

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 13. 009

给水厂生产废水回用对出厂水水质的影响

童禛恭, 章瞳瞳, 陈哲炜, 王舒琪, 康彩霞
(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 生产废水回用是给水厂节能减排的重要方式之一。以赣江水源给水厂为研究对象, 对雨季污染程度相对较高的赣江原水、给水厂沿程水和回流的生产废水进行分析, 测算了氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)、溶解性有机碳(DOC)等指标的污染负荷, 利用三维荧光-区域积分法(FRI)分析了水样中溶解性有机物的分布特征, 考察了生产废水回流对典型高致毒性卤乙酰胺类(HAMs)生成势的影响及其与水质指标和各荧光区域积分体积之间的相关性。结果表明, 雨季回流虽然会增加工艺的有机物和无机氮污染负荷, 但强化混凝作用会使出厂水的总体荧光强度较无回流工艺低约1.7%, 还会影响沿程出水中HAMs生成势的变化趋势。Pearson相关性分析显示, 各处理单元出水中芳香蛋白酪氨酸类物质、硝酸盐氮浓度和 UV_{254} 与三氯乙酰胺(TCAM)和总生成势之间呈现显著相关, 且各荧光区域积分能有效预测二氯乙酰胺(DCAM)和TCAM的生成势。总体而言, 在雨季生产废水可进行间接回流, 对出厂水水质影响较小。

关键词: 饮用水安全性; 生产废水回流; 荧光区域积分; 卤乙酰胺类生成势

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)13-0063-08

Impact of Production Wastewater Recycling on Quality of Produced Water in Water Treatment Plant

TONG Zhen-gong, ZHANG Tong-tong, CHEN Zhe-wei, WANG Shu-qi, KANG Cai-xia
(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Recycling production wastewater is an important method for water treatment plants to achieve energy conservation and emission reduction. Taking the water treatment plant using Ganjiang River water source as the study object, an analysis was conducted on the raw water from Ganjiang River, which has relatively high pollution levels during the rainy season, the water along the treatment process, and the recycled production wastewater. The pollution loads of indicators such as ammonia nitrogen (NH_4^+-N), total nitrogen (TN), and dissolved organic carbon (DOC) were calculated. The three-dimensional fluorescence-region integral method (FRI) was used to analyze the distribution characteristics of dissolved organic matter in the water samples. The impact of production wastewater recycling on the formation potential of highly toxic haloacetamides (HAMs) and its correlation with water quality indicators and the integrated volume of various fluorescence regions were investigated. The results

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52060006)

通信作者: 章瞳瞳 E-mail: zantt6687@163.com

showed that although recycling during the rainy season increased the pollution load of organics and inorganic nitrogen in the process, enhanced coagulation would result in the overall fluorescence intensity of the treated water being 1.7% lower than that without recycling. It also affected the variation trend of HAMs formation potential in the water along the treatment process. Pearson correlation analysis indicated a significant correlation between aromatic protein-like substances (tyrosine-like), nitrate nitrogen concentration, UV_{254} , and TCAM and total formation potential in the effluent from each treatment unit. Moreover, the integrated volumes of various fluorescence regions could effectively predict the formation potential of DCAM and TCAM. Overall, indirect recycling of production wastewater during the rainy season has minimal impact on the quality of finished water.

Key words: drinking water safety; recycling of production wastewater; fluorescence regional integration; HAMs formation potential

给水厂生产废水包括沉淀池排泥水和砂滤池反冲洗水,一般占给水厂制水量的3%~10%^[1]。目前,我国给水厂生产废水的资源化利用率不足20%^[2],其大多未经处理或回用而直接排放,不仅产生浪费,还会增加环境污染及处置费用。随着水资源紧缺问题的日益严重,将给水厂生产废水回流至原水中进行资源化利用,已经成为给水厂生产废水处理的发展趋势^[3]。然而有研究表明,生产废水回用可能引起重金属和有机物增加等水质问题,其中有机物污染是影响生产废水回用的重要因素之一^[4]。特别是雨季,长时间的降雨和地面冲刷会使地表江河水质浊度、有机物等指标激增,增加出水安全风险。当前,有关雨季期间以赣江为水源,使用生产废水回用工艺的给水厂生产性规模的研究案例及分析较少。因此,选择以赣江为原水的某给水厂为对象,探究雨季生产废水回流对工艺出水水质的影响,包括:检测水厂的沿程水质变化情况并测算回流带来的污染负荷;利用三维荧光光谱分析溶

解性有机物及含氮消毒副产物(N-DBPs)主要前体物的沿程变化特征;检测给水厂沿程典型N-DBPs生成势的变化情况;进行相关性分析,将回流与无回流工艺的相应出水指标进行对比,旨在为雨季给水厂生产废水的安全回用提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 给水厂工艺概况

