



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202306042

中图分类号 X703

文献标识码 A

李鼎,董慧峪,李海华,等. 混凝-超滤工艺处理饮用水厂滤池反冲洗水和排泥水的效能[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3169-3177. [LI Ding, DONG Huiyu, LI Haihua, et al. Efficacy of coagulation-ultrafiltration treatment for filter backwash water and sedimentation sludge water from drinking water treatment plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3169-3177.]

混凝-超滤工艺处理饮用水厂滤池反冲洗水和排泥水的效能

李鼎^{1,2},董慧峪^{2,✉},李海华¹,储文斌^{2,3},许谦⁴,蒋才芳⁴,段书乐²,苗钦奎^{2,5},
强志民²

1. 华北水利水电大学环境与市政工程学院, 郑州 450046; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085; 3. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310014; 4. 广西绿城水务股份有限公司, 南宁 530029; 5. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350

摘要 为探究饮用水厂滤池反冲洗水和排泥水的直接回用和处理后回用对水厂的影响及两类水处理过程中的差异, 采用了污染负荷计算、实验室混凝小试和现场混凝-超滤中试装置对两类生产废水分别进行了研究。溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、氨氮(NH₄⁺-N)、Al³⁺和全氟类化合物(perfluorinated compounds, PFASs)的污染负荷计算结果表明生产废水直接回用会为水厂带来一定的额外负荷, 其中排泥水和反冲洗水分别对PFASs和Al³⁺负荷贡献较大; 通过对小试中浊度, UV₂₅₄以及5种荧光组分去除效果的对比, 反冲洗水的混凝效果稍好于排泥水, 同时10 mg·L⁻¹的聚合氯化铝为最佳混凝剂方案; 在中试过程中, 两类水中的浊度、有机物、Al³⁺和PFASs均可被有效去除, 出水差异较小, 但反冲洗水中的亲水性和小分子有机物使得其去除效果低于排泥水。总体来说, 经过处理之后, 两类生产废水均可回用, 回用可有效减少废水排放量, 提高水厂水资源利用率。

关键词 滤池反冲洗水; 沉淀池排泥水; 混凝; 聚合氯化铝; 超滤

随着全球气候变化和人口增长的影响, 水资源问题已经成为一个全球性的挑战。饮用水厂生产废水回用是将生产过程中的沉淀池排泥水和滤池反冲洗水排再次利用, 用于生产过程。回用可以提高水资源的利用效率, 减少废水排放对环保的影响, 实现生产和环保的双赢。目前国内外对生产废水回用的研究逐渐增多。在国外, 例如美国^[1]、英国^[2]、日本^[3]等地, 生产废水回用技术已经成熟并广泛应用^[4]。而在国内, 目前对生产废水回用的研究主要集中于对滤池反冲洗水的回用, 而且多为未经处理或仅静置沉淀后直接进行回用, 对沉淀池排泥水的回用研究较少。

相较于直接回用, 生产废水回用技术包括混凝沉淀^[5]、气浮^[6]、膜滤^[7]等, 这些方法能够有效地去除废水中的悬浮物、微生物等污染物, 从而提高回用水的质量, 使其能够更加安全地再次用于生产过程^[8]。滤池反冲洗水主要是由滤料中截留下来的固体颗粒物、有机污染物和一些化学药剂的残留物组成。沉淀池排泥水主要由较多的胶体颗粒、泥沙、悬浮物、混凝剂和混凝剂形成的氢氧化物构成^[9]。但不同水厂的排泥水具有不同的特性, 受水源及水厂的工艺影响较大^[10]。对于水厂而言, 2种不同水质能否直接回用以及直接回用和处理后回用对水厂的影响仍值得深入探究。

本研究基于南方某水厂实际水样, 首先通过污染负荷分析对比2种生产废水直接回用对水厂工艺负荷带来的不同影响; 其次, 开展小试实验探究了不同混凝剂及其剂量对反冲洗水和排泥水中不同污染物的去除效

收稿日期: 2023-06-09; 录用日期: 2023-09-07

基金项目: 广西绿城水务水厂生产废水处理回用项目(202101), 国家自然科学基金面上资助项目(52070184, 52270012)。

第一作者: 李鼎(1999—), 男, 硕士研究生, lidong2818@163.com; ✉通信作者: 董慧峪(1983—), 男, 博士, 副研究员, hydong@rcees.ac.cn

果和机理；最后，通过混凝-超滤中试装置对 2 种生产废水进行了处理，研究了中试处理过程中的不同现象，分析了生产废水处理后回用对水厂带来的效益。本研究结果以期为其他水厂提供了宝贵的经验参考和技术指导，推动生产废水回用在饮用水厂中的应用。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

聚合氯化铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 28\%$, 上海阿拉丁生化科技有限公司)；无水三氯化铝 (99%)、聚合硫酸铁 ($\text{Fe} \geq 21\%$)、聚合氯化铝铁 (优纯级) 购于上海麦克林生化科技股份有限公司。

总有机碳分析仪 (TOC-V cph, 日本岛津)、pH 计 (PHS-3C 上海大浦公司)、浊度计 (HACH2100N, 美国哈希)、紫外分光光度计 (DR-6000, 美国哈希)、荧光分光光度计 (F-7000, 日本日立)、六联搅拌机 (TU-1901, 中国普析通用仪器有限公司)、电感耦合等离子体发射光谱仪 (iCAP7 200 duo, 美国赛默飞)、超纯水仪 (Milli-Q A10, 德国默克)。超高液相色谱三重四级杆质谱 (UPLC-MS/MS)。

