

某市供水系统饮用水中有机物的毒性及其影响因素

刘俊玲¹, 韩雪², 王艳², 王怀记^{1,2}

- 武汉市疾病预防控制中心, 湖北 武汉 430022
- 华中科技大学同济医学院公共卫生学院, 湖北 武汉 430030

摘要:为了解某市饮用水中有机物的生物毒性及其影响因素,在2018年6月至2019年9月期间采集该市A、B两个水厂的水源水、出厂水和管网水,测定水样有机提取物对费氏弧菌(*Vibrio fischeri*)发光的抑制作用,计算引起50%发光抑制的浓度(EC_{50}),并分析其与水样在254 nm波长处的紫外吸光度值(UV_{254})、溶解性有机碳(DOC)浓度的关联。结果表明:饮用水有机提取物 EC_{50} 值范围为0.23~98.97 REF(相对富集系数),中位数为3.37 REF。水文期、常规饮用水处理工艺、管网输送过程及水源水 UV_{254} 和DOC浓度水平对饮用水中有机物的毒性无明显影响。饮用水 UV_{254} 、DOC浓度与有机提取物 EC_{50} 的Spearman相关系数分别为-0.025($P=0.807$)、-0.237($P=0.020$),表明不能用 UV_{254} 、DOC浓度检测代替毒性测试来监测饮用水有机物污染的潜在健康风险。

关键词:饮用水;水质监测;有机提取物;费氏弧菌;生物毒性

中图分类号:X592;R123 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-6002(2024)04-0166-06

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2024.04.17

Toxicity and Influencing Factors of Organic Substances in Drinking Water of a City's Supply Systems

LIU Junling¹, HAN Xue², WANG Yan², WANG Huaiji^{1,2}

- Wuhan Centers for Disease Prevention & Control, Wuhan 430022, China
- School of Public Health, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

Abstract:To understand the biological toxicity and influencing factors of organic substances in drinking water in a certain city, the source water, finished water and tap water of two water plants in the city were collected from June 2018 to September 2019 to determine the inhibitory effect of samples organic extracts on luminescence of *Vibrio fischeri*, and correlations between effective concentration causing 50% luminescence inhibition (EC_{50}) with the conventional water quality parameters [ultraviolet absorbance at 254 nm (UV_{254}) and dissolved organic carbon (DOC)] were investigated. The results showed that EC_{50} values for organic extracts of drinking water samples ranged from 0.23 to 98.97 REF (relative enrichment factor), with a median value of 3.37 REF. The hydrological period, conventional water treatment process, drinking water distribution process, and UV_{254} and DOC levels of the source water had no obvious impact on drinking water toxicity. For drinking water samples, the Spearman correlation coefficients of UV_{254} and DOC levels with EC_{50} values were -0.025 ($P=0.807$) and -0.237 ($P=0.020$), respectively, indicating that UV_{254} and DOC measurements cannot replace toxicity testing for monitoring the potential health risk of drinking water organic contaminants.

Keywords: drinking water; water quality monitoring; organic extracts; *Vibrio fischeri*; biological toxicity

饮用水水质是会影响到公众健康的重要问题。随着我国工业化、城镇化的发展,越来越多的天然和人工合成有机物进入水体,导致地表水环境有机污染严重^[1-2]。近些年,研究人员在饮用水水源中检出的有机污染物超过了200种,污染物的种类和数量均呈增加趋势^[3-4]。常规饮用水处理工艺对众多有机污染物的去除能力有限,并且

氯化消毒会导致一些新的有机污染物的形成。这些来自水源和水处理过程的污染物很容易进入饮用水,进而对人群健康造成潜在威胁^[5]。当前,国内外监测和评价饮用水有机污染情况主要是依据对有机物综合指标(如化学耗氧量)和少量特定指标的检测结果。这些指标不但数量有限,而且不能反映污染物之间可能存在的联合毒性效

