

饮用水净化工艺中磷的去除研究

桑军强¹,李灵芝²,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,广东 深圳 518057; 2.清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘要: 利用一种新的微生物学分析方法,研究了原水中微生物可利用磷(MAP)以及总磷(TP)、溶解性正磷酸盐(SRP)在净水工艺中的去除情况.结果表明,生物预处理、生物活性炭及常规的混凝沉淀砂滤工艺均使水中的 MAP、TP 及 SRP 大大降低;生物预处理和生物活性炭对水中 MAP 的去除效率高于对 TP 的去除效率;常规处理对原水中 MAP 的去除率超过 90%,TP 的去除率在 80%以上.臭氧氧化对水中 TP 和 SRP 的影响不大,但是使 MAP 增加.试验原水经过净水处理后,水中可供细菌利用的磷源降低到很低的水平,说明处理后的水中磷源可能成为水中细菌生长的限制因子.

关键词: 磷; 净水工艺; 细菌再生长; 饮用水

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2003)02-0189-03

Studies on the removal of phosphorus in drinking water purification technology. SANG Jun-qiang¹, LI Ling-zhi², WANG Zhan-sheng² (1.Research Center for Environmental Engineering and Management, Shenzhen Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518057, China; 2.Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2003,23(2): 189~191

Abstract: The removal situation of MAP (microbially available phosphorus), TP (total phosphorus) and SRP (soluble reactive phosphorus) of raw water in the water purification technology was studied with a new microbiological analysis technique. The result showed that biological pretreatment, biological activated carbon and conventional technology (coagulation, sedimentation and sand-filtration) could remove greatly MAP, TP and SRP in water. The removal efficiency of MAP was higher than that of TP in the process of biological pretreatment and biological activated carbon. Over 90% of MAP and 80% of TP were removed in the conventional treatment. Ozonation did not affect TP and SRP obviously but did increase MAP. MAP source in the treated raw water decreased to very low level, which indicated that the phosphorus source in the treated water might be the limitation factor of bacterial in water.

Key words: phosphorus; water purification technology; bacterial regrowth; drinking water

近年来,国外研究发现,在砂滤池^[1]和生物活性炭^[2]的进水中添加磷源可以提高该工艺过程对进水中污染物的去除效果,另外也有研究发现水源水中的异养菌生长受到水中磷源限制的现象^[3].1996 年,Miettinen^[4]指出磷源成为饮用水中细菌再生长限制因子的情况,这一发现改变了可生物降解有机物是饮用水生物稳定性的唯一限制因子的传统观念,此后磷对饮用水生物稳定性的影响开始引起研究人员的关注,近期在国内的相关研究中才开始注意到饮用水中磷的作用,并在研究中发现了与上述国外研究相似的情况^[5].这说明,无论是从饮用水生物处理的角度,还是从饮用水在输水管网中的生物稳定性角度考虑,水

中磷源的作用需要引起足够的重视,也说明了深入了解原水中的磷源在水处理过程中去除情况的必要性.

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 是容易被细菌直接充分吸收利用的磷源,而水源水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,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源只占水中总磷的一部分.基于这一前提,Markku 等人提出了一种称为微生物可利用磷(MAP)的分析方法^[6],用来分析测定水中可被微生

收稿日期: 2002-07-17

基金项目: 科技部重大科技项目(9550610400-05-03)

* 通讯联系人

物吸收利用部分的磷含量.作者针对我国北方某水库原水进行净水处理,研究水中 MAP 及总磷(TP)、溶解性正磷酸盐磷(SRP)在各个水处理工艺过程中的去除情况,从而为有关磷在饮用水中作用的研究提供了相关试验依据.此类研究在国内尚未见到报道.

1 试验工艺与分析方法

1.1 原水处理工艺

试验中净水工艺为小试规模,每个工艺流程的水处理量为 160L/h,以下是具体采用的 2 个净水工艺流程.

工艺流程 1:原水 生物预处理 混凝沉淀 砂滤 臭氧接触柱 生物活性炭 出水.

