

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.001

滤池反冲洗水回用对自来水厂水质及净水效果的影响

段书乐¹, 蒋才芳², 董慧峪¹, 梁虹², 蒋菱², 强志民¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 广西绿城水务股份有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 滤池反冲洗水是自来水厂生产废水的主要组成部分,已被水厂广泛回用。为了探讨反冲洗水直接回用对水厂各工艺段水质和各单元工艺净水效果的影响,通过对南方某大型水厂的实地调研,采用周期内监测、污染负荷计算和健康风险评估的手段综合比较了反冲洗水回用前后的水质和净水效果差异,明确了在5.0%的回用比例(反冲洗水与原水的体积比)下,反冲洗水回用会明显增加水厂工艺进水的浊度和 Al^{3+} 负荷(其所占混合水负荷的比例高达70.7%和41.4%),但会降低农药类微污染物的暴露风险。与未回用相比,回用降低了混凝-沉淀工艺对 UV_{254} 和溶解性有机碳(DOC)的去除,但增加了对无机物指标、 COD_{Mn} 和农药类微污染物的去除。此外,揭示了滤池是DOC、 COD_{Mn} 和农药类微污染物发生积累的关键单元,证实了反冲洗水回用不会造成出厂水水质超标。这一发现可为保障水厂供水水质安全的前提下提升水资源利用率提供重要的参考。

关键词: 滤池反冲洗水; 回用; 自来水厂; 水质; 净水效果

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0001-08

Impact of Filter Backwash Water Reuse on the Water Quality and Treatment Efficiency: A Case Study in a Full-scale Drinking Water Treatment Plant

DUAN Shu-le¹, JIANG Cai-fang², DONG Hui-yu¹, LIANG Hong², JIANG Ling², QIANG Zhi-min¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

2. Guangxi Nanning Water Co. Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: Filter backwash water (FBW) is a major component of residuals produced in drinking water treatment plants (DWTPs) and has been widely recycled. To investigate the impacts of FBW direct reuse on water quality across process stages and unit process treatment efficiency in DWTPs, field investigations were conducted at a prominent large-scale DWTPs located in southern China. The water quality and treatment efficiency before and after recycling FBW were comprehensively compared and evaluated by utilizing a multifaceted approach that included periodic surveillances, pollution load calculations, and health risk assessments. At a 5.0% reuse ratio (volume ratio of FBW to raw water), FBW direct reuse significantly elevated influent turbidity and Al^{3+} load, comprising 70.7% and 41.4% of the

基金项目: 广西绿城水务水厂生产废水处理回用项目(202101); 国家自然科学基金资助面上项目(52070184、52270012)

通信作者: 强志民 E-mail: qiangz@rcees.ac.cn

mixed water load, respectively, while reducing the health risk of detected pesticides in drinking water exposure. Following reuse, the coagulation-sedimentation process showed reduced removal of UV_{254} and dissolved organic carbon (DOC) but increased removal of inorganic parameters, permanganate index (COD_{Mn}), and pesticides compared to non-reuse conditions. Moreover, the study highlighted filter beds as key units for the accumulation of DOC, COD_{Mn} , and pesticides, affirming that the implementation of FBW direct reuse did not result in the violation of the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022). This finding could provides crucial insights for enhancing water resource utilization while ensuring water quality safety.

Key words: filter backwash water; reuse; drinking water treatment plant; water quality; treatment efficiency

自来水厂在水质达标前提下减少生产废水排放,有助于节约水资源、减少水污染、增加水厂净产水量并降低制水成本^[1]。在“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针指导下,我国众多水厂均已实施生产废水回用。当前,国内外水厂一般生产工艺为“混凝-沉淀-过滤-消毒”,在净水全流程中产生的生产废水主要包括滤池反冲洗水、絮凝池和沉淀池排泥水、污泥浓缩池溢流液以及污泥脱水设备产生的废水^[2]。其中,反冲洗水的水量所占比例最大,占总产水量的2%~10%,平均值为2.5%^[3]。然而,反冲洗水中的悬浮物浓度较高(浊度一般高于200 NTU),含有混凝剂和絮凝剂、金属离子、无机离子、天然有机物、藻类、细菌、病毒、无脊椎动物和原生动物等,是原水中的几十倍甚至上百倍^[4-6]。因此,回用反冲洗水可能会增加进水负荷,降低单元工艺净水效果,增加出厂水的水质风险。