收稿日期:2023-02-25;修订日期:2023-10-03

第一作者简介:刘俊玲(1976-),女,湖北武汉人,硕士,副主任医师。

通讯作者:王艳

应,因而不能用以有效评估饮用水有机污染的潜在健康风险。

生物毒性检测通过测量水环境样品中所有生物活性分子的总效应,可部分弥补理化检测的局限性,逐渐成为开展饮用水安全评价的有效手段^[3]。至今,虽然已有一些体外^[6-7]、体内^[8-9]毒性测试技术被用于饮用水毒性评估,但行业内仍缺乏标准化的检测方法。发光细菌法是应用最为广泛的水质综合毒性检测方法,具有灵敏度高、检测范围广、操作简便和成本低廉等优点^[10-11]。国际标准化组织(ISO)和我国均已颁布了基于发光细菌法的水体生物毒性标准检测方法(ISO 11348-1:2007 和 GB/T 15441—1995),主要用于污染水体(如工业废水)毒性评价。根据中国科学院南京土壤研究所提出的水质毒性分级标准^[12],当水样导致的测试细菌的发光抑制率低于30%时,水质为最低毒性等级,即低毒。按照这个标准,由于饮用水中的污染物浓度通常很低,饮用水水质普遍会被判定为低毒,达不到精细区分不同水质的要求。此外,饮用水中的余氯可能会对发光细菌产生毒性效应,干扰测试结果。因此,不宜用发光细菌法直接测试饮用水样品的生物毒性。其中的一个替代方法是用发光细菌法检测饮用水样品有机提取物的毒性,以达到评估饮用水有机污染毒性的目的。

迄今为止,针对城市供水系统的从水源水到管网末梢水的全流程有机污染物毒性监测数据仍极其有限^[13-14]。本研究利用发光细菌法开展了针对某市饮用水中有机提取物的毒性监测,并分析了饮用水有机提取物毒性与水质理化指标[254 nm 波长处的紫外吸光度值(UV_{254})和溶解性有机碳(DOC)含量]的相关关系,以期能为评估当地饮用水的有机污染情况提供基础数据,也为发光细菌法在饮用水生物毒性监测中的应用提供参考。

1 材料与与方法

1.1 仪器、耗材与试剂

本研究采用的主要仪器、耗材与试剂包括紫外可见分光光度计(美国 PerkinElmer, Lambda 35)、TOC 分析仪(美国 GE, Sievers 900)、旋转蒸发仪(德国 Heidolph, LABOROTA 4000)、氮吹仪(北京众信佳仪, ZX-DCW 24)、酶标仪(美国

BioTek, Synergy 2)、玻璃层析柱(武汉化玻, 20 mm×300 mm)、96 孔透明细胞培养板(美国 Corning)、大孔树脂(美国 Sigma-Aldrich, XAD-2 与 XAD-8)、GF/F 玻璃纤维滤膜(北京赛福莱博, 0.7 μm)、二甲基亚砜(DMSO)(美国 Sigma-Aldrich, $\geq 99.0\%$)、费式弧菌(*Vibrio fischeri*)菌种冻干粉(美国 Modern Water)。

1.2 水样采集、处理及理化分析

2018 年 6 月至 2019 年 9 月期间,本研究团队成员在每月上旬分别采集 A、B 两水厂的水源水(分别来自长江和汉江)、出厂水和管网水。A、B 两水厂的地理位置以及采样点分布如图 1 所示。水源水和出厂水分别取自每个水厂的进水口(A-S1、B-S1)与出水口(A-S2、B-S2),管网水分别取自每个水厂的输送管网干线中点(管网水 1 号采样点, A-S3、B-S3)、支路管网终点(管网水 2 号采样点, A-S4、B-S4)和管网干线终点(管网水 3 号采样点, A-S5、B-S5)。每个采样点每月采集 1 份水样。在整个采样期间,本研究从 A、B 两个水厂分别收集了水源水、出厂水、1 号管网水、2 号管网水和 3 号管网水各 16 份样品。水样的采集和保存按照《生活饮用水标准检验方法 水样的采集与保存》(GB/T 5750.2—2006)进行。

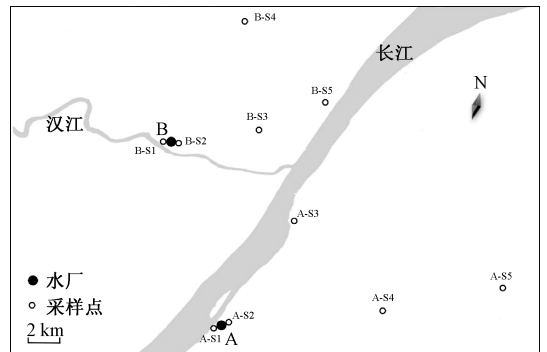


图 1 A、B 自来水厂地理位置及水样采样点分布示意图

Fig. 1 Location of water treatment plants A and B and distribution of water sampling sites

