

城镇水系统全流程水质监测技术专栏

尤为, 袁野, 路峰, 等. 基于 ATP 生物荧光法的供水管网生物稳定性评价[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 195–203.

YOU W, YUAN Y, LU F, et al. Biological stability evaluation of water supply pipelines network based on ATP bioluminescence method[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(11): 195–203.

基于 ATP 生物荧光法的供水管网生物稳定性评价

尤 为^{1,2}, 袁 野³, 路 峰^{1,2,*}, 陆 阳^{1,2}

(1. 江苏城镇给排水监测有限公司, 江苏南京 210036; 2. 国家城市供水水质监测网南京监测站, 江苏南京 210036; 3. 南京水务集团有限公司, 江苏南京 210001)

摘 要 【目的】供水管网中的生物稳定性遭到破坏, 饮用水会存在被二次污染的风险, 本文为能达到能够高效、准确地监测管网中饮用水水质情况。【方法】本文采用近年来用于食品等行业的三磷酸腺苷(ATP)生物荧光法, 对南方某城市4个水厂主要管网进行生物稳定性研究, 同时使用常规检测方法的特征数据作为参考。【结果】表面 ATP、环境 ATP、游离氯以及管网情况的变化能够解释总 ATP 变化情况的 71.8% (>30%), 说明这些因素变化是总 ATP 的变化主要原因。其中表面 ATP、游离氯、管径及管网材质对总 ATP 的影响显著性水平为 0.069、0.763、0.921 及 0.456 ($P>0.05$), 在统计学意义上对总 ATP 无显著影响。环境 ATP 降低, 总 ATP 下降 ($P<0.05$), 管龄越大, 总 ATP 越低 ($P<0.05$), 这两个因素对总 ATP 有显著影响。管网水中环境 ATP 以及生物 ATP 是总 ATP 的重要组成部分, 因此, 环境 ATP 与总 ATP 有着显著的正相关性。【结论】ATP 生物荧光法结果可靠, 可以高效评价管网生物稳定性, 能够用于水质监测、避免饮用水二次污染, 研究结果也为 ATP 生物荧光法在饮用水检测标准的建立以及城市供水管网建设改造提供参考依据。

关键词 水环境监测 二次污染 管网生物稳定性 ATP 生物荧光法 生物稳定性影响因素

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)11-0195-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.022

Biological Stability Evaluation of Water Supply Pipelines Network Based on ATP Bioluminescence Method

YOU Wei^{1,2}, YUAN Ye³, LU Feng^{1,2,*}, LU Yang^{1,2}

(1. Jiangsu Urban Water Supply and Drainage Monitoring Co., Ltd., Nanjing 210036, China;

2. Nanjing Monitoring Station of National Urban Water Quality Monitoring Network, Nanjing 210036, China;

3. Nanjing Water Group Co., Ltd., Nanjing 210001, China)

Abstract [Objective] The biological stability in the water supply network is disrupted, and there is a risk of secondary pollution to drinking water. This paper aims to achieve efficient and accurate monitoring of the drinking water quality in the network. [Methods] This test utilizes the adenosine triphosphate (ATP) bioluminescence method, which has been recently used in the food industry and other sectors, to investigate the biological stability in the main pipelines of four water treatment plants in a southern city in China. Conventional detection method were also used to provide reference data. [Results] Surface ATP, environmental ATP, free chlorine, and changes in pipeline conditions could explain 71.8% (>30%) of the variations in total ATP, suggesting that these factors were the main contributors to changes in total ATP. Among these, surface ATP, free chlorine, pipe diameter, and pipeline material showed no statistically significant impact on total ATP, with significance levels of 0.069, 0.763, 0.921, and 0.456, respectively ($P>0.05$).

[收稿日期] 2025-01-22

[作者简介] 尤为(1986—), 男, 主要从事水质监测研究等工作, E-mail: 517940761@qq.com。

[通信作者] 路峰(1986—), 男, 主要从事饮用水水质检测、涉水产品检测分析、工艺试验等工作, E-mail: flu628@hotmail.com。

However, a decrease in environmental ATP led to a significant decrease in total ATP ($P < 0.05$), and older pipes were associated with lower total ATP levels ($P < 0.05$), indicating these two factors have a significant impact. Environmental ATP and biological ATP in the pipeline water are significant components of total ATP, hence environmental ATP showed a significant positive correlation with total ATP. [**Conclusion**] ATP bioluminescence method is reliable and effective for evaluating the biological stability of water pipelines. It can be used for water quality monitoring to prevent secondary contamination of drinking water. The findings also provide a reference for establishing drinking water testing standards using the ATP bioluminescence method and for the construction and renovation of urban water supply networks.

