysjq@netease.com)

Abstract: In the experiment, a bioassay called Bacterial Regrowth Potential (BRP) was used to investigate the effect of phosphorus on bacterial regrowth in the water sample that was made from some raw water taken from a reservoir located in northern China. It was shown that BRP of water sample increased about $100\% \sim 235\%$ when $50\mu\text{g/L}$ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (as NaH_2PO_4) was added alone. BRP of water sample with various inorganic nutrients (including phosphate) addition had the similar increase compared with BRP of water sample with only $50\mu\text{g/L}$ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ addition and BRP of water sample with acetate-C of 1mg/L addition increased only $30\% \sim 40\%$. These results were clear evidence of phosphorus limitation on bacteria regrowth in the water sample investigated in the experiment. This observation offered novel possibility to restrict microbial regrowth in water distribution system by developing technologies to remove phosphorus efficiently from drinking water.

Key words: bacterial regrowth; phosphorus; assimilable organic carbon (AOC); drinking water; biological stability

配水管网中异养菌的生长会造成饮用水浊度、色度的增加, 致病微生物的出现及管网的腐蚀等一系列的问题^[1]. 长期以来, 饮用水中的可微生物降解的有机物, 特别是可同化有机碳 (Assimilable Organic Carbon, AOC) 含量的高低, 被普遍认为是控制给水管网中细菌再生长的限制因素^[2~7]. 1996 年, Miettinen I. T. 博士指出了饮用水中细菌的生长受到水中磷限制的情况^[8], 这一发现改变了可生物降解有机物是饮用水中细菌再生长唯一限制因子的传统观念. 之后, 磷对饮用水中细菌再生长的影响开始引起研究人员的关注^[9~13]. 相关研究指出^[9, 10], 对于有机物含量相对较高的饮用水, 水

中溶解性正磷酸盐 (Soluble Reactive Phosphorus) 浓度低于 $10\mu\text{g/L}$ 时, 磷对水中细菌生长的限制因子作用将会表现出来.

磷对饮用水中细菌再生长的影响研究在国内尚未见到相关报道, 考虑到我国水源水质的较大差别以及水源受到有机物污染的现状, 水源水有机物含量往往较高, 如果磷的浓度相对较低, 对于某些水厂的出水, 磷有可能成为饮用水中细菌再生长的限制因子. 笔者在我国某水源地进行水处理工艺研究的过程中发现, 该水

基金项目: 科技部重大科技项目 (9550610400-05-03).
作者简介: 桑军强 (1974~), 男, 博士, 主要从事水污染防治技术研究.

收稿日期: 2002-07-12; 修订日期: 2002-09-05

源中总磷的浓度较低,平均在 20 ~ 30 μg/L 之间,最低仅为 8 μg/L.由于常规处理可以有效地去除水中的磷^[11,14],由此推测,以此为水源进行处理后的出水,磷有可能成为细菌再生长的限制因子.对此,笔者进行了相关的试验研究及探讨,为国内饮用水生物稳定性的研究提出了一个新的方向.

1 试验工艺与分析方法

1.1 原水处理试验工艺

试验过程采用的净水工艺流程为:原水 → 生物预处理 → 混凝沉淀 → 砂滤 → 出水,试验工艺为小试规模.其中生物预处理采用生物陶粒工艺,滤层高 2 m,运行滤速为 6 m/h,气水比为 0.5:1.混凝沉淀单元采用聚合氯化铝作为混凝剂,混凝剂投加量为 15 mg/L.砂滤滤速为 10 m/h.

1.2 试验分析方法

常规水质指标只测定 COD_{Mn}, TOC 及 TP,均按国家标准分析方法进行^[15].