将每次在每个采样点采集的水样分为 3 份,作如下处理:一份水样用 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后,进行水样 UV_{254} 检测;一份水样用 0.45 μm 孔径滤膜过滤后,依据 *Water Quality — Guidelines for the Determination of Total Organic Carbon (TOC) and Dissolved Organic Carbon (DOC)* (ISO 8245:1999) 中的方法,测定水样 DOC 含量;一份

水样用于根据 SCHENCK 等^[15]的方法提取水样有机物。水样有机物的提取过程如下:在 10 L 水样中加入 0.15 g 的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 脱氯,先用 XAD-2 和 XAD-8 树脂富集水样中的有机物,再用乙酸乙酯洗脱树脂上富集的有机物;将洗脱液分离蒸发后,用氮吹仪氮吹至体积恒定;将浓缩物用 DMSO 定容至 200 μL ,放置于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中保存。另外,取超纯水,按照水样有机物提取方法进行相同处理,作为空白对照。水样提取物用于生物毒性测试,以相对富集系数(Relative Enrichment Factor, REF)度量染毒浓度。相对富集系数是指用于毒性测试的有机物浓度相对于水样有机物浓度的浓缩倍数,如 0.5 REF 和 5 REF 分别相当于将水样中的有机物进行 0.5 倍浓缩(即 2 倍稀释)和 5 倍浓缩。

1.3 细菌发光抑制试验

由于在 2018 年 8 月及 2019 年 5 月、6 月、7 月采集的部分水样的有机物提取过程出现失误,本研究仅对 2018 年 6 月至 2019 年 9 月之间的其余 12 个月的共计 120 个水样的有机提取物进行细菌发光抑制试验。120 个水样由 A、B 水厂的水源水、出厂水、1 号管网水、2 号管网水和 3 号管网水各 12 份样品组成。采用国际标准方法(ISO 11348-1:2007)进行细菌发光抑制试验。试验中,每个有机提取物用 2% NaCl 溶液进行等比稀释,分为 5~6 个剂量组。试验同时设置空白对照组(超纯水有机提取物)、阴性对照组(2% NaCl 溶液)和阳性对照组(219.8 mg/L $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液)。每个剂量组、对照组设 3 个平行样。在 96 孔板的各孔中快速加入 50 μL 新鲜费式弧菌菌液,使用酶标仪测定细菌的初始发光强度(I_0)。随后每孔加入 50 μL 染毒液,15 min 后测定各孔的发光强度(I_{15})。按照以下公式计算发光细菌与样品接触 15 min 后的发光抑制率(H_{15})。

$$H_{15} = [(I_0 - I_{15}) / I_0] \times 100\% \quad (1)$$

1.4 数据处理

根据各水样有机提取物的 H_{15} 值,应用 Prism 8.0 软件,采用回归分析方法计算引起费式弧菌 50% 发光抑制的有机提取物浓度(EC_{50})。 EC_{50} 值用 REF 表示,以反映水样中有机物生物毒性的大小。 EC_{50} 值越大,水样中有机物的相对生物毒性越小。应用 SPSS 26.0 软件进行 EC_{50} 均值差异显著性检验(t 检验、方差分析)以及数据间的关联分析(Spearman 相关分析)。

2 结果与讨论

2.1 水源水、出厂水和管网水有机提取物的生物毒性

A、B 两个水厂水源水有机提取物的 EC_{50} 月均值在大多数月份相对稳定,在某些月份出现了突然增大的现象[图 2(a)]。为探讨 EC_{50} 变化趋势是否与水文条件有关,分析了水文期对 EC_{50} 值的影响。结果显示,两个水厂水源水、出厂水及管网水有机提取物的 EC_{50} 均值在丰水期(包括 2018 年 6 月、7 月、9 月和 2019 年 8 月、9 月)、平水期(包括 2018 年 10 月和 2019 年 3 月、4 月)和枯水期(包括 2018 年 11 月、12 月和 2019 年 1 月、2 月)差异不明显($P > 0.05$),表明水文期对 EC_{50} 值无明显影响。两个水厂水源水有机提取物的 EC_{50} 均值在采样期间差异不明显($P = 0.378$),表明两个水厂水源水中的有机物的生物毒性无明显差别。A 水厂水源水取自长江武汉段,B 水厂水源水取自汉江下游。两个江段江水中的有机物主要来自于工农业污染和城市生活污水,种类和浓度可能相近,这可能也是导致其水源水有机提取物 EC_{50} 值无明显差别的原因之一。两个水厂水源水有机提取物的 EC_{50} 值的中位数为 4.17 REF,范围为 0.59~63.48 REF。