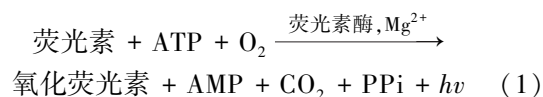
Keywords water environment monitoring secondary pollution water biological stability of pipe network ATP bioluminescence method influencing factors of biostability

供水管网是整个生活饮用水供水环节的一个重要部分,管网中饮用水的生物稳定性是保证用户端水质良好的重要条件之一,然而管网中的水体环境非常复杂,管网中生物可降解有机物 (biodegradable organic matter, BOM)、消毒剂、环境因素 (即水温、管道材料、水力条件等) 都会影响管网水的生物稳定性,生物稳定性被破坏会造成管网内壁生物膜的脱落,而造成细菌二次繁殖^[1],最终可能会导致饮用水被污染。因此,快速、准确评价管网生物稳定性显得越来越重要。饮用水生物稳定性可以通过可同化有机碳 (AOC) 或生物可降解的溶解性有机碳 (BDOC) 2 个指标去反映^[2],一旦水体所在环境中生物脱稳,细菌大量繁殖,相关微生物指标也会随之增高。

生物发光的研究始于 1885 年 Dubois 的试验,他首次证实荧光素酶与荧光素之间产生的化学反应能引起生物发光现象^[3]。三磷酸腺苷 (ATP) 生物发光法的反应机理最早由 Mc Elroy 和 Strehler 于 1949 年提出,他们证实 ATP 含量与荧光发光强度成正相关^[4]。1983 年, Moyer 等学者提出所有微生物细胞内都存在 ATP 且含量一定,可通过细胞内源性 ATP 的含量来表征细胞活性及活细胞的数量^[5]。20 世纪末,ATP 生物发光技术引入我国,此后,ATP 生物发光技术不断完善,并开始研制定量测定的检测仪,ATP 生物荧光法近年来常用于食品^[6-8]、化妆品^[9]、医疗用品行业^[10-11] 的生物检测中,特点是速度快、效率高,可以在生产现场于数分钟之内完成单个样品检测,具有时效性的样品很适合采用这种方法,在饮用水检测中也已有尝试^[12-13]。

ATP 是所有活细胞的主要能量载体,其含量水平可以作为评价微生物活性的参数^[14]。ATP 存在于所有活细胞中,所以 ATP 含量和细胞的生物活性有着密切联系。水中 ATP 含量与活细胞数量呈正相关关系,因此,通过测定 ATP 含量可间接反映水

环境中的活性生物量。ATP 生物荧光是基于酶催化的生化反应。通过细胞裂解提取 ATP,随后与荧光素酶产生荧光素反应,ATP 生物荧光检测技术发光原理完整反应如式 (1)。PPi 表示焦磷酸盐、AMP 表示腺嘌呤核糖核苷酸、 $h\nu$ 是光子。



荧光素在荧光素酶和 Mg^{2+} 的作用下,与 ATP 发生腺苷酰化被活化,活化后的荧光素与荧光素酶相结合,生成一种中间复合物 (荧光素腺苷酸),其与 O_2 结合,在 560 nm 处产生氧化荧光素和光子,氧化荧光素和光子可被分光光度计测定^[15],过程如图 1 所示。本研究所用的 ATP 荧光分析仪即可通过相对光单位 (relative light unit, RLU) 进行量化。由于荧光值与 ATP 浓度呈比例关系,可以换算出为 ATP 浓度,微生物状态稳定时,ATP 值相对恒定。

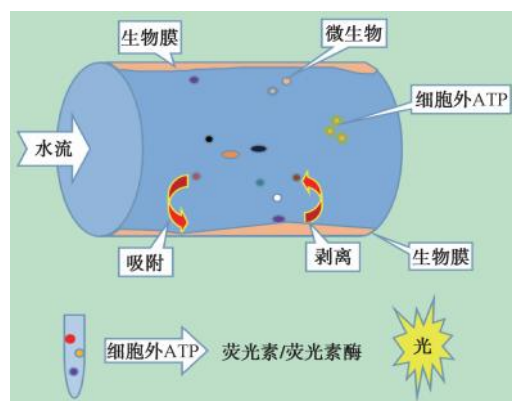


图 1 ATP 荧光分析仪技术原理

Fig. 1 Technical Principle of ATP Fluorescence Analyzer

综上所述,本研究中通过检测出厂水到管网末梢水中整个流程的 ATP 浓度反映水中微生物含量,从而评价连续水体生物稳定性及其影响因素,为今

后水质检测中 ATP 生物荧光法的应用、标准的拟定以及管道建设改造提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究选取的城市地处长江中下游,供水企业供水能力为 296.2 万 m^3/d ,供水用户约为 220 万户,服务人口近 700 万人,供水管网长度约为 8 300 km。供水面积大,且供水管网的长度较长。为全面了解整座城市管网水 ATP 情况,选取该城市东西南北 4 个方位 A、B、C、D 4 座主要水厂,研究其供水区域。将采样流程定为出厂水→管网水→管网末梢水,通过 3 个关键点的水样检测,可以形成一条完整的供水过程数据链,基本可以描述出整个供水过程中管网水 ATP 情况,从而进一步了解管网水生物稳定