1.2 实验方法

混凝小试实验设置 3 组平行样品，将废水水样充分振荡摇匀后，静置 30 min，取中部水样 250 mL 于锥形瓶中，加入相应剂量的混凝剂于样品中，首先以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速保持 1 min，充分搅匀反应体系，然后以 $70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速保持 15 min，最后静置 20 min，待悬浮物沉降后取上清液 50 mL，测定其浊度、 UV_{254} 和三维荧光。

混凝-超滤中试采用混凝、沉淀、砂滤、超滤工艺分别对反冲洗水和排泥水进行处理 (图 1)。中试运行时，进水流量为 $1800 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ，混凝剂流量为 $14 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ，PAC 质量浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，进水和混凝剂在中试前端混合器混合后进入混凝沉淀池，池体前段为搅拌区，搅拌均匀后进入沉淀区，沉淀池上清液溢流至斜板斜管沉淀池中，进水从斜板斜管沉淀池底部向上流动，通过溢流堰进入砂滤池中，经过滤后进入到清水池中，清水池水先流经一台 $50 \mu\text{m}$ 的精密过滤器，然后通过 $0.1 \mu\text{m}$ 的超滤膜后出水。

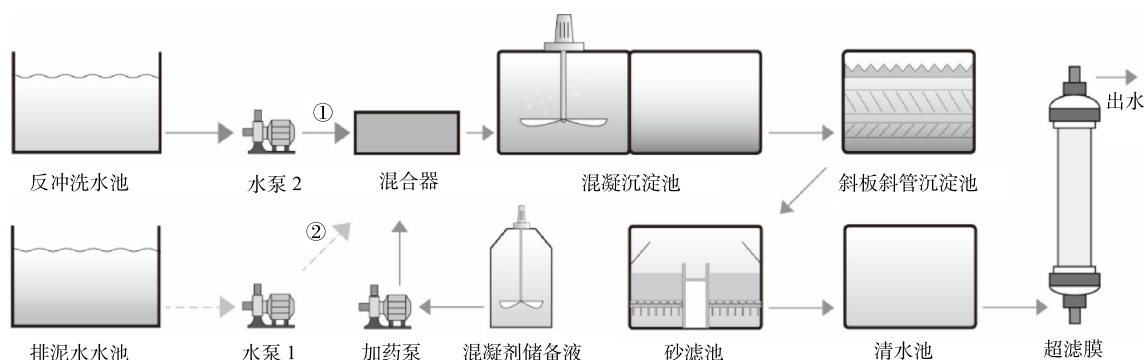


图 1 生产废水处理中试工艺流程图

Fig. 1 Pilot scale flow diagram for filter backwash water and sedimentation sludge wastewater treatment

1.3 分析方法

DOC 测定采用总有机碳分析仪；pH 采用 pH 计直接测定；浊度采用浊度计测量； UV_{254} 使用紫外分光光度计在 245 nm 波长下测量；三维荧光采用荧光光度计测量后使用 Matlab 进行区域积分分析； Al^{3+} 质量浓度分析采用《水质 32 种元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ 776-2 015) 中的方法。

PFASs 的测定首先对水样进行固相萃取处理，HLB 小柱分别使用甲醇、1:23 盐酸溶液和超纯水进行活化。水样以 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 富集 PFASs，之后使用 5% 的甲醇和超纯水洗去杂质，真空干燥 30 min 去除残留水分。采用甲醇洗脱小柱后通过氮吹吹干洗脱液，后加入甲醇洗脱管壁，再加入超纯水，注入液相小瓶，使用超高液相色谱三重四级杆质谱 (UPLC-MS/MS) 对 10 种 PFASs 进行分析。色谱柱型号为 ACQUITY BEH C18，离子源为 ESI 源，电离模式为正离子模式，离子源温度为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ，锥孔反吹气流量为 $50 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ，脱溶剂气温度为 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ，脱溶剂气流量为 $900 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ，监测模式为 MRM 模式^[11]。

2 结果与讨论

2.1 生产废水直接回用污染负荷测算

本节开展污染负荷测算比较 2 类水的差异并验证 2 类生产废水可否直接回用。表 1 中详细列举了该水厂原水，滤池反冲洗水和沉淀池排泥水的部分常规水质指标和 PFASs 质量浓度。可以看出，原水和 2 类生产废水中的 pH、UV₂₅₄、DOC 基本处在相似的水平，但 3 种水中有机物的亲疏水性及分子质量大小分布可能仍存在一定差异，致使其处理难度通常大于原水^[12]。此外，排泥水中的 NH₄⁺-N 和其他 2 类水中的浊度、Al³⁺ 和 PFASs 均与原水存在显著差异。从这些结果来看，直接回用生产废水会对水厂污染负荷带来较大的影响。

表 1 水厂原水、反冲洗水和排泥水水质参数

Table 1 Water quality parameters of raw water, filter backwash water and sedimentation sludge water

样品	pH	浊度/NTU	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	DOC/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	Al ³⁺ /(mg·L ⁻¹)	∑PFAS/(mg·L ⁻¹)
原水	7.5~8.3	0~50	0.021~0.053	1.92~5.11	0.14~0.27	0.003~0.056	0.2
反冲洗水	7.5~8.2	100~200	0.026~0.057	2.16~3.24	0.13~0.27	0.117~0.182	2.8
排泥水	7.7~8.1	>>200	0.024~0.049	2.40~3.58	0.10~0.64	0.066~0.130	11.4