雨季期间,在以赣江为水源的某给水厂开展试验。该水厂生产规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分3组,每组供水能力及工艺相同,即:预氯化(次氯酸钠)—往复式絮凝池—斜管沉淀池—虹吸砂滤池—次氯酸钠消毒出水,混凝剂采用聚合氯化铝(PAC)。每组生产废水排入储泥池,混合后经斜板沉淀池处理,上清液全部回流至第一组管道静态混合器前,其他两组(第二组和第三组)未进行回流,污泥经浓缩脱水一体化机处理后外运,脱水滤液再回流至储泥池。

1.2 原水及回流水水质

原水和回流水部分水质指标如表1所示。

表1 水厂原水、回流水水质

Tab.1 Quality of raw water and recycled water

项 目	浊度/NTU	pH	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硝酸盐氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD_{Mn} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	DOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SUVA/($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	Al^{3+} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
原水	82.9±12.7	7.27±0.07	0.21±0.02	1.15±0.02	1.47±0.04	2.72±0.21	9.23±0.46	0.78±0.02	0.98±0.21
回流水	31.7±5.6	7.38±0.05	0.15±0.01	1.40±0.02	1.62±0.03	2.62±0.28	3.67±0.42	0.90±0.03	0.27±0.13

1.3 水样采集与保存

于降雨量较大的3月—4月下旬进行采样,在原水浊度大幅升高且稳定时按水处理顺序同时采集第一组与第二组工艺(回流与无回流工艺)的水厂原水、混凝出水、沉淀出水、滤池出水、出厂水及回

流水,采样结束后再次采集原水并当场检测浊度(将两次采集的原水浊度进行对比,以确保在采样期间给水厂进水水质是稳定的)。使用2 L聚乙烯采样器于水面下15~20 cm左右采集水样,采样完成后立即送回实验室检测,来不及分析的水样用棕色

遮光瓶保存在4℃冰箱中并尽快检测。

1.4 分析方法

1.4.1 常规指标分析方法

浊度: HACH2100P 便携式浊度仪; pH: pH 计 (FE28); 氨氮: 纳氏试剂分光光度法; 硝酸盐氮: 紫外分光光度法; 总氮: 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; COD_{Mn} : 酸性高锰酸钾滴定法; DOC: 水样经 0.45 μm 滤膜过滤后, 采用 Shimadzu TOC-L CPN 总有机碳分析仪测定; Al^{3+} : 电感耦合等离子体发射光谱仪; UV_{254} : 水样经 0.45 μm 滤膜过滤后, 在 UV1800 紫外分光光度计上测定其在 254 nm 波长下的紫外吸光度。

1.4.2 三维荧光光谱分析方法

采用 Hitachi F-7000 三维荧光光谱仪测定水中溶解性有机物 (DOM) 的荧光组分, 激发波长 (λ_{ex}) 和发射波长 (λ_{em}) 范围均为 200~600 nm, 激发波长扫描间隔为 10 nm、发射波长扫描间隔为 5 nm, 扫描速度为 2 400 nm/min, 激发/发射狭缝为 5 nm, 响应时间设为自动, PMT 电压为 600 V。以超纯水作为参比, 采用区域积分法 (FRI) 分析水样组分, 使用软件 Origin 2022 绘制荧光图。

1.4.3 卤乙酰胺生成势分析方法

水样经 0.45 μm 滤膜过滤后, 用盐酸或氢氧化钠溶液调节 pH 至中性, 然后加入 2 mL 磷酸盐缓冲液和一定体积标定后的次氯酸钠溶液 (6 900 mg/L), 将样品密封保存在 200 mL 的棕色锥形瓶内并用遮光纸包裹, 于恒温培养箱中 25℃ 避光放置 24 h, 最后加入过量的硫代硫酸钠终止氯化反应。采用液液萃取-气相色谱-质谱法检测 N-DBPs 浓度: 取 100 mL 氯化后的水样, 加入 10 g 无水硫酸钠振荡至完全溶解, 再加入 10 mL 乙酸乙酯, 密封后振荡 10 min, 静置 15 min 等待分层, 取上层有机相 1 mL, 用 Agilent 7890B 气相色谱仪检测。

1.4.4 数据处理

运用 Excel 2016、Origin 2022、MATLAB 2024 和 SPSS 21.0 对数据进行处理和分析。

2 结果与讨论

2.1 生产废水间接回用污染负荷

生产废水回用的风险和流量有关, 因此可用“污染负荷”评估雨季间接回流对水厂带来的影响。据测算, 生产废水回流量约为 4 900 m^3/d , 虽然经过

处理后的回流水与原水水质相近, 但其有机物的分子质量分布和亲疏水性还是与原水存在差异^[4]。对各指标采用多次检测取平均值的方法进行污染负荷计算, 得到如图 1 所示的雨季期间原水和回流水的污染负荷。