为了研究磷对水中细菌再生长的限制因子作用,试验中采用一种称为细菌再生长潜力(Bacterial Regrowth Potential, BRP)的方法,对本试验工艺最终出水进行测定.具体为:取出水样,加入具塞磨口锥形瓶中,放到暗处,维持 20 ℃ 的恒温,培养 5 d,然后把此水样经孔径 2 μm 的滤膜过滤,以滤过水作为接种用的水样,以滤过水中的菌种作为接种菌种.接种用的水样经过上述处理后,水中的细菌充分生长,同时水中可供细菌利用的有机和无机营养物质大大下降,从而减少对待测水样的影响.取待测水样,加入经过超纯水洗涤、消毒及无碳化处理的具塞磨口锥形瓶中,在 65 ℃ 的水浴中消毒 30 min,冷却到室温后,按照 1:100 的比例加入接种水样,放到暗处,维持 20 ℃ 的恒温,培养一定时间后测定水中细菌总数.每个水样做 2 个平行样,结果取其平均值,以 CFU/mL 计.细菌计数采用平板涂布法,培养基采用 Reasoner D. J. 设计的专门针对给水中异养菌总数测定的 R2A 培养基^[16,17],在 22 ℃ ~ 25 ℃ 下生长 7 d 后计数.利用该培养方法得到的细菌总数大大高

于采用传统营养琼脂培养基培养的方法,可以更好地反应出水中细菌的数量.

为了确定磷对水中细菌再生长的限制因子作用,测定水样 BRP 时,在待测水样中添加了不同的组分,同不添加任何组分的水样进行比较,同时对不同 PO₄³⁻-P 添加量对 BRP 的影响进行了测定分析.

(1) 在一份水样中添加 50 μg/L 的 PO₄³⁻-P (NaH₂PO₄),一份水样中添加包括 PO₄³⁻-P 在内的无机盐溶液,无机盐的种类及添加浓度见表 1,一份水样中添加 1 mg/L 的乙酸碳(NaAc),一份水样中添加 1 mg/L 的乙酸碳(NaAc)和 50 μg/L 的 PO₄³⁻-P(NaH₂PO₄).培养 0,3,7,10,13,16 d 后测定水中细菌总数,考察不同组分对 BRP 的影响.

(2) 在水样中分别添加 1,2,4,8,12,20 μg/L 的 PO₄³⁻-P(NaH₂PO₄),培养 10 d 后测定水中细菌总数,考察不同的 PO₄³⁻-P 添加量对 BRP 的影响.

表 1 无机盐种类和添加浓度

Table 1 Concentration of inorganic nutrients added	
无机盐种类	添加浓度/μg·L ⁻¹
(NH ₄) ₂ SO ₄ (以 NH ₄ ⁺ -N 计)	970
MgSO ₄ ·7H ₂ O(以 Mg ²⁺ 计)	10
CaCl ₂ ·2H ₂ O(以 Ca ²⁺ 计)	30
KH ₂ PO ₄ (以 PO ₄ ³⁻ -P 计)	50
NaCl(以 Na ⁺ 计)	80

2 试验结果与分析

对常规水质指标的测定表明,该试验组合工艺过程对 COD_{Mn} 的去除率在 40 % 左右,出水 COD_{Mn} 小于 3 mg/L,出水 TOC 4 mg/L 左右;总磷(TP)去除率 80 % 以上,出水总磷极低,仅为 4 μg/L 左右.

图 1 是水样中添加不同组分后 BRP 的测定结果.由图 1 可以看到,在水样中添加各种组分均使水样的 BRP 增加.试验结果表明,水样中只添加乙酸碳后,细菌再生长潜力增加了 30 % ~ 40 %,而水样中添加各种无机盐或只添加磷源(NaH₂PO₄)后,水样的 BRP 增加了

100 % ~ 235 % , 大大高于只添加乙酸碳水样 BRP 的增加幅度 . 而在水样中添加各种无机盐后得到的 BRP 结果同只添加 NaH_2PO_4 得到的结果相差不大 , 这说明水中磷是细菌生长的限制因子 . 另外 , 在水样中同时添加 1 mg/L 的乙酸碳 (NaAc) 和 50 $\mu\text{g/L}$ 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (NaH_2PO_4) 后 , 水样中细菌再生长潜力增加幅度大大高于其它水样 , 这是由于水中细菌可利用的有机和无机营养物质大大提高造成的 .

