

饮用水配水系统生物稳定性的控制指标的应用

张 卿¹, 杨艳玲², 李 星², 崔崇威¹, 纪 峰³, 李圭白¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;
2. 北京工业大学 土木工程学院, 北京 100022; 3. 哈尔滨供排水集团, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 围绕着配水系统中水的生物稳定性问题, 从微生物的营养基质出发, 对比分析了国内外不同生物稳定性控制指标的研究现状, 并分别就 BDOC(可生物降解溶解性有机碳)、AOC(生物可同化有机碳)、MAP(可生物利用磷)和 TP(总磷)各自的测定方法及工程研究中的应用进行比较, 结果表明, 单一控制指标很难全面地反映配水管网的生物稳定性, 必须将上述四项指标综合考虑。

关键词: 生物稳定性; 可生物降解溶解性有机碳(BDOC); 生物可同化有机碳(AOC); 可生物利用磷(MAP);

中图分类号: TU991.2

文献标识码:

文章编号: 1672 - 0946(2005)01 - 0030 - 05

Study on different indicators of controlling biological stability in drinking water supply system

ZHANG Qing¹, YANG Yan-ling², LI Xing², CUI Cong-wei¹, JI Feng³, LI Gui-bai¹

(1. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. School of Architecture & Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;
3. Harbin Water Supply and Drainage Group, Harbin 150001, China)

Abstract: On the basis of microbial nutrients and bio-stability, the research on different indicators of controlling bacterial regrowth is discussed, BDOC, AOC, MAP and TP are investigated contrastively, the measurement and the progress of each indicators are compared separately. It is concluded that single indicator of controlling is difficult to indicate the biological stability in drinking water system completely, the four indicators must be considered synthetically.

Key words: biological stability; biodegradable dissolved organic carbon(BDOC); available organic carbon(AOC); microbial available phosphorus(MAP);

近年来关于给水管网上生物膜的生长、管网水中细菌再生长和大肠杆菌的突然爆发的研究越来越多^[1~3], 主要原因就是出厂水或管网水不是生物稳定水。饮用水水质的生物稳定性是指饮用水中可生物降解的异养细菌生长的潜力。微生物在供水管网中再生长直接反映了饮用水中有机物的生物降解性。供水系统中限制异养细菌生长的办法一般比较简单, 就是控制营养基质。加氯当然可以在一定程度上控制了细菌的生长, 但不能杜绝细菌的生长, 而且加氯后消毒的副产物将会大大增加, 因而

降低了饮用水的安全性^[4]。所以要提高饮用水的生物稳定性, 并且保证用水安全, 为有效控制营养基质, 选择合适的控制指标是很有意义的。本文就国内外迄今对不同生物稳定性控制指标进行了系统的评述。

1 影响管网生物稳定性的主要因素

从水厂到用户有大大小小的管道、水箱、水塔等繁多装备, 从而构成了巨大的复杂的输配水管

收稿日期: 2004 - 11 - 05.

基金项目: 国家自然科学基金(50378004)。

作者简介: 张 卿(1981 -), 女, 硕士研究生, 研究方向: 饮用水处理。

网.检测合格的出厂水在管网中也可能发生细菌的再生长,造成饮用水的二次污染,影响水的嗅味和色度,并引发致病菌的繁殖.影响细菌在管网中再生长因素有很多,除消毒剂余量,还包括营养基质、水力因素、温度、管材和管段的腐蚀情况.

1.1 杀菌剂的失效

出厂水通过加氯或氯胺消毒并保持管网中有一定余氯以控制细菌的生长.在氯消毒过程中,部分细菌或大肠杆菌在管网中修复,重新生长.自由氯在水中易分解,而且保持较高质量浓度的自由氯(3~5 mg/L)仍难以完全抑制生物膜的形成.有的细菌有抗氯性,少量的余氯可能不起作用.