目前,反冲洗水回用主要包括直接回用和处理后回用两种方式。对于反冲洗水直接回用,在调研的261座水厂中,将其回用至净水处理工艺最前端、预沉淀池、沉淀池和过滤工艺前端所占的比例分别为83%、11%、4%和2%^[7]。在反冲洗水处理后回用中,大多数研究仅考虑了气浮、氧化、絮凝沉淀、炭滤、膜滤以及两者的联用等工艺对反冲洗水中污染物的去除^[7-9],而有关回用对水厂各工艺段水质和各单元工艺净水效果的影响还不清楚。值得注意的是,反冲洗水中含有残余铝絮体,对其利用可提高混凝过程中溶解性有机碳(DOC)的去除率^[10],增强对低浊度水源水的混凝效果,并减少混凝剂用量^[11]。此外,上述这些研究都是基于小试和中试,

鲜有生产性规模的案例,因此有必要进行实际规模的连续试验,以评价反冲洗水直接回用对水厂水质和净水效果的影响。

为此,本研究基于南方某大型水厂,通过对反冲洗水和原水周期性的测定、污染负荷计算和健康风险评估等手段明确了反冲洗水直接回用所带来水质风险的关键指标,阐明了反冲洗水回用前后代表性水质指标(如浊度、常量有机物和微污染物)的变化规律,探究了直接回用对水厂各工艺净水效果的影响,并评估了出厂水的水质风险,这可为水厂直接回用反冲洗水提供科学的依据,并有助于推动反冲洗水回用的发展。

1 材料与方法

1.1 水厂概况

该水厂源水取自邕江,设计处理规模为 60×10^4 m^3/d ,具体工艺流程为:原水→网格絮凝池→平流沉淀池→高速滤池→清水池→送水泵房→市政管网。其中,絮凝池、沉淀池、滤池和清水池的水力停留时间分别为0.25、2.2、0.05~0.1和2~3 h。因此,从水厂进水到完成产水则需要5 h左右。此外,絮凝剂采用的是聚合氯化铝($PACl, Al_2O_3 \geq 10.2\%$),年平均投加量为10.2 mg/L;消毒剂为次氯酸钠溶液(含氯量 $\geq 10\%$),年平均投加量为9.4 mg/L。

1.2 水样采集与保存

该水厂三期工程(处理规模为 20×10^4 m^3/d)共有8组滤池,于08:30—15:30各完成1次反冲洗(每组间隔1 h),总反冲洗水量约为 1×10^4 m^3/d 。反冲洗水由厂内管网收集至排水池后即刻通过水泵提升至进水口与原水混合回用,瞬时回用比例为5.0%。所有水样均取自三期工程,采样时间为2022年的12

月13日、20日及28日,取样点如图1所示。其中,未回用水样(S1~S4)均于08:00前按净水工艺流程完成采集,反冲洗水(水冲洗阶段水样,S5)由当日第一组进行反冲洗的滤池获得,回用水样(S6~S9)考虑反冲洗水收集所耗时间并严格按照第一次混合水在各工艺段的停留时间进行采集(以确保每个工艺点水样都是滤池反冲洗水回用后的水样)。所有水样尽可能在当天完成检测,来不及分析的暂时储存在4℃冰箱中,并尽快检测。

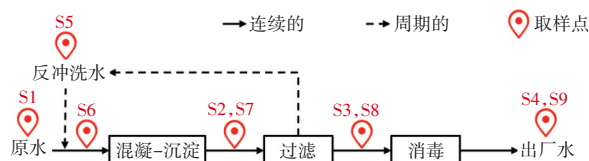


图1 水处理工艺流程及取样点

Fig.1 Schematic diagram of water treatment processes and sampling sites

1.3 分析方法

采用pH计(Sartorius PB-10)和浊度计(哈希2100N)测定pH和浊度;采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)和过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(HJ 636—2012)测定氨氮和总氮浓度;采用酸碱滴定法测定碱度;采用离子色谱仪(戴安ICS2000)测定氯离子浓度;采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 和 Al^{3+} 浓度;采用紫外可见分光光度计(哈希DR 6000)测定254 nm处的吸光度;采用岛津TOC分析仪测定DOC浓度;采用高锰酸钾滴定法测定高锰酸盐指数(COD_{Mn})。

采用超高效液相色谱-串联质谱仪测定水样中29种目标农药的浓度^[12]。简言之,每个样品均取1 000 mL,随后通过Oasis HLB色谱小柱(Waters)对其进行固相萃取和纯化。纯化后的萃取液用0.45 μm 的聚醚砜滤膜过滤,最后通过超高效液相色谱-串联质谱(安捷伦6420)进行分析。目标农药的检测限和定量限范围分别为0.01~0.06和0.02~5.00 ng/L^[12]。

1.4 健康风险评估

根据《化学物质环境健康风险评估技术指南》(WS/T 777—2021)评估反冲洗水和原水中 Al^{3+} 经口摄入途径的非致癌风险,采用风险熵法评估反冲洗水和原水中农药类物质经口摄入途径的人体健康风险^[13]。所涉及的参数中,不同年龄人群(儿童、成

