

饮用水生物稳定性控制指标探讨

杨艳玲¹ 李 星¹ 李圭白² 张 卿²

(1 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022; 2 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要 结合给水管网中饮用水微生物再生长现象, 分析了 AOC 作为反映饮用水生物稳定性的替代参数所存在的问题。根据饮用水处理系统中微生物营养的种类及特点, 以及磷在微生物生长和代谢过程中的关键作用, 提出同时检测和控制磷含量来保证饮用水生物稳定性的观点, 并对磷和 AOC 共同作为饮用水生物稳定性控制指标的可行性进行了探讨。

关键词 磷 AOC 饮用水 生物稳定性

Approach of phosphorus and AOC as control index of drinking water bio-stability

Yang Yan-ling¹, Li Xing¹, Li Gui-bai², Zhang Qing²

(1. School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The problems caused by using parameter assimilable organic carbon (AOC) as a surrogate indicator for the biological stability of drinking water were discussed combined with the appearance of microbial regrowth inside the drinking water distribution lines. The kinds and characteristics of nutrients used by microorganisms in water were investigated and on the basis of concerning the key effect of phosphorus in growth and metabolism of microorganisms, it was proposed that the bio-stability of the drinking water could be ensured by way of simultaneous monitoring and control of P content and AOC level. The feasibility to use both phosphorus and AOC as control index for drinking water bio-stability has been approached.

Keywords: Phosphorus; Assimilable organic carbon (AOC); Drinking water; Bio-stability

0 引言

近年来, 作为饮用水水源的天然水体普遍受到了严重的污染, 受污染的水源水存在有机污染物含量高的特点。在传统的水处理工艺中, 有机物的增加, 必然导致氯耗的增加, 而高浓度的氯与原水中高浓度的有机污染物直接反应, 会造成大量有毒有害消毒副产物的生成, 使水的化学安全性下降。另外, 水源水中有机污染物、氮、磷等作为可被细菌利用的营养物质为管网中微生物的繁殖和生长提供了条

件, 使得处理后的水出现细菌再生长的现象, 由此导致病原微生物的大量繁殖, 使水的微生物安全性降低。

饮用水的微生物学安全性是饮用水卫生安全性的首要问题, 保证饮用水微生物学安全性的主要方法是对水进行消毒。但是, 近年来发现在城市给水厂中经过消毒合格的饮用水, 在向市区输送过程中, 即使保证一定的余氯量, 水中的异养细菌在有机物存在的条件下仍有增多的现象, 这种现象被认为是水的生物学不稳定性。

生物学不稳定的饮用水, 一方面会使水中未被

国家自然科学基金资助项目(50378004)。

消毒杀死的细菌重新生长,而水中细菌的不断增加,意味着水中存在致病微生物的可能性增大,从而使饮用水的卫生安全性降低;另一方面,部分细菌随机附着在管壁上,利用水中的营养基质生长成生物膜,导致管壁结垢、腐蚀,降低管网输水能力,增加二级泵站动力消耗,甚至发生爆管事故。因此,提高饮用水的生物学稳定性对保证供水安全及供水水质具有重要意义。

生物稳定的饮用水是指配水系统中不会引起大肠杆菌等异养细菌再生长的饮用水。长期以来,有机碳被认为是控制饮用水中异养细菌繁殖的最主要营养物质,可同化有机碳(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^[1~3]。而近年来,国外学者在研究中发现,对于某些水质,无机营养物质磷也对微生物的代谢起到关键性作用^[4,5]。本文结合水处理系统中微生物的营养物质种类特点,对碳、磷在微生物生长和代谢过程中的关键作用以及常规水处理工艺对磷及AOC的去除效果进行分析,探讨磷和AOC共同作为饮用水生物稳定性控制指标的可行性。

