



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202111022

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

江钊泓, 毕然, 杜家豫, 等. 基于不同水厂水质调查的消毒副产物生成趋势及模型预测[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 515-523. [JIANG Gahong, BI Ran, DU Jiayu, et al. Disinfection by-products formation and model prediction based on water quality surveys of different drinking water treatment plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 515-523.]

## 基于不同水厂水质调查的消毒副产物生成趋势及模型预测

江钊泓, 毕然, 杜家豫, 王云鹏, 饶拉, 陈晨, 苑宝玲<sup>✉</sup>

华侨大学土木工程学院, 厦门市市政与工业固废资源化及污染控制重点实验室, 厦门 361021

**摘要** 以南方某市具有代表性的 7 个自来水厂为研究对象, 对不同季节和不同处理工艺下的原水、出厂水和管网水的 9 个常规水质参数和 2 类含碳消毒副产物进行了检测, 考察了水质指标随季节的变化规律和处理工艺对不同水质指标的影响, 分析了常规水质参数与消毒副产物生成量之间的关系。结果表明: 7 个自来水厂出厂水均检出三卤甲烷 (trihalomethanes, THMs) 和卤乙酸 (haloacetic acids, HAAs); THMs 平均质量浓度为 8.70~29.35  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , HAAs 平均质量浓度为 13.22~39.06  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 管网水中 2 类消毒副产物浓度水平较出厂水略有增加; THMs 的季节变化规律为冬季>春季~秋季>夏季, HAAs 的季节变化性不强。利用 IBM SPSS Statistics 20 进行了 Spearman 秩相关系数分析, 并分别以原水和出厂水水质参数来建立出厂水 THMs 或 HAAs 生成量的回归方程。结果表明: THMs 质量浓度预测效果良好, 可用于自来水厂水质的化学安全性预警; 但对于 HAAs 质量浓度预测, 无论采用原水还是出厂水水质参数所建立的预测方程, 预测结果均不理想。

**关键词** 消毒副产物; 三氯甲烷; 卤乙酸; 水质参数; 模型预测

作为传统消毒剂, 氯具有价格低廉、使用工艺成熟、可持续时间长等优点, 因而被广泛应用于各大自来水管网的消毒处理<sup>[1-2]</sup>。据统计, 我国有 99.5% 的自来水厂采用氯消毒工艺<sup>[3]</sup>。而水体中的一些有机物可与氯消毒剂反应, 生成消毒副产物 (disinfection by products, DBPs), 这些 DBPs 具有致癌、致畸和致突变等特征<sup>[4]</sup>。以三卤甲烷 (trihalomethanes, THMs) 和卤乙酸 (haloacetic acids, HAAs) 为代表的含碳 DBPs 被普遍关注。有研究<sup>[5-8]</sup>表明, THMs 具有遗传毒性、致癌性和对人体潜在的发育毒性; 而 HAAs 的危害主要表现为阻碍生殖和发育。故美国饮用水水质标准规定 THMs 和 HAAs 的限值分别为 80  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和 60  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。流行病学研究<sup>[9-10]</sup>表明, 长期饮用氯化消毒后的饮用水可能诱发膀胱癌, 并可能造成早期流产。

陈颂等<sup>[11]</sup>选取了 4 个中小自来水厂, 原水分别来自珠江、长江和淮河, 利用美国环境保护署推荐的健康风险模型, 针对经口摄入为暴露途径所引起的风险, 评价了出厂水中三卤甲烷和卤乙酸对人体健康产生的潜在危害; 结果表明, 4 个自来水厂出厂水中的消毒副产物浓度均未超过国标限值, 其健康风险均在可接受范围内。于影等<sup>[12]</sup>通过调查北方某大城市多水源供水格局下管网水

收稿日期: 2021-11-03; 录用日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51678255); 厦门市第一批科技计划重大项目 (3502Z20191012); 福建省高校产学研合作重大项目 (2018Y4101); 泉州市高层次人才创新创业项目 (2018C082R) 资助

第一作者: 江钊泓 (1998—), 男, 硕士研究生, 1025385704@qq.com; ✉通信作者: 苑宝玲 (1973—), 女, 博士, 教授, blyuan@hqu.edu.cn

中 THMs 和 HAAs 的质量浓度,对管网中各类 DBPs 的超标风险、风险点的时空分布及影响因素进行了分析;结果表明,该市 DBPs 的超标风险整体较低,但管网中 HAAs 超标风险明显高于 THMs,故可作为管网监测的指示性 DBPs。上述研究都为自来水厂出厂水和管网水的 DBPs 的风险预测进行了有益的探索。

但由于国内大部分自来水厂由于检测能力有限或成本问题,无法及时准确地检测出厂水中的 DBPs,一旦原水水质发生变化就难以确保水质安全。因此,建立水质常规指标与 DBPs 生成量之间的预测模型,有利于帮助自来水厂快速响应由于水质变化带来的 DBPs 生成风险<sup>[13]</sup>。而如何通过自来水厂原水和不同工艺出水水质指标与消毒副产物生成的相互关系,实现出厂水消毒副产物生成量的快速预测,为自来水水质的化学安全性预警提供保障,是本研究的主要目标。基于上述考虑,本研究以南方某市具有代表性的 7 个自来水厂为研究对象,对原水、出厂水和管网水的 9 个水质指标进行了检测,考察这些指标随季节的变化特征,分析各水质参数与消毒副产物生成量之间的关系;通过研究消毒副产物的生成归趋以及时空分布,建立预测回归方程,为后续控制和消减 DBPs 的生成、降低饮用水供水风险提供参考。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 水样的采集