年人和老人)的饮水摄入量(DWI)、体质量(BW)由《中国人群参数暴露手册》获得;参考剂量(RfD)的参考值为1^[14];农药每日可接受摄入量(ADI)参考PPDB数据库(<http://sitem.herts.ac.uk/>)^[12];儿童、成年人和老人的暴露周期(ED)参考值分别为6、30和74年^[14-15];暴露频率(EF)、危害熵(HQ)和摄入率(IR)的参考值分别为350 d/a、1和1。

2 结果与讨论

2.1 反冲洗水直接回用下关键水质风险识别

表1显示了水厂原水与反冲洗水的常规水质特征。可以看出,反冲洗水的浊度、氨氮、总氮、 Al^{3+} 、DOC和 COD_{Mn} 浓度均高于原水;反冲洗水的pH、碱度、氯离子、 Mn^{2+} 和 Fe^{3+} 浓度与原水基本相当;反冲洗水的 UV_{254} 略低于原水。特别地,反冲洗水的平均浊度和 Al^{3+} 浓度分别为原水的48和14倍,其数值也明显超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求。因此,回用反冲洗水有必要重点关注浊度和 Al^{3+} 浓度。然而,适当地提高水厂进水浊度以及反冲洗水中残余的 Al^{3+} 均有可能增强混凝-沉淀工艺对污染物的去除效果^[10-11],提高水厂出水水质。

表1 原水和反冲洗水的常规水质特征

Tab.1 General quality of raw water and filter backwash water

项目	原水		反冲洗水	
	范围	均值	范围	均值
pH	7.90~7.96	7.93	8.03~8.08	8.05
浊度/NTU	3.92~7.03	5.30	220~280	254
氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.08~0.15	0.11	0.07~0.52	0.28
总氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.58~1.62	1.60	1.77~2.25	2.01
碱度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	140~144	143	140~147	144
氯离子/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	7.1~9.0	8.0	8.8~9.1	9.0
Mn^{2+} /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	—	—	—	—
Al^{3+} /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0~0.03	0.02	0.02~0.75	0.28
Fe^{3+} /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0~0.03	0.01	—	—
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.023~0.026	0.024	0.018~0.021	0.020
DOC/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.2~1.5	1.3	2.0~2.4	2.2
COD_{Mn} /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.8~2.2	1.3	1.3~2.6	1.7

此外,还研究了水厂原水与反冲洗水中新污染物(如农药)的赋存特征,结果如表2所示。在29种目标农药中检出24种,可分为4大类(苯并咪唑类2种,烟碱及酰胺类6种,三唑类9种,其他类7种)。其中,原水和反冲洗水中检出浓度高的前4种农药

均为烟碱及酰胺类的噻虫嗪、三唑类的多效唑、其他类的莠灭净和苯并咪唑类的多菌灵,它们在原水中的检出浓度分别为 38.8、25.8、20.7 和 9.4 ng/L,而在反冲洗水中的检出浓度分别为 24.9、14.2、13.0 和 6.2 ng/L。与其他地区检出的农药相比,噻虫嗪的检出浓度明显高于长江中游和下游的(平均检出浓度分别为 4.3、13.2 ng/L)^[12,16];多效唑的检出浓度与长江下游的(平均检出浓度为 17.8 ng/L)相差不多^[12],但高于东南地区饮用水源地的(最高检出浓度一般小于 4.0 ng/L)^[17];莠灭净的检出浓度高于长江下游(平均检出浓度为 10.6 ng/L)、东南地区饮用水源地(检出浓度<1.0 ng/L)和安徽某流域的(检出浓度范围为 2.2~3.4 ng/L);多菌灵的检出浓度远低于长江下游(平均浓度为 121.8 ng/L)、东南地区饮用水源地(平均浓度为 77.7 ng/L)和安徽某流域的(浓度范围为 3~687 ng/L)^[12,17-18]。

表2 原水和反冲洗水中检出的农药浓度

Tab.2 Detected pesticides concentration in raw water and filter backwash water ng·L⁻¹

农药类别	农药名称	原水	反冲洗水
苯并咪唑类	多菌灵	9.4	6.2
	噻菌灵	0.1	—
烟碱及酰胺类	啉虫脒	3.0	0.7
	甲霜灵	3.0	1.6
	吡虫啉	3.9	—
	异丙甲草胺	2.2	1.7
	噻虫嗪	38.8	24.9
	啉酰菌胺	0.7	—
三唑类	腈菌唑	0.4	0.2
	稻瘟灵	2.3	1.3
	多效唑	25.8	14.2
	三唑醇	2.9	2.0
	戊唑醇	7.2	4.4
	己唑醇	2.5	1.5
	氟环唑	0.3	0.2
	丙环唑	1.6	0.8
	苯醚甲环唑	1.0	0.7
	啉霉胺	0.6	0.4
其他	仲丁威	0.4	—
	莠灭净	20.7	13.0
	水胺硫磷	1.8	1.0
	噻嗪酮	0.3	0.2
	烯酰吗啉	7.8	5.5
	啉菌酯	3.1	1.4