性,设置采样点时选择距离水厂距离不同的采样点。由于距离水厂的距离不同,水龄也会产生变化,以此来观察水龄对管网生物稳定性情况的影响。

从 4 座水厂的出厂水开始采样,管网点在 4 座水厂主要供水管道沿线选取,按照间距为 3~5 km 设置,总体不少于 8 个;选取管网末梢点为距离 4 座水厂 20 km 以上,不少于 10 个点,末梢点以最不利点为主,如图 2 所示。最终采样点总数为 50 个,其中 A 片区为城市北侧,采样点 8 个,5 号、8 号为末梢点;B 片区为城市南侧,采样点 13 个,其中 13 号、21 号为末梢点;C 片区为城市西侧,采样点 16 个,末梢点为 44 号、50 号;D 片区为城市东侧,采样点 13 个,32 号、37 号为末梢点。采样检测时间为冬季 9:00—13:00。



图 2 采样点示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Sampling Points

1.2 仪器与试剂

ATP 荧光分析仪及 ATP 拭子 (Hygiena 型号 EnSURE);便携式浊度仪 (哈希 2100Q);便携式余氯仪 (哈希 PCl1);营养琼脂 (奥博星生物技术)。

1.3 研究方法

1.3.1 分析指标及检测依据

ATP 荧光分析仪检测指标包括总 ATP、环境 ATP 以及表面 ATP。总 ATP 即水体中全部高能磷酸化合物,存在于所有细胞中,能够与二磷酸腺苷

(ADP)的相互转化实现贮能和放能,用于保证细胞各项生命活动的能量供应。环境 ATP 指非生物 ATP,主要来源于管道中浮游动植物等体细胞和灭活的细菌胞内物释放。生物 ATP 为细菌胞内物质 ATP,为细菌繁殖提供能量。表面 ATP 是最终采样点与空气接触的管道处外壁的物质 ATP。水中 ATP 生物荧光检测还不具备成熟标准,因此,以食品中 ATP 生物荧光法为依据。ATP 荧光分析仪经过严格验证,具有较高的准确度、回收率及灵敏度,能够达到《食品接触表面清洗消毒效果试验方法 三

磷酸腺苷生物发光法》(GB/T 36004—2018)的标准。检测方法依据如表 1 所示。

表 1 检测方法依据
Tab. 1 Test Method and Basis

项目	检测方法	方法依据
总 ATP 环境 ATP 表层 ATP	ATP 生物荧光法	《食品接触表面清洗消毒效果试验方法 三磷酸腺苷生物发光法》(GB/T 36004—2018)
异养菌群(heterotrophic plate count, HPC)	HPC 平板计数法	《饮用水水质准则》(第四版)
游离氯	现场 N,N-二乙基对苯二胺(DPD)法	《生活饮用水标准检验方法 第 11 部分:消毒剂指标》(GB/T 5750. 11—2023)
浑浊度	散射法-福尔马胂标准	《生活饮用水标准检验方法 第 4 部分:感官性状和物理指标》(GB/T 5750. 4—2023)

本研究选择其他实验室常规指标进行分析,从而了解生物稳定性情况,作为参考进一步评价 ATP 生物荧光法在管网水监测中的适用性。研究^[16-17]表明,AOC 测定难度大,BDOC 不适合批量检测,而管网中 BDOC 与余氯负相关,浑浊度正相关,与管网中的细菌呈显著正相关。因此,以浑浊度、游离氯以及 HPC 进行分析。浑浊度是水体物理性状指标之一,它表征水中悬浮物质等阻碍光线透过的程度,其因颗粒物产生。颗粒物是细菌依附繁殖的必要载体。因此,浑浊度也可以侧面反映细菌的潜在风险,本研究中使用便携式浊度仪检测。游离氯是一种强氧化剂,能损害细胞膜,从而使细菌死亡^[18],本研究中该指标使用便携式余氯仪检测。HPC 指能从有机化合物中获取碳营养的细菌,涵盖了较为广泛的种类^[19]。本研究中使用 HPC 平板计数法检测,在 20~28 ℃ 条件下,培养 5~7 d 以得到最大菌落数。每项检测方法依据如表 1 所示。

供水管道情况也是分析参数的一部分,主要包括管材、管径、管龄 3 项。供水行业管网材质存在几个大类:金属管材(铸铁管、球墨铁管、无缝钢管)、水泥管、塑料管[聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)等]。文献^[20]表明,金属管材中铸铁管和球墨铁管内表面杂质含量是无缝钢管的 15 倍以上,其锈垢的产生风险远高于无缝钢管,细菌等有害的元素虽然只存在于锈垢中,但其稳定性一旦被破坏(水压、施工、切换水源)都会对供水水质安全构成威胁。同时,文献^[21]表明,球墨铸铁管运行过程中水质变化最大,余氯衰减明显,这种不稳定性也可能导致细菌暴发诱发二次污染,而不锈钢管等新式管材料各项水质参数运行前期变化较大,后期逐

渐趋于稳定。

大管径通常用于主管网或者支管网,有用水量、水流速快、水龄短等特点,相比于小管径的管网水质较好,不易出现锈垢、生物膜等问题。随着管网使用年限的增加,管道内壁会腐蚀形成锈垢。因此,管网使用时间也可能对管道内部的生物稳定性产生影响。综上,管道参数在生物稳定性研究中也需加以考虑。