根据该水厂实际生产情况，原水、反冲洗水、排泥水流量分别以 6×10^5 、 1.96×10^4 、 8×10^3 t·d⁻¹ 计算，污染物质量浓度采取多次测量的平均值计算，可得到回用污染负荷分布，具体如图 2 所示。由图 2(a) 和图 2(b) 中可以看出，在 NH₄⁺-N 总负荷中，原水、反冲洗水、排泥水分别提供的负荷占比分别为 95.3%、2.9% 和 1.8%；在 DOC 负荷中，3 类水分别提供的负荷占比分别为 96.4%、2.5% 和 1.1%。综上所述，生产废水的直接回用可增加水厂 4.7% 的 NH₄⁺-N 负荷及 3.6% 的 DOC 负荷，对水厂的传统工艺提出了更高的要求。

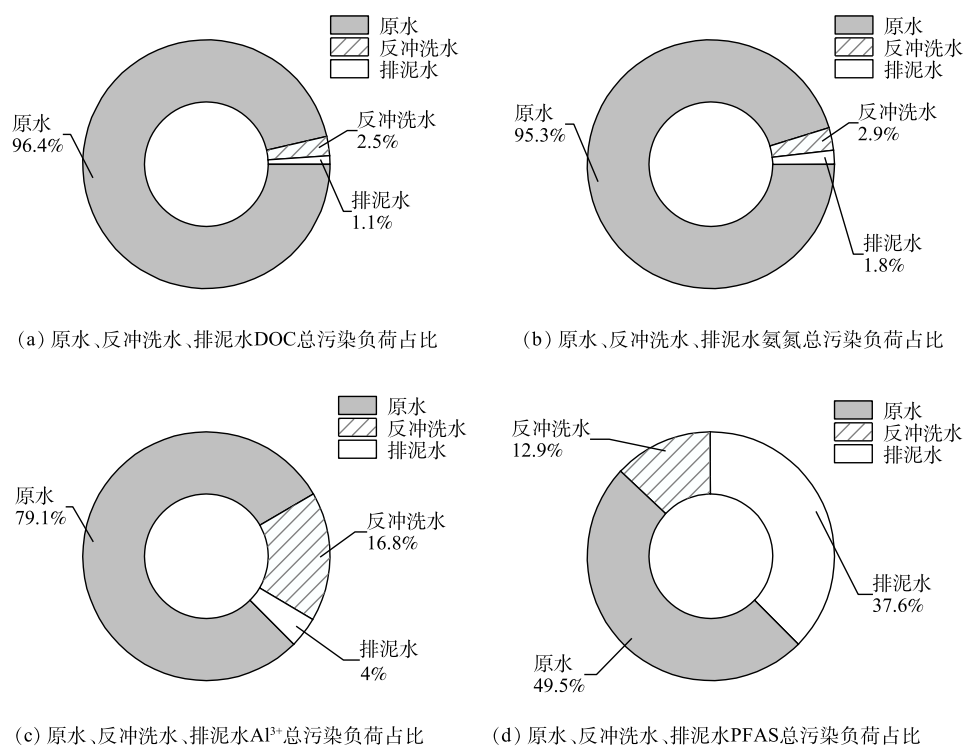


图 2 原水、反冲洗水和排泥水中 NH₄⁺-N、DOC、Al³⁺、PFAS 污染负荷与占比

Fig. 2 Pollution loads and proportions of NH₄⁺-N, DOC, Al³⁺, and PFAS in raw water, filter backwash water, and sedimentation sludge water

除上述指标外,生产废水中会含有一定的混凝剂残留及富集的微污染物,对于使用聚合氯化铝作为混凝剂的该水厂而言,生产废水中 Al^{3+} 含量也会更高^[13]。因此,本研究也对 Al^{3+} 负荷及 PFASs 负荷进行了研究。由图 2 可以看出,反冲洗水带来的 Al^{3+} 负荷约是排泥水的 4 倍左右,而排泥水回用对 PFASs 负荷的影响则约是反冲洗水的 3 倍。这可能是由于排泥水中主要成分为 Al^{3+} 生成的胶体及絮体沉淀,难沉降的含 Al^{3+} 细小颗粒则会被滤池截留下来,这部分含 Al^{3+} 物质则会在对滤池反冲洗的过程中转移到反冲洗水中,造成反冲洗水中 Al^{3+} 含量较高^[14]。此外,絮凝过程中形成的絮体对水中的微污染物及细小颗粒有一定的吸附作用^[15],致使含有较多絮体沉淀的排泥水中 PFASs 含量较高。生产废水回用为该水厂带来了 20.9% 的 Al^{3+} 负荷和 50.5% 的 PFASs 负荷,2 类水直接回用会对水厂工艺带来较大的压力。

直接回用 2 类反冲洗水会带来额外的污染负荷,其中反冲洗水和排泥水会分别带来较多的 Al^{3+} 负荷和 PFASs 负荷,尤其是在雨天或藻类爆发季节等会对原水水质带来较大波动的时间段^[16-17],直接回用增加了水厂出水水质的不确定性,从而带来一定的潜在风险。

2.2 混凝小试实验处理生产废水

2 种生产废水具有不同的理化性质及组成成分,为了深入了解混凝对 2 类废水的去除效果,提前为中试装置运行积累经验,本研究进行了小试实验,评估了市场上常见的 4 种商业混凝剂在处理 2 种生产废水方面的效果。通过多个角度的对比,探究了反冲洗水和排泥水之间的差异,以寻找最佳的混凝剂及剂量。

