

城镇水系统全流程水质监测技术专栏

孙坚伟. 基于 ATP 生物荧光法的供水系统生物安全评估[J]. 净水技术, 2022, 41(9):162-168.

SUN J W. Biological safety assessment of water distribution system based on ATP bioluminescence method[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9):162-168.



扫我试试?

基于 ATP 生物荧光法的供水系统生物安全评估

孙坚伟

(上海浦东威立雅自来水有限公司, 上海 200127)

摘要 文章针对上海某区域供水系统的生物安全性进行评估。对该区域 4 个管网采样点和 9 个二次供水采样点的 4 项生物安全性指标[ATP、菌落总数、异氧菌平板计数(HPC)、总大肠菌群数]进行连续 7 个月 9 次水质监测。结果表明:生物安全指标受供水距离、季节影响较大,夏季在二次供水环节可能存在一定风险。相关性研究表明:ATP 与 HPC、温度显著正相关,与总氯显著负相关,能较好地反映生物安全现状。基于菌落总数和 HPC 限值,对 ATP 检出指标的控制限值进行分析,初步判断 ATP 质量浓度低于 1.30 pg/mL 时,采样点的菌落总数和 HPC 能满足上海地标限值。总体而言,ATP 检测技术是针对水质生物安全评价的新技术,该研究可为后续供水系统生物安全评价提供技术支持。

关键词 ATP 检测 水质安全 供水管网 二次供水 生物安全

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)09-0162-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.09.023

Biological Safety Assessment of Water Distribution System Based on ATP Bioluminescence Method

SUN Jianwei

(Shanghai Pudong Veolia Water Co., Ltd., Shanghai 200127, China)

Abstract The biological safety of a water supply system in Shanghai was evaluated in this paper. The water quality indices including ATP, total bacterial count, heterotrophic plate count (HPC) and total coliform count of 4 pipe network sampling points and 9 secondary water supply sampling points of a water distribution system in Shanghai for 7 months were monitored. Results showed that the biological safety indices were affected by the water supply distance and season, and there may had some risks in the secondary water supply system in summer. Correlation study showed that ATP had a significant positive correlation with HPC and temperature, and a significant negative correlation with total chlorine concentration, which could reflect the current situation of biological safety. Based on the limit values of total bacterial count and heterotrophic plate count, the control limit values of ATP detection indicators were analyzed, indicated that when ATP was lower than 1.30 pg/mL, the total bacterial count and HPC at the sampling point could meet the Shanghai water quality standard. In general, ATP detection technology was a new technology for biological safety assessment of tap water. This research provides technical support for the subsequent biological safety assessment of water supply systems.

Keywords ATP detection water quality safety water distribution system secondary water supply system biological safety

[收稿日期] 2022-06-24

[基金项目] 上海市科委项目:上海市市政自来水直饮保障关键技术研究示范(19DZ1204400)

[作者简介] 孙坚伟(1975—),女,高级工程师,主要从事制水生产运行管理工作,E-mail:sunjianwei@pudongwater.com。

饮用水水质对人类健康至关重要,卫生、安全的饮用水主要依赖于水源保护、净化处理、消毒和安全输配。世界卫生组织(WHO)调查指出,全球88%的疾病归咎于不安全的饮用水以及缺乏相关卫生设施,与饮用水有关的卫生问题大多来自微生物(细菌、病毒、原生动物或其他生物)的污染。饮用水安全问题是我国当前重要的民生问题,与居民生活和健康息息相关。经水厂处理后的自来水虽达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2016)的各项要求,但水中仍含有微量的微生物、有机物和无机盐等物质进入供水管网。供水管网水中存在的微生物及有机物、氮、磷等物质,不仅导致管网管壁生物膜生长,而且可能引起管材生物腐蚀、供水系统末梢水质劣变,产生生物安全隐患^[1]。随着供水管网输送距离的增加,水中菌落总数、浑浊度等随之增加,水质生物安全性呈明显下降趋势,导致水质出现“二次污染”,管网中的消毒剂、营养物质、管道材料、水力条件等与水中细菌的再生长有关,同时,这些环境因素会改变水中微生物的群落

