

应用中断时间序列方法评估干预措施对陆家嘴水厂出厂水三卤甲烷的影响

任洋洋^a, 钱海雷^a, 裴赛峰^b, 孙晓冬^a, 吴笋^a, 伍晨^a, 周婧娴^b, 杜爱民^a, 隋少峰^a

上海市疾病预防控制中心 a. 健康危害因素监测与控制所 b. 化学品毒性检测所, 上海 200336

摘要:

[背景] 青草沙水库面临着水藻繁殖、富营养化的问题, 由此引起水中的氯化消毒副产物含量增加一直是人们关注的重点。

[目的] 评估“青草沙水库藻类监测与应对方案”(后称“方案”)的实施对常规处理出厂水中三卤甲烷 (THMs) 的治理效果。

[方法] 从 2011—2019 年, 每个季节采集陆家嘴水厂 1 次出厂水水样, 每次采集 1 个样品, 检测出厂水中四种 THMs (三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷) 的质量浓度 (后称浓度)。以 2014 年“方案”的实施作为干预分界点, 将整个研究阶段分为干预措施实施前 (2011—2013 年) 和实施后 (2014—2019 年) 两个阶段。应用中断时间序列分析方法进行分段线性回归, 评估干预措施实施前后出厂水中 THMs 浓度和变化趋势。

[结果] 在“方案”实施前, 时间每延长一个季节, 出厂水中总 THMs 浓度上升 $1.561 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P=0.010$), 最高浓度达 $25.97 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。干预措施实施后, 出厂水中总 THMs 的浓度变化未见统计学意义 ($P=0.198$); 但出厂水中总 THMs 浓度回归线的斜率为 -0.626 ($P=0.001$), 即 THMs 浓度随时间变化呈下降趋势。自 2017 年起至 2019 年, 陆家嘴水厂出厂水中 THMs 的平均浓度保持在 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。

[结论] 青草沙水库藻类和富营养化治理措施达到了较好的效果, 将出厂水中的 THMs 控制在较低水平, THMs 的变化趋势由干预前的逐年上升, 变为干预后的逐年降低。

关键词: 饮用水; 消毒副产物; 三卤甲烷; 中断时间序列; 卫生干预措施

Assessment of intervention measures on trihalomethane in finished water by interrupted time series analysis REN Yangyang^a, QIAN Hailei^a, PEI Saifeng^b, SUN Xiaodong^a, WU Zheng^a, WU Chen^a, ZHOU Jingxian^b, DU Aimin^a, SUI Shaofeng^a (a. Division of Health Risk Factors Monitoring and Control b. Division of Chemical Toxicity and Safety Assessment, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China)

Abstract:

[Background] The Qingcaosha Reservoir is facing issues of algal blooms and eutrophication, and the resulting increase in the level of chlorination disinfection by-products in the water has been a major concern.

[Objective] To evaluate the impact of "Algae Monitoring and Control Program in Qingcaosha Reservoir" (hereinafter referred to as the program) on the control of trihalomethanes (THMs) in conventional finished water.

[Methods] From 2011 to 2019, water samples were collected from the Lujiazui Water Plant once per season, one sample each time, and the concentrations of four THMs (trichloromethane, dichlorobromomethane, monochlorodibromomethane, and tribromomethane) were measured in the samples. Using 2014 when the program was implemented as a cut-off point, the entire study period was divided into two phases: pre-implementation (2011–2013) and post-implementation (2014–2019). Segmented linear regression with interrupted time series analysis was applied to assess the concentrations and trends of THMs in the finished water before and after the program launch.