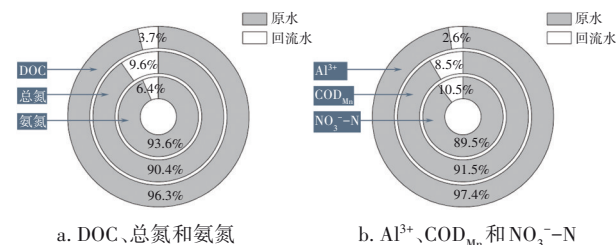


图1 原水和回流水的污染负荷占比

Fig.1 Proportion of pollution load from raw water and recycled water

由图 1 可以看出, 生产废水回流会给原工艺带来一定的污染负荷。在硝酸盐氮负荷中, 回流水和原水对工艺的污染负荷贡献率分别为 10.5% 和 89.5%; 在氨氮负荷中, 两类水对污染负荷的贡献率分别为 6.4% 和 93.6%; 在总氮负荷中, 两类水对污染负荷的贡献率分别为 9.6% 和 90.4%。其中, 因生产废水回流前经过斜板沉淀池二次沉淀, 部分氨氮被残留的聚合氯化铝去除^[5], 导致回流水中氨氮浓度低于原水, 对工艺的污染负荷贡献率较低。然而, 由于硝酸盐氮受混凝剂的影响极小, 沿程处理工艺中存在微生物且生产废水中微生物活性较高^[6], 硝化细菌易产生硝酸盐氮, 因此回流水中的硝酸盐氮和总氮分别成为污染负荷贡献率较高的两个指标, 给工艺运行带来一定压力, 有必要对其重点关注。而回流水中的溶解性有机碳 (DOC) 和 Al^{3+} 给水厂带来的污染负荷则相对较小。

2.2 水质指标沿程变化

由于氨氮、硝酸盐氮、比紫外吸光度 (SUVA) 等会影响 N-DBPs 的生成, 因此需重点关注其回流所带来的影响。上述指标在各处理单元中的变化如图 2 所示。由图 2(a)、(d) 可知, 原水经混凝后氨氮浓度降低, 经沉淀单元后则升高, 回流与无回流工艺的沉淀池出水氨氮浓度相较于混凝出水分别升高 107% 与 6.5%, 这是因为大量絮体在经过流速较大的斜管沉淀池时发生碰撞被破坏, 部分已经吸附在絮体上的游离氨等污染物被释放回水中, 导致两种工艺的沉淀池出水氨氮浓度出现不同幅度的增加^[7]。此外, 生产废水含有未完全反应的聚合氯化

铝,回流产生强化混凝效果,在生成更多矾花的同时也会带来更大的流量^[8-9],故斜管沉淀池中上升流速相对较大,增加了絮体被破坏几率,最终出现回流工艺沉后水中氨氮浓度的增幅大于无回流工艺的现象。

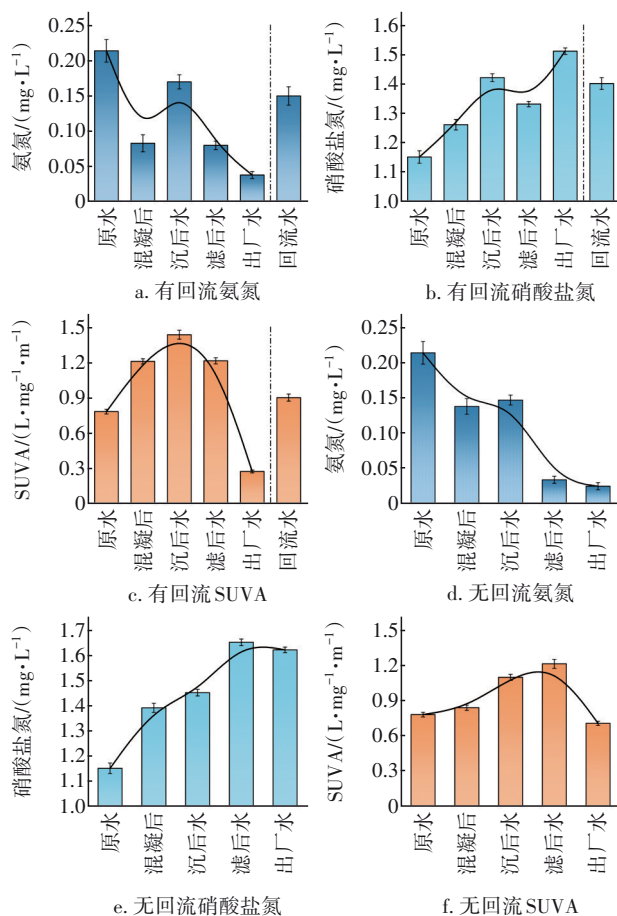


图2 有回流条件下沿程各处理单元水质变化

Fig.2 Water quality change across the treatment units with and without recycled water process

从图2(b)、(e)可知,硝酸盐氮浓度总体呈现逐渐上升的趋势,这可能是由于雨水冲刷增加了有机物的输入,为黏附在斜管、滤料上的硝化细菌提供了更多的营养物质,促进了氮的转化,其原理为氨