组成,从而影响水中微生物的存在水平^[2]。对供水系统中微生物水平的准确评估是评判水质生物安全的重点。

传统的饮用水生物安全检测方法包括菌落总数、异养菌平板计数(HPC)、总大肠菌群等。而随着分子生物学的发展,基于灵敏的分子生物学检测方法,如三磷酸腺苷(ATP)生物荧光检测和荧光定量PCR等^[3]、细胞生物学检测方法流式细胞术(FCM)等可对水质生物安全进行更全面的表征。各种不同的检测方法特征如表1所示,其中ATP检测法基于微生物以ATP的形式捕获并储存从食物和光源获取的能量,ATP是微生物中的基本能量单位,可以作为水中总微生物量的指标^[4]。传统的HPC和细菌平板计数检测方法只能反映水中微生物的一小部分,且需要较长的培养时间。由于ATP存在于所有的细胞内,对其进行检测可以更全面地反映水中所含活性生物性颗粒的浓度,且此方法与其他分子生物学检测方法相比具有一定的优势,可以在现场检测,时间只需要几分钟。

表1 常见的供水系统微生物检测方法
Tab. 1 Common Microbiological Detection Methods for Water Supply Systems

生物学方法/单位	用途	检测地点和时间	优点	缺点
菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	评估微生物的可培养性	实验室,2~7 d	适用性广,操作便捷	仅检测微生物中的可培养部分[(不含休眠、活的非可培养状态(VBNC)],耗时长
流式细胞仪/(cells·mL ⁻¹)	针对水中细胞数量进行检测	实验室,几分钟	快速,对所有细胞进行定量 ^[5]	需要在实验室特定仪器进行,如水中浓度低时需要富集和染色
分子生物学方法				
q-PCR/(copies·mL ⁻¹)	基于PCR期间靶DNA片段的扩增,间接评估细胞总数	实验室,几小时	快速,可以对一个样本中的不同物种进行定量	胞外DNA(eDNA)的存在导致结果偏高,不够准确
PMA-qPCR/(copies·mL ⁻¹)	通过PCR预先评估活细胞的总数,用单独的丙锭(PMA)处理样品,灭活eDNA和死细胞的DNA	实验室,几小时	快速,只能对活细胞进行定量,排除eDNA的干扰	仅基于细胞膜的完整性确定细胞的活性
ATP生物荧光/(pg·mL ⁻¹)	针对水中细胞内和游离的ATP进行检测	现场,几分钟	快速,对所有活性细胞进行定量 ^[5]	需要使用实验试剂,单次样品检测成本高
物理方法				
重量法/(mg·mL ⁻¹)	通过干重或湿重间接测量生物量	实验室,几小时	操作便捷,不需要昂贵的设备	富集及前处理耗时,灵敏度和准确度低
化学方法				
微量滴定板染色总生物量测定/(cells·mL ⁻¹)	通过吸附/解吸染料(结晶紫)间接测量生物量	实验室,几小时	适用广泛,适用于批量实验,不需要转移生物膜直接在微量滴定板中进行	缺乏可重复性,灵敏度差,洗涤对结果影响较大,无法进行标准化

ATP生物荧光法检测供水系统中生物安全性的方法反映的微生物水平具有全面性好和时

效性高的特点,在供水系统中进行水质安全评估具有较好的应用价值,而目前国内较少同时采用

ATP 检测方法与传统培养法对供水系统进行全面评估的报道。本研究采用 ATP 及其他传统检测方法对上海市某片区供水系统生物安全进行调研,对该检测方法的实际应用情况进行分析和评估。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置

1.1.1 市政供水采样点

选取上海某地区出厂水、管网市政供水及二次供水采样点。

1.1.2 供水小区内部采样点

在水厂附近、管网中段、末梢,分别选择供水模式为水池+变频供水和水池+水箱供水的小区,设置小区内部采样点。

在水池+变频供水小区中选择采样点包括泵房出水、住户 6 楼龙头(最不利点);在水池+水箱供水小区中选择采样点包括多层供水小区[泵房进水、泵房出水、住户 1 楼龙头、住户 4 楼龙头(最不利点)]、高层供水小区[泵房出水、住户 2 楼龙头(最不利点)]。采样点信息具体如表 2 所示。