对于 GB 5749—2022 拓展指标及限值中列出的七氯(浓度阈值为 0.4 μg/L)和草甘膦(浓度阈值为

0.7 mg/L),原水和反冲洗水中均未检出,甲霜灵和稻瘟灵(浓度阈值分别为 50 和 300 μg/L)的检出浓度则均未超标。值得注意的是,在所有检出的农药中,反冲洗水中的农药浓度均低于原水,这表明反冲洗水回用带来的农药类微污染物风险水平较低。

由于实际的回用风险还和流量有关,因此引入“污染负荷”(即污染物总量,由流量与污染物浓度的乘积得到)进行进一步评估。其中,原水、反冲洗水以及两者混合水的瞬时流量分别为 8 330、420 和 8 750 m³/h。如图 2 所示,混合水中,反冲洗水的浊度所贡献的污染负荷比例最高(约 70.7%),Al³⁺所贡献的污染负荷比例处于中等水平(约 41.4%),其他污染物所贡献的污染负荷比例较低(不超过 12%)。此外,无论是何种类型的农药或农药总量,反冲洗水所贡献的污染负荷比例极低(苯并咪唑类、烟碱及酰胺类、三唑类、其他类和农药总量的负荷比例分别为 1.1%、0.9%、0.9%、1.0% 和 1.0%),可以忽略不计。上述结果与表 1、2 的结果相符,说明回用反冲洗水仅会明显增加水厂所处理水的浊度和 Al³⁺浓度,不会造成农药类污染物的风险升高。但是,回用反冲洗水的健康风险还需要进一步探究。

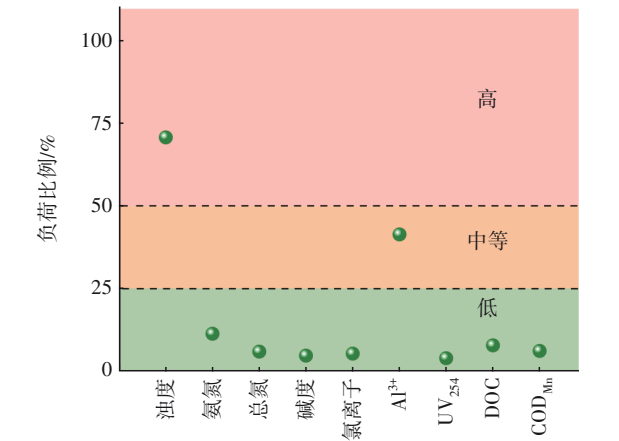


图2 反冲洗水中常规指标所贡献的负荷比例

Fig.2 Proportion of pollution load contributed by general water quality in filter backwash water

图 3(a)显示了不同年龄组人群通过饮用水摄入 Al³⁺的非致癌风险。可以看出,不同年龄组的非致癌风险有所差异,随年龄增加有降低的趋势,即儿童组>成年人组>老年人组。因为非致癌风险与污染物浓度有关,因此反冲洗水的非致癌风险明显高于原水。此外,发现反冲洗水各年龄组的非致癌

风险均高于0.01,表现为“低风险”;原水的各年龄组的非致癌风险均低于0.01,表现为“无风险”。由图3(b)可知,不同年龄组人群通过饮用水暴露农药的风险熵均低于0.1,且反冲洗水的风险熵均不高于原水。值得注意的是,原水中噻虫嗪、多效唑和莠灭净在不同年龄组中均表现为“低风险”。此外,原水中多菌灵、己唑醇和水胺硫磷的风险熵在儿童组表现为“低风险”,而在成年组和老年人组表现为“无风险”。