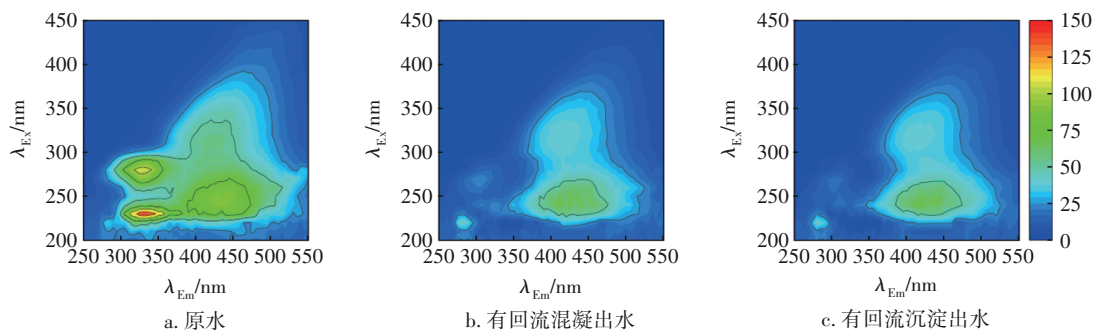
氧化菌将氨氮氧化成亚硝酸盐氮后,再被亚硝酸盐氧化菌进一步氧化成硝酸盐氮^[10]。虽然雨季水中溶解氧浓度更低,但给水厂构筑物中的微生物数量很少,需氧量不大,故微生物能持续保持活性。此外,水厂沿程的SUVA呈现先升高后降低的趋势,这是因为混凝沉淀过程中,通常分子质量高、疏水性强、芳香性低的有机物更容易被去除,这意味着剩余的DOM更倾向于低分子质量、高芳香性,故先升高;随后滤池滤料将一些疏水性低并被微小絮体吸附的有机物拦截或吸附,次氯酸消毒将溶解性有机物氧化分解,尤其是具有芳香性的有机物,故后降低。

综上所述,滤后水和出厂水中影响N-DBPs生成的指标受生产废水间接回流的影响较小,其变化相对稳定。

2.3 溶解性有机物沿程变化

2.3.1 三维荧光光谱分析

为进一步了解雨季回流对水厂各工艺段溶解性有机物(DOM)组分特征的影响,对沿程工艺单元出水进行三维荧光光谱分析,结果如图3所示。根据DOM的荧光峰位置,三维荧光光谱可分为5个区^[11],分别代表芳香蛋白酪氨酸类物质(I区: $\lambda_{Ex}<250\text{ nm}$, $\lambda_{Em}<330\text{ nm}$)、芳香蛋白色氨酸类物质(II区: $\lambda_{Ex}<250\text{ nm}$, $330\text{ nm}<\lambda_{Em}<380\text{ nm}$)、富里酸类物质(III区: $\lambda_{Ex}<250\text{ nm}$, $\lambda_{Em}>380\text{ nm}$)、溶解性微生物代谢产物(IV区: $\lambda_{Ex}>250\text{ nm}$, $\lambda_{Em}<380\text{ nm}$)和腐殖酸类物质(V区: $\lambda_{Ex}>250\text{ nm}$, $\lambda_{Em}>380\text{ nm}$)。其中芳香蛋白类、富里酸类和腐殖酸类有机物均是N-DBPs的重要前体物^[12]。从图3(a)可以看出,赣江原水中的荧光有机物主要为II区芳香蛋白色氨酸类物质,其次为IV区溶解性微生物代谢产物及III区富里酸类物质。原水经过不同工艺处理后各荧光区域强度均减弱,且回流工艺对荧光有机物的整体去除效果稍好于无回流工艺。