工艺流程 2:原水 混凝沉淀砂滤 出水.

其中生物预处理采用生物陶粒工艺,滤层高 2m,运行滤速为 6m/h,气水比为 1:1.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 15mg/L,砂滤滤速为 10m/h.臭氧接触柱中臭氧投加量 4.5mg/L,水力停留时间 20~25min.生物活性炭柱炭层厚度 1.5m,滤速 8m/h.

1.2 分析方法

常规测定 COD_{Mn},同时测定 MAP、TP 及 SRP.

MAP 的测定采用 Markku 等提出的方法^[6],该方法是基于荧光假单胞菌 P17(*Pseudomonas fluorescens* P17,AOC 测定所用菌种)在水中磷源是其生长限制因子时,其生长增殖状况同水中微生物可吸收利用的磷源成正比而设计的.荧光假单胞菌 P17 不但可以吸收利用水中的 PO₄³⁻-P,对于其他形态的部分磷源也能够加以利用^[6],从而可以较全面地反映出水中可以被细菌所吸收利用的磷源总量.该方法适于测定 MAP 在 0.05~10μg/L 之间的水样^[6],对于 MAP 高于 10μg/L 的水样需要适当稀释后测定.

2 结果与讨论

试验过程中,原水 COD_{Mn} 在 4.5~5.0mg/L,工艺流程 1 出水 COD_{Mn} 在 1.5~2.0mg/L,流程 2 出水 COD_{Mn} 在 3.0~4.0mg/L.

表 1 是工艺流程 1 中各个处理过程对水中磷的去除情况.从表 1 可以看出,生物预处理、常规处理和生物活性炭处理均使水中的 MAP、TP 及 SRP 降低,臭氧氧化对水中 TP 和 SRP 的影响不明显,却使 MAP 增加了 146.8%.这说明臭氧的氧化作用可以提高水中磷源的可微生物利用性.这是由于水中含有磷元素的大分子有机物质在被臭氧氧化的过程中变为小分子物质,导致这部分磷源的形态结构随之发生变化,从而容易被荧光假单胞菌 P17 利用.

表 1 流程 1 中各处理过程对水中磷的去除情况(μg/L)

Table 1 Phosphorus removal in every treatment unit of treatment process 1 (μg/L)

指标	原水	陶粒出水	常规出水	臭氧氧化出水	生物活性炭出水
MAP	14.26	3.76	1.09	2.69	0.47
TP	26.3	12.8	4.4	4.3	< 2
SRP	4.7	2.9	< 2	< 2	< 2

从表 1 还可看出,生物陶粒预处理对原水中 MAP 的去除率超过 70%,而对 TP 的去除率为 51.3%;生物活性炭处理对 MAP 的去除率超过 80%.这两个过程,主要是利用生物膜中微生物的生命活动对水中的污染物进行去除,微生物在生长繁殖过程中需要吸收一定的磷源,如果水中可供微生物利用的其他营养物质相对丰富,必然会大大降低水中 MAP 的含量.

表 2 是工艺流程 2 对水中磷的去除情况.由于原水中总磷含量较低,除了直接针对原水进行常规混凝沉淀砂滤处理外,另外在原水中添加 25μg/L 的 PO₄³⁻-P(H₃PO₄)后进行同样处理,考察了该常规工艺对水中磷的去除情况.

表 2 流程 2 对水中磷的去除情况(μg/L)

Table 2 Phosphorus removal in treatment process 2 (μg/L)

指标	原水	出水	原水 (外加磷源)	出水 (原水外加磷源)
MAP	14.26	1.28	39.03	2.58
TP	26.3	4.6	50.2	5.2
SRP	4.7	< 2	29.0	< 2

由表 2 可见,常规的混凝沉淀砂滤过程对水中磷的去除非常有效.MAP 的去除率在 90%以上,TP 的去除率在 80%以上.相关试验已经表明,常规处理对水中 TP 的去除非常有效^[7].试验表明,混凝沉淀砂滤对 MAP 的去除也很有效.