1.3.2 检测步骤

ATP 生物荧光法现场操作步骤主要可分为采样、破碎混合以及检测 3 个步骤:①采样阶段,从耗材盒中取出对应 ATP 检测拭子进行采样,总 ATP 与环境 ATP 使用拭子棉絮端搅拌接触水样进行采集,表面 ATP 使用拭子对龙头内壁进行擦拭采样;②破碎阶段,在采样完成后将拭子另一端挤压,使荧光素试剂与采样端混合,并进行摇晃,使样品中待测 ATP 脱出并与荧光素充分反应;③ATP 荧光分析仪在仪器自检通过后,上机进行检测,选择对应检测项目,显示的 RLU 值即间接体现 ATP 浓度。

为避免偶然性,使用 ATP 荧光分析仪、浊度仪和余氯仪进行现场指标检测时,每个采样点中 ATP 相关检测项目检测前均进行仪器校准,且 ATP 相关检测项目、浑浊度、游离余氯均进行 2 次检测并进行现场记录。实验室 HPC 平板计数法检测所需样品以一次性无菌采样瓶进行采集,每个采样点采集 2 份样品,实验室中使用相同培养基和温度条件进行培养,最终得出结果。

1.4 数据处理

数据处理阶段,将现场记录的 2 次检测结果以及实验室相同样品培养得到的 2 份结果值进行平均

后分析,运用 SPSS 25.0 软件帮助建模,进行统计学分析,评价指标间关联显著性,多个指标相关性通过线性回归进行分析,结果以回归曲线表示。检验水准取 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与讨论

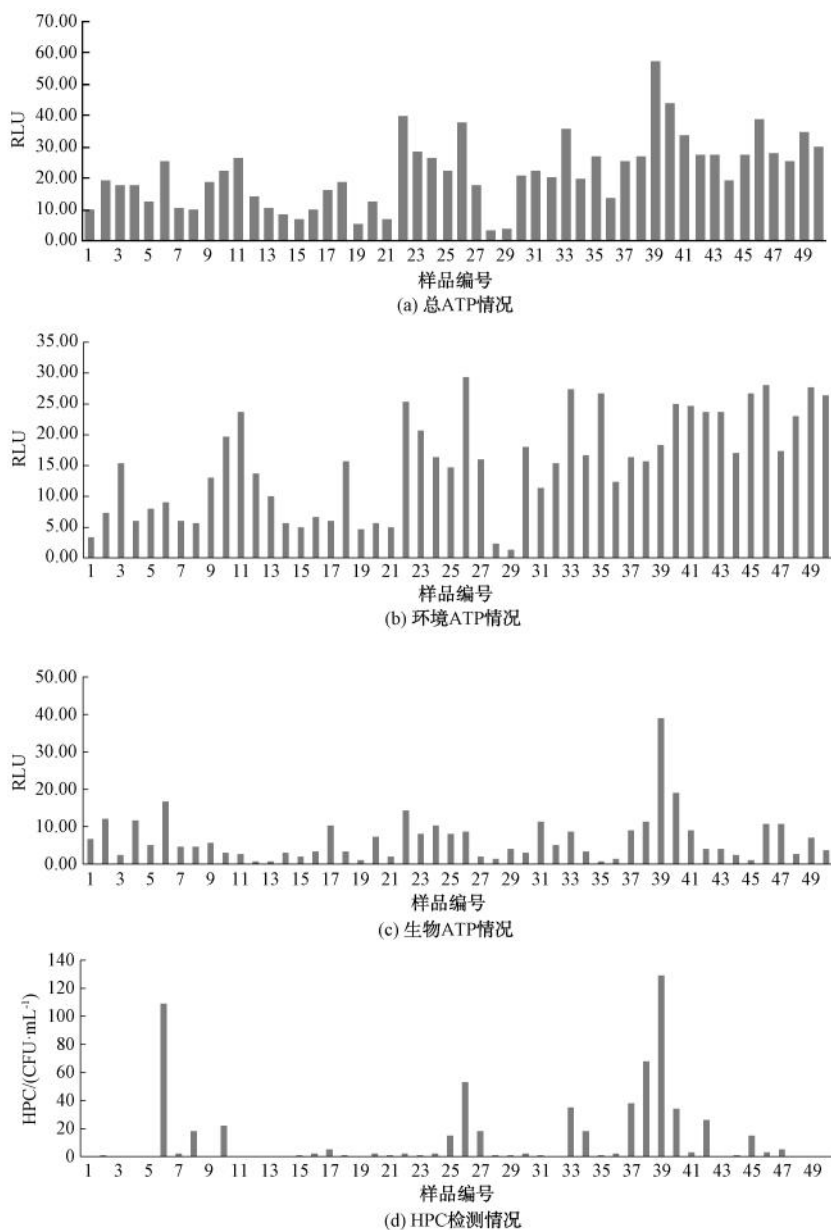
供水管网错综复杂,覆盖整个城市,饮用水从出厂到末梢距离远。因此,管网输配水环节水质监测一直是业内难题^[22],如果能将 ATP 生物荧光法应用到管网水质监测中,将能更好地掌握城市饮用水水质情况。经过本次研究,发现 ATP 生物荧光法可以通过多个 ATP 指标的情况综合反映出管网水生物稳定性。结果讨论如下。