1 AOC作为饮用水生物稳定性控制指标

1.1 AOC与饮用水生物稳定性

常规给水处理的工艺流程主要以去除原水中颗粒物质为主要目的,以反应沉淀、过滤和消毒为基础的工艺具有多级屏障的功能,可以对包括颗粒物质、病原微生物、一定数量的有机污染物质等有很好的去除效果。但当原水受到较严重的污染时,就可能会有相当数量的有机污染物质不能去除,出水中的微污染物质含量会大量增加,对于这样的出水水质,即使保持管网中较高的余氯量也不能完全控制细菌的生长^[6]。一般认为,碳元素,即有机物是微生物生长最主要的限制因子,出厂水中存在的有机物是细菌在管网中繁殖的必要条件,氯消毒后未杀死的细菌的自我修复生长以及外源细菌进入管道是细菌生长的内在因素,而管道的本身特点如管道内壁粗糙度、边界层效应、悬浮及胶体物质的沉积都为细菌的生长提供了基地。而有机物中,生物可同化有机碳(AOC)是最易被微生物利用合成细胞体的有机物,与异养细菌在给水管网中的生长繁殖密切相关。通过调查实际的给水系统发现^[7],AOC在管网中逐渐

下降,AOC下降最多时,细菌计数也最多。因此,在现阶段的研究中,主要采用AOC这一指标来评价水的生物稳定性。认为^[8]在不加氯的情况下,AOC在10~20 $\mu\text{g/L}$ 的饮用水为生物稳定的饮用水;在加氯时,AOC在50~100 $\mu\text{g/L}$ 的饮用水为生物稳定的饮用水。但也指出在AOC浓度显著低于10 $\mu\text{g/L}$ 时,仍可从水中分离出大肠杆菌,因而,在给水处理厂的出水端,通过控制AOC达到痕量水平,仍很难抑制细菌的再生长。

1.2 AOC的测定方法

AOC测定方法是由荷兰Van der Kooij博士于1982年首先提出的,后来被广泛用来评价饮用水在输水管网中的生物稳定性及水处理工艺对可同化有机碳的去除效能^[6,9,10]。在这期间,AOC的测定方法不断完善,试验时间大为缩短,试验菌种也由原来的P17(*Pseudomonas fluorescens*)1种,增加到P17和NOX(*Spirillum*)2种菌种配合使用,使得该测试方法对水中AOC含量反映得更为全面^[6,11]。

AOC测定方法中P17和NOX的接种方法有3种^[6]:①分别接种法;②同时接种法;③先后接种法。3种方法中,分别接种法由于重复计算了水样中两种菌株都能利用的那部分有机物,会使测定值偏大,而对于不同的水样,两菌种可共同利用的有机物含量可能不同,这种误差的大小也可能不同。因此,分别接种法在对不同水样进行测定时,其可比性较差,有较大的缺陷。同时接种法避免了分别接种法的缺陷,但由于接种的两种菌株大小不一,达到稳定期的时间不同(P17为2~3 d,NOX为4~5 d),当稀释倍数不合适时,在同一培养皿上,有时会发生NOX被P17掩盖的现象,影响测定结果,因此,采用第二种方法时应应对水样中AOC含量范围有所了解。先后接种法符合NOX是对P17不能利用的基质补充的原理,但会出现P17菌体的溶解和代谢产物使NOX值偏大的现象,不过由于属于系统误差,不影响不同水样测定值的可比性。但这种方法测定时间较长(第一、二种方法需时6~7 d,第三种方法需时9~12 d),也是实际应用中应考虑的。

1.3 水处理工艺去除AOC的效果

鉴于AOC与饮用水生物稳定性的密切关系,国

内外学者在水处理工艺对 AOC 去除效果方面进行了大量的研究工作,结果表明^[1,10,12,13],常规处理工艺对 AOC 的去除效果波动较大,为 7.8%~48.8%,多数情况下小于 30%;强化混凝可提高混凝工艺对有机物的去除效率,对 AOC 的去除率比原工艺提高 0~29%;生物活性炭对 AOC 去除效果较好,去除率达 60%;纳滤膜对 AOC 的去除率为 80%;臭氧—活性炭工艺对 AOC 的去除率为 83%。因而对于水质较好的水源水(AOC 在 200~300 $\mu\text{g/L}$),可采用常规处理—生物活性炭工艺或臭氧—活性炭工艺等深度处理工艺,从而得到生物稳定的饮用水。