在原水总磷低于 50.2 $\mu\text{g/L}$ (《地表水环境质量标准》中 3、4 类湖、库水的标准^[8])的情况下,通过常规的混凝沉淀砂滤(工艺流程 2)可以使原水中的 MAP 降低到 3 $\mu\text{g/L}$ 以下,通过工艺流程 1 则使 MAP 降低到 0.5 $\mu\text{g/L}$ 以下.这说明,原水在经过净水处理过程后,水中可供细菌利用的磷源可以降低到很低的水平.对于水中有机污染物的去除相对水中磷源的去除则困难许多,往往难以保证把原水中的可生物降解溶解性有机碳(BDOC)降低到 0.5 mg/L 以下^[9].一般认为微生物的生长需要的有机碳、磷的比例为 100:1 左右^[10],也有学者提出这一比例为 100:1.7~2.0^[7].这说明,相对于水中可生物降解有机碳而言,水中的磷更容易被充分去除,处于相对缺乏的状态,预示着磷源可能会成为水中细菌生长和其生物稳定性的限制因子.

从饮用水生物处理的角度分析,由于单纯的常规处理工艺对水中磷源的去除已经十分有效,若在常规处理后增加臭氧活性炭深度处理工艺,虽然臭氧氧化会使 MAP 增加,但同时水中有机物的可生化部分也会增加^[11],因此也存在磷源会限制生物活性炭中微生物作用的可能.

3 结论

3.1 生物预处理和生物活性炭处理使原水中的 MAP、TP 及 SRP 降低,两者对水中 MAP 的去除效率高于对 TP 的去除效率.

3.2 臭氧氧化对水中 TP 和 SRP 的影响不大,但是可以提高水中磷源的可微生物利用性,使 MAP 增加.

3.3 常规的混凝沉淀砂滤对水中磷的去除非常有效.对原水 MAP 的去除率在 90%以上,对原水 TP 的去除率在 80%以上.

3.4 原水经过净水处理过程后,水中可供细菌利用的磷源可以降低到很低的水平,而且常规处理工艺对水中磷源的去除已经十分有效,这说明了磷源成为水中细菌生长和生物活性炭深度处理中微生物作用限制因素的可能.

参考文献:

- [1] Van der Aa L T J, Kors L J, Wind A P M, *et al.* Nitrification in rapid sand filter: phosphate limitation at low temperatures [J]. Water Science Technology: Water Supply, 2002,2(1):37-46.
- [2] Yoshizaki T, Ozaki M. On removal of nitrogen by addition of phosphoric acid in ozone-granulated active carbon treatment [J]. Water Supply, 1993,11(3/4):321-330.
- [3] Charles N Haas, Paul Bitter, Peter A Scheff. Preliminary determination of limiting nutrients for standard plate count organisms in Chicago intake water [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1988,37:65-72.
- [4] Miettinen I T, Vartiainen T, Martikainen P J. Contamination of drinking water [J]. Nature, 1996,381:654-655.
- [5] 桑军强,余国忠,王占生.磷浓度与饮用水生物稳定性的关系 [J]. 中国环境科学, 2002,22(6):534-536.
- [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] Sathasivan A, Ohgaki S. Application of new bacterial regrowth potential method for water distribution system-a clear evidence of phosphorus limitation [J]. Wat. Res., 1999,33(1):137-144.
- [8] GB3838-2002,地表水环境质量标准 [S].
- [9] 刘文君,吴红伟,张淑琪,等.某市饮用水水质生物稳定性研究 [J]. 环境科学,1999,20(3):34-37.
- [10] Mark W LeChevallier, William Schulz, Ramon G Lee. Bacterial nutrients in drinking water [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1991, 57(3):857-862.
- [11] Camel V, Bermond A. The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment [J]. Wat. Res., 1998,32(11): 3208-3222.

作者简介: 桑军强(1974-),男,山东潍坊人,清华大学深圳研究生院环境工程与管理研究中心博士后,主要从事水污染防治技术研究.已发表论文 3 篇.