1) 不同混凝剂对浊度的去除效果。由图 3 中可以看出,不同的混凝剂种类及剂量均可以对浊度有一定的去除效果,但不同混凝剂之间以及同一混凝剂的不同剂量之间均表现出不同程度的去除效果。同时,在处理 2 类废水的实验中,无水 AlCl_3 、聚合氯化铝、聚合氯化铝铁在最佳投加量下去除率均可以达到 95% 以上。当混凝剂混凝效果达到峰值后,反冲洗水和排泥水均出现了随着混凝剂剂量增加去除率却降低的趋势。这可能是因为当混凝剂的剂量增加到一定程度时,其对水中悬浮颗粒和胶体物质的凝聚能力会达到饱和状态,继续增加混凝剂的用量则会出现过混凝的现象,导致颗粒间的排斥力较大,颗粒物的生长速度变慢,反而会难以沉淀^[18]。

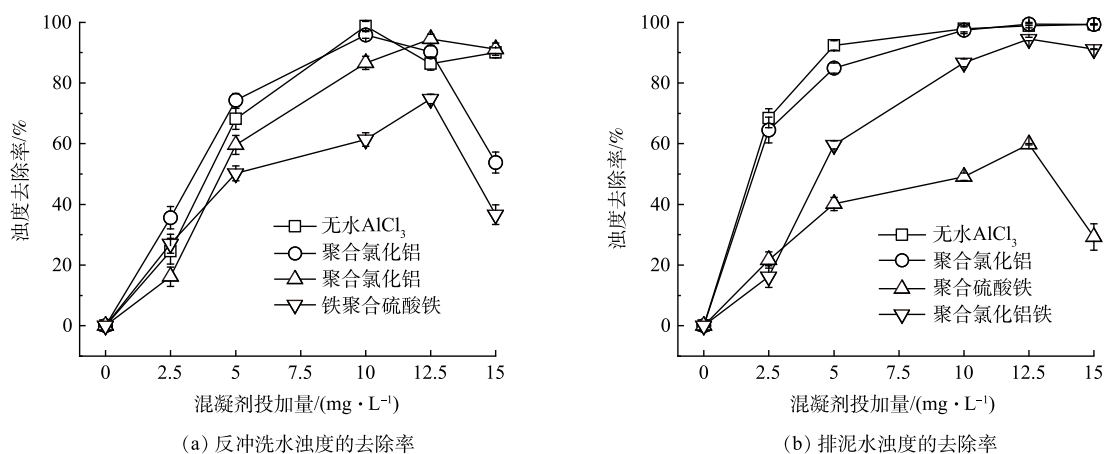


图 3 不同混凝剂和投加量对反冲洗水和排泥水的浊度去除率

Fig. 3 Removal rate of turbidity of filter backwash water and sedimentation discharge water with different coagulants and dosage

2) 不同混凝剂对有机物的去除效果。图 4(a)~(b) 展示了 4 种混凝剂对 UV_{254} 的去除率随投加量的变化。 UV_{254} 的去除率随着混凝剂投加量的变化趋势不同于浊度,其会随着剂量的增加而逐渐增加。其中聚合氯化铝处理反冲洗水时 UV_{254} 的去除率可以达到 45% 以上,无水 AlCl_3 、聚合氯化铝铁的去除率可以达到 40% 以上。而在处理排泥水的时候,去除效果最好的为聚合氯化铝铁,去除率可以达到 40% 以上。图 4(c)~(d) 反映了在投加量为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,4 种混凝剂对反冲洗水和排泥水中 5 种荧光组分去除效果的影响。可以看到,排泥水中的总荧光区域积分值约是反冲洗水中的 2 倍,但几种组分所占比例与反冲洗水类似。在 2 类生产废水中,腐殖酸类占比最高,芳香族蛋白 I 占比最少。其中聚合铝铁对反冲洗水中荧光组分