[Results] The concentration of total THMs in finished water increased by $1.561 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P=0.010$) for each season of time extension before launching the program. The change in the concentration of total THMs in finished water was not statistically significant after the program launch, but the



DOI 10.11836/JEOM23297

基金项目

上海市加强公共卫生体系建设三年行动计划 (2023—2025) 重点学科项目 (GWVI-11.1-39); 上海市加强公共卫生体系建设三年行动计划 (2023—2025) 项目 (GWVI-4); 国家疾控局公共卫生人才培养支持项目 (现场流行病学调查, 无编号)

作者简介

任洋洋 (1994—), 女, 硕士, 医师;
E-mail: renyangyang@scdc.sh.cn

通信作者

隋少峰, E-mail: suishaofeng@scdc.sh.cn

作者中包含编委会成员 无

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2023-08-28

录用日期 2024-01-31

文章编号 2095-9982(2024)04-0420-05

中图分类号 R12

文献标志码 A

引用

任洋洋, 钱海雷, 裴赛峰, 等. 应用中断时间序列方法评估干预措施对陆家嘴水厂出厂水三卤甲烷的影响 [J]. 环境与职业医学, 2024, 41(4): 420-424.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM23297

Funding

This study was funded.

Correspondence to

SUI Shaofeng, E-mail: suishaofeng@scdc.sh.cn

Editorial Board Members' authorship No

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2023-08-28

Accepted 2024-01-31

To cite

REN Yangyang, QIAN Hailei, PEI Saifeng, et al. Assessment of intervention measures on trihalomethane in finished water by interrupted time series analysis [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41(4): 420-424.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM23297

THMs concentration showed a decreasing trend as the slope was -0.626 ($P=0.001$). From 2017 until the end of 2019, the average concentration of THMs in finished water of Lujiazui Water Plant dropped to $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ or less.

[Conclusions] The algae and eutrophication control measures in Qingcaosha Reservoir have achieved good results, controlling THMs in finished water at a low level, and the trend of THMs has changed from a yearly increase pattern before the program to a yearly decrease pattern after the program.

Keywords: drinking water; disinfection by-products; trihalomethanes; interrupted time series; sanitary intervention

消毒是饮用水水处理过程中不可或缺的工序,可以杀灭病原微生物,防止介水传染病的发生,保护公众健康,然而消毒过程中会不可避免地产生各种消毒副产物。常见的消毒副产物包括受控的三卤甲烷(tri-halomethanes, THMs)、卤乙酸及非受控的卤乙腈、卤酮等。研究显示这些物质具有致癌性,美国环保局已将 THMs 中的三氯甲烷定义为 B1 组(人类证据有限的致癌物),将二氯一溴甲烷和三溴甲烷定义为 B2 组(动物实验证据充足的可能人类致癌物)^[1]。

位于长江口的青草沙水库于 2011 年 1 月正式运营,作为水源地向上海市的陆家嘴自来水厂供应原水。由于该水库一直面临着水体富营养化、藻类繁殖的问题,导致出厂水中消毒副产物的含量增加^[2]。为确保供水安全,控制自来水厂出厂水中以三卤甲烷为代表的消毒副产物的含量,上海市水务部门 2013 年制定了高峰供水期“青草沙水库藻类监测及应对方案”(后简称:“方案”),通过加强水质监控,优化水源地环境等措施对原水的富营养化问题进行治理^[3]。中断时间序列分析(interrupted time series, ITS)经常用于评估在明确规定的时期内人群水平上采取的卫生干预措施的有效性^[4-5]。在国外,ITS 已被广泛用于评估公共卫生干预措施,包括新疫苗、自行车头盔立法、对乙酰氨基酚(扑热息痛)包装的变化、交通区间测速、预防鼻腔感染的措施,以及评估诸如全球金融危机等意外事件对健康的影响^[6-11]。但 ITS 分析方法目前国内公共卫生干预措施效果评价中的应用并不多见。

本研究旨在观察青草沙水库供水时期,出厂水中 THMs 的质量浓度(后称浓度),将 2014 年作为实施“方案”的干预分界点,分为“方案”实施前(2011—2013 年)和实施后(2014—2019 年)两个阶段,采用 ITS 方法分析“方案”对出厂水中 THMs 浓度的控制效果。

1 材料与方法

1.1 样品采集

从 2011—2019 年,每季度采集 1 次陆家嘴水厂出厂水的水样,每年采集时间分别为 2 月、5 月、8 月、

11 月,研究期间共采集 36 个样品,每个样品采集 60 mL。用 60 mL 的棕色螺纹口样品瓶(德国 CNW)采集水样至满瓶(不应有气泡),样品在 4°C 冷藏保存。采样后加盐酸至样品 PH 小于 2,样本尽快送至实验室,在 24 h 内完成测定。