2019 年 1—11 月,对南方某市具有代表性的 7 个自来水厂的原水、出厂水以及就近管网水龙头出水分别进行了水样的采集。采集水样方法:先放水 3 min,然后用水样荡洗聚乙烯瓶 3 次后采集,水样上部不留空间,并采用水封。在采样瓶上注明水样编号、采样者、日期、时间、地点,采样完毕后立即送往实验室。水温、pH、游离余氯等指标在现场测定;其余指标的测定在 24 h 内完成。采样方法遵循生活饮用水标准检验方法(GB/T 5750.2-2006)。

7 个自来水厂采用的具体处理工艺如表 1,所使用混凝药剂均为聚合双酸铝铁(PAFCS),消毒方式均采用次氯酸钠溶液消毒。

### 1.2 水质参数的检测

分别于 2019 年 1、4、8 和 11 月(分别代表冬、春、夏、秋 4 个季节)对 7 个自来水厂的原水、出厂水和管网水的温度、pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、余氯、氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )、总氮(TN)、溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、 $\text{UV}_{254}$  共 9 个水质指标进行检测,检测方法详见生活饮用水标准检验方法(GB/T 5750.4-2006)。

### 1.3 消毒副产物的测定

THMs 前处理:取水样 10 mL 加入 20 mL 顶空进样瓶中,加入 100  $\mu\text{L}$  氟苯内标( $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),加盖密封后用多管式漩涡混合器于  $2\,500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  振荡 3 min。

HAAs 前处理:取水样 40 mL 加入 60 mL 棕色样品瓶中,加入 2 mL 浓硫酸,并加入 18 g 无水硫酸钠,振荡溶解后,加入 4 mL 含 1,2 二溴丙烷内标的 MTBE 萃取剂,充分振荡混合后

表 1 南方某市 7 个自来水厂基础信息  
Table 1 Basic information of 7 DWTPs in a city of South China

自来水厂编号	供水规模 ( $10^4 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ )	处理工艺	原水水源
1 <sup>#</sup>	20	折板絮凝池+平流沉淀池 (V型滤池)	九龙江北溪
2 <sup>#</sup>	12	折板絮凝池+平流沉淀池 (V型滤池)	九龙江北溪
3 <sup>#</sup>	90	折板孔式反应池+平流沉淀池 (V型滤池)	九龙江北溪
4 <sup>#</sup>	16	机械搅拌加速澄清池 (V型滤池)	九龙江北溪
5 <sup>#</sup>	5	回旋网格式反应池+斜管沉淀池 (双阀虹吸滤池)	九龙江北溪
6 <sup>#</sup>	12	折板絮凝池+平流沉淀池 (V型滤池)	坂头水库
7 <sup>#</sup>	4	栅条反应池+平流沉淀池 (V型滤池)	汀溪水库

静止 5 min, 转移上层萃取液 3 mL 至 15 mL 样品瓶中, 加入 10% 酸化甲醇, 50 °C 水浴 (120±10) min 衍生化反应, 待反应结束后取出样品; 冷却后加入 7 mL 150g·mL<sup>-1</sup> 无水硫酸钠溶液, 充分混合, 静置后移除下层水相; 加入 1 mL 饱和碳酸氢钠溶液; 转移上层有机相 1 mL 至进样瓶。采用内标法测试 THMs 和 HAAs, 气相色谱条件参考生活饮用水标准检验方法 (GB/T 5750.10-2006)。

#### 1.4 数理统计方法

相关性分析: Spearman 秩相关系数利用单调方程评价 2 个统计变量的相关性, 如果数据中没有重复值且当 2 个变量完全单调相关时, Spearman 秩相关系数则为 +1 或 -1, 用于度量 2 个变量 X 和 Y 之间的相关性。其计算公式如式 (1) 所示。

$$r = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (1)$$

式中:  $r$  为 Spearman 秩相关系数, 介于 -1~1,  $|r|$  越靠近 1, 相关性越强;  $D$  为 2 个数据次序的差值;  $N$  为数据的数量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 7 个自来水厂水质指标随季节的变化规律

对 7 个自来水厂的原水 (5 个江河水和 2 个水库水)、出厂水和管网水的 9 个水质指标进行了季节监测, 得到水质指标随季节的变化规律并研究水处理工艺对不同水质指标的影响。

4 个季度原水温度显著不同, 为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季, 平均水温分别为 30.01、21.80、20.58 和 18.40 °C。原水 pH 为 6.65~8.72, 春、夏、秋、冬的平均 pH 分别为 7.09、7.71、7.48、7.08。7 个自来水厂夏季原水 pH 均较高, 一方面可能是由于夏季雨水冲刷呈碱性的污染物进入水源地引起 pH 值升高<sup>[14]</sup>; 另一方面, 水体温度较高, 二氧化碳的溶解度减小<sup>[15]</sup>, 导致原水 pH 升高。7 个自来水厂不同处理工艺的出水 pH 无明显变化, 表明自来水厂出水 pH 受原水影响较大。7 个自来水厂原水 DO 质量浓度为 5.31~9.80 mg·L<sup>-1</sup>。春、夏、秋、冬 4 个季度的溶解氧平均值分别为 9.07、7.05、8.22、8.76 mg·L<sup>-1</sup>。利用 IBM SPSS Statistics 20 软件, 计算了 Spearman 秩相关系数, 上述结果表明: 各自来水厂原水 DO 季节变化与原水温度季节变化呈负相关 ( $r=-0.671$ )。这表明, DO 主要受温度的影响而发生变化, 温度越高, 溶解氧越低<sup>[16]</sup>。除此之外, 在充分光照下, 藻类光合作用释放大量氧气也会使 DO 异常增加<sup>[17]</sup>。