2.1 水质分析指标的基本概况

50 个采样点总 ATP、环境 ATP、生物 ATP (总 ATP 减去环境 ATP)、HPC、浑浊度、游离氯、表面 ATP,7 个指标检测值分别作为纵坐标,采样点位置为横坐标(图 3)。

在 50 个采样点中,A 水厂供水管网片区的 38~50 号样品,总 ATP、环境 ATP、生物 ATP 以及异养菌数量平均值均为 4 个片区最高。浑浊度和游离氯指标 4 个片区的 50 个采样点之间区别不大,波动较小。表面 ATP 数值波动较大,RLU 从 5~10 088。

C 水厂的管网长度最长,整体 ATP 量值较高,可能是其管网情况最复杂,管网末梢点距离水厂最



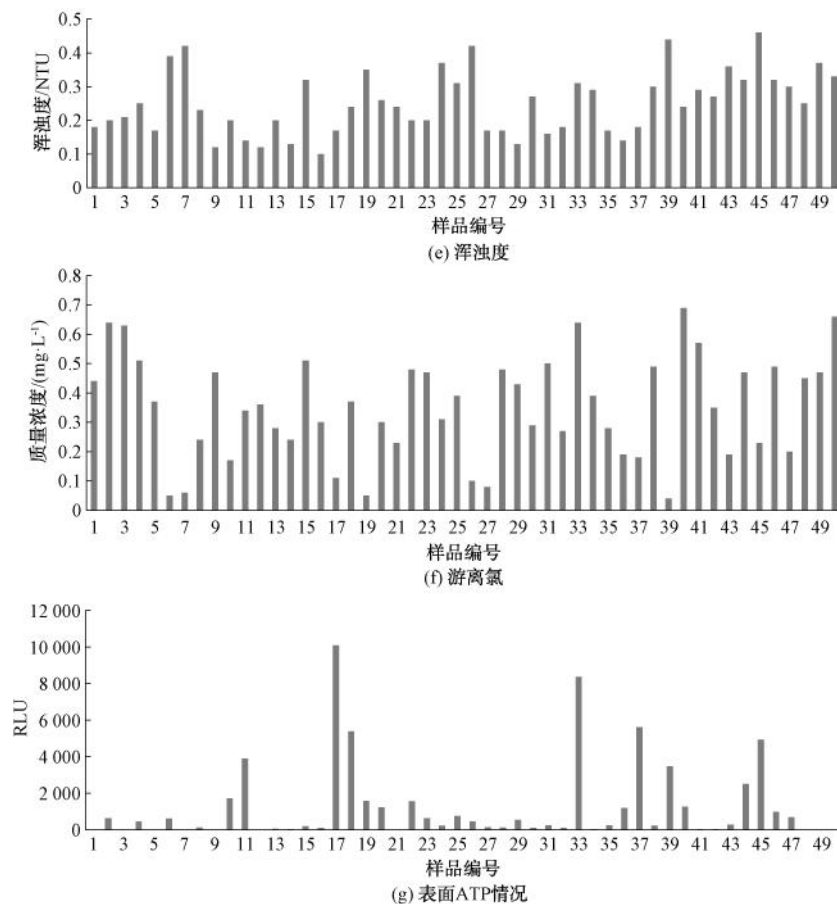


图3 水质分析情况

Fig. 3 Water Quality Analysis

远,导致管道内生物活动旺盛,因此,多项 ATP 数值均偏高。50 个采样点中表面 ATP 波动大,考虑到表面 ATP 的采样方法,拭子拭取的样品为管网水末端接触的物体表面,多为采样点水龙头内侧。观察表面 ATP 最高的 2 个采样点后发现,表面 ATP 最高的 2 个采样点是社区医院和卫生条件很差的公厕,由于龙头表面长时间与空气接触,周围环境中较多的细菌等微生物,容易在龙头处富集,活跃的生物活动最终形成较高的 ATP。浑浊度变化波动极小,标准差仅为 0.09,且均值都很低,远远低于清洁饮用水 (1 NTU) 的标准。因此,后续分析中可以不考虑浑浊度变化对管网生物稳定性产生的影响。采样点和水厂间的距离与 ATP 数值间没有显著关系,可能是中途设置的二次泵站二次加氯或是末梢用户的用水量大,缩短了水龄。

2.2 管道情况

利用管网地理信息系统 (GIS) 工程系统查看管道情况,对本研究中涉及的 50 个采样点管网进行统

计分析,管道基本情况如图 4 所示。

管材种类涉及铸铁管、球墨管、钢管、PVC 管、PE 管共 4 个大类,其中铸铁管 6 段 (占比为 12%),球墨管 38 段 (占比为 76%),钢管 4 段 (占比为 8%),PVC 管 1 段 (占比为 2%),PE 管 1 段 (占比为 2%),结果表明,球墨管的使用率最高。

