

周晨, 袁聪, 鲍寻, 等. 水厂生产尾水水质特性分析及回用技术[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 56-66, 176.

ZHOU C, YUAN C, BAO X, et al. Analysis of water quality characteristics and reclamation technology of WTP tailwater[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 56-66, 176.

水厂生产尾水水质特性分析及回用技术

周 晨¹, 袁 聪¹, 鲍 寻¹, 司佳蕾², 陈 晗^{2,*}

(1. 南京水务集团有限公司, 江苏南京 210002; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098)

摘 要 【目的】 水厂生产尾水主要包括沉淀池排泥水和滤池反冲洗水, 水量占水厂产水量的 6%~10%, 通过分析生产尾水的水质特征并探讨其直接回用技术, 可为水厂生产尾水回用提供技术参考, 对推进节水型社会建设具有重要的现实意义。【方法】 文章采用浓缩池上清液回用中试装置, 系统研究了浓缩池上清液的水质特征及浓缩池上清液直接回用(回用比为 3:1)对原水、炭砂滤池出水、沉淀池排泥水及炭砂滤池反冲洗水水质的影响。【结果】 浓缩池上清液浑浊度<6 NTU, 显著低于原水浑浊度, 氨质量浓度为 0.04~0.12 mg/L, 与原水氨含量几乎相当, 高锰酸盐指数与原水相当, 整体低于 4 mg/L, 菌落总数为 500~1 000 CFU/mL, 显著高于原水, 铝盐含量高出原水中铝盐含量约 10 倍, 整体为 0.04~0.12 mg/L, 三氯甲烷、二氯乙酸和二氯乙腈生成势均低于原水。浓缩池上清液直接回用后, 原水浑浊度、三氯甲烷、二氯乙酸和二氯乙腈生成势均略微下降, 氨含量变化不明显, 高锰酸盐指数略微升高, 铝盐和菌落总数显著升高, 表明铝盐和菌落总数是浓缩池上清液回用亟需重点关注的水质指标。基于中试的连续运行研究, 发现浓缩池上清液直接回用对炭砂滤池出水水质无明显影响, 且浓缩池上清液直接回用不会导致铝盐在沉淀池排泥水和炭砂滤池反冲洗水中富集。【结论】 这说明浓缩池上清液可在自来水处理过程中直接回用。

关键词 水厂 生产尾水 污泥浓缩池上清液 水质特性 回用

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0056-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.007

Analysis of Water Quality Characteristics and Reclamation Technology of WTP Tailwater

ZHOU Chen¹, YUAN Cong¹, BAO Xun¹, SI Jiale², CHEN Han^{2,*}

(1. Nanjing Water Group Co., Ltd., Nanjing 210002, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract [Objective] The production tailwater from water treatment plants (WTPs) primarily includes sludge discharge water from sedimentation tanks and backwash water from filters, accounting from 6% to 10% of the water production capacity of the WTP. By analyzing the water quality characteristics of production tailwater and investigating its direct reuse technologies, this study can provide technical references for the recycling of WTP tailwater, which holds significant practical importance for advancing the construction of a water-saving society. [Methods] In the paper, a pilot-scale plant for the reuse of supernatant from a concentration tank was used to systematically study the water quality characteristics of the supernatant from the concentration tank and the impact of direct reuse of supernatant from the concentration tank (reuse ratio of 3:1) on the water quality of raw water, sand filter outflow, sedimentation tank sludge discharge, and filter backwash water. [Results] The turbidity of the supernatant in the concentration tank was less than 6 NTU, significantly lower than the turbidity of the raw water. The ammonia content was from 0.04 mg/L to 0.12 mg/L, almost equivalent to the ammonia content in the raw water. The permanganate index was equivalent to the raw water, and it was lower than 4 mg/L. The total bacterial count fluctuated between 500 CFU/mL and 1 000 CFU/mL, significantly higher than the raw water. The

[收稿日期] 2023-12-21

[基金项目] 南京水务集团有限公司科技创新项目(YF2022-010): 尾水处理系统浓缩池上清液回用技术研究

[作者简介] 周晨(1989—), 男, 工程师, 主要从事市政给水处理与研究等工作, E-mail: 693004034@qq.com。

[通信作者] 陈晗(1992—), 男, 副研究员, 主要从事饮用水安全保障、水厂节水与排泥水安全回用等方面的研究与应用等工作, E-mail: hhu_chenhan@163.com。

aluminum content was about 10 times higher than that in raw water, and the overall fluctuation was from 0.04 mg/L to 0.12 mg/L. The formation potential of chloroform, dichloroacetic acid and dichloroacetonitrile were slightly lower than that of raw water. After direct reuse of supernatant from the concentration tank to raw water, the turbidity of the raw water and the formation potential of chloroform, dichloroacetic acid and dichloroacetonitrile slightly decreased, the ammonia content did not change significantly, the permanganate index slightly increased, and the aluminum and total bacterial count significantly increased, suggesting that aluminum and total bacterial count were water quality indicators that urgently need to be focused on for the reuse of supernatant from concentration tanks. Based on the continuous operation study of the pilot scale plant, it was found that the direct reuse of the supernatant from the concentration tank had no significant effect on the effluent quality of the carbon sand filter, and the direct reuse of the supernatant from the concentration tank would not lead to the enrichment of aluminum in the sludge water of the sedimentation tank and the backwash water of the carbon sand filter. [**Conclusion**] This paper indicates that the supernatant from the concentration tank can be directly reused in the process of drinking water treatment.