表 2 各采样点位置
Tab. 2 Location of Different Sampling Points

采样点类型	采样点编号	采样点位置
市政采样点	1	出厂水
	2	近水厂采样点
	3	管网中段采样点
	4	管网末梢采样点
二次供水采样点	1	A 变频供水小区泵房出水
	2	A 变频供水小区 6 楼龙头(小区最不利点)
	3	B 变频供水小区泵房出水
	4	B 变频供水小区 1 楼龙头
	5	B 变频供水小区 6 楼龙头(小区最不利点)
	6	C 工频泵+高位水箱供水高层小区泵房出水
	7	C 工频泵+高位水箱供水高层小区 2 楼龙头(小区最不利点)
	8	D 工频泵+高位水箱供水高层小区泵房出水
	9	D 工频泵+高位水箱供水小区 4 楼龙头(小区最不利点)

1.2 检测参数

ATP 生物荧光法的检测:现场根据水样污染程度将 20~50 mL 样品通过针筒富集在过滤器中,再将过滤器中的目标活性颗粒萃取入测试管后加入荧光素酶试剂[哈希水质分析仪器(上海)有限公司第二代 ATP 测试盒,通用型]使其发出荧光,再经过稀释后混合均匀并在 10 s 内读数^[4]。具体检测过程技术规格参数如表 3 所示,该检测结果减去空白萃取液的检测结果记为样品中 ATP 发光强度,根据式(1)计算出 ATP 的精确含量。

$$c_{\text{ATP}} = \frac{\text{RLU}_{c_{\text{ATP}}}}{\text{RLU}_{\text{ATP1}}} \times \frac{10000}{V_{\text{sample}}} \quad (1)$$

其中: c_{ATP} ——ATP 检测法得到的活性颗粒最

终质量浓度,pg/mL;

$\text{RLU}_{c_{\text{ATP}}}$ ——实际样品在检测器中所显示的发光强度;

RLU_{ATP1} ——试剂盒校准液在检测器中所显示的发光强度;

10 000——换算常数,pg;

V_{sample} ——样品体积,mL。

HPC 是经过一系列具有一定营养物质的培养基为基础的检测方法,检测水样中所包含的微生物含量,可用来描述所有需要有机物生长的细菌数量。对于饮用水中的 HPC,我国采用传统的较高温度(37 ℃培养 48 h)和富营养培养基培养(PCA)的菌落总数检测方法。但对于饮用水中的一些细菌,如假单胞细菌等,该方法并不能检测出来。目前,美

表3 ATP荧光检测技术规格参数
Tab. 3 Technical Specifications of ATP Detection

技术项目	规格参数
检测器	高灵敏度光电管
相对发光强度	0~10 000 000
ATP线性动态值/(mol·L ⁻¹)	4×10 ⁻¹² ~1×10 ⁻⁶
检测菌种范围	符合《Water Quality-Determination of the Inhibitory Effect of Water Samples on the Light Emission of <i>Vibrio fischeri</i> (Luminescent Bacteria Test)-Part 3: Method Using Freeze-Dried Bacteria》(ISO 11348-3-2007)和《水质 急性毒性的测定 发光细菌法》(GB/T 15441-1995)标准规定的菌种,包括费氏弧菌、明亮发光杆菌、青海弧菌
比色管规格/mm	12×55

国、德国等国家采用贫营养的 R2A 培养基或者 TSA-SB 培养基,同时通过降低培养温度(28 ℃)、延长培养时间等方法检测饮用水中的 HPC。本文中采用的 HPC 检测方法为平板倾注法,平板倾注后在 25 ℃下培养 7 d 计数,结果以 CFU/mL 计,最终结果为两组平行样的平均值。