A、B 水厂饮用水(包括出厂水、管网水)有机提取物的每月 EC_{50} 值如图 2(b)和图 2(c)所示。对比结果显示,A 厂出厂水有机提取物的每月 EC_{50} 均值与其水源水有机提取物的每月 EC_{50} 均值差异不明显($P = 0.590$),B 厂出厂水有机提取物的每月 EC_{50} 均值与其水源水有机提取物的每月 EC_{50} 均值也差异不明显($P = 0.713$),表明两水厂采取的常规饮用水处理工艺(混凝-沉淀-过滤-氯化消毒)不影响水中有机物的生物毒性。每个水厂出厂水及管网水水样有机提取物的每月 EC_{50} 均值之间亦无明显差异(A 厂, $P = 0.580$;B 厂, $P = 0.719$),表明饮用水的管网输送过程未对饮用水的生物毒性造成影响。此外,A、B 两水厂饮用水有机提取物的 EC_{50} 均值之间差异不明显($P = 0.950$)。将两水厂饮用水合并计算,其有机提取物的 EC_{50} 值的中位数为 3.37 REF,范围为 0.23~98.97 REF。此外,由图 2 可知,饮用水有机提取物 EC_{50} 值与水源水有机提取物 EC_{50} 值的时间变化趋势基本一致。关联分析结果显示,水

源水与出厂水、出厂水与管网水有机提取物的 EC_{50} 值之间均呈显著正相关, Spearman 相关系数在 0.622~0.930 之间(表 1)。这些发现表明, 饮用水有机提取物的生物毒性可能主要取决于水源水的水质。

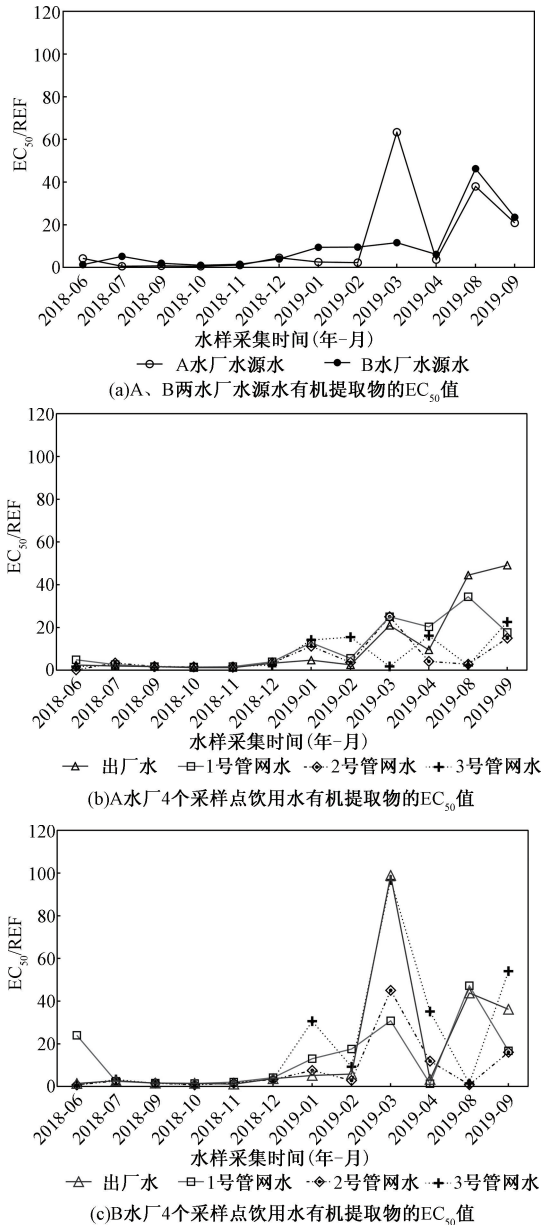


图2 A、B两水厂水样有机提取物抑制费氏弧菌发光的 EC_{50} 值

Fig. 2 EC_{50} values of the *Vibrio fischeri* test for organic extracts of water samples from water treatment plants A and B