1.2 样品处理和分析

采用 USEPA 524.2 吹脱捕集气质联用方法对样品进行检测^[12]。将样品平衡至室温后,沿瓶壁倒满 40 mL 样品瓶,拧紧顶空瓶盖。利用吹扫捕集自动进样器精确移取 5.0 mL 水样至吹扫管,利用吹扫捕集装置,用氦气将水样中的挥发性有机物吹脱、捕集在捕集管内。吹脱程序完成后,将捕集管瞬间加热并以氦气反吹,将所吸附的目标化合物解吸进入毛细管气相色谱质谱联用仪进行分离测定,根据保留时间及特征离子定性,内标法定量。具体检测条件如下。吹扫捕集条件:捕集阱材料 2,6-二苯基咪唑多孔聚合物树脂(Tenax)、硅胶(silicol)、椰壳碳(charcol)混合吸附剂(美国 Tekmar 公司),吹扫进样量 5 mL,吹扫温度 25°C ,吹扫时间 11 min,解吸温度 220°C ,解吸时间 2 min,烘烤温度 260°C ,烘烤时间 2 min。色谱条件:色谱柱 HP-5MS UI ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}, 0.25 \mu\text{m}$);进样口温度 220°C ;分流比为 20:1;程序升温为 35°C 保持 5 min,然后以 $6^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 100°C ,再以 $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 210°C ,保持 1 min。质谱条件:离子源类型 EI,离子源温度 230°C ,传输线温度 260°C ,溶剂延迟 1.6 min,全扫描方式,扫描范围为 35~450 u。

为保证分析的准确性,每批样品测试空白样品,并且每 20 个样品运行一个质控样,控制相对偏差小于 10%。本检测方法的检出限: $0.50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;回收率: 90%~110%;相对标准偏差: $< 5\%$;方法线性范围: $0.50\sim 25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。将未检出浓度设为检出限的 1/2,即 $0.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3 ITS 回归模型构建

将水源地“方案”的实施作为一个干预事件,对中断时间序列数据进行分段线性回归,估计与干预措施实施效果相关的 2 个参数:(I)干预前后 THMs 的浓度变化;(II)干预引起的趋势或斜率的变化。干预前的时

间段为 2011—2013 年, 干预后的时间段为 2014—2019 年。拟合的水平和斜率改变回归模型如下:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 X_t + \beta_3 (T - T_0) \cdot X_t \tag{1}$$

式(1)中: 应变量 Y_t 为每个季节出厂水中 THMs 的浓度; β_0 是时间序列开始前 THMs 的基线水平; β_1 是干预前 THMs 浓度随时间单位的变化趋势; β_2 是干预措施引起的浓度改变; β_3 是干预措施引起斜率的变化; $(\beta_1 + \beta_3)$ 是干预后 THMs 浓度随时间的变化趋势(干预后回归线的斜率); T 代表时间单位, 在本研究中以一个季度为一个时间单位; T_0 为干预措施开始的时间, 在本研究中 $T_0=12$; X_t 代表干预措施的不同阶段, 本研究分干预前($X_t=0$)和干预后($X_t=1$)两个阶段。本研究基于 12 个干预前数据点(2011—2013 年)和 24 个干预后的数据点(2014—2019 年)进行 ITS 分析。利用 Durbin-Watson(DW)法检验序列是否存在 1 阶自相关。利用增广 Dickey-Fuller 法检验干预前后序列的平稳性, 发现数据达到开展时间序列分析的弱平稳性要求。利用赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)最小原则选择最佳回归模型, 以确定纳入模型中的回归项, 提高统计效力。通过计算模型预测值和真实值的差, 绘制残差图, 并计算序列数据的偏自相关系数, 对模型的拟合效果进行检验。