7 个自来水厂的出厂水余氯质量浓度为 0.60~1.09 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 0.83 mg·L<sup>-1</sup>; 管网水余氯质量浓度为 0.12~0.94 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 0.57 mg·L<sup>-1</sup>。通常, 供水规模越大, 管网延伸越长, 需要的余氯就越高, 以保证管网水的生物稳定性<sup>[18]</sup>。由于管网生物膜的作用, 出厂水余氯经过管网后均有不同程度的衰减, 而且随着管网的延伸而不断减少<sup>[19]</sup>。

7 个自来水厂原水氨氮质量浓度为 0.02~0.33 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 0.08 mg·L<sup>-1</sup>; 出厂水氨氮质量浓度为 0.02~0.08 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 0.03 mg·L<sup>-1</sup>。以江河为水源的原水氨氮质量浓度为 0.02~0.33 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 0.09 mg·L<sup>-1</sup>; 以水库为水源的原水氨氮质量浓度为 0.02~0.25 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 0.06 mg·L<sup>-1</sup>。上述结果表明: 以江河为水源的原水氨氮质量浓度高于以水库为水源的原水氨氮质量浓度。这与 FU 等<sup>[20]</sup>对中国集中式饮用水氨氮质量浓度调查的结果一致。而且, 氨氮在不同工艺处理工艺中均得到有效去除, 这保证了出厂水具有较低的氨氮质量浓度。7 个自来水厂原水硝酸盐氮质量浓度为 0.44~2.11 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 1.16 mg·L<sup>-1</sup>; 出厂水硝酸盐氮质量浓度为 0.47~2.18 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 1.23 mg·L<sup>-1</sup>。以江河为水源的原水硝酸盐氮质量浓度为 0.58~2.11 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 1.45 mg·L<sup>-1</sup>; 以水库为水源的原水硝酸盐氮质量浓度为 0.44~1.58 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 0.84 mg·L<sup>-1</sup>。上述结果表明: 以江河为水源的原水硝酸盐氮质量浓度高于以水库为水源的原水硝酸盐氮质量浓度。这一结果与

朱静华对天津市水体的调查一致<sup>[21]</sup>。此外,硝酸盐氮在处理工艺中没有得到有效去除。7个自来水厂原水总氮质量浓度为0.22~2.51 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为1.57 mg·L<sup>-1</sup>;出厂水总氮质量浓度为0.41~2.74 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为1.57 mg·L<sup>-1</sup>。上述结果表明:总氮在处理工艺中也没有得到有效去除。

如图1所示,原水DOC质量浓度为1.49~7.72 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为3.45 mg·L<sup>-1</sup>;出厂水DOC质量浓度为0.97~4.23 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为2.10 mg·L<sup>-1</sup>;管网水DOC质量浓度为1.00~6.29 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为2.30 mg·L<sup>-1</sup>。7个自来水厂原水DOC的季节性变化趋势均呈夏季>秋季~春季>冬季,出厂水DOC的季节性变化趋势均呈夏季>秋季>春季~冬季,管网水DOC的季节性变化趋势均呈夏季>秋季>春季>冬季。夏季原水DOC浓度增高,其主要原因如下:夏季温度高,水源蒸发量大,水中的DOC浓度增加;夏季雨水将空气以及水源周边的有机物带入水源中,使水源的DOC浓度增加<sup>[22]</sup>。从图1可以看出,DOC在处理工艺中均能得到有效去除。DOC年平均去除率为38.94%,春季原水中DOC较易处理,平均去除率可达56.80%;夏季原水中DOC去除效果较差,平均去除率仅为19.03%。这说明DOC可通过混凝、沉淀、过滤、消毒得到有效消减。此外,消毒过程中DOC与三卤甲烷生成呈正相关关系( $r=0.304$ )。这与牛志广对于桥水库的研究结果一致<sup>[22]</sup>。