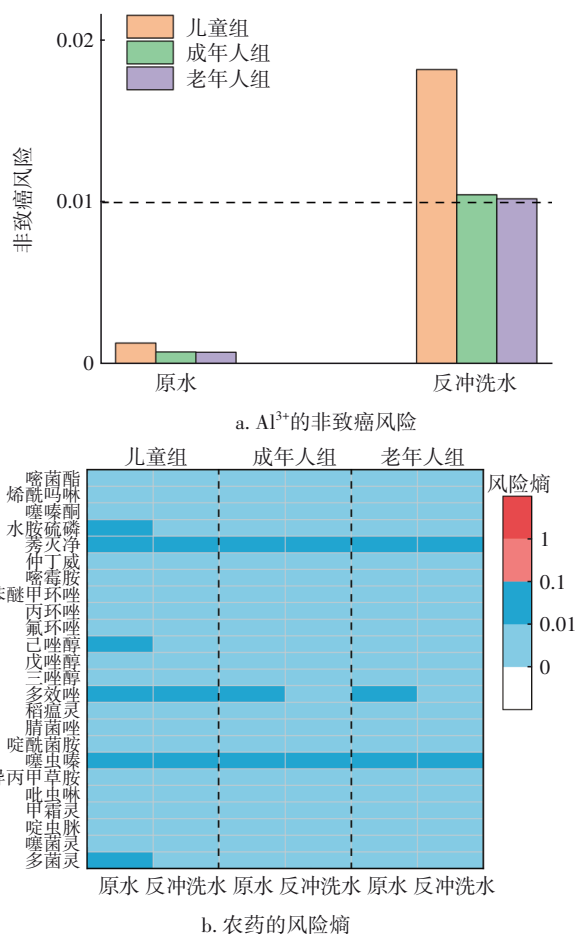


图3 不同年龄组人群通过饮用水摄入 Al^{3+} 的非致癌风险和农药的风险熵

Fig.3 Non-carcinogenic risk of Al^{3+} and health risk of detected pesticides in different age groups: raw water exposure versus filter backwash water exposure

2.2 直接回用对各工艺段水质的影响

反冲洗水回用对水厂各单元工艺出水水质的影响如图4所示。可以看出,回用后明显增加了絮凝前的浊度和 Al^{3+} 浓度,略微提高了氨氮和总氮浓度, pH 、 UV_{254} 、DOC和 COD_{Mn} 则基本不变,这和前面分析的结果一致。相比回用前,沉后水、滤后水和

出厂水中氨氮、 COD_{Mn} 略微降低,pH、总氮和 UV_{254} 基本不变,浊度略微升高, Al^{3+} 和DOC浓度有明显的升高。需要指出的是,回用前后的出厂水中常规污染物浓度均低于GB 5749—2022的规定。

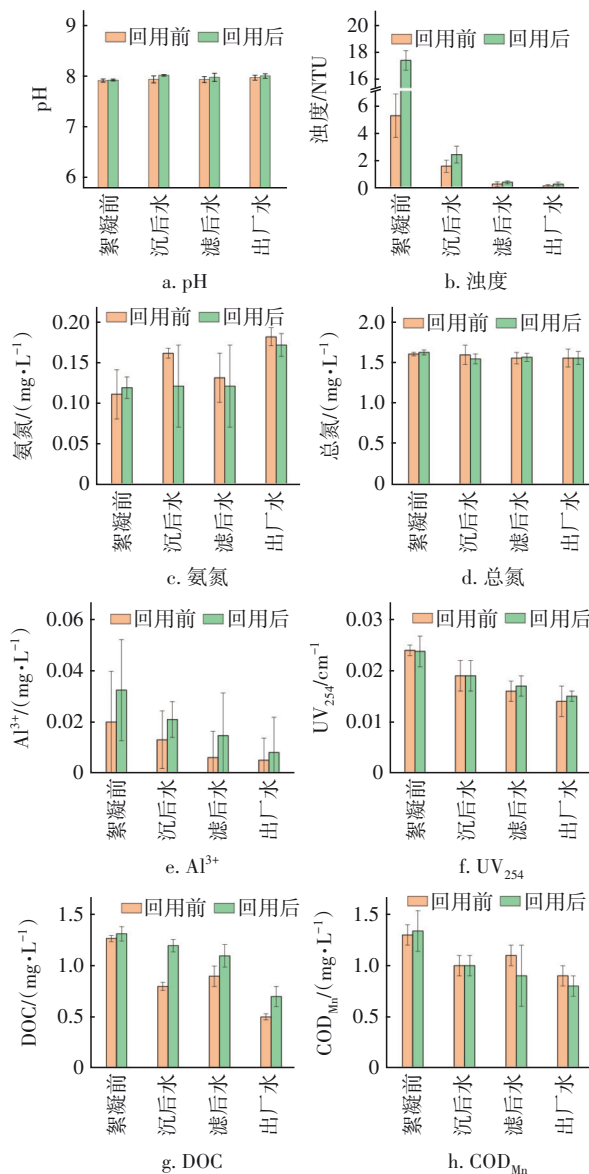


图4 不同工艺段代表性水质参数的浓度

Fig.4 Concentrations of representative water quality parameters in different treatment processes

上述结果表明,反冲洗水周期性回用不仅能够增加水厂净水量,而且未给出厂水带来超标的风险。相比回用前,出厂水 Al^{3+} 浓度升高可能归因于反冲洗水中较高的 Al^{3+} 负荷贡献、常规处理工艺对 Al^{3+} 的去除有限。然而,即使反冲洗水中 DOC 所贡献的污染负荷较低,其直接回用却仍会造成单元出水及出厂水中 DOC 浓度明显升高,原因可能是反冲