由此可见,为降低 AOC 含量,使饮用水具有良好的生物稳定性,必须对水进行深度处理,如活性炭吸附和生物处理等,但处理成本高、操作复杂。从我国给水厂目前的实际情况看,由于水处理工艺技术落后、原水水质污染严重、资金有限等多方面原因,要达到 AOC 含量低于 50 $\mu\text{g/L}$ 的限定值是非常困难的,即使是对技术发达的美国和加拿大的给水厂进行调查,结果也显示,95%的地表水水厂和 50%的地下水水厂不能达到 50 $\mu\text{g/L}$ 的标准。针对这一实际情况,提出的近期 AOC 建议控制值仅为 200 $\mu\text{g/L}$,这对于少数水源水质很好的给水厂有可能达到,但绝大多数给水厂仍很难实现,而且 200 $\mu\text{g/L}$ 限定值实际上已经完全可以造成微生物的再生长。另外,水中营养物质来源有多种途径,很难控制其来源,例如,经过臭氧和加氯消毒后的水,AOC 的含量均会有相当幅度的增加,可能造成饮用水在管网中重新处于生物不稳定状态。因此即使水源水质较好也不能保证管网水质的稳定性。

此外,采用 AOC 作为饮用水生物稳定性的控制指标还存在以下几个问题:

(1)细菌的作用可以将不易生物降解的有机碳转变成易降解的有机碳;

(2)试验菌种测定的可生物降解有机碳可能与管网系统内部的情况不同,采用单一 P17 及 NOX 菌种对简单的、低分子的有机物的降解并不能代表实际给水管网中细菌混合生长状况及细菌胞外酶对大分子有机物的降解;

(3)所使用的 AOC 测定方法试验数据不稳定,

有较大的误差,水样经巴氏灭菌预处理可能会改变可生物降解有机物成分;

(4)AOC 测定方法的菌种来源及保存复杂,对分析操作环境要求高,对大多数水厂来说,难以将此指标纳入日常分析检测,而且耗时较长,不能在线反映水质情况。

因此,从目前已有的研究情况看,仅通过简单的控制 AOC 含量使水保持良好的生物稳定性是相当困难的,探索和研究其它控制因素是具有极大意义的前沿课题。

2 磷作为饮用水生物稳定性控制指标的可行性

2.1 磷对微生物生长的限制作用

从生物学角度看,微生物繁殖和生长需要多种营养物质,除了碳元素、氮元素外,还需要磷、硫、钾、钠、钙、镁等大量元素及锰、铜、钴、锌等微量元素,这些营养物质按一定比例被微生物摄取。其中磷在微生物的生命代谢过程中是极其重要的和必须的元素之一,在细菌细胞中有多种含磷物质参与代谢过程。一般认为,微生物生长需要的有机碳和磷的比例为 100:1^[2],而细菌在饮用水中生长所需的磷略高,碳磷比为 100:(1.7~2.0)^[14]。在磷充足的好氧条件下,微生物将聚合磷酸盐转化为 ATP,作为能量储存,当外部磷不足时,异氧菌通过激酶利用储藏的磷合成核酸和磷脂。磷脂是所有细菌细胞中都含有的一种成分,细胞膜的单位结构由磷脂双分子层与蛋白质组成,并且在细胞膜中所占的份额是固定的。磷酸是 DNA 和 RNA 的重要组成成分,是合成核酸和某些蛋白质的必要元素。另外细胞内含物中的异染颗粒的主要成分也是多聚磷酸盐,是磷源和能源的贮藏物。

由于磷对微生物繁殖和生长的关键性作用,目前世界各国对于控制水体中的含磷量都特别重视,已在许多方面得到应用。例如,在污水的生物处理工艺中,一般要求 $\text{BOD}_5:\text{N}:\text{P}$ 为 100:5:1;在某些工业废水的生物处理中,投加适量的氮和磷,以保证微生物种群的正常生长。从另一个角度看,如果破坏此营养平衡,就势必会限制微生物的生长和繁殖,影响生物处理的效果。一些研究表明^[15,16],在生物滤池和生物活性炭池进水中添加磷源可以提高水中污染物的去除率。桑军强^[17]等考察了磷源

对陶粒滤池生物膜的影响发现,对于我国北方某磷含量较低的水源水,添加磷源后,生物陶粒滤池内的微生物数量和活性均得到改善,对原水中的有机物去除率明显提高。再比如,水体富营养化判断标准是总氮低于 0.2 mg/L,总磷低于 0.02 mg/L,如果水体中磷含量超过 0.02 mg/L,就可能出现藻类大量繁殖的富营养化现象。还有研究指出^[4,5],对于有机物含量较高的饮用水,水中溶解性正磷酸盐浓度低于 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。Sathasivan 等也指出,当磷浓度为 1~3 $\mu\text{g/L}$ 时,磷可能成为饮用水中微生物生长的限制因子。这说明,无论是从饮用水生物处理的角度,还是从饮用水生物稳定性角度考虑,水中的磷都起着极其重要的作用。因此,在实际水处理工艺中,尽可能地采取措施降低水中磷含量,将会大大降低水中细菌的再生能力,提高饮用水的生物稳定性。