Keywords water treatment plant(WTP) tail water supernatant of sludge thickener water quality characteristics reclamation

水厂在运行过程中会产生占水厂供水量 6% ~ 10% 的生产尾水,其中以沉淀池排泥水和滤池反冲洗水为主^[1-3]。现有水厂多将生产尾水经浓缩池浓缩处理后取其上清液外排至河道,造成了巨大的水资源浪费。随着水资源短缺的加剧和城市节水要求的提升,国内陆续开展水厂浓缩池上清液回用研究,合理利用浓缩池上清液,将其回用至水处理工艺中。这具有重要的社会效益和经济效益。

排泥水是沉淀池中沉降下来的含有污染物较多的泥水,不仅含有大量的悬浮颗粒,而且还含有相对高浓度的有机组分和氢氧化物。排泥水的水质性质决定了其沉降性能,如排泥水含泥量越大,其中胶体颗粒越拥挤,将难以在浓缩池中通过重力浓缩^[4-6]。滤池主要用于进一步去除絮凝沉淀后水中的细小颗粒及残余絮体,随着截留物质在滤池内累积,滤层水头损失增大,因此,需要定期反冲洗滤池^[7-8]。滤池反冲洗水的污染物质主要包含滤池滤料截留的固体颗粒物、金属离子、有机污染物和微生物等^[9-11]。可见,沉淀池排泥水和滤池反冲洗水进入浓缩池后将导致浓缩池上清液水质情况变复杂,浓缩池上清液回用至水处理工艺中需要重点关注水质指标的变化,为水厂生产尾水回用提供理论依据。

研究^[12]指出,仅回用滤池反冲洗水时,回用比为 5% ~ 10% 有利于降低水中颗粒的表面电荷,从而加强混凝效果;另有研究^[13-14]指出,直接回用滤池反冲洗水时,回用水的浑浊度、氨、高锰酸盐指数等含量均无明显变化;吴灿东^[15]对南方低浑浊度的沉淀池排泥水直接回用,发现控制适当的排泥水含固率可以有效提高絮凝剂的网捕卷扫作用,从而强化混凝效果;Xu 等^[16]研究得出了类似结果,研究还表

明排泥水中有机物和细菌总数较多,对沉淀池排泥水的回用比宜控制在 3% 以内。以上结果表明,合理控制沉淀池排泥水和滤池反冲洗水的回用比,将对自来水处理过程水质控制起积极作用。浓缩池上清液是将沉淀池排泥水和滤池反冲洗水收集后经过调质、浓缩、脱水和处置后得到的上清液,其水质与沉淀池排泥水和滤池反冲洗水的不同主要体现在浑浊度较低、金属离子含量较高、有机物含量与原水相当、菌落总数较高等方面^[17]。然而,浓缩池上清液直接回用及其回用对原水和自来水处理工艺的影响研究尚处于起步阶段。

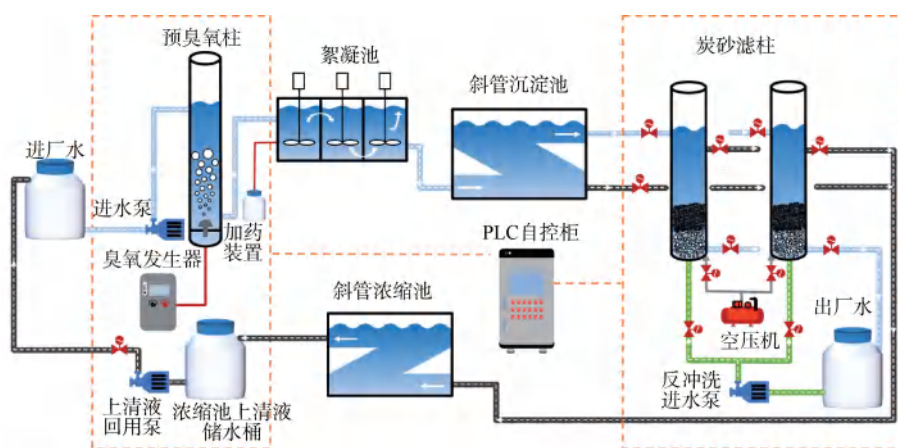
因此,本研究通过建立浓缩池上清液回用中试装置,考察了浓缩池上清液的浑浊度、氨、高锰酸盐指数、菌落总数、铝盐、典型消毒副产物(三氯甲烷、二氯乙酸和二氯乙腈)生成势等水质特征,基于浓缩池上清液连续直接回用(回用比为 3 : 1)试验,系统研究了浓缩池上清液回用对原水、滤池出水、排泥水和反冲洗水水质的影响。研究结果将对自来水生产尾水安全回用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 中试装置设计