管径从 20 ~ 1 400 mm 共 50 段,其中管径为 200 ~ 500 mm (包括 500 mm) 的 31 段 (占比为 62%),管径为 500 ~ 1 000 mm (包括 1 000 mm) 的 16 段 (占比为 32%),管径为 1 000 mm 以上的 3 段 (占比为 6%)。本次研究的管网片区以 200 ~ 1 000 mm 的管道居多。

管龄为 1 ~ 30 年,其中管龄为 5 年以内 (包括 5 年) 的 8 段 (占比为 16%),管龄为 5 ~ 10 年 (包括 10 年) 的 6 段 (占比为 12%),管龄为 10 ~ 20 年 (包括 20 年) 的 32 段 (占比为 64%),管龄为 20 年以上的 4 段 (占比为 8%)。本次研究的管道使用时间大部分为 10 ~ 20 年。

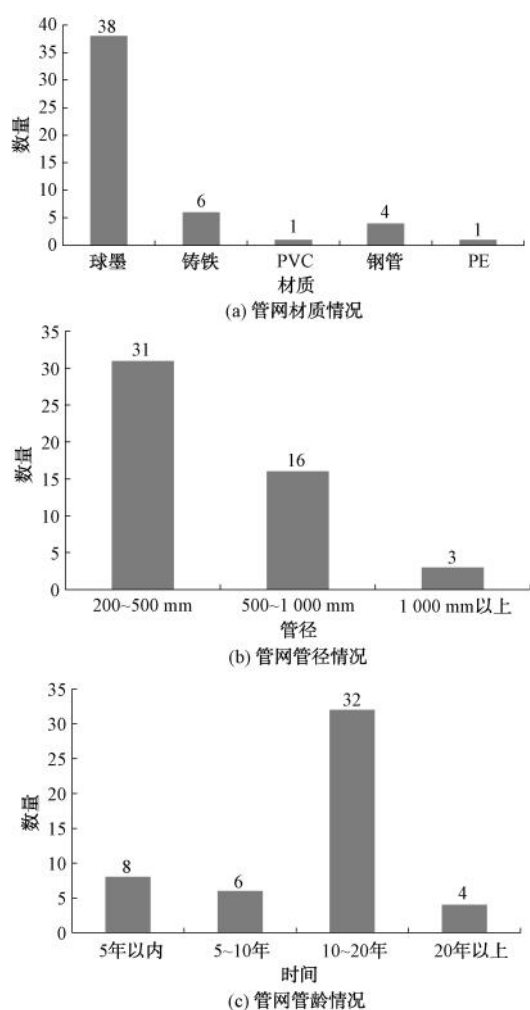


图4 管网综合情况

Fig. 4 General Status of Pipelines Network

2.3 统计学分析

2.3.1 总 ATP 分析结果

使用 SPSS 25.0 线性回归模型评价水体中表面 ATP、环境 ATP、游离氯、管径、管龄以及管网材质这 6 个因素对总 ATP 的影响。结果表明:表面 ATP、环境 ATP、游离氯以及管网情况的变化能够解释总 ATP 变化情况的 71.8% ($>30\%$),说明这 6 个因素变化是总 ATP 的变化主要原因。其中,表面 ATP、游离氯、管径及管网材质对总 ATP 的影响显著性水平为 0.069、0.763、0.921 及 0.456 ($P>0.05$),在统计学意义上对总 ATP 无显著影响。环境 ATP 降低,总 ATP 下降 ($P<0.05$),管龄越大,总 ATP 越低 ($P<0.05$),这 2 个因素对总 ATP 有显著影响。管网水中环境 ATP 以及生物 ATP 是总 ATP 的重要组成部分,因此,环境 ATP 与总 ATP 有着显著的正相

关性。

管网情况方面,一般来说,管网老化会导致水质下降^[23],但在本研究中管网使用年限范围内,管网管龄与总 ATP 呈显著负相关。管道在施工更换中,由于在工程环境中周围土壤尘埃的影响,以及振动、摇晃等物理原因,管道内部的生物稳定性容易遭到破坏。因此,年限较低的管道中总 ATP 较高。使用年限较久的管道中,生物膜已经形成,生物稳定性较好。

2.3.2 异养菌与生物 ATP、管道情况的相关性分析

生物 ATP 是管网水中微生物胞内能量,应与异养菌成正相关,因此,在分析 HPC 变化时将总 ATP 与环境 ATP 进行减法运算,得到生物 ATP 量值。使用 SPSS 软件对数据进行统计学分析,讨论生物 ATP、管网情况与异养菌是否存在显著关系。根据统计学结果,生物 ATP、管龄、材质以及管径 4 个因素的变化能够解释异养菌变化的 58.9% ($>30\%$)。因此,这 4 个因素变化是异养菌的变化主要原因。其中,管网情况中的 3 个因素对异养菌的影响并不明显 ($P>0.05$),游离氯与生物 ATP 没有明显相关性,说明游离氯只能灭活部分异养菌,难以有效控制异养菌代谢活动。表面 ATP 与环境 ATP 与异养菌群并没有关系,可能对于 HPC 来说外界 ATP 不容易利用。而生物 ATP 与 HPC 数量显著相关 ($P<0.05$),说明生物 ATP 所代表的生物胞内 ATP 含量可以反映出管网中 HPC 的生长情况,两者呈正相关。