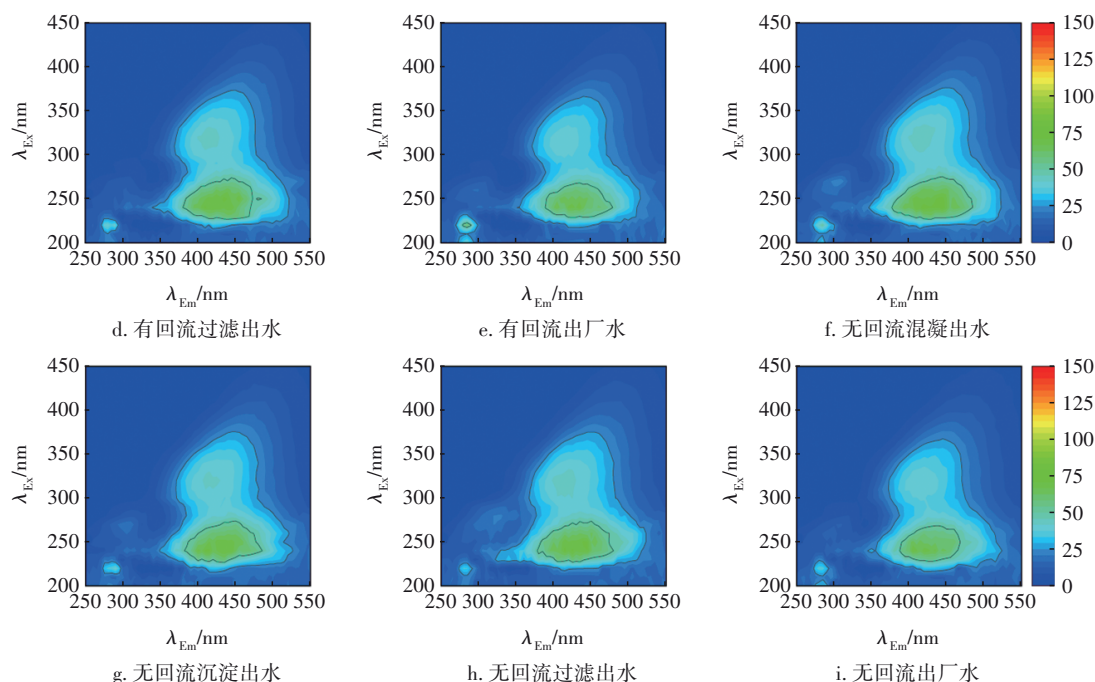


图3 给水厂工艺沿程出水的三维荧光光谱

Fig.3 Three-dimensional fluorescence spectra of effluents along the process of water treatment plant

通过区域积分法(FRI)分析水样的荧光积分体积,结果如图4所示。从沿程来看,各单元出水的荧光光谱特征基本不变,仅荧光强度有所变化,混凝沉淀及过滤单元对赣江雨季原水中的荧光有机物有一定的削减作用,全区总荧光强度整体呈现逐渐降低的趋势。

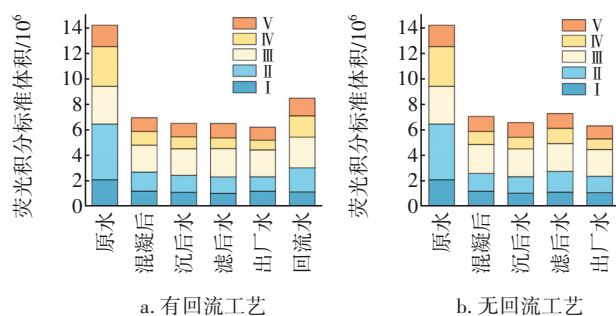


图4 给水厂工艺沿程出水的区域积分体积

Fig.4 Integrated fluorescence intensity of effluent along the process of water treatment plant

从对N-DBPs前体物的去除效果来看,有回流时对I区、II区和V区物质的去除率分别为51.1%、70.5%和32.7%,均高于无回流时的46.1%、62.9%和30.6%,而对III区物质的去除率为25.1%,低于无回流时的26.1%。通过对比滤后水的荧光强度发现,回流时滤后水的III区荧光强度高于无回流工艺,而其他荧光区域低于无回流工艺。

这是因为回流水中的富里酸类物质占比最大(见图5),其分子质量较小,氧含量较高,官能团以羧基($-\text{COOH}$)和羟基($-\text{OH}$)为主,导致水溶性和极性较强,混凝沉淀对这类物质的去除效果不佳,回流后会增加这类物质的负荷。然而,由于回流工艺对与N-DBPs前体物相关的I区、II区和V区的荧光强度去除效果更好,且滤后水中I区、II区、III区和V区的总荧光强度较无回流时低7.2%,因此回流不会带来出厂水N-DBPs浓度升高的潜在风险。

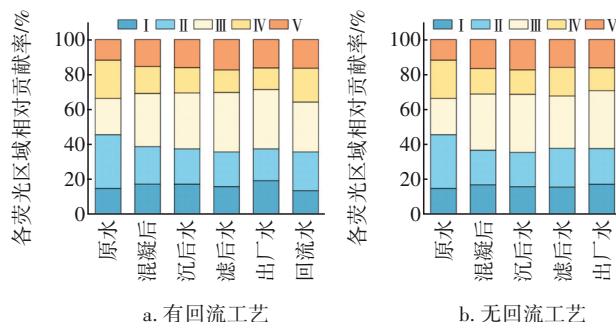


图5 给水厂沿程出水中各荧光类物质区域贡献占比

Fig.5 Proportion of fluorescent substances in each region along the process of water treatment plant

总体来看,雨季期间给水厂生产废水回流工艺对赣江原水中有有机物的去除效果比无回流工艺更明显,但对5个荧光区域的不同有机物去除效果有差别。回流会使工艺承受的有机物负荷增大,但回

流水中的残留混凝剂会产生强化混凝作用,导致回流工艺出厂水的5个区的总荧光强度体积比无回流工艺低1.7%,因此雨季期间进行生产废水回流对出水有机物浓度影响较小。

2.3.2 典型卤乙酰胺生成势

卤乙酰胺(HAMs)中的二氯乙酰胺(DCAM)和三氯乙酰胺(TCAM)因其较高的检出频率和高毒性成为给水厂生产废水回用时的关注焦点,了解它们在工艺中受生产废水回流影响的变化特征,对指导生产废水安全回用具有重要参考价值。