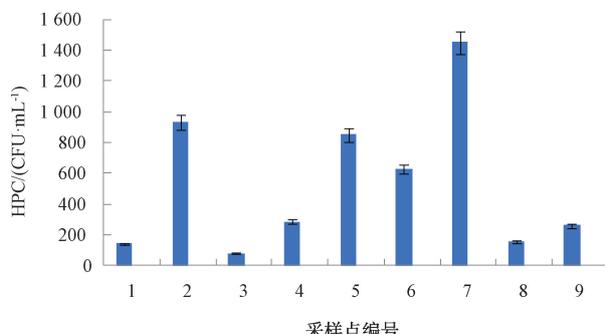
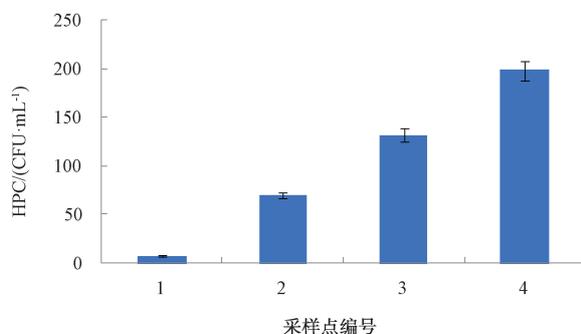
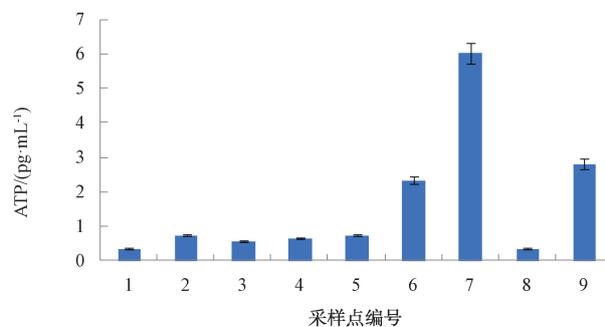
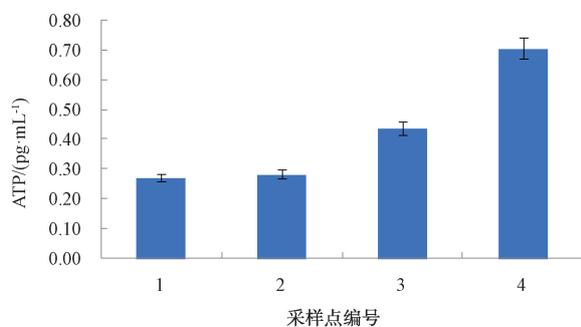
根据上海市地标要求确定检测项目,水质检测指标包括常规指标、重金属、微生物和感官指标、消毒副产物指标等。本文检测水样为管网水,具体检测指标为浑浊度、色度、总氯、总大肠菌群、菌落总数、臭和味、大肠埃希氏菌、HPC、重金属离

子、溶解性总固体、三卤甲烷、锰、砷、铅、锌等,检测频率为 1~2 次/月。本文采样时间为 2021 年 8 月—2022 年 2 月,共进行 14 次水质检测,水质指标均参考《生活饮用水标准检验方法》相关分析方法。

2 结果与讨论

2.1 供水系统 ATP 检测、菌落总数和 HPC 检测结果

供水系统不同采样点生物安全指标情况如图 1 所示。



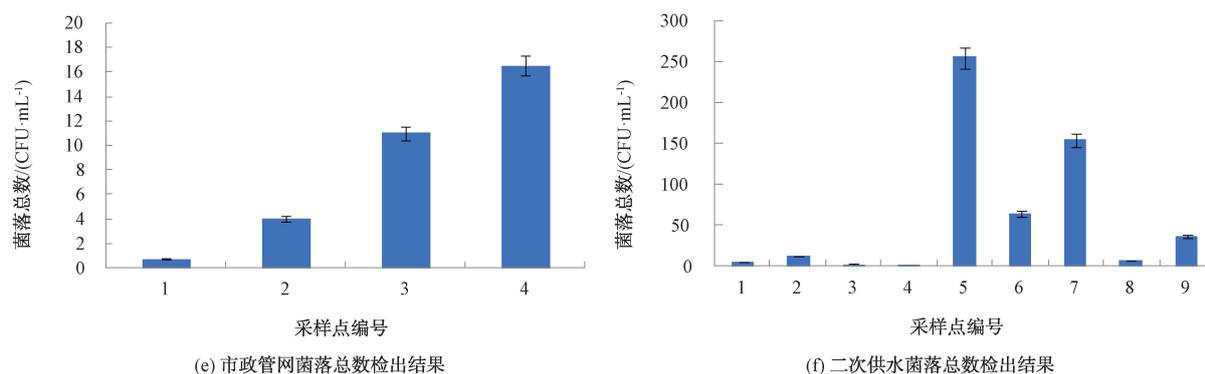


图 1 供水系统生物安全指标变化

Fig. 1 Variation of Different Biological Safety Water Quality Indices of Water Distribution System