洗水中蛋白类物质分子质量较原水的小且溶解性高,更难被混凝-沉淀工艺去除^[10]。

图5展示了烟碱及酰胺类、三唑类农药在不同工艺段检出浓度的变化。可见,回用反冲洗水对絮凝前的农药检出浓度基本没有影响,但各工艺段的检出浓度均显著降低。

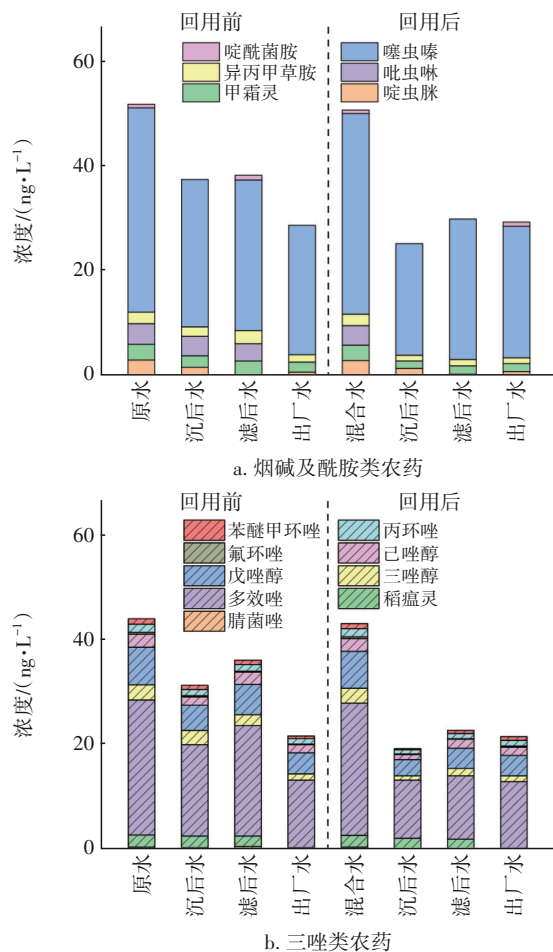


图5 不同工艺段烟碱及酰胺类和三唑类农药的检出浓度
Fig.5 Detected concentrations of nicotine and amide and triazole pesticides in different treatment processes

此外,对于受控的两种农药(甲霜灵和稻瘟灵),回用后也明显降低了其在各工艺段的检出浓度。上述结果说明直接回用反冲洗水有利于提高混凝-沉淀工艺对农药类微污染物的去除。相较于沉后水,滤后水中的农药类污染物浓度相对较高,表明滤池对农药类微污染物具有一定的积累能力。对于积累程度较高的滤池需要加强反冲洗,从而缓解滤池出水微污染物浓度过高的风险。