典型卤乙酰胺生成势的检测结果见图6。其中,回流水中的DCAM和TCAM浓度分别为4.76、5.32 $\mu\text{g/L}$ 。由图6可知,有无回流条件下DCAM和TCAM的整体变化趋势一致。由于回流的强化混凝作用去除了部分前体物,故无回流时的DCAM和TCAM浓度普遍高于有回流的。随着水处理的进行,大部分非溶解性物质被混凝沉淀去除,水中溶解性有机物占比逐渐增加。

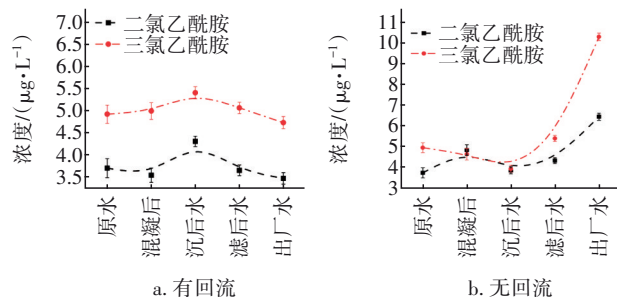


图6 给水厂沿程出水的DCAM和TCAM生成势变化

Fig.6 Change in formation potential of DCAM and TCAM in effluent along the process of water treatment plant

在回流工艺中,生产废水回流带来大量悬浮污染物,污染负荷增大使混凝出水中疏水性有机物较沉后水更多,导致混凝出水中的疏水性有机物在进行生成势氯化实验时与氯发生大量反应,而沉后水中的溶解性有机物与氯反应生成N-DBPs及含氮有机中间产物。随后,工艺中的部分N-DBPs前体物被滤池滤料吸附,使滤池出水中二氯乙酰胺和三氯乙酰胺生成势浓度降低,此为回流工艺中N-DBPs生成势在沉淀池出水达到峰值的原因。在无回流工艺中,由于有机物负荷、絮体数量和破坏程度均小于回流工艺,混凝沉淀能更有效地吸附和沉降有机物,因此中段处理单元没有出现明显的N-DBPs生成势峰值。

此外,无回流工艺中出厂水的二氯乙酰胺和三氯乙酰胺生成势显著增加。从两组工艺的滤后水荧光体积分析来看,回流工艺的强化混凝作用使滤后水中的Ⅱ区和Ⅳ区荧光体积明显低于无回流工艺(见图4),因此在出厂水消毒和氯化实验中,大量氯与这些有机物发生反应,从而导致二氯乙酰胺和三氯乙酰胺生成势上升^[13]。相比之下,回流工艺中出厂水的生成势未出现突增现象。这是因为回流使进水有机物浓度升高,预氧化剂与部分悬浮和溶解性有机物初步反应,生成含氮有机中间产物。随着水处理和强化混凝的进行,悬浮有机物和部分中间产物被逐步去除。消毒时,虽然游离氯增加,但只有相对更少的有机中间产物与之反应,因此生成的N-DBPs相对更少。综上所述,回流会影响水处理过程中二氯乙酰胺和三氯乙酰胺生成势的沿程变化趋势,与无回流工艺相比,回流工艺下出厂水中这两种物质的浓度更低。

2.3.3 DCAM和TCAM生成势与相关指标的关系

采用SPSS 21.0软件,对回流工艺的部分实验室检测指标和各荧光区域积分体积进行皮尔逊相关性分析,结果如图7所示(*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关;**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关;***表示在 $P<0.001$ 水平上显著相关)。可见,Ⅰ区物质与TCAM及DBPs之间呈现显著相关,这是因为芳香蛋白类物质是N-DBPs的主要前体物^[14]。三维荧光光谱的5个荧光区域中,Ⅱ区和Ⅳ区荧光强度呈现极高的相关性,皮尔逊相关值为0.99,表明水中芳香蛋白类物质和溶解性微生物代谢产物之间具有高度同源性。DCAM和TCAM的生成势之间呈显著相关,符合卤乙酰胺类副产物的前体物主要为芳香蛋白类物质的同源性^[15]。 UV_{254} 与三氯乙酰胺呈显著相关,原因是 UV_{254} 主要表征水中大分子有机物和芳香族化合物^[16],而芳香蛋白类物质是消毒副产物的主要前体物。此外,氨氮浓度与Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅳ区物质呈显著相关。这是因为Ⅰ区和Ⅱ区中的芳香蛋白类物质是有机氮的主要组成部分,这些复杂的有机氮化合物经过微生物分解转化为简单的氨氮,Ⅳ区的溶解性微生物代谢产物也包括微生物代谢过程中将有机氮转化产生的氨氮。相反,硝酸盐氮浓度与Ⅰ区物质、三氯乙酰胺和二氯乙酰胺呈显著负相关。这可能是因为在雨季原水污染较高时,微生物降解有机氮化合物的能力增强,逐步