基于 9 次水质检测结果,对比出厂水、供水管网和二次供水取样点可知,出厂水样品 ATP 检测、菌落总数和 HPC 均值分别为 0.27 pg/mL、0.75 CFU/mL 和 7.50 CFU/mL;管网采样点样品 ATP 检测、菌落总数和 HPC 均值分别为 0.48 pg/mL、7.17 CFU/mL 和 133.75 CFU/mL;二次供水 ATP 检测、菌落总数和 HPC 均值分别为 1.62 pg/mL、40.28 CFU/mL 和 431.82 CFU/mL。尽管在供水系统不同月份、不同位置的采样点总大肠菌群均未检出,但检测结果表明二次供水样品中微生物含量较高,存在一定的风险。

分析沿输水管线上 4 个管网取样点,对比每次数据可知,微生物含量随供水距离增加而增加,ATP 含量从水厂出水到最后一个管网取样点依次增高,最后一个取样点数值明显高于其余各点,而总氯含量从出厂到管网末梢逐步降低。

在二次供水采样点中,龙头水采样点微生物指标均高于泵房出水采样点,由此可见,目前供水系统生物安全的主要风险点在于二次供水环节。研究表明,水的停留时间对水中消毒剂含量和微生物组成均会产生影响^[6]。对比不同供水模式采样点,工频泵+高位水箱供水小区龙头水较泵房出水微生物含量增长最多,在 C 高层小区,用户龙头水较泵房出水菌落总数提升 138.2%,HPC 提升 131.1%,ATP 提升 158.8%。由此可见,对于工频+水箱供水小区需通过管道材质优选、水龄控制等途径降低余氯衰减,减少微生物再生长的情况。

不同季节变化如表 4 所示。在冬季,总氯平均含量较高,ATP、菌落总数和 HPC 处于全年最低水平;在夏季,总氯含量较低,余氯在管网中衰减较快,ATP、细菌总数和 HPC 含量为全年最高,因此,针对夏季生物安全风险的控制尤为重要。

表 4 不同季节生物安全指标均值

Tab. 4 Average Concentration of Biological Safety Water Quality Indices for Different Seasons

季节	菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)		ATP/(pg·mL ⁻¹)		HPC/(CFU·mL ⁻¹)	
	市政管网	二次供水	市政管网	二次供水	市政管网	二次供水
夏季	5.25	110.48	0.71	2.55	216.67	757.78
秋季	1.58	46.96	0.30	0.60	21.67	608.52
冬季	1.2	5.72	0.21	0.49	18.25	161.11

2.2 供水系统不同供水模式小区生物安全指标影响因素研究

基于市政取样点和小区不同供水单元取样点的数据,对其中微生物指标与其他水质指标的相关性进行分析,如表 5 所示。

ATP 与总氯显著负相关($R = -0.565, P < 0.05$),与 HPC 显著正相关($R = 0.305, P < 0.05$),与温度显著正相关($R = 0.363, P < 0.05$);HPC 和菌落总数显著正相关($R = 0.724, P < 0.05$),与总氯显著负相关($R = -0.270, P < 0.05$),和温度显著正相关($R =$

表5 水质检测指标相关性
Tab. 5 Correlation of Different Water Quality Indices

项目	ATP	HPC	菌落总数	浑浊度	总氯	温度
ATP	1.000	-	-	-	-	-
HPC	0.305	1.000	-	-	-	-
菌落总数	0.186	0.724	1.000	-	-	-
浑浊度	0.267	0.058	0.037	1.000	-	-
总氯	-0.565	-0.270	-0.094	-0.172	1.000	-
温度	0.363	0.322	0.268	-0.016	-0.287	1.000

0.322, $P < 0.05$); 菌落总数和 HPC 显著正相关 ($R = 0.724, P < 0.05$), 与温度显著正相关 ($R = 0.268, P < 0.05$); 总氯与温度显著负相关 ($R = -0.287, P < 0.05$); 浑浊度与菌落总数、HPC 等相关性不显著。由此可见, ATP 与 HPC 相关性较好, 能较好地反映水中微生物指标情况, 主要受温度和总氯的影响。ATP 和 HPC 均与总氯显著负相关, 与温度正相关, 因此, 在夏季需保持用户终端的总氯含量以保障供水生物安全。