1.2 管道的腐蚀和结垢

水在管网中流动时,有些水中化合物会发生复杂的分解或化合作用.饮用水中还有可能被细菌利用的有机物,水或管壁的材质也会发生化学作用,使管道内微生物繁殖并在管道内形成生物膜及沉淀物.生物膜诱导形成管道腐蚀,结垢形成管垢,结垢和腐蚀的产物以及管道的粗糙内壁又为细菌的繁殖提供了基地.

1.3 水力因素

增加流速可以使更多的营养基质带到管壁膜处,同时也增加了氯量与管壁生物膜的冲刷作用.水中虽然有余氯,但在管壁层流区(传质很差)或在弯头处、接头处,在这些坑凹处都是残存细菌的隐蔽场所.死水区由于没有氯,往往导致微生物生长,水质恶化.

1.4 营养物质

微生物所需营养元素是微生物生命活动的物质基础,微生物生长需要有机碳、氮、磷的比例为100:10:1左右.任何一种营养物质的缺乏都会使微生物的生长受到限制.水源水不同程度受到了污染,经净化水厂常规工艺处理后仍然有有机物和营养物质存在于出厂水中.这样,出厂水中的细菌与复活的细菌就有可能利用这些有机物作为营养物质生长繁殖.

2 饮用水配水管网生物稳定性控制指标及其应用

在饮用水配水管网中,微生物生长所需的有机碳、氮、磷含量相对较低,水中这种有机物很难用化学办法加以测定,所以必须用生物检测办法.

2.1 生物可同化有机碳(AOC)

生物可同化有机碳(assimiable organic carbon)是饮用水中细菌的有机营养基质,是可生物降解有

有机物中最易被细菌同化为细菌体那部分,AOC与异养菌在管网中的繁殖有密切的关系,是异养细菌直接用以新陈代谢的物质和能量来源^[4].目前AOC被普遍认为是评价饮用水中生物稳定性的指标,可以衡量异养细菌如大肠杆菌在给水管网中的再生长(Regrowth)潜力.有研究认为,在不加氯的情况下,AOC<10~2×10⁻²mg 乙酸碳/L的饮用水为生物稳定水,而在加氯时,AOC<5×10⁻²~1×10⁻¹mg 乙酸碳/L的饮用水为生物稳定水.

2.1.1 测定方法

AOC的测定方法是由Van der kooij 首先提出,后来又有人经过几次改进.以饮用水中普遍提出的荧光假单胞菌 P17 (Fluorescent Pseudomonads) 和一种螺旋菌 NOX(Spirillum) 为测试菌株,以乙酸牌作为标准基质,分别取一定体积的水样于经过无碳化处理的磨口玻璃瓶中,现场进行巴氏消毒(70℃, 30 min),以杀死植物细胞和无芽孢细菌,加冰冷藏尽快运回实验室,接种2种菌株进行培养,达到平台期后平板计数,根据乙碳酸的产率系数分别计算出AOC-P17和NOX,试验结果为二者之和.

$$AOC = \left[\frac{P17(cfu/mL) - 空白对照(cfu/mL)}{P17产率系数(cfu/\mu g)} + \frac{NOX(cfu/mL) - 空白对照(cfu/mL)}{NOX产率系数(cfu/\mu g)} \right] \times 1000$$

2.1.2 接种方法

目前对于P17和NOX的接种方法有3种.第1种是将待测水样分为2份,分别接种P17和NOX,将待测的结果相加作为总的AOC,这种方法可简称为分别接种法.第2种方法是在水样中同时接种P17和NOX,因为2种菌的形状和大小差别较大,比较容易区分,因此可以通过平板计数数出各自的细菌数,算出AOC质量浓度,这种方法可称为同时接种法.而清华大学提出第3种方法,即先接种P17于水样中,当P17达到生长稳定期后将该水样巴氏灭菌以杀死P17菌然后将水样再接种NOX菌,然后将P17细菌数和NOX细菌数分别转换成AOC-乙酸碳质量浓度和AOC-草酸碳质量浓度,这种方法可简称为先后接种法^[5].3种方法的特点比较如表1所示.