3 结论

(1) ATP 生物荧光法通过不同 ATP 指标反映管网环境,可以应用于快速评价管网生物稳定性,且结果可靠。管网水中生物 ATP 与 HPC 数呈显著正相关,生物 ATP 过高表明管网水中微生物代谢活动较旺盛,管网水水质生物稳定性差。与实验室内进行的常规理化指标和菌落总数指标检测相比,具有时效性的优势,可以掌握即时管网水质情况,能够有效避免城市水污染。

(2) 环境 ATP、管龄对总 ATP 影响显著,从而进一步影响到生物稳定性,环境 ATP 越高,总 ATP 也随之升高。环境 ATP 的高低反映管道内部环境优劣,在一定年限范围内,管道使用越久,内部生物情况更为稳定。因此,新换管道需加强生物稳定性监

测,避免饮用水的二次污染。

(3) 由于本研究的供水范围内水厂消毒方式为单纯氯气消毒,且原水氨氮等物质维持较低水平,因此,优先考虑游离氯对管网生物稳定性的影响,研究中发现游离氯难以有效控制 HPC 代谢活动,管网中依然存在生物稳定性被破坏的风险,有进行长期监测的必要。

(4) 本文从实际应用的角度研究 ATP 生物荧光法在饮用水监测领域的可行性,为未来快速监测管网内复杂水体情况提供参考依据,若进一步研究本课题,可从季节性、用水量等角度入手,为形成监测标准提供监测频率建议。

参考文献

- [1] 李钊鹏. 基于管壁腐蚀产物和生物膜影响的余氯衰减规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
LI Z P. Research on the chlorine decay based on the influence of corrosion products and biofilm of pipe wall[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [2] 陈晓晨, 肖亮, 陈之歆, 等. 给水管网生物稳定性研究: 现状、挑战与未来[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 1-9.
CHEN X C, XIAO L, CHEN Z X, et al. A review on the biological stability of drinking water distribution system: Current status, challenges and future [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 1-9.
- [3] 王丽芸, 李新, 杨佳生, 等. 基于 ATP 生物发光法的微生物数量快速检测技术的研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(8): 3451-3468.
WANG L Y, LI X, YANG J S, et al. Research progress in rapid detection of microbial count based on ATP bioluminescence[J]. Microbiology China, 2022, 49(8): 3451-3468.
- [4] 王丽芸. ATP 在线检测设备在污水生物处理性能动态监控中的应用[D]. 绵阳: 绵阳师范学院, 2023.
WANG L Y. Application on ATP online detection equipment in dynamic monitoring of biological treatment performance for wastewater [D]. Mianyang: Mianyang Teacher's College, 2023.
- [5] 陈盟, 祁建城, 李玲君, 等. ATP 生物发光法在空气微生物监测评估中的应用研究[J]. 军事医学, 2020, 44(7): 523-529.
CHEN M, QI J C, LI L J, et al. Application of ATP bioluminescence assay in monitoring of airborne microbes[J]. Military Medical Sciences, 2020, 44(7): 523-529.
- [6] LIU Z N, ZHONG Y H, HU Y, et al. Fluorescence strategy for sensitive detection of adenosine triphosphate in terms of evaluating meat freshness [J]. Food Chemistry, 2019, 270: 573-578. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.07.041.
- [7] 黄炎, 张文平, 凌艳明. ATP 生物荧光技术在肉品生产在线清洁度监测中的可行性研究[J]. 农产品加工, 2021(18): 65-68.
HUANG Y, ZHANG W P, LING Y M. Feasibility study of ATP biofluorescence technology in on-line cleanliness monitoring of meat production [J]. Farm Products Processing, 2021(18): 65-68.
- [8] 李彩霞, 秦梦婷, 李海龙, 等. 纸片法与 ATP 荧光检测法在餐饮具消毒中的一致性检验[J]. 解放军预防医学杂志, 2018, 36(6): 804-805.
LI C X, QIN M T, LI H L, et al. Consistency test between paper disc method and ATP fluorescence detection method in tableware disinfection [J]. Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army, 2018, 36(6): 804-805.
- [9] 李红, 张华. 食品化学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2022.
LI H, ZHANG H. Food chemistry[M]. Beijing: China Textile Press, 2022.
- [10] 耿军辉, 詹朦, 姚卓娅, 等. ATP 生物荧光法检测手术器械清洗质量效果评价[J]. 河南预防医学杂志, 2021, 32(10): 789-791, 801.
GENG J H, ZHAN M, YAO Z Y, et al. Evaluation of the effect of ATP bioluminescence method for detecting the cleaning quality of surgical instruments [J]. Henan Journal of Preventive Medicine, 2021, 32(10): 789-791, 801.
- [11] 陈乐, 高胜春, 王海虹. ATP 荧光检测法用于胃肠镜清洗消毒效果评价[J]. 中国乡村医药, 2021, 28(18): 43-44.
CHEN L, GAO S C, WANG H H. Evaluation of gastrointestinal endoscope cleaning and disinfection effectiveness using atp fluorescence detection method [J]. Chinese Journal of Rural Medicine and Pharmacy, 2021, 28(18): 43-44.
- [12] ZHANG K J, PAN R J, ZHANG T Q, et al. A novel method: Using an adenosine triphosphate (ATP) luminescence-based assay to rapidly assess the biological stability of drinking water [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 2019, 103(11): 4269-4277.
- [13] 杨石红, 赵益杰, 宋飞, 等. ATP 检测技术在自来水处理中的应用[J]. 供水技术, 2022, 16(3): 35-39, 44.
YANG S H, ZHAO Y J, SONG F, et al. Application of ATP detection technology in tap water treatment [J]. Water Supply Technology, 2022, 16(3): 35-39, 44.
- [14] 吴鹏, 孙雅和, 朱旭丽, 等. 食源性致病菌快速检测技术及其标准化应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 426-437.
- [15] WU P, SUN Y H, ZHU X L, et al. Research progress on rapid detection technology and standardized application of foodborne pathogens[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 426-437.
- [15] 冉强三, 康建伟, 冯萃敏, 等. 荧光检测技术在水质检测中的应用[J]. 应用化工, 2020, 49(7): 1780-1785.