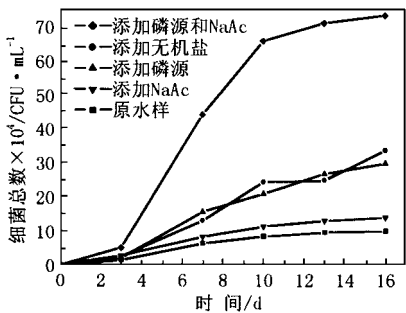


图 1 添加不同组分对水样 BRP 的影响

Fig.1 Effect of different nutrients addition to BRP

图 2 是水样中添加不同量的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 后水样 BRP 的测定结果 . 由图 2 可以看到 , 水样 BRP 随着 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 添加量的增加而上升 , 磷对水中细菌的再生长能力的促进作用明显 . 这说明在磷是细菌生长的限制因子的情况下 , 水中磷的少量增加将会大大提高水中细菌的生长能力 . 因此 , 实际饮用水处理过程中如果通过相关工艺尽可能降低水中磷含量将大大降低水中细菌的再生能力 , 从而提高饮用水的生物稳定性 . 饮用水水源的污染在我国已经成为一个普遍的

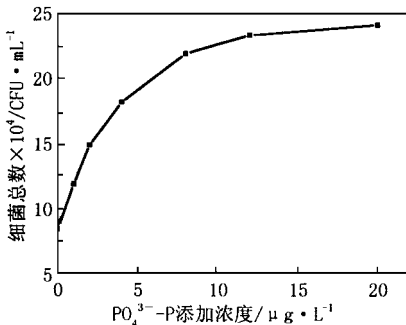


图 2 不同的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 添加量对水样 BRP 的影响

Fig.2 Effect of different phosphorus addition to BRP

事实^[18] , 其中有机物和氨氮的超标是许多水源地面临的主要问题 , 水厂出水 AOC 大多超出 100 $\mu\text{g/L}$ ^[5,19] , 难以达到保证饮用水的生物稳定性的标准 . 长期以来 , 围绕如何有效地去除受污染水源水中的有机污染物和氨氮 , 国内水处理工作者进行了大量的研究 , 对于饮用水处理过程中磷的去除研究则要少得多 . 但是传统处理工艺对于有机污染物的去除能力有限 , 而在我国现有的经济条件下 , 在水处理过程中引入深度处理对于大多数水厂来说难以承受 , 如何采用经济有效的手段来提高饮用水的生物稳定性仍然是水处理工作者的研究热点 .

试验研究表明^[14,20] , 对于水源水中磷的去除相对有机物而言容易得多 , 常规处理工艺即可以达到 90 % 以上的去除率 . 另外需要指出的是 , 水中总磷的浓度是指水中以各种形态存在的磷的总和 , 其中正磷酸盐是容易被细菌直接吸收利用的磷源 . 水环境中的磷元素往往同大分子有机物相结合或以胶体状态存在^[21] , 从而降低了微生物对其利用的可能性 , 实际上能被细菌所吸收利用的磷只占水中总磷的一部分^[20] . 因此 , 在饮用水处理工艺过程中尽可能地去除原水中的磷 , 同时 , 减少甚至杜绝水厂和输水管网中外来磷源的引入 , 保证输水管网中磷的低含量 , 使磷成为管网细菌再生长的限制因子 , 从而保证饮用水的生物稳定性 , 可以作为提高饮用水生物稳定性的一个重要途径 .

3 结论及建议

通过对我国某地水源的初步研究发现 , 此水源水经过生物预处理加常规混凝沉淀过滤处理后 , 在出水水样中添加 50 $\mu\text{g/L}$ 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (NaH_2PO_4) 后 , 可以使水中细菌的再生长能力 BRP 提高 100 % ~ 235 % . 在水样中添加各种无机盐后得到的 BRP 结果同只添加 NaH_2PO_4 得到的结果相差不大 , 而水样中添加 1 mg/L 的乙酸碳 (NaAc) 后 BRP 只增加 30 % ~ 40 % , 大大小于单独添加磷源后水样的 BRP , 这说明出水中的磷是细菌生长的限制因子 .