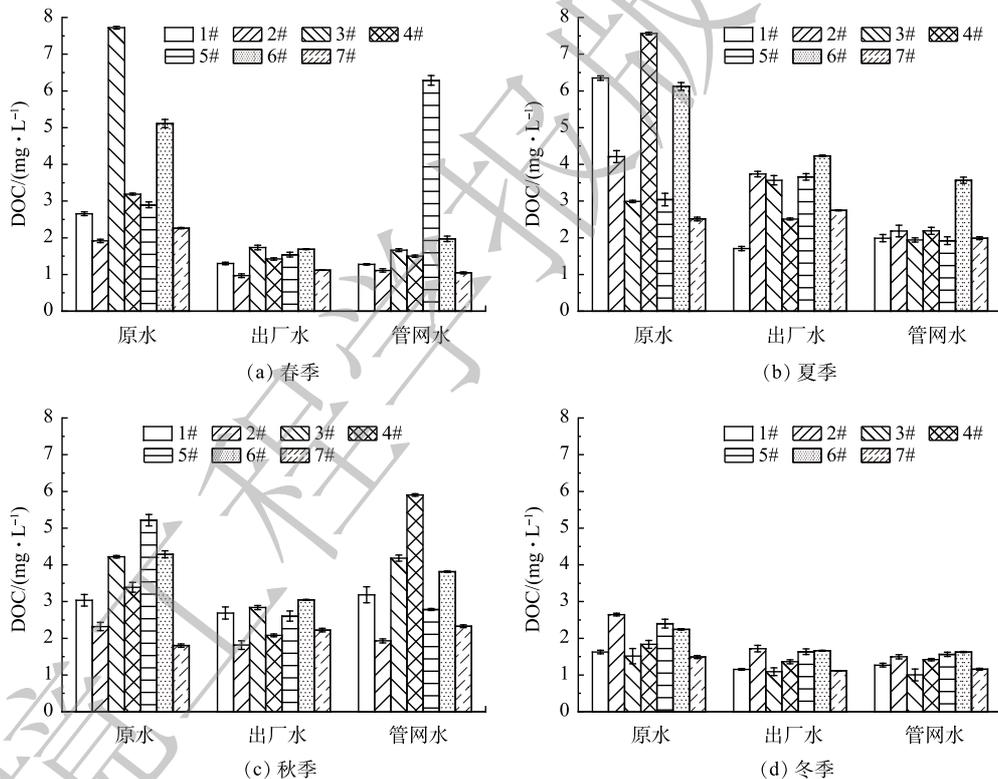


图1 不同季节7个自来水厂DOC浓度变化

Fig. 1 Variation of DOC in 7 DWTPs in different seasons

如图2所示,原水UV<sub>254</sub>为0.02~0.05 cm<sup>-1</sup>,平均值为0.03 cm<sup>-1</sup>;出厂水UV<sub>254</sub>为0.01~0.04 cm<sup>-1</sup>,平均值为0.02 cm<sup>-1</sup>;管网水UV<sub>254</sub>为0.01~0.05 cm<sup>-1</sup>,平均值为0.02 cm<sup>-1</sup>。上述结果表明,UV<sub>254</sub>在7个自来水厂处理工艺中均得到有效去除。其中,UV<sub>254</sub>年平均去除率为55.52%,且不同水源去除效果相当。从季节性变化来看,春季去除率显著高于其他季节,为66.48%;夏季去除率最低,仅为34.01%,这与DOC的季节性变化规律相当。