2.3 直接回用对各单元工艺净水效果的影响

图6显示了混凝-沉淀、过滤和消毒工艺段对部

分常规污染物的累积去除率,可以发现大多数常规污染物的去除率会沿着水处理流程而升高。

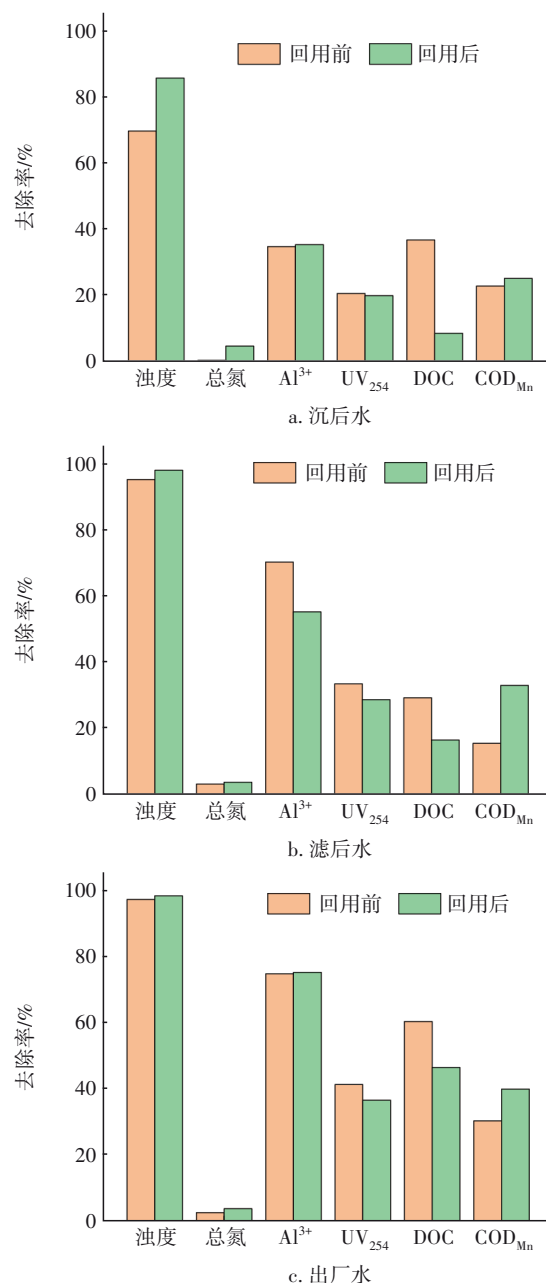


图6 不同工艺段典型水质指标的累积去除率

Fig.6 Cumulative removal rates of typical water quality parameters in different treatment processes

通过比较可知,在混凝-沉淀、过滤或消毒单元,回用反冲洗水后提高了浊度、总氮、 Al^{3+} 和 COD_{Mn} 的去除率,但降低了对 UV_{254} 和DOC的去除率。由此可见,直接回用反冲洗水带来的浊度升高能够促进传统水处理工艺尤其是混凝-沉淀工艺对无机物指标的去除^[11,19]。而反冲洗水中的蛋白质类有机物

较难被混凝-沉淀工艺去除^[10],因此造成其去除效率下降。但该水厂反冲水中赋存的常量有机物浓度相对较低(平均DOC浓度为2.2 mg/L,且UV₂₅₄值略低于原水),即使混凝-沉淀工艺的去效率有所下降,其回用带来的常量有机物水质风险也会较低。此外,回用前的滤池存在一定的有机物积累(相较于沉后水,滤后水的DOC及COD_{Mn}去除率分别降低了7.9%和7.7%),及时的反冲洗能够恢复其过滤性能(回用后的滤后水的DOC及COD_{Mn}去除率较沉后水分别提高了7.6%和7.4%,这和文献中报道的过滤去除效率相当^[20])。

有趣的是,回用反冲洗水可以显著提高混凝-沉淀及过滤工艺对微污染物(如农药)的累积去除率,其平均去除率较回用前增加了约20%(见图7),明显高于传统水处理工艺对微污染物的去除率(不高于30%)^[12]。进一步研究发现,农药的溶解度与混凝-沉淀及过滤工艺对其去除率不相关。上述结果表明,混凝-沉淀及过滤工艺对水中常量有机物(如DOC)及微量农药类化合物的去除之间存在一定的竞争效应,即伴随常量有机物去除率的下降会出现微量农药类化合物的去除率上升,这可能与这些污染物的分子质量、物化特性和赋存浓度有关,未来还需要进一步研究。

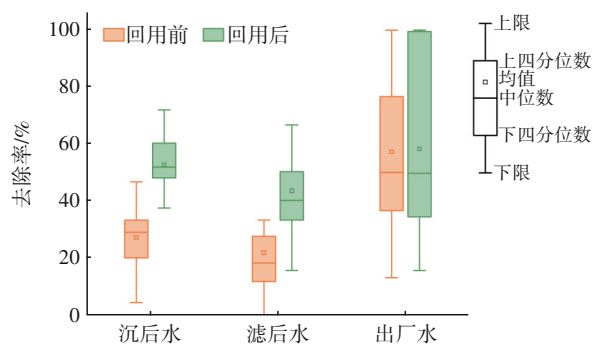


图7 不同工艺段农药类化合物的累积去除率

Fig.7 Cumulative removal efficiency of detected pesticides in different treatment processes

3 结论

① 南方某水厂反冲洗水直接回用所带来的水质风险关键指标为浊度和Al³⁺,两者分别占混合水污染负荷的70.7%和41.4%。反冲洗水各年龄组的Al³⁺非致癌风险均高于原水,并表现为低风险水平;而反冲洗水暴露农药的健康风险均低于原水,仅噻虫嗪、多效唑和莠灭净表现为低风险水平。

② 与回用前相比,反冲洗水直接回用后不会造成沉淀和过滤出水的浊度明显升高,但会使Al³⁺和DOC浓度明显升高。对于出厂水来说,回用前后的水质均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求。此外,回用反冲洗水会降低水厂各工艺段的农药检出浓度。

③ 反冲洗水直接回用提高了混凝-沉淀工艺对无机物指标、COD_{Mn}和农药类微污染物的去除率,但会降低对UV₂₅₄和DOC的去除率。此外,DOC、COD_{Mn}和农药类微污染物在滤池中发生了积累,而反冲洗是解决滤池中污染物积累的有效手段。

参考文献:

- [1] QIAN Y, SHI Y, GUO J, *et al.* Molecular characterization of disinfection byproduct precursors in filter backwash water from 10 drinking water treatment plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 159027.
- [2] 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).
- [3] MAHDAVI M, AMIN M M, HAJIZADEH Y, *et al.* Removal of different NOM fractions from spent filter backwash water by polyaluminum ferric chloride and ferric chloride [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017, 42: 1497-1504.
- [4] MAHDAVI M, AMIN M M, MAHVI A H, *et al.* Metals, heavy metals and microorganism removal from spent filter backwash water by hybrid coagulation-UF processes [J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2018, 8(2): 225-233.
- [5] ARENDZE S, SIBIYA M. Filter backwash water treatment options [J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2014, 4(2): 85-91.
- [6] GOTTFRIED A, SHEPARD A D, HARDIMAN K, *et al.* Impact of recycling filter backwash water on organic removal in coagulation-sedimentation processes [J]. *Water Research*, 2008, 42(18): 4683-4691.

- [7] ARORA H, DI G G, LECHEVALLIER M. Spent filter backwash water contaminants and treatment strategies [J]. Journal of American Water Works Association, 2001, 93(5): 100–112.
- [8] BOURGEOIS J C, WALSH M E, GAGNON G A. Comparison of process options for treatment of water treatment residual streams [J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004, 3(6): 477–484.
- [9] EBRAHIMI A, MAHDAVI M, PIRSAHED M, *et al.* Dataset on the cost estimation for spent filter backwash water (SFBW) treatment [J]. Data in Brief, 2017, 15: 1043–1047.
- [10] ZHOU Z, YANG Y, LI X, *et al.* Effect of recycling filter backwash water on characteristic variability of dissolved organic matter in coagulation sedimentation process [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(1): 48–56.
- [11] CHEN T, XU Y, WANG D, *et al.* The impact of recycling sludge on water quality in coagulation for treating low-turbidity source water [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(31): 14433–14442.
- [12] DONG H, XU L, MAO Y, *et al.* Effective abatement of 29 pesticides in full-scale advanced treatment processes of drinking water: from concentration to human exposure risk [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123986.
- [13] DE JESUS GAFFNEY V, ALMEIDA C M M, RODRIGUES A, *et al.* Occurrence of pharmaceuticals in a water supply system and related human health risk assessment [J]. Water Research, 2015, 72: 199–208.
- [14] AHMED M F, MOKHTAR M B, ALAM L, *et al.* Non-carcinogenic health risk assessment of aluminium ingestion via drinking water in Malaysia [J]. Exposure and Health, 2019, 11: 167–180.
- [15] 刘子奇, 仇付国, 李红岩, 等. 华北平原某区农村供水水质与健康风险评估 [J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2054–2063.
- LIU Ziqi, QIU Fuguo, LI Hongyan, *et al.* Evaluations of rural drinking water quality and health risk in the North China Plain [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(7): 2054–2063 (in Chinese).
- [16] XU L, GRANGER C, DONG H, *et al.* Occurrences of 29 pesticides in the Huangpu River, China: highest ecological risk identified in Shanghai metropolitan area [J]. Chemosphere, 2020, 251: 126411.
- [17] 何姝, 董慧峪, 任南琪. 我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 [J]. 环境科学, 2023, 44(1): 180–188.
- HE Shu, DONG Huiyu, REN Nanqi. Occurrence and health risk assessment of multiple pesticides in drinking water sources of Southeast China [J]. Environmental Science, 2023, 44(1): 180–188 (in Chinese).
- [18] 顾允轩, 仇付国, 王大伟, 等. 典型农业小流域中29种农药类微污染物检出、时空变化与生态风险评估 [J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3): 326–338.
- GU Yunxuan, QIU Fuguo, WANG Dawei, *et al.* Occurrence, spatial-temporal variation and ecological risk assessment of 29 pesticides in a typical small agricultural basin [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(3): 326–338 (in Chinese).
- [19] SHAFIQUZZAMAN M, ALSALEEM S S, HAIDER H, *et al.* Experimental study for sand filter backwash water management: low-cost treatment for recycling and residual sludge utilization for radium removal [J]. Water, 2021, 13(20): 2799.
- [20] 韩晓刚, 黄廷林. 水厂常规工艺去除有机物和总磷 [J]. 环境工程学报, 2013, 7(5): 1616–1620.
- HAN Xiaogang, HUANG Tinglin. Removal efficiency of organics and total phosphorus in conventional process of water plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(5): 1616–1620 (in Chinese).

作者简介:段书乐(1995–),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事水处理技术研究。

E-mail:slduan_st@rcees.ac.cn

收稿日期:2023-09-15

修回日期:2023-10-02

(编辑:李德强)