1.4 统计学分析

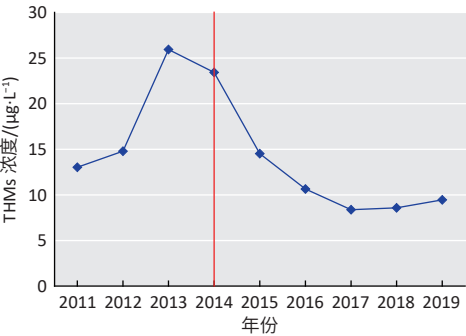
采用 Excel2000 软件建立数据库, 数据保存为.csv 格式。采用 R 3.5.2 软件和 Graphpad 5.0 软件对数据进行统计分析和绘图。采用"lmtest", "Epi", "tsModel", "vcd"等 R 包, 对“方案”实施前后的监测数据进行 ITS 分析^[13]。本研究建立 ITS 模型的 R 语言编码见链接 <https://blog.csdn.net/franksui/article/details/129819879>。在 ITS 分析中, 对回归模型的检验采用双侧检验, 检验水准为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 饮用水中三卤甲烷的浓度

2011—2019 年陆家嘴水厂出厂水中 THMs 的平均浓度为 $14.31 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。图 1 展示了 2011—2019 年逐年出厂水中 THMs 的平均浓度, 可以发现 2013 年前 THMs 的浓度呈上升趋势, 最高达 $25.97 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 而自 2014 年起, 浓度逐年降低, 在 2017 年达到最低, 为 $8.38 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 至 2019 年底一直保持在 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。

干预措施实施前后出厂水中 THMs 的浓度见表 1。“方案”实施后 THMs 的平均浓度降至 $12.51 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 与“方案”实施前的浓度($17.92 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)相比, 下降了 30.2%。



[注] 垂直于 x 轴的红色实线表示青草沙水库藻类干预措施实施开始时间。

图 1 出厂水中 2011—2019 年 THMs 平均浓度
Figure 1 Average concentrations of THMs in finished water from 2011 to 2019

表 1 干预前后出厂水中 THMs 浓度的变化
Table 1 Variation of THMs concentrations in finished water before and after intervention

THMs	平均浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		范围/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	
	干预前	干预后	干预前	干预后
总THMs	17.92	12.51	4.37~31.70	3.98~34.36
三氯甲烷	7.09	3.95	0.25~17.70	0.25~15.20
一氯二溴甲烷	3.26	2.67	0.25~11.10	0.56~9.80
二氯一溴甲烷	6.43	4.84	0.25~11.00	1.50~11.80
三溴甲烷	1.17	0.80	0.25~6.67	0.25~4.11

2011—2019 年每一季度出厂水中 THM 浓度和建立模型所需变量的设置(Y_t , T , X_t)的数据(以 2013、2014 年数据为例)格式示意, 见表 2。

表 2 陆家嘴水厂出厂水中 THMs 浓度变化趋势中断时间序列模型构建的数据格式(以 2013 年、2014 年数据为例)

Table 2 Data format for interrupted time series modeling of the trend of THMs concentrations in finished water from Lujiazui Waterworks (taking 2013 and 2014 as examples)

年份	THMs (Y_t)	季节	时间单位(T)	干预阶段(X_t)
2013	24.82	1	9	0
2013	28.23	2	10	0
2013	19.02	3	11	0
2013	31.70	4	12	0
2014	21.65	1	13	1
2014	34.36	2	14	1
2014	22.10	3	15	1
2014	15.65	4	16	1

[注] 季节: 每年的季节编号从春夏秋冬依序为 1~4; 时间单位从 2011 年第一季度开始顺序编号为 1~36; 干预阶段: 方案实施前设为 0, 方案实施后设为 1。

2.2 “方案”实施后 THMs 的浓度变化趋势

在图 2 中用阴影的深浅来表示干预的不同时期。干预之前,在 2011—2013 年,出厂水中 THMs 的浓度逐年增加;对水库中的藻类开始干预和控制后,斜率由正值变为负值,出厂水中 THMs 的浓度呈现降低趋势。施行了水源藻类控制“方案”后,THMs 浓度(深灰色区域内的蓝色实线)要低于未干预状态的预测值(深灰色区域内的红色虚线)。