## 2.2 常规净水工艺中THMs行为归趋及时空分布

由图3可看出,原水中THMs检出值均较低,为0~1.50 μg·L<sup>-1</sup>,平均值为0.61 μg·L<sup>-1</sup>。但随着

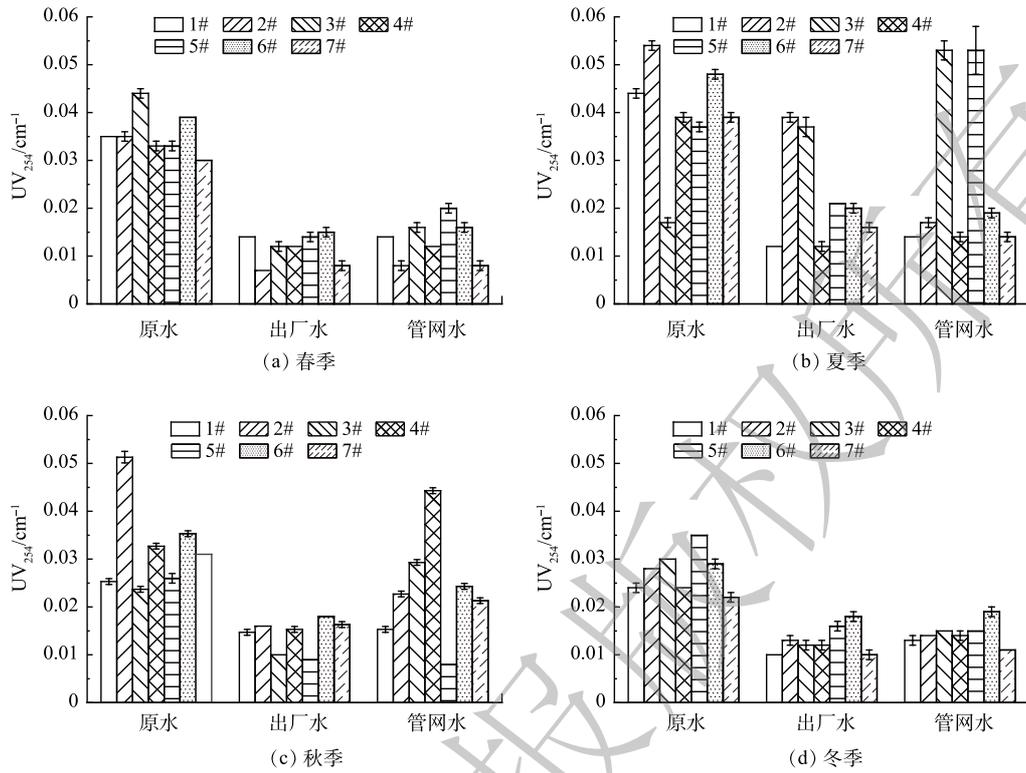


图 2 不同季节 7 个自来水厂 UV<sub>254</sub> 变化

Fig. 2 Variation of UV<sub>254</sub> in 7 DWTPs in different seasons

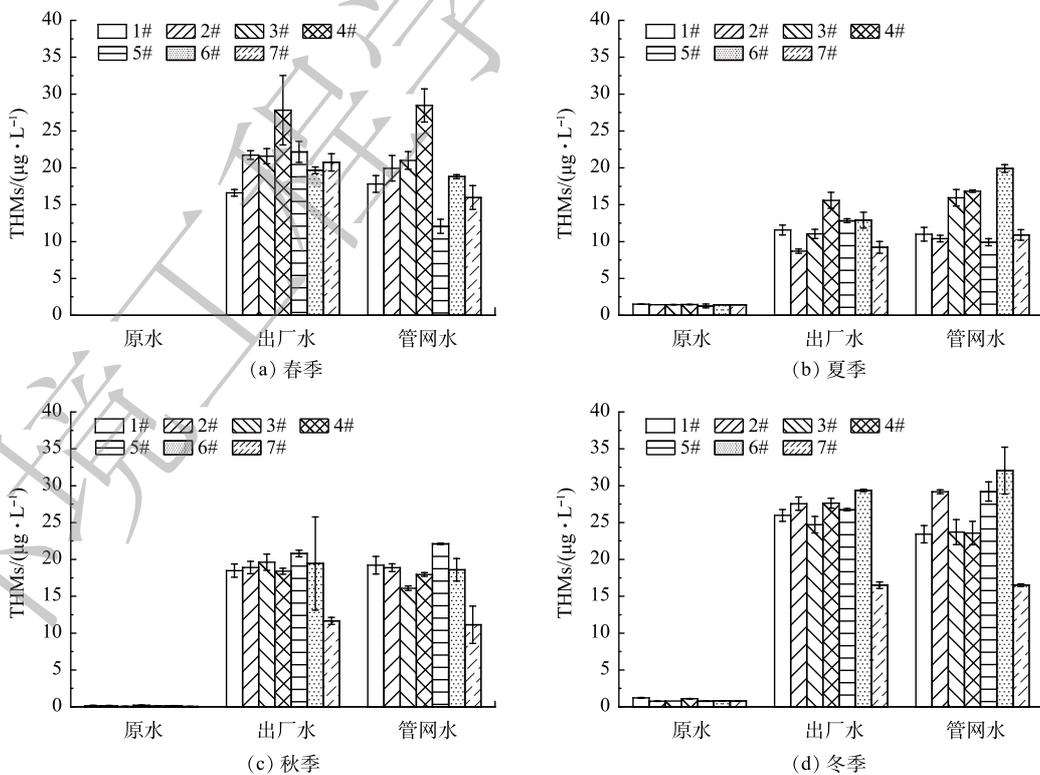


图 3 不同季节 7 个自来水厂 THMs 浓度变化

Fig. 3 Variation of THMs concentration in 7 DWTPs in different seasons

加氯消毒后, 7个自来水厂出厂水和管网水在4个季节均检出THMs, 且质量浓度大幅度增加, 7个自来水厂出厂水和管网水THMs质量浓度分别为8.70~29.35  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和9.92~32.05  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。7个自来水厂出厂水THMs呈现不同的季节变化规律: 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>水厂为冬季>春季 $\approx$ 秋季>夏季; 7<sup>#</sup>水厂为春季>冬季>秋季>夏季。这与出厂水DOC和UV<sub>254</sub>季节性变化差异不完全一致, 表明水体中THMs前体物质量浓度与DOC在季节上存在差异, 夏季高质量浓度的DOC并不意味着THMs前体物含量高。管网水中的THMs质量浓度季节性变化规律为冬季>春季 $\approx$ 秋季>夏季, 这与出厂水THMs质量浓度变化规律相似, 且管网水较出厂水略微升高。这可能是THMs前体物与管网余氯反应后引起的THMs的升高。

### 2.3 7个自来水厂THMs的行为归趋

以原水和出厂水的水质参数建立了出厂水THMs生成量的预测模型。利用IBM SPSS Statistics 20进行了Spearman秩相关系数分析, 以探究原水和出厂水水质参数与出厂水THMs质量浓度之间的关系, 结果见表2。

由表2可以看出, 出厂水THMs与原水的DO、温度、pH、TN、NO<sub>3</sub>-N和UV<sub>254</sub>相关性显著; 与出厂水的温度、DO、pH、DOC和UV<sub>254</sub>相关性显著。以这些相关性显著的原水水质参数(DO、温度、pH、TN、NO<sub>3</sub>-N和UV<sub>254</sub>)和出厂水水质参数(温度、DO、pH、DOC和UV<sub>254</sub>)为自变量, 出厂水THMs浓度为因变量, 采用IBM SPSS Statistics 20作多元线性回归, 得到原水和出厂水水质与THMs生成量的预测回归方程, 如式(2)和式(3)所示。

$$C_{\text{THMs}} = 42.230 + 0.415C_{\text{DO}} - 0.629T - 1.527\text{pH} + 0.617C_{\text{TN}} - 0.364C_{\text{NO}_3\text{-N}} - 54.066\text{UV}_{254} (R^2 = 0.700) \quad (2)$$

$$C_{\text{THMs}} = 46.002 - 0.456T + 1.965C_{\text{DO}} - 4.392\text{pH} + 0.61C_{\text{DOC}} - 159.279\text{UV}_{254} (R^2 = 0.663) \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{THMs}}$ 为THMs质量浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $C_{\text{DO}}$ 为DO质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $T$ 为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{\text{TN}}$ 为TN质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $C_{\text{NO}_3\text{-N}}$ 为NO<sub>3</sub>-N质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; UV<sub>254</sub>为水样在254 nm波长紫外光下的吸光度,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $R^2$ 为可决系数。