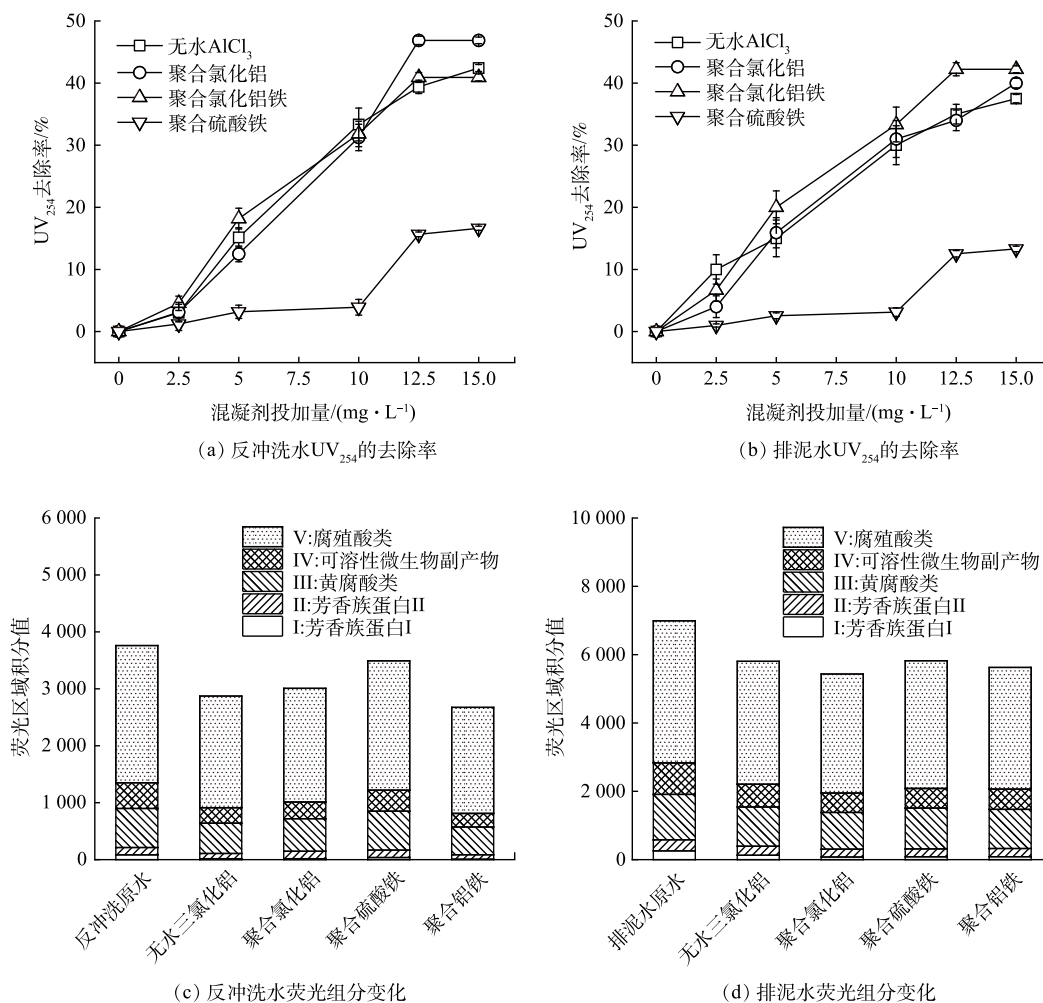


图 4 不同混凝剂对反冲洗水和排泥水的 UV₂₅₄ 和五种荧光组分的去除效果

Fig. 4 Effects of different coagulants on the removal of UV₂₅₄ and five fluorescent components in filter backwash water and sedimentation discharge water

的去除效果较好，而聚合氯化铝对排泥水中荧光组分的去除效果最好。

小试实验结果表明，10 mg·L⁻¹ 聚合氯化铝对浊度的去除效果较好，对 UV₂₅₄ 也有 30% 以上的去除，且投加量相对较低，除了有利于控制回用成本，还能降低回用时 Al³⁺超标的风险。通过对浊度、UV₂₅₄ 和 5 种荧光组分的去除效果的对比，4 种混凝剂中聚合硫酸铁的去除效果最差，而聚合氯化铝和聚合铝铁效果最好且各有优势。分析认为铝盐相较于铁盐可以产生更大的絮体，能够更好的捕集悬浮物，对有机物的网捕卷扫效果更强，具有更好的去除效果^[19]。在小试实验中，反冲洗水的混凝处理效果稍好于排泥水，这可能是由于排泥水中的浊度远高于反冲洗水，影响到混凝剂的作用效果。同时也可能是由于排泥水中的高浊度影响了混凝剂的作用效果^[20]

2.3 中试装置处理生产废水

中试项目位于某南方水厂厂区内，采用混凝-沉淀-砂滤-超滤工艺，其中混凝阶段采用 10 mg·L⁻¹ 的聚合氯化铝。滤池反冲洗水和排泥水经场内管网收集至不同调节池后，通过潜水泵按照设置流量进入中试系统。本节将通过分析常规水质指标、5 种荧光组分变化、Al³⁺质量浓度及 PFASs 质量浓度变化探究不同工艺段的处理效果并对 2 类废水的不同表现进行对比。

1) 不同工艺段对浊度的去除效果。图 5(a) 反映了浊度在处理过程中的变化，其中混凝沉淀将排泥水和反冲洗水的浊度分别由 4 061 NTU 和 242 NTU 降至 55.3 NTU 和 15.91 NTU，几乎绝大多数悬浮颗粒物得以去除，可实现约 95% 的浊度去除率。虽然 2 类生产废水的浊度有较大差异，但在中试装置的处理过程中