表 1 3种接种方法的特点

方法的特点	可靠性	可操作性	工作量	实验时间
分别接种法	差	易	大	短
同时接种法	差	难	小	短
先后接种法	强	难	大	长

笔者认为,希望短时间内得到的结果,可以选用第 1 种方法;如果对水样的 AOC 质量浓度范围比较了解,使用平板计数法时 P17 的菌落数为 30~200 cfu 之间,可以选用方法 2;如果时间充分,对水样缺乏了解,则应选用方法 3^[6].

2. 1. 3 AOC 的工程应用

国内外对 AOC 做了一些研究,他们主要研究水源水质和出厂水以及管网中 AOC 质量浓度的关系,饮用水中 AOC 和 BDOC 之间的定量关系,水处理工艺对 AOC 去除效果(如表 2 所示),氯氧化和细菌活动对 AOC 影响以及氯、消毒副产物与 AOC 的关系.

表 2 不同水处理工艺对 AOC 的去除效果

工艺	研究者	AOC 的去除效果
常规工艺	刘文君等 ^[7]	去除率小于 30 %
	王丽花等 ^[8]	AOC - P17 去除率为 43. 8 %~82. 3 %,AOC~NOX 去除率为 19. 3 %~34. 7 %
	Randtke ^[9]	采用低 pH 值对 AOC 去除影响小
强化混凝		比较混合滤料对水质生物稳定性的影响,发现 GAC - 砂更好,可以使 AOC 小于 1×10^{-1} mg/L
强化过滤	Lechevllier ^[10]	强化生物过滤对 AOC 的去除率可达 90 %以上
生物氧化预处理	Miltner ^[11]	生物处理技术可使 AOC 低于 1×10^{-2} mg/L
	Huck ^[12]	生物陶粒预处理对 AOC 去除率达 45 %
	吴红伟等 ^[13]	AOC 去除率达 37. 7 %
	张淑琪等 ^[14]	
臭氧 - 生物活性炭	Hu 等 ^[15]	臭氧使 AOC 升高 2. 19 倍,但 O ₃ - BAC 工艺对 AOC 去除率达 80 %
膜过滤	李灵芝等 ^[16]	RO 可以使 AOC 去除率达 76 %
	龙小庆等 ^[17]	NF 对 AOC 去除率达 79. 8 %以上

2. 1. 4 AOC 的测定存在的问题

- 1) 只用单一的菌种(荧光假单胞菌 P17 和螺旋菌 NOX)降解简单的低分子有机物,不能代表实际给水管网细菌的混合生长状况和细菌胞外酶对大分子有机物的分解作用;
- 2) 菌种的来源和保存复杂;
- 3) 实验数据不稳定,重复性差,有较大的误差;
- 4) 耗时,至少要 6~7 d^[18],操作要求高;

2. 2 可生物降解有机碳(BDOC)

BDOC(可生物降解溶解性有机碳)是水中细菌和其它的微生物新陈代谢的物质和能量来源,为了更准确地分析水中的混合菌对可生物降解有机物的分解和利用状况,人们将 BDOC 作为衡量生物稳定性的指标.

Joret 认为 BDOC 小于 0. 1 mg/L 时大肠杆菌不能在水中成长,Dukan^[19]等人通过动态模型计算出管网中 BDOC 低于 0. 2~0. 25 mg/L 时能达到水质生物稳定. Laurent^[20]等人通过 SANCHO 模型计算出 BDOC 小于 0. 15 mg/L 时异养细菌在水中不能生长.

2. 2. 1 测定方法

Servais 和 Billen 等人于 1987 年提出了 BDOC 测定方法,是目前国外 BDOC 方法的测定基础.