将原水和出厂水自变量相关水质参数代入上述线性回归方程进行拟合, 得到出厂水THMs质量浓度的预测效果。如图4所示, 预测值/实测值比值越接近1, 则表明预测效果越好。由图4(a)中拟合预测值和实测值之间的关系可知, 该回归方程可以预测出厂水THMs质量浓度水平。这在水源地保护和水源受到污染后应急快速响应上具有重要意义。由图4(b)可知, 该回归方程能够较好地预测出厂水THMs质量浓度水平。这意味着在实际水厂运行过程中, 可以通过快速检测出厂水T、DO、pH、DOC和UV<sub>254</sub>这些简单指标, 代入回归方程进行快速THMs质量浓度的预测, 从而实现出厂水消毒副产物风险的及时预警。

### 2.4 常规净水工艺中HAAs行为归趋及时空分布

7个自来水厂的原水、出厂水和管网水的HAAs变化如图5所示。2019年7个自来水厂原水、出厂水和管网水在4个季度均检出了HAAs, 原水HAAs质量浓度为1.51~6.49  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为4.17  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 加氯消毒后, 出厂水和管网水HAAs质量浓度大幅度增加, 分别为13.22~39.06  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

表2 出厂水THMs浓度与原水和出厂水各水质参数间的Spearman秩相关系数( $r$ )及相伴概率( $P$ )

Table 2 Spearman rank correlation coefficient ( $r$ ) and associated probability ( $P$ ) between THMs and water quality parameters in raw water and factory water

水质参数	原水		出厂水	
	$r$ 值	$P$ 值	$r$ 值	$P$ 值
DO	0.797**	0	0.768**	0
温度	-0.751**	0	-0.788**	0
pH	-0.635**	0	-0.637**	0
TN	0.409*	0.031	0.351	0.067
NO <sub>3</sub> -N	-0.384*	0.044	-0.235	0.228
UV <sub>254</sub>	-0.362*	0.049	-0.436*	0.02
DOC	0.304	0.115	0.608**	0.001
余氯	0.209	0.286	0.256	0.188
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.112	0.570	-0.116	0.555

注: \*表示差异显著,  $P < 0.05$ ; \*\*表示差异显著,  $P < 0.01$ 。

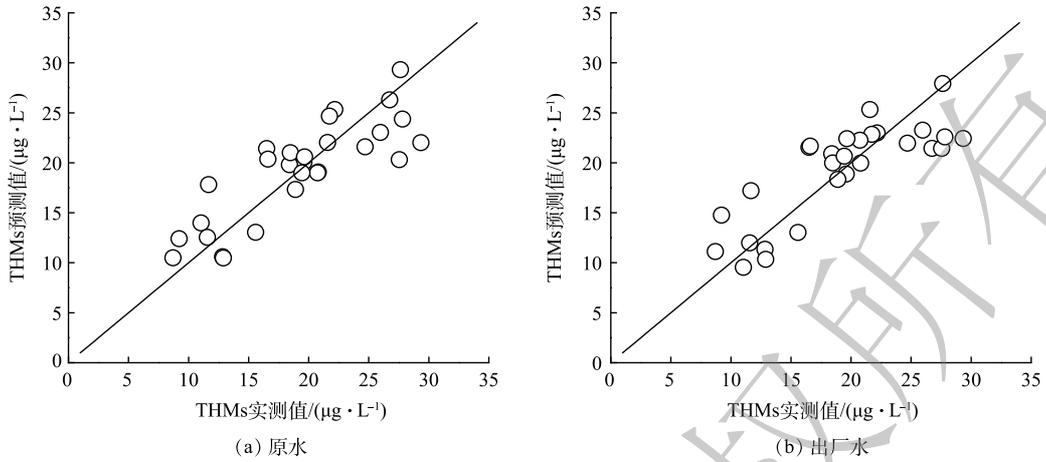


图 4 7 个自来水厂出厂水 THMs 浓度实测值与水质参数回归方程预测值

Fig. 4 Measured and predicted THMs in 7 DWTPs based on regression equation of different water quality