2.2 水处理工艺对磷的去除效果

常规水处理工艺对水中有机物特别是可生物降解有机物的去除能力有限^[10],而对磷的去除却很有效,桑军强等在试验中证实,常规的混凝沉淀砂滤对原水中 MAP 的去除率在 90% 以上,对原水 TP 的去除率在 80% 以上。相对于严重的有机污染,在我国相当部分的水源中,TP 的含量较低,尤其是 2002 年新实施的《地表水环境质量标准》对 TP 提出了更高的要求:一类水体低于 10 $\mu\text{g/L}$,二类低于 25 $\mu\text{g/L}$,三类低于 50 $\mu\text{g/L}$,有研究表明^[14],当原水中 TP 为 80 $\mu\text{g/L}$ 左右时,常规的水处理工艺就可以将水中的 TP 降到 5 $\mu\text{g/L}$ 。在 TP 中,正磷酸盐是容易被细菌直接吸收利用的磷源,而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,降低了微生物对它利用的可能性。实际上能被细菌利用的磷仅占 TP 的一部分^[18]。因此,在饮用水工艺中尽可能地去除原水中的 TP,就可能使磷成为管网中细菌生长的限制因子。

如上所述,和碳一样,磷也是水中微生物生长的限制因素之一,而且,常规水处理工艺对磷的去除比对 AOC 更有效。此外,由于 AOC 的测定对分析操作环境要求高,而且耗时较长,不能在线反映水质情况,对大多数给水厂来说,难以将此项指标纳入日常

分析检测,而对 TP 的检测则简单得多,且现有的检测方法对 TP 的最低检测限值达 2 $\mu\text{g/L}$ ^[4],所以,从很大程度上讲,磷含量可能是决定管网中微生物再生长及水的生物稳定性的更具有实用价值的控制性因素。

3 磷与 AOC 共同作为控制指标的可行性

综上所述,磷和碳一样,也是微生物生长的限制因子之一,也可以作为水的生物稳定性的控制指标,而且在分析检测和水处理工艺的处理效果上与 AOC 相比更具有实际应用的价值,但磷并不能完全取代 AOC 这一传统的控制饮用水生物稳定性的指标。已有研究指出在 AOC 浓度显著低于 10 $\mu\text{g/L}$ 时,仍可从水中分离出大肠杆菌,还有研究发现,即使总磷含量低于 2 $\mu\text{g/L}$,仍能够维持微生物大量繁殖。所以,仅通过简单地控制 AOC 或磷含量使水保持良好的生物稳定性是相当困难的。另外,饮用水生物处理系统属于基质限制型,所含的各种营养元素均处于较低的水平,对于微生物而言,当各种营养元素的含量不符合合适的比例时,任何一种处于较低含量水平的营养元素均可能成为微生物生长代谢的限制性因子。在特定条件下,当碳源、氮源充足而磷源短缺时,磷就会对微生物的生长起限制作用;同样,当磷源充足碳源缺乏时,AOC 将成为水的生物稳定性的限制因子。于鑫在研究中发现^[19],对某水源水进行生物处理时,在原水中加入一定量的磷元素后,碳成为滤池出水中的主要限制因子;而不加磷经生物处理,磷在出水中的限制因子作用更强。由此可见,对于某特定的水体,碳和磷都可能成为饮用水中微生物生长发育的限制因子。因此,将磷与 AOC 共同作为饮用水生物稳定性的控制指标,在实际生产工艺中同时控制磷和 AOC 含量,或者针对某些水质特性重点采用其中一种控制指标,则可能取得更理想的效果。

为此需研究饮用水中磷和 AOC 的含量对水的生物稳定性的共同影响程度和相互限制关系,这将对今后深度水处理技术是以去除 AOC 为主要目的还是以去除磷为控制性指标,或者是两者都控制到一定含量范围内;对今后选择水源、常规处理工艺流程、混凝剂种类、消毒剂的种类与投加、深度处理技术、管道材质、经济技术比较等都有很大影响。另