由于饮用水中的污染物的浓度低, 现有检测饮用水毒性的技术大多采取测试其有机提取物毒性的方式。虽然一些针对饮用水特异毒性的测试技术提供了毒性阈值(相当于毒性限值, 如检测

值超过此限值, 则认为饮用水存在健康危害风险)^[16], 但这些毒性阈值仅从属于特定的检测方法, 而且还需进一步的验证。目前, 采用基于费式弧菌发光试验的有机提取物 EC_{50} 值评价生活饮用水毒性, 尚缺乏权威的毒性阈值或毒性分级标准。TANG 等^[17] 针对饮用水中有机污染物的毒性效应, 推荐采用 3 REF 作为水质安全预警阈值, 即: 在开展饮用水毒性筛查与监测时, 若饮用水样品有机提取物导致费式弧菌 50% 发光抑制的 $EC_{50} \leq 3$ REF, 则认为该样品毒性偏高, 应通过进一步的理化测试来评估水质的安全性; 若 $EC_{50} > 3$ REF, 则认为该样品的水质可以接受, 无需采取进一步的安全性评估措施。根据该标准, A、B 两水厂的饮用水样品中, 53.12% (51/96) 的样品的水质初筛结果为安全, 无需进行进一步的安全性评估。因此, 在人力、物力有限的情况下, 将有限资源集中在一些潜在毒性高的样品的检测上, 有利于更好地发现导致饮用水毒性的关键水质因素, 提高饮用水水质监测的效率, 节省监测成本。必须说明的是, 3 REF 的安全阈值是基于费式弧菌发光抑制试验制定的, 其适用性需要进一步的验证。此外, 基于体外毒性试验结果判定一个样品有毒或无毒, 并不意味着人类对它的暴露一定会带来健康损害或是绝对安全。

2.2 水样有机提取物 EC_{50} 与水样 UV_{254} 、DOC 浓度的相关性分析

饮用水中的有机污染物对健康的潜在危害日益受到社会的关注, 监测其毒性对保障饮用水安全具有重要意义。迄今为止, 饮用水有机污染物的安全性评价主要是通过测试有机污染物的量来进行的, 但污染物的量与其生物毒性的关系并不清晰, 有机污染负荷指标是否能反映潜在健康风险还有待研究。此外, 虽然在饮用水消毒过程中加入的消毒剂可能会与水中的有机物发生反应, 进而生成有毒的消毒副产物, 但关于水源水有机物浓度与饮用水毒性的关系的研究开展较少。 UV_{254} 和 DOC 浓度是两个已获得广泛应用的饮用水有机污染综合指标^[18-19]。本研究开展了 EC_{50} 与 UV_{254} 、DOC 浓度的相关性分析, 探讨水源水 UV_{254} 、DOC 浓度对出厂水有机物生物毒性的影响, 以及饮用水 UV_{254} 和 DOC 浓度水平是否能表征其有机污染物的毒性水平, 以明确水源水有机物污染对饮用水毒性的影响以及开展饮用水毒性监测的重要性。

表1 A、B两水厂水样有机提取物 EC₅₀ 间的 Spearman 相关系数
Table 1 The Spearman correlation coefficients for EC₅₀ values of organic extracts of water samples from different sampling sites

指标	A 水厂 EC ₅₀				B 水厂 EC ₅₀			
	水源水	管网水 1	管网水 2	管网水 3	水源水	管网水 1	管网水 2	管网水 3
出厂水 EC ₅₀	0.867 (0.001)	0.930 (0.000)	0.741 (0.006)	0.685 (0.014)	0.930 (0.000)	0.622 (0.031)	0.641 (0.025)	0.643 (0.024)

注:括号内的数值为相关分析中的 P 值。

UV₂₅₄、DOC 浓度与 EC₅₀ 的相关性如表 2 所示。水源水 UV₂₅₄、DOC 浓度与出厂水 EC₅₀ 均没有显著相关性 ($P > 0.05$), 表明水源水 UV₂₅₄、DOC 浓度水平对出厂水有机物毒性无明显影响。有研究模拟了饮用水消毒过程, 用氯胺处理经澄清和砂滤的水源水, 发现水样氯胺化前的 DOC 浓度与氯胺化后的消毒副产物生成量及有机提取物细胞毒性呈显著正相关^[20]。考虑到实验室操作过程中的影响因素远没有实际饮用水处理过程复杂, 且本研究中用于相关性分析的样本量较少, 关于水源水有机物污染负荷对氯化饮用水毒性的影