对比各类型采样点位置的数据, 管网采样点中, 就总氯含量而言, 水厂总氯质量浓度控制在 0.78~1.12 mg/L, 夏季(8月—9月)比冬季(10月—次年2月)略高; 在离水厂最近的2号市政采样点中总氯质量浓度略有下降, 为 0.78~0.90 mg/L; 管网水流经 B、C、D 小区到达供水末梢4号市政采样点时总氯质量浓度没有明显下降, 为 0.67~0.90 mg/L。各点总氯呈现夏天比冬天略低的现象, 说明夏天管网氯消耗略高, 但从直供点末端总氯值而言, 出厂水的氯控制浓度足够。就 ATP 含量而言, 水厂出水最大质量浓度为 0.63 pg/mL, 而市政采样点的 ATP 质

量浓度均小于 0.78 pg/mL, 各管网采样点呈现夏天比冬天高的现象。

二次供水(泵房出水, 用户龙头)的 ATP 含量都呈现夏天比冬天高的现象, 而且数值上比上一级供管网点高, 这之前传统培养法得到的研究结论相一致^[7]。总氯值出现夏季比冬天略低的现象, 这说明在管网和二次供水设施内, 夏天总氯消耗得多, 而微生物的繁殖略显旺盛。C 小区的 2 楼采样点中, ATP 的含量比大多数管网点高(9 个点中有 5 个质量浓度超出 0.70 pg/mL), 且和总氯值出现明显的季节性变化(从 8 月—次年 2 月, ATP 逐步降低, 总氯逐步增加), 而且和 HPC、菌落总数的趋势一致(8 月—9 月 HPC 和菌落总数也比较高)。ATP 的检测快速、准确地发现了这一取样点的水质问题。

2.3 基于 ATP 检测的供水系统生物安全指标限值研究

针对 9 次检测数据进行统计学分析, 取菌落总数、HPC 或浑浊度符合本地限值的样品的 ATP 结果值, 用 Grubbs 检验去掉离群值, 用剩下数据的平均值+3 倍标准偏差估计基准值, 统计结果如表 6 所示。

表6 ATP 生物安全限值分析
Tab. 6 Analysis of ATP Biological Safety Limits

参数	限值 /(CFU·mL ⁻¹)	符合限值数据量 /(CFU·mL ⁻¹)	去掉离群值后的数据量 /(CFU·mL ⁻¹)	对应 ATP 平均值 /(pg·mL ⁻¹)	标准偏差	对应 ATP 基准线 /(pg·mL ⁻¹)
菌落总数	<50	93	82	0.51	0.43	1.80
HPC	<500	86	72	0.40	0.3	1.30

通过筛选满足 HPC 及菌落总数地方标准限值对应的 ATP 基准值, 建议取该值来评估管网水或者末梢水(用户水龙头)的微生物量, 即当 ATP 质量浓度小于 1.30 pg/mL 或 1.80 pg/mL 时, 分别对应 HPC 和菌落总数达到上海市地方标准《生活饮用水

水质标准》(DB 31/T 1091—2018)。这个 ATP 基准值与 ATP 设备供应商提供的建议限值(生物安全为小于 1.0 pg/mL, 不安全为大于 10 pg/mL)较为接近, 因此, 初步判断 ATP 质量浓度低于 1.30 pg/mL 可作为 ATP 检测生物安全控制限值。

从 ATP 检测结果看,二次供水的水质随着小区管线水流方向变差,夏季尤其明显。比如,A 小区泵房水泵出水夏季 ATP 质量浓度为 0.40~0.96 pg/mL,用户龙头水中为 1.01~1.73 pg/mL;C 小区和 D 小区更为明显,用户龙头水中 ATP 质量浓度达到 2.53~17.67 pg/mL。在夏季,供水管网及泵房水泵出水能满足生物安全的要求,但在用户龙头水存在一定的生物安全风险,需对二次供水系统的生物安全保障技术进行研究,提升水质安全保障能力。根据 2.2 小节相关性研究结果,总氯与生物安全指标显著负相关,因此,可以通过保障龙头水的总氯含量,保障生物安全。基于 ATP 限值倒推所需的总氯含量,将 ATP 质量浓度低于 1.3 pg/mL 时对应的总氯数据进行统计,将最高总氯含量确认为总氯的控制值,结果表明当总氯质量浓度高于 0.28 mg/L 时,可以满足 ATP 质量浓度低于 1.30 pg/mL,保障生物安全。因此,想实现用户龙头水水质的持续安全稳定,需要对整个供水流程中出现的风险点进行评估,从每个环节上分析可能存在的问题^[8-9],如二次供水系统中管道和水池(箱)材质表面生物膜的生长、较长的停留时间导致的消毒剂衰减等,减少出厂之后被二次污染的可能性,基于更多时效性强的监测指标,快速反应系统内可能存在的问题,从而持续稳定保障用户优质饮水。