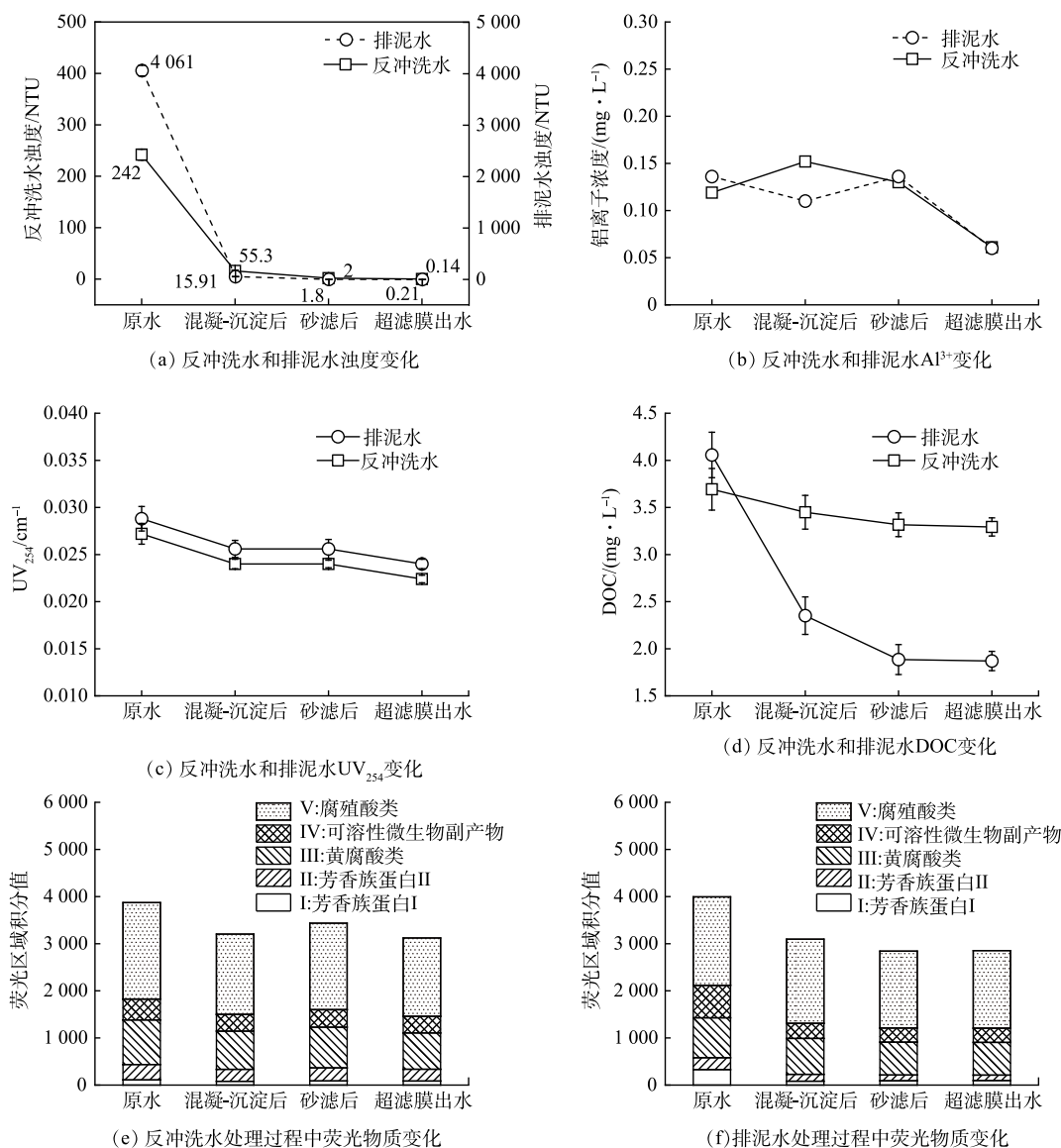


图5 中试不同工艺段对浊度、Al³⁺、UV₂₅₄、DOC、五种荧光组分的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of turbidity, Al³⁺, UV₂₅₄, DOC and five fluorescent components by different treatment processes in the pilot test

并无明显区别, 经中试装置处理后最终出水浊度均低于1 NTU。

2) 不同工艺段对有机物的去除效果。由图5(c)可知, UV₂₅₄在不同工艺段的处理过程中逐渐降低, 2种不同废水经过膜处理后UV₂₅₄可降至0.023 cm⁻¹左右, 去除率约为16%。同时, 反冲洗水的膜出水UV₂₅₄值略低于排泥水的膜出水UV₂₅₄值。这可能与2种废水初始UV₂₅₄值有关。在DOC的去除过程中, 2类不同水质也存在有一定的差异。由图5(d)中可以看出, 2者的原水DOC含量比较接近, 但排泥水的去除效果优于反冲洗水, 前者最大去除率可以达到53.9%, 后者仅为10.8%, 这可能是由于2类生产废水的构成不同。由董秉直等^[21]的研究结果可知, 混凝沉淀过程对大分子有机物去除效果较好, 对小分子有机物的去除效果较差。反冲洗水是清洗滤料过程中产生的, 其有机物来源主要为亲水性和低分子质量的有机物^[22], 这些有机物和颗粒在混凝过程中可能去除效果较差。相比之下, 排泥水中的主要有机物主要集中在悬浮颗粒物及污泥之中, 通过投加混凝剂可以使悬浮颗粒物脱稳并形成较大的絮体沉降下来, 同时絮体也能吸附捕集部分有机物, 使得排泥水中DOC去除效果优于反冲洗水^[23]。图5(e)~(f)反映了处理过程中的5种荧光组分的变化。可以观察到, 反冲洗水和排泥水的荧光组分在处理过程中每个组分都逐渐减少, 整体上约有25%的去除率。

结合上述有机物指标来看，中试工艺可有效去除 2 类生产废水中的有机物，其中起主要作用的仍是混凝阶段。通过添加混凝剂使水中的悬浮物和胶体物质凝聚成絮体，混凝生成的较大絮体可以在沉淀过程中被较好地去除，难以自沉降的絮体也可以在后续的砂滤和超滤中被有效的去除。相较于排泥水，反冲洗水中更多的有机物为小分子有机物，再加之排泥水的絮体量要优于反冲洗水，这些絮体对有机物也存在一定的吸附作用，所以排泥水的有机物的去除效果整体要稍优于反冲洗水。

3) 不同工艺段对 Al^{3+} 质量浓度的影响。由于该水厂混凝工艺采取的混凝剂为聚合氯化铝，在回用处理工艺中仍然采用铝盐可能会对水厂带来 Al^{3+} 超标的风险，故本研究关注了中试处理过程中 Al^{3+} 的变化。由图 5(b) 可知，反冲洗水和排泥水中 Al^{3+} 的质量浓度分别为 $0.119 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.136 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，经过处理后为 $0.061 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.060 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2 种水质中 Al^{3+} 的去除率在 50% 左右，低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022) 规定的 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。超滤膜对 Al^{3+} 较高的去除率可能是因为多数 Al^{3+} 以胶体或和其他物质聚合而成的小絮体的形式存在，而并非以 Al^{3+} 的形式在水中，所以在通过超滤膜时对 Al^{3+} 有较高的去除率^[24]。2 类水在中试装置的处理过程中， Al^{3+} 去除效果类似，最后出水质量浓度都可以达到较低的水平。