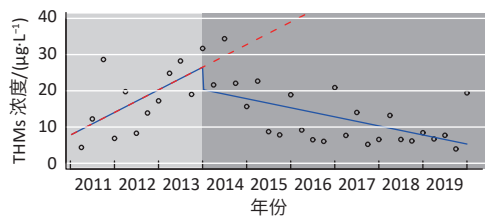


图 2 应用 ITS 分析干预措施实施前后出厂水中 THMs 浓度和趋势的变化

Figure 2 Changes in THMs concentrations and trends in finished water before and after the program launch by ITS

ITS 回归模型的各项统计学参数见表 3。结果显示,在干预措施实施之前的阶段,出厂水中 THMs 的斜率为 1.561,呈上升趋势,即随着时间因素每延长一个季节,出厂水中 THMs 浓度上升 $1.561\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,有统计学意义($b_1=1.561$, $P=0.010$)。干预措施实施后,出厂水中 THMs 水平的改变没有统计学意义($b_2=-6.180$, $P=0.198$)。干预措施导致的出厂水中 THMs 斜率的改变($b_3=-2.187$),具有统计学意义($P=0.001$)。干预措施实施以后的阶段,THMs 的斜率= b_1+b_3 ,即 $1.561+(-2.187)=-0.626$,即 THMs 浓度随时间变化呈下降趋势。

表 3 ITS 回归模型参数

Table 3 Parameters of ITS regression model

变量	回归系数(b)	t	P
常数项	7.736	1.846	0.074
时间(τ)	1.561	2.728	0.010
干预(X_t)	-6.180	-1.314	0.198
斜率改变($(\tau - \tau_0) \cdot X_t$)	-2.187	-3.604	0.001

3 讨论

出厂水中的 THMs 是饮水消毒过程中产生的主要氯化消毒副产物,包括三氯甲烷(CHCl_3)、一氯二溴甲烷(CHBr_2Cl)、二氯一溴甲烷(CHBrCl_2)、三溴甲烷(CHBr_3)。Richardson 等^[14]的研究表明,终生暴露于饮用水消毒副产物会增加癌症风险,尤其是膀胱癌和结肠癌。另外,THMs 对人体的肝脏、肾脏、神经系统、生殖系统等器官具有非致癌风险^[15-17]。陆家嘴水厂采用

的是“絮凝-沉淀-过滤-消毒”的常规水处理工艺,加氯消毒过程主要应用氯和氯胺作为消毒剂。本研究对 2011—2019 年陆家嘴水厂的出厂水中的 THMs 的浓度进行了连续监测,过去 9 年间,THMs 的平均浓度为 $14.31\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,低于伊朗 Bushehr 省($92.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[18]、中国北方的山东省($35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[19]出厂水中的检出浓度,与中国南方的珠江三角洲出厂水中的水平($17.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)接近^[20]。在本研究中,该水厂所有出厂水样品中 THMs 的总浓度远低于 WHO 和欧盟的限值($100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)以及 US EPA 的限值($80\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[21]。

当青草沙水库自 2011 年建成开始供水后,它供应了上海市所有自来水厂原水总用量的 60%,覆盖人口约 1000 万。青草沙水库作为上海市饮用水的新水源地,具有水量充足,水质优良稳定,水源防护与运行成本低等优势。然而,有学者对青草沙水库的水质进行了调查,发现水库内氮/磷比值较高(16~29:1),而且夏季水库蓝藻、微囊藻数量明显增加,这表明青草沙水库面临着水体富营养化和蓝藻繁殖的问题^[22]。水体中的藻类繁殖会为 THMs 的形成提供了更多的有机前体物质(腐殖酸、富里酸、氨基酸),饮用水加氯消毒后,出厂水中的 THMs 含量增加^[15,23]。