3 结论与展望

目前,供水片区的主要水质安全风险点为生物安全指标(ATP、菌落总数和 HPC),微生物指标受季节影响较大,夏季在居民龙头水处可能存在一定风险。

生物安全指标与其他水质指标的相关性研究结果表明:ATP 与总氯显著负相关($R = -0.565$, $P < 0.05$),与 HPC 显著正相关($R = 0.305$, $P < 0.05$),与温度显著正相关($R = 0.363$, $P < 0.05$);HPC 和菌落总数显著正相关($R = 0.724$, $P < 0.05$),与总氯显著负相关($R = -0.270$, $P < 0.05$),与温度显著正相关($R = 0.322$, $P < 0.05$);总氯与温度显著负相关($R = -0.287$, $P < 0.05$);浑浊度与菌落总数、HPC 等相关性不显著。由此可见,ATP 与 HPC 相关性较好,能较好地反映水中微生物指标情况,主要受温度和总氯的影响。ATP、HPC 和菌落总数均与总氯显著负相关,与温度正相关,因此,在夏季需保持用户终端的总氯含量以保障供水生物安全。

通过筛选满足 HPC 及菌落总数地方标准限值对应的 ATP 基准值,建议取该值来评估管网水或者末梢水(用户水龙头)的微生物量,即 ATP 质量浓度低于 1.30 pg/mL 可初步判断作为 ATP 检测生物安全控制限值。基于 ATP 限值倒推所需的总氯含量,当总氯质量浓度高于 0.28 mg/L 时,可以满足 ATP 质量浓度低于 1.30 pg/mL,保障生物安全。

ATP 生物荧光检测方法具有检测效率高、能全面反映水体中生物量的特点,在供水系统中应对突发水质事件的过程中有很多可以尝试的应用场景。例如在水厂臭氧生物活性炭工艺后,能通过 ATP 检测及时确认活性炭生物泄露情况;在二次供水泵房后,通过 ATP 检测能及时反应二供系统的生物安全问题;在管道冲洗消毒后,通过 ATP 检测能及时反应冲洗消毒效果等。后续可以对该检测方法进一步进行推广研究。

参考文献

- [1] LI W, TAN Q, ZHOU W, et al. Impact of substrate material and chlorine/chloramine on the composition and function of a young biofilm microbial community as revealed by high-throughput 16S rRNA sequencing [J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125310. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125310.
- [2] LI W, ZHANG J, WANG F, et al. Effect of disinfectant residual on the interaction between bacterial growth and assimilable organic carbon in a drinking water distribution system [J]. *Chemosphere*, 2018, 202: 586-597. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.056.
- [3] 陈晓,汪毅,丁志斌,等. 饮用水生物安全现状、评价方法及对策措施[J]. *净水技术*, 2019, 38(5): 65-72.
- [4] 郑亦舟. 生活饮用水中细菌总数检测的方法比较与应用[J]. *净水技术*, 2022, 41(5): 150-154.
- [5] 王惠荣,池勇志,辛丽花,等. ATP 生物发光法在饮用水和再生水活菌生物量快速检测中的应用[J]. *给水排水*, 2016, 42(4): 27-33.
- [6] CHEN X, WANG Y, LI W, et al. Coupling changes of disinfectant and bacteria induced by the water stagnation and disinfection strategy [J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125190. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125190.
- [7] 孙坚伟,吕娅琼,周云,等. 上海市二次供水水质现状调查研究[J]. *给水排水*, 2009, 45(8): 9-12.
- [8] 童俊. 上海市政自来水实现直饮目标的对策研究[J]. *给水排水*, 2020, 46(4): 70-75.
- [9] 朱慧峰. 上海实施优质饮用水目标的对策研究[J]. *净水技术*, 2018, 37(1): 5-9.