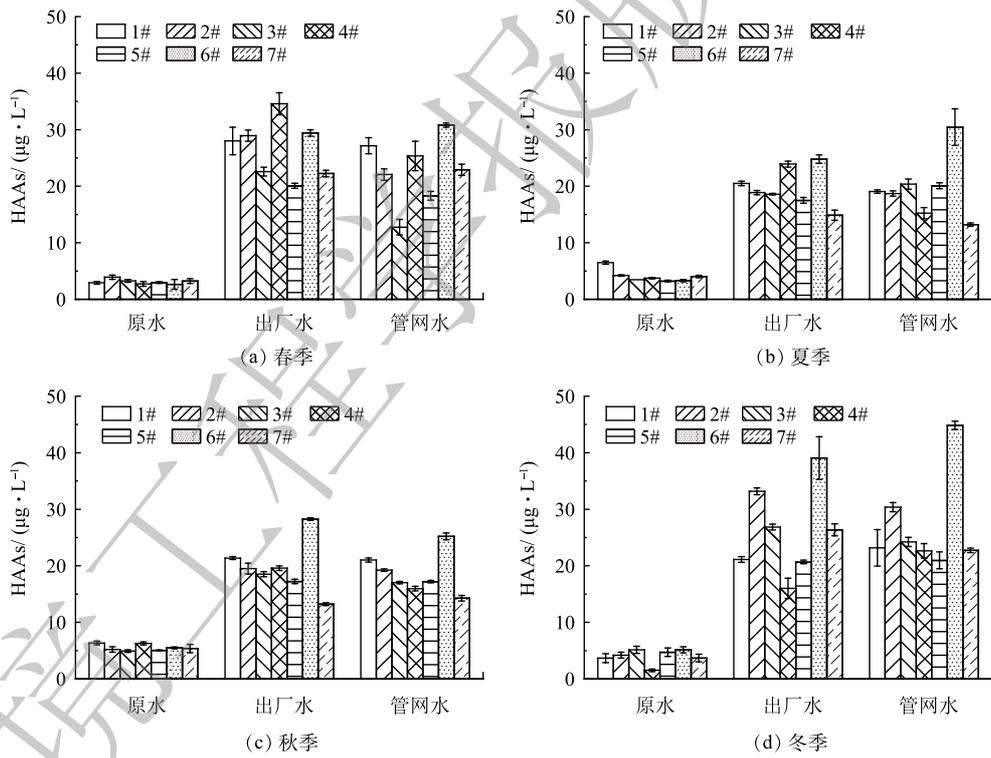


图 5 不同季节 7 个自来水厂 HAAs 浓度变化

Fig. 5 Variations of HAAs concentration in 7 DWTPs in different seasons

和 12.75~44.84  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。7 个水厂出厂水 HAAs 平均值为 6#>2#>4#>1#>3#>7#>5#。

7 个水厂出厂水 HAAs 呈现不同季节变化规律：1# 水厂为春季>冬季~夏季~秋季；2#、3# 和 5# 和 7# 水厂为冬季>春季>夏季~秋季；4# 水厂为春季>夏季>秋季>冬季；6# 水厂为冬季>春季~秋季>夏季。1#、2#、3#、4# 和 5# 水厂在不同季节出厂水 HAAs 差异不同，说明不同处理工艺在不同季节对 HAAs 前体物去除能力有差异；5# 和 6# 不同季节出厂水 HAAs 具有不同差异，说明不同水源在不同季节对 HAAs 前体物质量浓度水平有差异。不同水厂之间季节变化规律不同，但同一水厂出厂水

和管网水总是呈现相同的趋势，且管网水较出厂水略微升高。这可能是 HAAs 前体物与管网余氯反应后引起的 HAAs 的升高。

### 2.5 7个自来水 HAAs 的行为归趋

以原水和出厂水水质参数建立了出厂水 HAAs 生成量的预测模型。利用 IBM SPSS Statistics 20 进行了 Spearman 秩相关系数分析，以探究原水和出厂水水质参数与出厂水 HAAs 质量浓度之间的关系，结果见表 3。

由表 3 可以看出，出厂水 HAAs 与原水的 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  相关性显著；与出厂水的 pH、DOC 和 DO 相关性显著。以这些相关性显著的原水水质参数 (pH 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 和出厂水水质参数 (pH、DOC 和 DO) 为自变量，出厂水 HAAs 质量浓度为因变量，采用 IBM SPSS Statistics 20 作多元线性回归，得到原水和出厂水水质与 HAAs 生成量预测回归方程，如式 (4) 和式 (5) 所示。

$$C_{\text{HAAs}} = 68.659 - 6.137\text{pH} - 2.685C_{\text{NH}_4^+\text{-N}} (R^2 = 0.174) \quad (4)$$

$$C_{\text{HAAs}} = 66.830 + 0.295C_{\text{DOC}} + 1.344C_{\text{DO}} - 7.630\text{pH} (R^2 = 0.213) \quad (5)$$

式中： $C_{\text{HAAs}}$  为 HAAs 质量浓度， $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ； $C_{\text{NH}_4^+\text{-N}}$  为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； $C_{\text{DOC}}$  为 DOC 质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； $C_{\text{DO}}$  为 DO 质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； $R^2$  为可决系数。

上述线性回归方程  $R^2$  较低，不能够运用该回归方程通过测试原水水质参数预测出厂水的 HAAs 质量浓度水平，故需要通过取样检测才能获得。

### 3 结论

1) 7个水厂原水的温度、pH、DO、DOC 和  $\text{UV}_{254}$  均呈现季节性变化。出厂水的温度、pH、DO、DOC 和  $\text{UV}_{254}$  季节性变化与原水一致；氨氮、DOC、 $\text{UV}_{254}$  均得到有效去除，硝酸盐氮、总氮去除效果不明显。

2) 7个水厂出厂水 THMs 均呈现不同的季节变化规律。以原水和出厂水水质参数建立了出厂水 THMs 的生成量预测方程，可较好地预测出厂水 THMs 质量浓度水平。

3) 7个水厂出厂水 HAAs 均呈现不同的季节变化规律。出厂水 HAAs 与原水和出厂水水质参数相关性较差，无法建立并运用回归方程预测出厂水的 HAAs 质量浓度水平。

表 3 HAAs 与原水和出厂水各水质参数间的 Spearman 秩相关系数 ( $r$ ) 及相伴概率 ( $P$ )

Table 3 Spearman rank correlation coefficient ( $r$ ) and associated probability ( $P$ ) between THMs and water quality parameters in raw water and factory water HAAs and quality parameters in raw water and tap water

水质参数	原水		出厂水	
	$r$ 值	$P$ 值	$r$ 值	$P$ 值
pH	-0.488**	0.008	-0.443*	0.018
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	-0.37*	0.042	-0.324	0.093
DO	0.324	0.093	0.427*	0.023
温度	-0.319	0.097	-0.271	0.162
余氯	0.156	0.427	0.162	0.411
TN	0.122	0.538	0.175	0.374
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	-0.107	0.589	-0.169	0.391
$\text{UV}_{254}$	-0.06	0.761	-0.187	0.341
DOC	0.004	0.985	0.432*	0.022