外,磷作为微生物生长和繁殖的关键营养元素已在污水处理领域得到广泛重视,但是饮用水的除磷问题一直未有报道,主要原因是饮用水中磷的作用未得到充分认识和重视,没能与饮用水的水质,尤其是饮用水的生物稳定性相关联;而且饮用水的除磷要求与污水方面有很大不同,特别是在限制含量方面的差异极大;另外可能采用的除磷处理技术和方法也受水处理工艺和水质要求的很大约束。因此研究和开发用于饮用水处理的除磷技术和方法,直接关系到利用磷含量来控制饮用水生物稳定性的目的能否实现。这方面的研究如获得成功,将为饮用水的生物稳定性的控制开辟一条新的途径,对提高饮用水卫生安全性会有重要意义。

4 结论

(1)AOC 作为饮用水生物稳定性的控制指标存在许多问题,仅通过简单地控制 AOC 含量使水保持良好的生物稳定性是相当困难的。

(2)和碳一样,磷也是水中微生物生长的限制因素之一,从某种程度上讲,磷含量可能是决定管网水的生物稳定性的更具有实用价值的控制指标。

(3)将磷与 AOC 共同作为饮用水生物稳定性的控制指标,研究饮用水中磷和 AOC 的含量对水的生物稳定性的共同影响程度和相互限制关系,以及饮用水深度除磷处理技术,将为饮用水的生物稳定性控制开辟一条新的途径,对提高饮用水卫生安全性有重要意义。

参考文献

- 1 刘文君,吴红伟,张淑琪,等 某城市饮用水水质生物稳定性研究,环境科学,1999,20(2):34~37
- 2 LeChevallier M W, Schulz W, Lee R G Bacterial nutrients in drinking water Appl Environ Microbiol, 1991,57(3):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 Miettinen I T, Vartiainen T, Martikainen P J. Phosphorus and bacterial growth in drinking water Appl Environ Microbiol, 1997, 63(8): 3242~3245
- 5 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
- 6 王占生,刘文君 微污染源饮用水处理 北京:中国建筑工业出版社 1999 236~239
- 7 王丽花,周鸿,张晓健,等 供水管网中 AOC、消毒副产物的变化规律 中国给水排水,2001,17(6):1~3
- 8 Le Chevallier M W, et al Development of a rapid assimilable organic carbon method for water Appl Environ Microbiol, 1993, 59(5): 1526~1531
- 9 Huck P M Measurement of biodegradable organic matter and bacterial growth potential in drinking water AWWA, 1990, 82(7):78~86
- 10 吴红伟,刘文君,张淑琪,等 水厂常规工艺去除可同化有机碳的研究 中国给水排水,1999, 15(9):7~9
- 11 刘文君,王亚娟,张丽娟,等 饮用水中可同化有机碳(AOC)的测定方法研究 给水排水 2000,26(11):1~5
- 12 李灵芝,王占生 纳滤膜组合工艺去除饮用水中可同化有机碳和致突变物 重庆环境科学,2003, 25(3):17~18
- 13 李灵芝,王占生 臭氧-活性炭组合工艺对饮用水中 AOC 的去除 环境科学与技术,2003, 26(5):45~46
- 14 Sathasivan A, Ohgaki S. Application of new bacterial regrowth potential method for water distribution system-a clear evidence of phosphorus limitation Water Research, 1999, 33(1):137~144
- 15 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
- 16 Van der Aa L T J, Kors L J, Wind A P M, et al Nitrification in rapid sand filter: phosphorus limitation at low temperatures Wat Sci Tech: Water Supply, 2002, 2(1): 37~46
- 17 桑军强,张锡辉,周浩晖,等 外加磷源对陶粒滤池生物膜特性的影响研究 环境科学学报, 2003, 23(4):417~421
- 18 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
- 19 于鑫,张晓健 磷元素在饮用水生物处理中的限制因子作用 环境科学,2003,24(1):57~62

○通讯处:100022 北京朝阳区平乐园 100 号
北京工业大学建工学院市政工程学科部
电话:(010)88586585
E-mail: yangyanling@bjpu.edu.cn
收稿日期:2004-08-05