在上海市水务管理部门制定的青草沙高峰供水时期的《藻类监测与应对方案》中,主要采取对水体中氮/磷营养盐、藻类进行环境监测,利用水动力调控、物理拦截等控藻技术和生态工程联合治理技术,优化水源地周边环境等水体富营养化综合治理措施^[24-25]。陆家嘴水厂自 2010 年底开始由青草沙水库供水,截至 2019 年底,出厂水中 THMs 的平均浓度降至 $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,与高峰年份的 $25.97\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 相比,降低了 67.73%。在 2014 年的第二季度出厂水中 THMs 的浓度达到最大值($34.36\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),随后浓度开始逐年下降。由 ITS 分析的结果可见,干预措施不仅引起了出水中 THMs 浓度的降低,而且扭转了 THMs 浓度的变化趋势,即由干预前的逐年上升趋势转变为干预后的逐年下降趋势。这一趋势的变化表明,干预措施有效地遏制了原水中藻类迅速增长的态势,从源头上降低了形成消毒副产物所需要的前体物质,有效降低了水中消毒副产物的含量。今后,饮用水监管部门应继续加强水源地的保护和监管,减少水源地上游区域含磷、含氮元素废水的排放量,研发富营养化原水深度处理新工艺,从而进一步降低饮用水中消毒副产物含量,提高饮用水的卫生安全性。

本研究具有一定的局限性。首先,采样点位于浦

东新区的一家水厂,一个采样点的监测数据无法代表整个上海市的消毒副产物的水平。其次是监测频率低,每3个月采样监测一次,无法反映水中污染物逐月的动态变化,季节性的变化也不明显,后续的研究需要提高监测频率,如果能做到每月采样检测一次,将会有效地弥补这一缺陷。另外,适当增加样本量、平行样也是必要的,以减少抽样误差。