4) 不同工艺段对新污染物的去除效果。本研究对中试不同工艺段出水的 10 种 PFASs 进行了检测 (图 6)。在 2 类生产废水原水中均只检测到 3 类物质，分别为全氟丁酸 (perfluorobutanoic acid, PFBA)、全氟己酸 (perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟戊酸 (perfluoropentanoic acid, PFPeA)，其中无论是反冲洗水还是排泥水，PFBA 是主要成分，占 95% 以上的含量。此外反冲洗水中的 PFASs 也要高于排泥水，前者为 $88.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ，后者为 $54.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经过中试装置处理后，2 类废水的 PFASs 出水质量浓度均低于原水中的质量浓度，反冲洗水的 PFASs 去除率接近 60%，而排泥水的去除率超过 50%。因此，处理后回用的水能够有效降低 PFASs 的污染负荷。反冲洗水在砂滤后能达到稳定水平，这可能是因为排泥水悬浮物含量远高于反冲洗水，沉淀池停留时间不足，混凝沉淀出水中仍有少量絮体，需通过砂滤超滤后进一步去除，同时这也伴随着 PFASs 的减少。

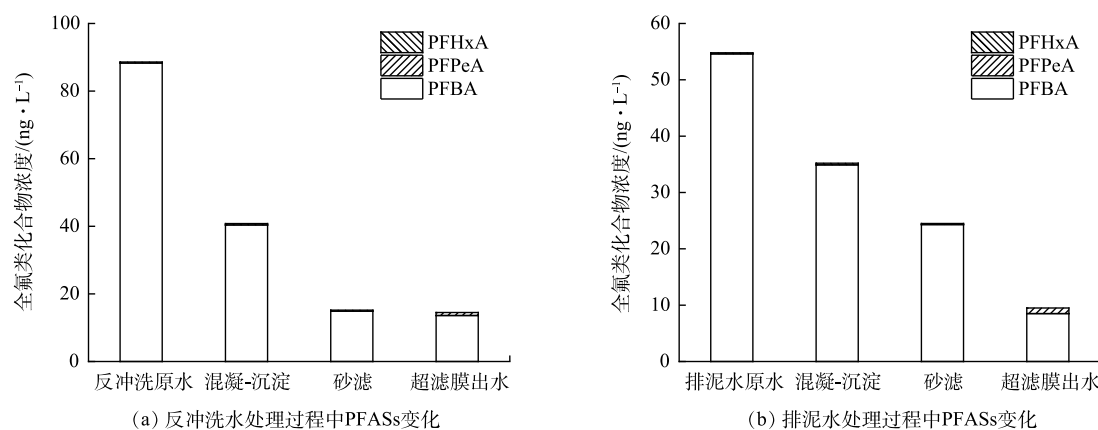


图 6 中试不同工艺段对 PFASs 的去除效果

Fig. 6 Removal efficiency of PFASs by different treatment processes in the pilot test

中试装置可以有效去除各类污染物，从而减轻生产废水回用所带来的污染负荷及安全风险。但从浊度、DOC、 UV_{254} 、PFASs 和黄腐酸类、腐殖酸类等 5 种荧光组分变化的角度来看，混凝沉淀砂滤后的出水相比原水在回用中可大幅降低相关污染物的负荷。同时，相对于其他工艺段，超滤工艺并没有表现出更好的污染物去除率。2 类生产废水在中试装置的处理过程中存在一定的区别，但最终出水水质较为相似且优于该水厂水源水。

3 结论

1) 结合南方某水厂的水源水质及生产废水污染物质量浓度开展了该水厂生产废水直接回用的污染负荷计算。研究结果显示，2 类水直接回用均会对该水厂的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 DOC 负荷带来一定的影响，其中反冲洗水会对 Al^{3+} 以及排泥水会对 PFASs 负荷的影响更为显著。

2) 开展了 2 类生产废水的混凝小试实验, 确定了混凝工艺的最佳混凝剂为聚合氯化铝, 最佳剂量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并且该条件下可有效降低 2 类生产废水中的浊度、 UV_{254} 和 5 种荧光组分。2 类生产废水在相同混凝条件下的不同表现与不同的组成组分相关。

3) 经过中试装置处理后, 2 类生产废水中浊度、 UV_{254} 、DOC、和 5 种荧光组分均有不同程度的降低, 此外受生产废水回用影响较高的 Al^{3+} 和 PFASs 负荷, 在经过中试处理后也有了较为显著的去除效果。2 类不同的废水经中试装置处理后的出水差异较小, 较好的减轻了水厂的净水压力。