BDOC 的悬浮培养测定法是将待测水样经膜过滤去除微生物,然后接种一定量的同源细菌(同源细菌也可称为土著细菌(Indigenous bacteria)即在与待测水样相同的水源环境中生长的细菌). 在恒温条件下,(一般为 20 °Q 培养 28 d,测定培养前后 DOC(溶解性有机碳)的差值为 BDOC.

$$BDOC = DOC_0 - DOC_{28}$$

动态循环培养测定法测定 BDOC 的原理是让待测水样不断循环通过具有生物活性的颗粒载体,使水中可被生物降解的有机物充分分解,直至反应器出水的 DOC 值保持恒定或达到最低值,在此过程中在一定时间间隔里测水样 DOC 的值,最初的 DOC 值与最低的 DOC 值之差为 BDOC. 清华大学对接种的悬浮土著细菌和将水样循环通过生物膜反应器的方法进行了研究^[21],认为悬浮法的好处是可以测定多个水样,而生物膜法循环培养法一次只能测定一个水样,但对于评价水源中的有机物的可生物降解性和是否采用生物处理技术有重要的意义.

2.2.2 BDOC的工程应用

BDOC测试技术比较成熟稳定,操作简便^[4],缺点是BDOC没有AOC灵敏。

清华大学刘文君^[21]认为,BDOC悬浮培养28 d测定时间太长,不能及时反映水中BDOC含量的变化,在实际应用中受限。研究了以培养3 d的BDOC测定值(BDOC₃)来代替28 d的BDOC测定值(BDOC₂₈)的可行性问题,BDOC₃及时反映水中可生物降解溶解性有机碳含量,有实用价值。

哈尔滨工业大学^[4]优化求解针对东北某市饮用水水质的BDOC降解动力学常数,建立了BDOC降解动力学方程,并且研究了BDOC和细菌总数在管网中的变化规律。

Lyonnaise des Eaux^[22]等人认为对于出厂水BDOC的质量浓度存在一个阈值,当出厂水BDOC质量浓度低于这个阈值时,管网中的细菌繁殖将会受到限制。

Colin channock^[23]测定Nowegian的原水和饮用水中的BDOC和AOC,发现BDOC可以被完全去除,说明BDOC所表示的有机物的分子量比AOC大。

2.3 BDOC和AOC联合使用

Iscale C, Esobar等通过采用膜技术进行实验,发现NF可以去除BDOC达90%以上,而AOC去除率很低。BDOC会使NF后水的生物稳定性偏高,而AOC会使NF后水的生物稳定性偏低,认为应把AOC和BDOC两个指标相结合来判断水的生物稳定性。如果重点研究生物的再生长,那么就用AOC指标,如果重点研究生物过程中需氯量和消毒副产物的形成潜能,那么就用BDOC指标。单独考虑其中一个,会使得生物稳定性偏低或偏高^[18]。

2.4 可生物利用磷(MAP)和总磷(TP)

1996年Miettenen等指出饮用水中细菌的生长受到水中磷限制的情况^[24],这一发现改变了可生物降解有机物是饮用水中唯一限制因子的传统概念。

细菌可以利用的3种形式的磷源为:无机磷酸盐(Inorganic phosphates, Pi)、有机磷酸酯(Organic phosphates)和磷酸酯(phosphates, Pn)按照营养状态,溶解性的磷酸盐是可以被微生物完全利用的^[25]。MAP^[26](microbially available phosphorus)可生物利用磷是一种生物检测技术,以荧光单胞菌为测试菌株,它不但可以吸收利用水中的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$,对于其他形态的部分磷源也能加以利用,从而可全面反映出水中可以被细菌所吸收的磷源总量。

2.4.1 测定方法

MAP是芬兰学者Lehtola等^[27]提出的,是在消除其他元素生长的情况下,以P17为测试菌,磷酸盐(NaH_2PO_4)为磷源,对生长稳定期的细菌进行平皿计数法,根据不同质量浓度的磷与该质量浓度下的P17达到生长稳定期的数量 $N_{\max}$ 作标准曲线,得到一条有较好相关性的直线,求出MAP的产率系数。Lehtola等提出的产率系数为 $3.73 \times 10^8 \text{ cfu}/\mu\text{gPO}_4^{3-}-\text{P}$,而清华大学实验研究得到产率系数为 $1.10 \times 10^9 \text{ cfu}/\mu\text{gPO}_4^{3-}-\text{P}$,从而求出磷的质量浓度。该方法适用于MAP在 $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$ 之间的水样,对于MAP高于 $1 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$ 的水样,需要适当稀释后加以测定。