如果采用有效手段去除水中的磷 , 使磷成为饮用水生物稳定性的限制因子 , 在饮用水中

有机物浓度相对较高的情况下,仍然可以有效抑制管网细菌的再生长,保证饮用水的生物稳定性.由此为减少消毒过程的加氯量,降低消毒副产物的形成,提高饮用水生物稳定性,改善饮用水水质提供了一种新的思路.由于在饮用水处理流程的水质分析中,磷含量往往不作为一项日常检测指标,对于磷在饮用水各处理工艺过程中的去除情况及其作用缺乏了解,因此具体相关问题还需要进一步广泛、深入地分析和研究.

参考文献:

- 1 Bruce E Rittmann, Vernon L Snoeyink. Achieving biologically stable drinking water. *J. AWWA*, 1984, **76**(10): 106 ~ 114.
- 2 LeChevallier M W, Schulz W, Lee R G. Bacterial nutrients in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1991, (57): 857 ~ 862.
- 3 Isabel C Escobar, Andrew A Randall, James S Taylor. Bacterial growth in distribution systems: Effect of assimilable organic carbon and biodegradable dissolved organic carbon. *Environ. Sci. Tech.*, 2001, **35**(17): 3442 ~ 3447.
- 4 吴红伟,刘文君,张淑琪等. 提供生物稳定饮用水的最佳工艺. *环境科学*, 2000, **21**(5): 64 ~ 67.
- 5 刘文君,吴红伟,张淑琪等. 某市饮用水水质生物稳定性研究. *环境科学*, 1999, **20**(3): 34 ~ 37.
- 6 Peter M Huck. Measurement of biodegradable organic matter and bacterial growth potential in drinking water: a review. *J. AWWA*, 1990, **82**(7): 78 ~ 86.
- 7 Mark W LeChevallier, Nancy J Welch, Darrell B Smith. Fullscale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1996, **62**(7): 2201 ~ 2211.
- 8 Miettinen I T, Vartiainen T, Martikainen P J. Contamination of drinking water. *Nature*, 1996, **381**: 654 ~ 655.
- 9 Miettinen I T, Vartiainen T, Martikainen P J. Phosphorus and bacterial growth in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1997, **63**(8): 3242 ~ 3245.
- 10 Sathasivan A, Ohgaki S, Yamamoto K et al. Role of inorganic phosphorus in controlling regrowth in water distribution system. *Wat. Sci. Tech.*, 1997, **35**(8): 37 ~ 44.
- 11 Sathasivan A, Ohgaki S. Application of new bacterial regrowth potential method for water distribution system—a clear evidence of phosphorus limitation. *Wat. Res.*, 1999, **33**(1): 137 ~ 144.
- 12 Chandy J P, Angles M L. Determination of nutrients limiting biofilm formation and the subsequent impact on disinfectant decay. *Wat. Res.*, 2001, **35**(11): 2677 ~ 2682.
- 13 Frias J, Ribas F, Lucena F. Effects of different nutrients on bacterial growth in a pilot distribution system. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2001, **80**: 129 ~ 138.
- 14 Wataru Nishijima, Eiji Shoto, Mitsumasa Okada. Improvement of biodegradation of organic substance by addition of phosphorus in biological activated carbon. *Wat. Sci. Tech.*, 1997, **36**(12): 251 ~ 257.
- 15 水和废水监测分析方法(第三版).北京:中国环境科学出版社,1989.
- 16 Reasoner D J, Geldreich E E. A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1985, **49**(1): 1 ~ 7.
- 17 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed. Washington D. C: American Public Health Association, 1998, 9-34 ~ 9-40.
- 18 肖羽堂,张晶晶,吴鸣等. 我国水资源污染与饮用水安全性研究. *长江流域资源与环境*, 2001, **10**(1): 51 ~ 59.
- 19 余国忠,王根凤,龙小庆等. 给水管网的细菌生长可能机制与防治对策. *中国给水排水*, 2000, **16**(8): 18 ~ 20.
- 20 Markku J Lehtola, Miettinen I T, Vartiainen T Martikainen et al. A new sensitive bioassay for determination of microbially available phosphorus in water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1999, **65**(5): 2032 ~ 2034.
- 21 Baldwin D S. Reactive “organic” phosphorus revisited. *Wat. Res.*, 1998, **32**(8): 2265 ~ 2270.