将其转化为氨氮,继而进一步转化为硝酸盐氮。

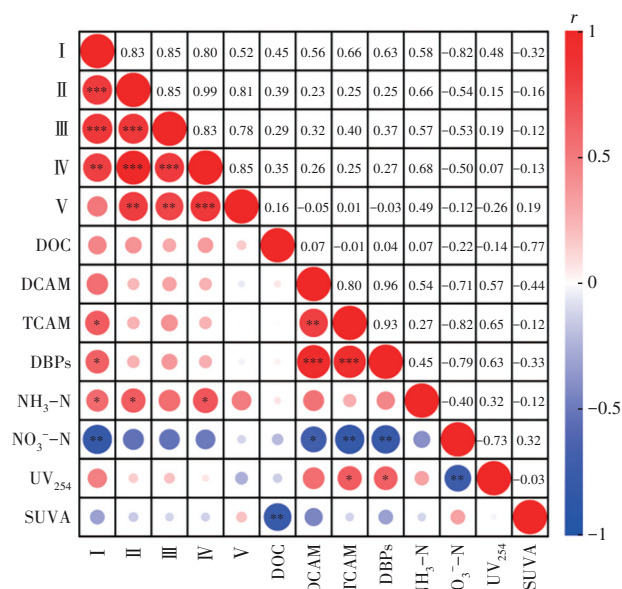


图7 有回流时给水厂各指标和荧光区域的相关性
Fig.7 Correlation between various indicators and fluorescence regions in the recycled process of water treatment plant

为预测雨季期间进行生产废水回流时水厂各单元出水的HAMs生成势,给实际生产性案例的出水安全提供参考,对DCAM、TCAM和5个荧光区域积分($\Phi_1 \sim \Phi_5$)进行多元线性回归拟合,拟合方程见式(1)~(3)。 R^2 分别为0.91、0.93、0.97,表明两种卤乙酰胺与区域积分的多元线性回归关系良好,可用三维荧光区域积分值预测水厂沿程出水中DCAM和TCAM的生成势。

$$\begin{aligned} \text{DCAM} = & -1.082 \times 10^{-5} \Phi_1 - 2.655 \times 10^{-6} \Phi_2 + \\ & 1.700 \times 10^{-5} \Phi_3 + 1.082 \times 10^{-5} \Phi_4 - 3.157 \times \\ & 10^{-5} \Phi_5 + 6.948 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{TCAM} = & 2.583 \times 10^{-7} \Phi_1 - 1.925 \times 10^{-6} \Phi_2 + 3.528 \times \\ & 10^{-6} \Phi_3 + 2.637 \times 10^{-6} \Phi_4 - 5.525 \times 10^{-6} \Phi_5 + \\ & 3.433 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{DCAM}+\text{TCAM}=&-1.841\times10^{-6}\Phi_1-5.613\times10^{-6}\Phi_2+ \\ &8.895\times10^{-6}\Phi_3+1.062\times10^{-5}\Phi_4- \\ &2.037\times10^{-5}\Phi_5+12.03 \end{aligned} \quad (3)$$

3 结论

① 虽然生产废水回流会增加工艺的污染负荷,但强化混凝作用仍能够去除部分污染物,而且N-DBPs保持相对稳定,回流不会带来潜在风险。

② 雨季期间,给水厂生产废水回流工艺对赣

江原水中有机物的去除效果优于无回流工艺;虽然回流增加了有机物负荷,但回流水中残留的聚合氯化铝能够强化混凝作用,导致回流工艺滤后水中与N-DBPs前体物相关的荧光区域积分体积之和比无回流工艺低7.2%,出厂水中5个荧光区域积分体积之和比无回流工艺低1.7%,因此雨季进行生产废水回流不会造成出厂水有机物增加的风险。

③ 雨季期间生产废水回流会影响沿程出水中HAMs生成势的变化趋势,无回流工艺的DCAM和TCAM生成势普遍高于回流工艺,且DCAM和TCAM在同种工艺中的变化趋势一致;回流工艺的强化混凝作用使出厂水消毒副产物浓度总和低于无回流工艺,故雨季期间生产废水回流不会造成出水DCAM和TCAM增加的风险。