- RAN Q S, KANG J W, FENG C M, et al. Application of fluorescence detection technology in water quality detection [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(7): 1780-1785.
- [16] 陈晓, 汪毅, 丁志斌, 等. 可同化有机碳 AOC 检测方法研究进展[J]. 齐鲁工业大学学报, 2018, 32(3): 30-34.
- CHEN X, WANG Y, DING Z, et al. Study of assimilable organic carbon determination methods [J]. Journal of Qilu University of Technology, 2018, 32(3): 30-34.
- [17] 张新瑜. 城市供水管网生物稳定性及其影响因素的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- ZHANG X Y. Study on bio-stability and its influencing factors in water distribution system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [18] 潘仁杰. 水源切换下管网水质微生物稳定性及控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- PAN R J. Study on biostability and control measures of drinking water in water distribution system under water source switch[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [19] 韦智三. 工业循环冷却水中异养菌检测方法的影响因素分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(16): 66-70.
- WEI Z S. Analysis of influencing factors on the detection method of heterotrophic bacteria in industrial circulating cooling water [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(16): 66-70.
- [20] 李冬涵, 庄媛, 滑熠龙, 等. 老旧无内衬铸铁管中氯对水质的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(2): 675-681.
- LI D H, ZHUANG Y, HUA Y L, et al. Effect of free chlorine on drinking water quality in old unlined cast iron pipes[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(2): 675-681.
- [21] 刘东坡, 张金松, 靳军涛. 城市供水管网通水初期水质变化规律研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 43-49.
- LIU D P, ZHANG J S, JIN J T. Water quality variation in initial stage of urban water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(17): 43-49.
- [22] 骆杉杉. 城市供水管网在线水质监测点优化管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- LUO S S. Research on optimized management of online water quality monitoring points in urban water supply network [D]. Hangzhou: Zhejiang University. 2021.
- [23] 高金良, 张天天, 张怀宇. 城乡一体化供水管网建设与水质保障技术问题[J]. 给水排水, 2020, 46(6): 48-51.
- GAO J L, ZHANG T T, ZHANG H Y. Technical problems of water quality guarantee and construction of urban and rural integrated water supply network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(6): 48-51.

(上接第 164 页)

- [12] 梁宁慧, 兰菲, 张绍伟, 等. 特大山地城市供水安全保障必要性探讨[J]. 水利水电技术, 2020, 51(s2): 230-235.
- LIANG N H, LAN F, ZHANG S W, et al. Discussion on the necessity of water supply safety guarantee in the mountainous megacity[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(s2): 230-235.
- [13] 张华丽, 董婕, 延军平, 等. 西安市城市生活用水对气候变化响应分析[J]. 资源科学, 2009, 31(6): 1040-1045.
- ZHANG H L, DONG J, YAN J P, et al. Urban domestic water consumption's response to climate change in Xi'an City [J]. Resources Science, 2009, 31(6): 1040-1045.
- [14] 顾建峰. 重庆智慧气象探索与实践[J]. 气象科技进展, 2021, 11(2): 32-38, 104.
- GU J F. Exploration and practice of Chongqing smart meteorology [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(2): 32-38, 104.
- [15] 王克晓, 周蕊. 近 25 年重庆主城区不透水面变化与驱动力分析[J]. 山地学报, 2023, 41(4): 521-531.
- WANG K X, ZHOU R. Urban impervious surface changes in main urban areas of Chongqing, China and associated driving forces for the period of 1995—2020 [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 521-531.