有关研究指出^[27,28]: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)质量浓度低于 $1 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$,磷对水中细菌生长的限制因子作用将会表现出来。Sathisvan等提出:当磷的质量浓度为 $1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ 时,磷可能成为饮用水中微生物生长的限制因子。

2.4.2 MAP和TP应用中值得注意的几个问题

水中总磷是指水中以各种形态存在的磷的总和。正磷酸盐是容易被细菌直接利用了的磷源,而水环境中的磷元素往往是同大分子有机物相结合或以胶体状态而存在,从而降低了微生物对其利用的可能性,实际上能被细菌利用的磷只占水中TP的一部分^[26,29]。水中的TP测定简单的多,而且以现有的化学分析方法对水中的TP最低值可达到了 $2 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ ^[26,30]。

当水中的TP在 $8 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$ 左右,常规水处理过程即可使水中总磷降到 $5 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$,从而使磷成为出水中细菌生长的限制因子^[31]。但是Miettenen等对芬兰饮用水研究后指出尽管总磷低于 $2 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$,但足够维持微生物大量繁殖。

以TP作为控制饮用水中生物稳定性的指标并不是要以TP完全取代AOC这一控制饮用水生物稳定性的指标。在实际的分析中要根据具体情况进行确定。如果水中TP低于 $5 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$,说明基本可以保证目前饮用水生物稳定性标准,不必分析水中AOC的含量,而如果水厂出水中的TP较高,还需要测定AOC以确定是否达到饮用水生物稳定性的标准。

3 结 语

从国内外研究情况,可以认为:

1) AOC(可同化有机碳)是被普遍认为的评价生物稳定性的主要指标,但耗时长,操作要求高。

2) BDOC(可生物降解溶解性有机碳)小于 0.15 mg/L 是生物稳定水,并且操作简单。

3) AOC 和 BDOC 应当相辅相成,同时作为控制指标。

4) 当有机物充足时,磷会成为微生物生长的限制因子,MAP(可生物利用磷)小于 1×10^{-2} mg/L, TP 小于 5×10^{-3} mg/L 时可以限制微生物的生长。

5) AOC、BDOC、TP 和 MAP 这些指标合理的选择可以更好的控制饮用水的生物稳定性。

参考文献:

- [1] LIU W, WU H. Investigation of assimilable organic carbon (AOC) and bacterial regrowth in drinking water distribution system [J]. Wat. Res., 2002(36): 891 - 898.
- [2] PATRICK N, PIERRE S. Bacterial Dynamics in the drinking water distribution system of Brussels [J]. Wat. Res., 2001, 35(3): 675 - 682.
- [3] 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[J]. 中国给水排水, 2000, 16(8): 18 - 20.
- [4] 马剑薇. 供水管网水质生物稳定性及其影响因素[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2000.
- [5] PAODE R D, AMY G L. Predicting the Formation of Aldehydes and BOM [J]. AWWA, 1997, 89(6): 79 - 93.
- [6] 刘文君,王亚娟. 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.
- [7] 刘文君,吴红伟,张淑琪. 某市饮用水水质生物稳定性研究[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 34 - 37.
- [8] 王丽花,周 鸿,张晓健,等. 某市饮用水生物稳定性研究[J]. 给水排水, 2001, 27(12): 23 - 25.
- [9] RANDTAK S J. Organic Contamination Removal by Coagulation and Related Process Combination [J]. AWWA, 1988, 80(5): 40 - 56.
- [10] LECHÉVALIER M W, BECKER W C, SCHORR P, et al. Evaluating the Performance of Biological Active Rapid Filters [J]. AWWA, 1992, 84(4): 136 - 146.
- [11] MILNER R J, SHUKAIRY H M, SUMMERS R S. Disinfection By-product formation and control by Ozonation and Biotreatment [J]. AWWA, 1992, 84(11): 53 - 62.
- [12] HUCK P M, FEDORAK P M, ANDERSON W B. Formation and Removal of Assimilable Organic Carbon During Biological Treatment [J]. AWWA, 1991, 83(12): 69 - 80.
- [13] 吴红伟,刘文君,张淑琪,等. 提高生物稳定饮用水的最佳工艺[J]. 环境科学, 2000, 21(3): 64 - 67.
- [14] 张淑琪,刘彦竹,胡江泳,等. 臭氧氧化自来水生物稳定性研究[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 34 - 36.
- [15] HU J Y, WANG Z S, NG W J, et al. The effect of Water Treatment Processes on the Biological Stability of Potable Water [J]. Wat. Res., 1999, 33(11): 2587 - 2592.
- [16] 李灵芝. RO 深度处理自来水中有毒物质 [J]. 辽宁化工, 1998, 27(5): 271 - 273.
- [17] 龙小庆,罗 敏,王占生. 活性炭 - 纳滤膜工艺去除饮用水中总有机碳和可同化有机碳 [J]. 水处理技术, 2000, 26(6): 351 - 354.
- [18] ISABEL C, ESCOBAR S. Assimilable Organic Carbon (AOC) And Biodegradable Dissolved Organic Carbon (BDOC): Complementary Measurement [J]. Wat. Res., 2001, 35(8): 4444 - 4445.
- [19] DUKAN S, LEVI Y. Dynamic Modeling of Bacterial Growth in Drinking Water Networks [J]. Wat. Res., 1996, 30(9): 3148 - 3761.
- [20] LAURENT P, SERVAIS P. Testing the SANCHEZ Model on Distribution Systems [J]. AWWA, 1997, 89(7): 5446 - 5459.
- [21] 王占生,刘文君. 微污染水源饮用水处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999.
- [22] LYONNSISE D E, LABORATOIRE L M. Dynamic modeling of bacterial growth in drinking water network [J]. Water Research, 1996, 30(9): 1991 - 2002.
- [23] CONLIN C, OCELE K. Assimilable Organic Carbon and Biodegradable Dissolved Organic Carbon in Norwegian raw and drinking waters [J]. Wat. Res., 2000, 34(10): 2629 - 2642.
- [24] MIETTINEN I T, VARTIAINEN T, MARKAINEN P J. Phosphorus and Bacterial growth in drinking water [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1997, 63(8): 3242 - 3245.
- [25] 姜登岭,张晓健. 饮用水中磷对微生物生长的限制作用[J]. 中国给水排水, 2004, 20(1): 26 - 28.
- [26] MIETTINEN I T, VARTIAINEN T, MARKAINEN P J. Phosphorus and Bacterial growth in controlling regrowth in water distribution system [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1997, 63(8): 3242 - 3245.
- [27] MARKKU J L, MIETTINEN I T, VARTIAINEN T, et al. A new sensitive bioassay for determination of microbe phosphorus in water [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1999, 65(5): 2032 - 2034.
- [28] SATHASIVAN A, OHGAKI S, YAMAMOTO K. Role of inorganic phosphorus in controlling regrowth in water distribution system [J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 35(18): 37 - 44.
- [29] American Public Health Association. Standard Methods For the Examination of water and wastewater [M]. Washington D C: American Public Health Association, 1998.
- [30] BALDWIN M, MARKKU J, MIETTINEN I, et al. Reactive "organic" phosphorus revisited [J]. Wat. Res., 1998, 32(8): 2265 - 2270.
- [31] SATHASIVAN A, OHGAKI S. Application of new bacterial regrowth method for water distribution system - a clear evidence of phosphorus limitation [J]. Wat. Res., 1999, 33(1): 137 - 144.