响, 还需要开展更多的研究。有研究调查了紫外线照射对氯化饮用水致哺乳动物细胞毒性的影响, 发现 UV₂₅₄ 可作为指示紫外线照射过程中的毒性消减水平的替代测量指标^[21]。本研究显示, 饮用水的 UV₂₅₄ 与其有机提取物 EC₅₀ 之间无显著相关性 ($P > 0.05$), 且 DOC 浓度与 EC₅₀ 间的 Spearman 相关系数仅为 -0.237 ($P < 0.05$), 表明 UV₂₅₄、DOC 浓度不能作为有机污染物毒性的替代测量参数。这个结果意味着将 UV₂₅₄、DOC 浓度检测与生物毒性测试相结合, 才能更全面、客观地评价饮用水有机污染的潜在健康风险。

表2 水样 UV₂₅₄、DOC 浓度与有机提取物 EC₅₀ 间的 Spearman 相关系数
Table 2 The Spearman correlation coefficients between EC₅₀ values of organic extracts and levels of UV₂₅₄ and DOC of water samples

指标	水源水 (n=24)		饮用水 (n=96)	
	UV ₂₅₄	DOC 浓度	UV ₂₅₄	DOC 浓度
出厂水 EC ₅₀	0.057 (0.790)	-0.331 (0.115)	—	—
饮用水 EC ₅₀	—	—	-0.025 (0.807)	-0.237 (0.020)

注:括号内的数值为 P 值, “—”表示不涉及。

3 结论

1) 在采样调查期间, A、B 两个水厂的水源水有机提取物生物毒性之间及饮用水有机提取物生物毒性之间没有明显差异。水源水有机提取物的 EC₅₀ 值的中位数为 4.17 REF, 范围为 0.59 ~ 63.48 REF; 饮用水有机提取物的 EC₅₀ 值的中位数为 3.37 REF, 范围为 0.23 ~ 98.97 REF。

2) 水文期、常规饮用水处理工艺、管网输送过程, 以及水源水 UV₂₅₄、DOC 水平, 对饮用水有机提取物的生物毒性无明显影响。

3) 不能用对常规有机污染综合指标 UV₂₅₄、DOC 的检测代替有机物毒性测试, 来监测饮用水有机污染的潜在健康风险。

参考文献 (References):

[1] 赵尚玉, 郑小慎, 叶洽. 滨海新区地表水水质评价与污染源分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(2): 107-116.

ZHAO Shangyu, ZHENG Xiaoshen, YE Qia. Surface Water Quality Evaluation and Pollution Source Analysis in Binhai New Area [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(2): 107-116.

[2] 解鑫, 尤佳艺, 李文攀, 等. 2011—2021 年全国地表水环境质量评价与变化分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(4): 23-32.

XIE Xin, YOU Jiayi, LI Wenpan, et al. Assessment and Change Analysis of National Surface Water Environmental Quality in 2011-2021 [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(4): 23-32.

[3] 张崇华, 闫海, 王春莲. 饮用水有机物污染及安全评价技术研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(3): 278-281.

ZHANG Chonghua, YAN Hai, WANG Chunlian. Safety Assessment Methods for Organic Pollution in Drinking Water: A Review of Recent Studies [J]. Journal of Environment and Health, 2013, 30(3): 278-281.

[4] SUN S N, JIANG T T, LIN Y J, et al. Characteristics of Organic Pollutants in Source Water and Purification Evaluations in Drinking Water Treatment

- Plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733:139277.
- [5] BORRULL J, COLOM A, FABREGAS J, et al. Presence, Behaviour and Removal of Selected Organic Micropollutants Through Drinking Water Treatment [J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130023.
- [6] FERETTI D, ACITO M, DETTORI M, et al. Genotoxicity of Source, Treated and Distributed Water from Four Drinking Water Treatment Plants Supplied by Surface Water in Sardinia, Italy [J]. *Environmental Research*, 2020, 185: 109385.
- [7] MASOOD M I, HAUKE N T, NASIM M J, et al. Neural Stem Cell-Based *in Vitro* Bioassay for the Assessment of Neurotoxic Potential of Water Samples [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 101: 72-86.
- [8] WANG H J, PENG C W, HAN X, et al. Toxicological Characteristics of Drinking Water in Two Large-Scale Municipal Water Supply Systems of a Metropolitan City in Central China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(23): 64 058-64 066.
- [9] STOREY M V, VAN DER GAAG B V D, BURNS B P. Advances in On-Line Drinking Water Quality Monitoring and Early Warning Systems [J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 741-747.
- [10] 黄灿克, 刘婷婷, 汤晓畏. 发光细菌毒性法在饮用水水质评估与预警中的应用 [J]. *环境监控与预警*, 2015, 7(3): 4-7.
- HUANG Canke, LIU Tingting, TANG Xiaowei. Application of the Photobacteria Toxicity Detection Method in Water Quality Assessment and Early Warning of Drinking Water [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2015, 7(3): 4-7.
- [11] ABBAS M, ADIL M, EHTISHAM-UL-HAQUE S, et al. *Vibrio fischeri* Bioluminescence Inhibition Assay for Ecotoxicity Assessment: A Review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1 295-1 309.
- [12] 厉以强, 常卫民, 郭小颖, 等. 发光菌毒性试验在项目竣工环保验收监测中的应用 [J]. *中国环境监测*, 2005, 21(2): 49-51.
- LI Yiqiang, CHANG Weimin, GUO Xiaoying, et al. Application of Photobacterium Phosphoreum Toxicity Test on the Environmental Protection Acceptance Monitoring at Project Completion [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(2): 49-51.
- [13] 董小蓉, 杨晓明, 鲁翌, 等. 长江、汉江水源水及其自来水中有机物生物毒性的比较 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(2): 263-268.
- DONG Xiaorong, YANG Xiaoming, LU Yi, et al. Comparison of the Biototoxicity of Organic Compounds in Source and Tap Water from the Yangtze and Han River [J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(2): 263-268.
- [14] 豆捷雄, 石莹, 宋瑞霞, 等. SOS/umu 试验在自来水厂水样有机提取物遗传毒性及其致癌风险评估中的应用 [J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(3): 248-251.
- DOU Jiexiong, SHI Ying, SONG Ruixia, et al. Genetic Toxicity and Carcinogen Risk Assessment of Organic Extracts of Water from a Waterwork by Using SOS/umu Test [J]. *Journal of Environment and Health*, 2017, 34(3): 248-251.
- [15] SCHENCK K M, SIVAGANESAN M, RICE G E. Correlations of Water Quality Parameters with Mutagenicity of Chlorinated Drinking Water Samples [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2009, 72(7): 461-467.
- [16] LEUSCH F D L, NEALE P A, ARNAL C, et al. Analysis of Endocrine Activity in Drinking Water, Surface Water and Treated Wastewater from Six Countries [J]. *Water Research*, 2018, 139: 10-18.
- [17] TANG J Y M, MCCARTY S, GLENN E, et al. Mixture Effects of Organic Micropollutants Present in Water: Towards the Development of Effect-Based Water Quality Trigger Values for Baseline Toxicity [J]. *Water Research*, 2013, 47(10): 3 300-3 314.
- [18] LUNDQVIST J, ANDERSSON A, JOHANNISSON A, et al. Innovative Drinking Water Treatment Techniques Reduce the Disinfection-Induced Oxidative Stress and Genotoxic Activity [J]. *Water Research*, 2019, 155: 182-192.
- [19] KUMAR A, KUMARI M, GUPTA S K. Performance Study of Fly-Ash-Derived Coagulant in Removing Natural Organic Matter from Drinking Water: Synthesis, Characterization, and Modelling [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(11): 821.
- [20] ERSAN M S, LIU C, AMY G, et al. Chloramination of Iodide-Containing Waters: Formation of Iodinated Disinfection Byproducts and Toxicity Correlation with Total Organic Halides of Treated Waters [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134142.
- [21] HUANG W C, DU Y, LIU M, et al. Influence of UV Irradiation on the Toxicity of Chlorinated Water to Mammalian Cells: Toxicity Drivers, Toxicity Changes and Toxicity Surrogates [J]. *Water Research*, 2019, 165: 115024.