注：\*表示差异显著， $P < 0.05$ ；\*\*表示差异显著， $P < 0.01$ 。

## 参考文献

- [1] 朱小娟, 李江华, 仇银燕. 游泳池水消毒副产物的研究与控制[J]. *给水排水*, 2010, 36(7): 158-163.
- [2] 程胜梓, 刘晶晶, 刘红磊, 等. 含氯消毒剂的应用和环境毒性特点[J]. *三峡生态环境监测*, 2020, 5(2): 8.
- [3] 王占生, 刘文君. 我国给水深度处理应用状况与发展趋势[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(9): 29-33.
- [4] 蒋柱武, 刘欣汝, 武江南, 等. 饮用水中典型含氮消毒副产物的生成与控制研究进展[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2595-2603.
- [5] 吴克友, 任力. 饮用水中的三卤甲烷及去除方法[J]. *环境科学与管理*, 2004, 29(3): 45-45.
- [6] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性[J]. *环境化学*, 2011, 30(1): 20-33.
- [7] 向红, 吕锡武. 饮用水中卤乙酸的生殖和发育毒性研究进展[J]. *卫生研究*, 2008, 37(2): 242-243.
- [8] 马武仁, 陆伟, 蒋志强, 等. 饮用水卤乙醛类消毒副产物的生成及毒效应研究进展[J]. *中华预防医学杂志*, 2021, 55(3): 418-423.
- [9] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性[J]. *环境化学*, 2011, 30(1): 21-22.
- [10] 张楷立, 林大瑛, 邱楚茵, 等. 家庭常用处理方法控制氯化消毒饮用水中消毒副产物的研究进展[J]. *净水技术*, 2021, 40(7): 60-70.
- [11] 陈颂, 董文艺, 赵福祥, 等. 我国中小水厂三卤甲烷和卤乙酸的健康风险评估[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(13): 29-34.
- [12] 于影, 陈儒雅. 多水源供水管网中消毒副产物风险分析[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(5): 1803-1809.
- [13] 姜旭, 赵慕南, 纪峰, 等. 东北地区原水氯化消毒副产物三氯甲烷生成模型预测[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(11): 33-39.
- [14] 刘其鑫. 拉萨大气降水阴离子特征及其来源浅析[J]. *西藏科技*, 2018, 303(6): 63-66.
- [15] 文娟, 霍春秀, 杨剑, 等. 混合胺MEA+DETA吸收CO<sub>2</sub>的影响因素[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(11): 4451-4456.
- [16] 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2539-2546.
- [17] 张澎浪, 孙承军. 地表水体中藻类的生长对pH值及溶解氧含量的影响[J]. *中国环境监测*, 2004, 20(4): 49-50.
- [18] 陈忠林, 武晓飞, 沈吉敏, 等. 保障长距离输水管网水质生物稳定性的补氯方法, CN110502869A[P]. 2019.
- [19] 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 等. 供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型[J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3307-3314.
- [20] FU Q, ZHENG B, ZHAO X, et al. Ammonia pollution characteristics of centralized drinking water sources in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(10): 1739-1743.
- [21] 李明悦, 朱静华, 廉晓娟, 等. 天津市水体硝酸盐污染现状与分析[J]. *天津农业科学*, 2008, 14(1): 43-46.
- [22] 牛志广, 魏晓婷, 张颖. 于桥水库溶解性有机碳分布特征及三卤甲烷的生成势[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(1): 48-54.

(责任编辑: 曲娜)

## Disinfection by-products formation and model prediction based on water quality surveys of different drinking water treatment plants

JIANG Gahong, BI Ran, DU Jiayu, WANG Yunpeng, RAO La, CHEN Chen, YUAN Baoling\*

Xiamen Key Laboratory of Municipal and Industrial Solid Waste Utilization and Pollution Control, College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China

\*Corresponding author, E-mail: blyuan@hqu.edu.cn

**Abstract** In this study, 9 conventional water quality parameters and 2 types of carbon containing disinfection by-products of raw water, factory water and pipe water in different seasons and treatment processes were detected in 7 representative drinking water treatment plants (DWTPs). The variations of water quality with seasons and the removal effect of water treatment processes on water qualities were studied. The relationship between conventional water quality parameters and the amount of disinfection by-products was also analyzed. The results showed that trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs) were detected in factory water of 7 DWTPs. The average concentrations of THMs and HAAs were 8.70~29.35  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  and 13.22~39.06  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. There was a slight increase in the concentration levels of the two types of disinfection by-products in the pipe network water compared with the factory water. The seasonal variation of THMs was as follows: Winter > spring  $\approx$  autumn > summer, and slight seasonal variation of HAAs occurred. Spearman rank correlation coefficient was performed using IBM SPSS Statistics 20, and the production water THMs or HAAs prediction equations were established based on the raw water and factory water quality parameters, respectively. The results found that the prediction effect of THMs concentration was good, which can be used to guide the chemical safety early warning of water quality in waterworks. But for HAAs concentration prediction, regardless of whether the prediction equations established by raw water or factory water quality parameters is used, the prediction results were not ideal and the correlation was poor.

**Keywords** DBPs; THMs; HAAs; water quality parameters; model prediction