综上所述,青草沙水库供水高峰期《藻类监测及应对方案》实施后,陆家嘴水厂的出厂水中THMs的浓度自2014年起明显下降,THMs浓度的发展趋势由干预前的逐年上升,变为干预后的逐年下降,说明上海市水务管理部门采取的藻类监测与原水富营养化治理措施取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 李永珍,何更生,詹铭,等.上海市水源水及出厂水中卤甲烷、卤乙酸、卤乙腈类消毒副产物含量及健康风险评估[J].环境与职业医学,2021,38(5):460-466.
LI YZ, HE GS, ZHAN M, et al. Levels and health risk assessments of halomethanes, haloacetic acids, and haloacetoneitriles disinfection by-products in source and finished water in Shanghai[J]. J Environ Occup Med, 2021, 38(5): 460-466.
- [2] OU HS, WEI CH, DENG Y, et al. Principal component analysis to assess the composition and fate of impurities in a large river-embedded reservoir: Qingcaosha reservoir[J]. Environ Sci Process Impacts, 2013, 15(8): 1613-1621.
- [3] 上海水资源保护基金会. 2013年高峰供水青草沙藻类监测工作启动[EB/OL]. [2023-06-06]. <http://www.swrf.org.cn/news-detail.asp?nid=4444>. Shanghai Water Resources Foundation. In 2013, the algae monitoring work of Qingcaosha in peak water supply was started[EB/OL]. [2023-06-06]. <http://www.swrf.org.cn/news-detail.asp?nid=4444>.
- [4] SOUMERAI SB, STARR D, MAJUMDAR SR. How do you know which health care effectiveness research you can trust? A guide to study design for the perplexed[J]. Prev Chronic Dis, 2015, 12: E101.
- [5] WAGNER AK, SOUMERAI SB, ZHANG F, et al. Segmented regression analysis of interrupted time series studies in medication use research[J]. J Clin Pharm Ther, 2002, 27(4): 299-309.
- [6] LAU WC Y, MURRAY M, EL-TURKI A, et al. Impact of pneumococcal conjugate vaccines on childhood otitis media in the United Kingdom[J]. Vaccine, 2015, 33(39): 5072-5079.
- [7] DENNIS J, RAMSAY T, TURGEON AF, et al. Helmet legislation and admissions to hospital for cycling related head injuries in Canadian provinces and territories: interrupted time series analysis[J]. BMJ, 2013, 346: f2674.
- [8] HAWTON K, BERGEN H, SIMKIN S, et al. Long term effect of reduced pack sizes of paracetamol on poisoning deaths and liver transplant activity in England and Wales: interrupted time series analyses[J]. BMJ, 2013, 346: f403.
- [9] GRUNDY C, STEINBACH R, EDWARDS P, et al. Effect of 20 mph traffic speed zones on road injuries in London, 1986-2006: controlled interrupted time series analysis[J]. BMJ, 2009, 339: b4469.
- [10] DERDE LP G, COOPER BS, GOOSSENS H, et al. Interventions to reduce colonisation and transmission of antimicrobial-resistant bacteria in intensive care units: an interrupted time series study and cluster randomised trial[J]. Lancet Infect Dis, 2014, 14(1): 31-39.
- [11] LOPEZ BERNAL JA, GASPARRINI A, ARTUNDO CM, et al. The effect of the late 2000s financial crisis on suicides in Spain: an interrupted time-series analysis[J]. Eur J Public Health, 2013, 23(5): 732-736.
- [12] ALFORD-STEVENSON A, EICHELBERGER J W, BUDDE W L. Measurement of purgeable organic compounds in water by capillary column gas chromatography/mass spectrometry: EPA Method 524.2[R]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 1992.
- [13] BERNAL JL, CUMMINS S, GASPARRINI A. Corrigendum to: interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions: a tutorial[J]. Int J Epidemiol, 2020, 49(4): 1414.
- [14] RICHARDSON SD, PLEWA MJ, WAGNER ED, et al. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research[J]. Mutat Res, 2007, 636(1/3): 178-242.
- [15] RISTOIU D, VON GUNTEN U, MOCAN A, et al. Trihalomethane formation during water disinfection in four water supplies in the Somes river basin in Romania[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2009, 16 Suppl 1: S55-S65.
- [16] SADIQ R, RODRIGUEZ MJ. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review[J]. Sci Total Environ, 2004, 321(1/3): 21-46.
- [17] WOO Y T, LAI D, MCLAIN J L, et al. Use of mechanism-based structure-activity relationships analysis in carcinogenic potential ranking for drinking water disinfection by-products[J]. Environ Health Perspect, 2002, 110 Suppl 1(Suppl 1): 75-87.
- [18] DOBARADARAN S, SHABANKAREH FARD E, TEKLE-RÖTTERING A, et al. Age-sex specific and cause-specific health risk and burden of disease induced by exposure to trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs) from drinking water: an assessment in four urban communities of Bushehr province, Iran, 2017[J]. Environ Res, 2020, 182: 109062.
- [19] YAO Z, SUN S, WANG M, et al. The occurrence of THMs and AOX in drinking water of Shandong province, China[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2019, 26(18): 18583-18592.
- [20] GAN W, GUO W, MO J, et al. The occurrence of disinfection by-products in municipal drinking water in China's Pearl River Delta and a multipathway cancer risk assessment[J]. Sci Total Environ, 2013, 447: 108-115.
- [21] CHOWDHURY S, RODRIGUEZ MJ, SADIQ R. Disinfection byproducts in Canadian provinces: associated cancer risks and medical expenses[J]. J Hazard Mater, 2011, 187(1/3): 574-584.
- [22] HUANG Z, XIE B, YUAN Q, et al. Microbial community study in newly established Qingcaosha Reservoir of Shanghai, China[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2014, 98(23): 9849-9858.
- [23] GALLARD H, VON GUNTEN U. Chlorination of natural organic matter: kinetics of chlorination and of THM formation[J]. Water Res, 2002, 36(1): 65-74.
- [24] 余梦. 青草沙监控水质严防藻类暴发[EB/OL]. [2023-06-06]. <https://news.sina.com.cn/o/2013-07-02/100027553516.shtml>. YU M. Qingcaosha monitors water quality to prevent algae outbreaks[EB/OL]. [2023-06-06]. <https://news.sina.com.cn/o/2013-07-02/10002755-3516.shtml>.
- [25] 申一尘,王绍祥,朱宜平,等.青草沙水库藻类防控与多水源调配示范研究成果[J].净水技术,2017,36(6):1-5.
SHEN YC, WANG SX, ZHU YP, et al. Research achievements on algae control of Qingcaosha Reservoir and demonstration of multi-water sources distribution[J]. Water Purif Technol, 2017, 36(6): 1-5.

(英文编辑:汪源;责任编辑:丁瑾瑜)