④ 雨季期间生产废水回流工艺中 I 区芳香蛋白酪氨酸类物质、硝酸盐氮和 UV_{254} 与 TCAM 及总 DBPs 生成势显著相关。使用荧光区域积分值和两种卤乙酰胺浓度成功拟合出 Φ_i 与 HAMs 生成势的模型 ($R^2 \geq 0.91$), 可为以赣江为原水并进行生产废水回用的给水厂提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 童楦基, 奚志成, 陈文秀, 等. 净水厂沉淀池排泥水直接回用的可行性研究[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 646-650.
TONG Zhengong, XI Zhicheng, CHEN Wenxiu, *et al.* Feasibility study on direct reuse of sludge water from sedimentation tank in water purification plant [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(2): 646-650 (in Chinese).
- [2] 李政伟, 高小涛, 马浩. 净水厂排泥水处理现状及展望[J]. 水处理技术, 2024, 50(6): 15-20.
LI Zhengwei, GAO Xiaotao, MA Hao. Present situation and prospect of water treatment residuals in water purification plant [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(6): 15-20 (in Chinese).
- [3] 李成, 马顺君, 贺鑫, 等. 典型给水厂运行碳排放核算与碳减排路径[J]. 给水排水, 2023, 49(7): 1-7.
LI Cheng, MA Shunjun, HE Xin, *et al.* Carbon emission calculation and carbon emission reduction path of typical waterworks operation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(7): 1-7 (in Chinese).
- [4] 张栋杰, 李星, 于海宽, 等. 混凝沉淀/超滤处理给水厂生产废水及回用可行性[J]. 中国给水排水, 2023,

- 39(15): 45–50.
- ZHANG Dongjie, LI Xing, YU Haikuan, *et al.* Treatment of production wastewater from drinking water treatment plant by coagulation–sedimentation/ultrafiltration technology and feasibility of reuse [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(15): 45–50 (in Chinese).
- [5] 张锋, 蒋才芳, 刘敏, 等. 给水厂砂滤池反冲洗水直接回用对出厂水水质影响及其风险评价[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(5): 128–137.
- ZHANG Feng, JIANG Caifang, LIU Min, *et al.* Impact of direct recycling of sand filter backwash water in a drinking water treatment plant: long-term operational investigation and health risk assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(5): 128–137 (in Chinese).
- [6] JANE F S, ALEJANDRO P, ARNAUD D, *et al.* *Comammox Nitrospira* are abundant ammonia oxidizers in diverse groundwater-fed rapid sand filter communities [J]. *Environmental Microbiology*, 2018, 20(3): 1002–1015.
- [7] 李建, 王海梅, 白筱莉, 等. 复合沉淀池的衍变及工程应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(12): 31–35.
- LI Jian, WANG Haimei, BAI Xiaoli, *et al.* Development and engineering application of composite sedimentation tank [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(12): 31–35 (in Chinese).
- [8] YANG L, WEI J, LIU Z, *et al.* Material prepared from drinking waterworks sludge as adsorbent for ammonium removal from wastewater [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 330: 228–236.
- [9] 奚志成. 给水厂生产废水回流强化混凝试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023: 63–65.
- XI Zhicheng. Experimental Study on Reflux Enhanced Coagulation of Production Wastewater from Water Supply Plants [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023: 63–65 (in Chinese).
- [10] LIPPONEN M T T, SUUTARI M H, MARTIKAINEN P J. Occurrence of nitrifying bacteria and nitrification in finnish drinking water distribution systems [J]. *Water Research*, 2002, 36(17): 4319–4329.
- [11] 吕晶晶, 龚为进, 窦艳艳, 等. PARAFAC 和 FRI 解析 ISI 中 DOM 分布[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(5): 2039–2047.
- LÜ Jingjing, GONG Weijin, DOU Yanyan, *et al.* The distribution of DOM in aeration pretreatment improved soil infiltration system based on FRI and PARAFAC [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(5): 2039–2047 (in Chinese).
- [12] XU X T, KANG J, SHEN J M, *et al.* EEM–PARAFAC characterization of dissolved organic matter and its relationship with disinfection by-products formation potential in drinking water sources of northeastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 774: 145297–145297.
- [13] 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 等. 蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性[J]. *环境科学*, 2021, 42(7): 3348–3357.
- LI Mengya, SONG Yuying, ZHANG Xiaolan, *et al.* Removal behavior of protein-like dissolved organic matter during different water treatment processes in full-scale drinking water treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(7): 3348–3357 (in Chinese).
- [14] DENG Y, LI D M, CHU T F, *et al.* Peptide bonds affect the formation of haloacetamides, an emerging class of N-DBPs in drinking water: free amino acids versus oligopeptides [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 14412.
- [15] 郭学博. 氨基酸类前体物生成含氮消毒副产物的形成过程及控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 11–19.
- GUO Xuebo. Formation and Control of Nitrogen-containing Disinfection By-products from Amino Acid Precursors [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 11–19 (in Chinese).
- [16] 吴梅. 典型自来水处理工艺中消毒副产物生成规律及去除技术研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019: 30–31.
- WU Mei. Study on the Generation Rules and Removal Technique of Disinfection By-products in Typical Water Treatment Process [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019: 30–31 (in Chinese).

作者简介: 童祯恭(1972–), 男, 福建武平人, 博士, 教授, 主要从事给水处理理论与技术研究。

E-mail: zzggtt@126.com

收稿日期: 2024-07-29

修回日期: 2024-08-10

(编辑: 李德强)