4) 中试装置中的超滤工艺虽然可以带来更好的去除效果, 但从水厂的回用需求及生产成本的角度考虑, 其必要性仍有待商榷。

参考文献

- [1] LI W, LIANG X, DUAN J, et al. Influence of spent filter backwash water recycling on pesticide removal in a conventional drinking water treatment process[J]. Environmental science water research & technology. 2018, 4 (7) : 157-167.
- [2] SCHOFIELD T. Dissolved air flotation in drinking water production[J]. Water Science and Technology. 2001, 43 (8) : 9-18.
- [3] OKUDA T, NISHIJIMA W, SUGIMOTO M, et al. Removal of coagulant aluminum from water treatment residuals by acid[J]. Water Research. 2014, 60: 75-81.
- [4] 张立. 澄西水厂生产废水处理及回用优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [5] 武仁超, 王东升, 段晋明, 等. 强化混凝工艺深度处理水厂排泥废水[J]. 环境工程学报, 2012, 6 (6) : 1915-1918.
- [6] 李荣光, 何文杰, 黄廷林, 等. 气浮工艺在水厂排泥水处理中的应用[J]. 供水技术, 2013, 7 (3) : 6-9.
- [7] 陈丽, 李佳宾, 付宛宜, 等. 陶瓷膜组合工艺对自来水厂排泥水的处理效果[J]. 环境工程, 2021, 39 (7) : 80-87.
- [8] 孙天晓, 唐海华, 周叶, 等. 饮用水厂中深度处理工艺生产废水研究[J]. 水处理技术, 2022, 48 (10) : 1-5.
- [9] 黄卓. 城市净水厂生产废水回用安全性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [10] HU C, LIU H, QU J, et al. Coagulation behavior of aluminum salts in eutrophic water: Significance of Al13 species and pH control[J]. Environmental Science & Technology. 2006, 40 (1) : 325-331.
- [11] WU S, YUAN T, FU W, et al. Perfluorinated compound correlation between human serum and drinking water: Is drinking water a significant contributor?[J]. Science of the Total Environment. 2023, 873: 162471.
- [12] QIAN Y, HU Y, CHEN Y, et al. Haloacetonitriles and haloacetamides precursors in filter backwash and sedimentation sludge water during drinking water treatment[J]. Water Research. 2020, 186: 116346.
- [13] LORET J F, COSSALTER L, ROBERT S, et al. Assessment and management of health risks related to the recycling of filter backwash water in drinking water production[J]. Water Practice and Technology. 2013, 8 (2) : 166-179.
- [14] MCCORMICK N J, PORTER M, WALSH M E. Disinfection by-products in filter backwash water: Implications to water quality in recycle designs[J]. Water Research. 2010, 44 (15) : 4581-4589.
- [15] MATILAINEN A, VEPSÄLÄINEN M, SILLANPÄÄ M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science. 2010, 159 (2) : 189-197.
- [16] AZIZ M T, GRANGER C O, FERRY J L, et al. Algae impacted drinking water: Does switching to chloramination produce safer drinking water?[J]. Science of the Total Environment. 2023, 877: 162815.
- [17] LONG D T, PEARSON A L, VOICE T C, et al. Influence of rainy season and land use on drinking water quality in a karst landscape, State of Yucatán, Mexico[J]. Applied Geochemistry. 2018, 98: 265-277.
- [18] ZHANG Z, JING R, HE S, et al. Coagulation of low temperature and low turbidity water: Adjusting basicity of polyaluminum chloride (PAC) and using chitosan as coagulant aid[J]. Separation and Purification Technology. 2018, 206: 131-139.
- [19] 陈伯俭. 南水北调(邯郸段)水源水预氧化-强化混凝试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [20] 熊易华. 长江上游高浊度原水及处理技术[J]. 给水排水, 2011, 47 (4) : 23-27.
- [21] 董秉直, 李伟英, 陈艳, 等. 用有机物分子量分布变化评价不同处理方法去除有机物的效果[J]. 水处理技术, 2003 (3) : 155-158.
- [22] 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.
- [23] XU Y, CHEN T, LIU Z, et al. The impact of recycling alum-humic-floc (AHF) on the removal of natural organic materials (NOM) : Behavior of coagulation and adsorption[J]. Chemical Engineering Journal. 2016, 284: 1049-1057.
- [24] WANG W, YUE Q, LI R, et al. Optimization of coagulation pre-treatment for alleviating ultrafiltration membrane fouling: The role of floc properties on Al species[J]. Chemosphere. 2018, 200: 86-92.

(责任编辑: 曲娜)

Efficacy of coagulation-ultrafiltration treatment for filter backwash water and sedimentation sludge water from drinking water treatment plants

LI Ding^{1,2}, DONG Huiyu^{2,*}, LI Haihua¹, CHU Wenbin^{2,3}, XU Qian⁴, JIANG Caifang⁴, DUAN Shule², MIAO Qinkui^{2,5}, QIANG Zhimin²

1. School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 4. Guangxi Nanning Water Co.Ltd., Nanning 530029, China; 5. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China

*Corresponding author, E-mail: hydong@rcees.ac.cn

Abstract To investigate the impacts of direct reuse and treated reuse of filter backwash water and sedimentation sludge water on water treatment plants, as well as the different performance in the treatment processes of these two types of water, this study employed pollution load calculations, laboratory-scale coagulation experiments, and pilot-scale coagulation-ultrafiltration trials to examine the two types of production wastewater. The pollution load calculations for dissolved organic carbon (DOC), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), Al^{3+} , and perfluorinated compounds (PFASs) indicated that the direct reuse of production wastewater would impose an additional pollution load on the drinking water treatment plants, of which sedimentation sludge water and filter backwash water contributed significantly to the load of PFASs and Al^{3+} , respectively. Comparative analysis of turbidity, UV_{254} , and PFASs removal in the laboratory-scale tests revealed that the coagulation performance of filter backwash water was slightly better than that of sludge discharge water. A dosage of $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of poly-aluminum chloride was found to be the optimal coagulant. In the pilot-scale experiments, turbidity, DOC, Al^{3+} , and PFASs in both types of water were effectively removed, with small differences in effluent quality. However, the presence of hydrophilic and small-molecule organic matter in filter backwash water resulted in lower removal efficiency compared to sedimentation sludge water. Overall, after appropriate treatment, both the two wastewater types can be reused, thereby reducing wastewater discharge and improving water resource utilization in drinking water treatment plants.

Keywords filter backwash water; sedimentation sludge water; coagulation; poly aluminum chloride; ultrafiltration