中试试验装置位于某以长江水为水源的水厂。中试流程图如图 1 所示,主要工艺流程为预臭氧、混凝、沉淀、炭砂滤池过滤、斜管浓缩及上清液回流。中试装置柱体或池体均采用有机玻璃材质,连接管路均采用硬质聚氯乙烯(UPVC)材质。中试装置的产水量为 24 m³/d,预臭氧投加量为 1.0 mg/L,混凝剂采用聚合氯化铝(PAC),投加量为 30 mg/L。

试验设置斜管沉淀池排泥周期为 12 h,排泥时长为 2 min。炭砂滤柱设置 2 根,1 用 1 备,炭床高



注:PLC 为可编程逻辑控制器。

图 1 浓缩池上清液回用中试试验装置

Fig. 1 Pilot-Test Set-Up of Supernatant Recycling in Sludge Thickener

度为 1.5 m,上层为活性炭滤料,下层为石英砂滤料,滤柱内径为 40 cm。炭砂滤柱每 24 h 反冲洗 1 次,反冲洗方式为气冲+水冲方式,气冲强度为 $15.95 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,冲洗时长为 3 min,进气量为 $2 \text{ L}/\text{s}$,水冲强度为 $13.70 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,冲洗时长为 10 min,进水量为 $1.72 \text{ L}/\text{s}$ 。斜管浓缩池中收集斜管沉淀池的排泥水和炭砂滤柱的反冲洗水,中试装置实际运行过程中浓缩池起到了同步调节水质水量与浓缩的作用。经测算,中试装置斜管沉淀池排泥水量约为 $0.8 \text{ m}^3/\text{d}$,炭砂滤池反冲洗水量约为 $1.0 \text{ m}^3/\text{d}$,经浓缩池重力浓缩后的上清液水量约为 $1.6 \text{ m}^3/\text{d}$ 。浓缩池上清液储水桶在接收中试装置产生的浓缩池上清液的同时,通过外接管路连接至水厂浓缩池以补给中试研究不足的回用上清液水量。上清液通过水泵回流至进水端,与原水在桶内进行完全混合后进入后续水处理单元。中试装置设置 PLC 自控柜,可实现全流程自动运行。

1.2 水样的采集和保存

水厂工艺流程如图 2 所示,浓缩池的来水主要包括新厂沉淀池排泥水、新厂砂滤池反冲洗水、新厂活性炭滤池反冲洗水、老厂沉淀池排泥水和老厂炭砂滤池反冲洗水。新厂和老厂的处理水量分别为 $90 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 和 $30 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,浓缩池上清液的产生水量为 $8 \text{ 万} \sim 9 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。为研究水厂浓缩池上清液及其来源水的水质情况,采集了原水及水厂中浓缩池上清液、新厂沉淀池排泥水、新厂砂滤池反冲洗水、新厂活性炭滤池反冲洗水、老厂沉淀池排泥水和老厂炭砂滤池反冲洗水共 7 组水样。

中试装置各工艺单元均设置采样点,共采集包括原水、滤后水、滤池反冲洗水、沉淀池排泥水、浓缩池上清液、上清液与原水混合水 6 组水样。中试装置首先在浓缩池上清液未回用条件下连续运行 15 d,然后在浓缩池上清液与原水回用比为 3 : 1 下连续运行 15 d,每日采样存放于棕色试剂瓶中,低温保存并及时进行水质测定,所有水样均在 3 d 内完成检测。

1.3 水样检测指标与分析方法

水样检测项目包括浑浊度、高锰酸盐指数、氨、菌落总数、铝盐和典型消毒副产物(三氯甲烷、二氯乙酸、二氯乙腈)生成势。浑浊度采用 HACH TL23 型浊度仪测定;高锰酸盐指数采用高锰酸钾滴定法测定^[18];氨含量采用纳氏试剂分光光度法测定;菌落总数采用滤膜法测定^[19];铝盐含量采用 Agilent 5110 DVD 型电感耦合等离子发射光谱仪测定^[20];消毒副产物生成势试验在 50 mL 无顶空螺旋盖琥珀玻璃瓶中进行,40 mL 水样加入 $200 \mu\text{mol}/\text{L}$ 次氯酸钠溶液后置于 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 黑暗条件下反应 24 h,测量余氯后采用抗坏血酸终止氯反应。三氯甲烷采用高效气相色谱仪(Agilent 7890B)顶空进样测定,色谱柱采用 HP-5($30 \text{ mm}\times 0.25 \text{ mm}\times 0.1 \mu\text{m}$)毛细管柱,进样孔温度为 200°C ,分流比为 5 : 1,柱箱温度为 40°C ,保持 11 min,柱内流量为 $2 \text{ mL}/\text{min}$ ^[21]。二氯乙酸测定前,先用甲基叔丁基醚液液萃取,再采用甲醇衍生化,采用高效气相色谱/质谱联用仪(Thermo DSQ2)测定^[22]。二氯乙腈测定前,先用甲基叔丁基醚液液萃取,然后采用气相色谱/电子捕获检测法

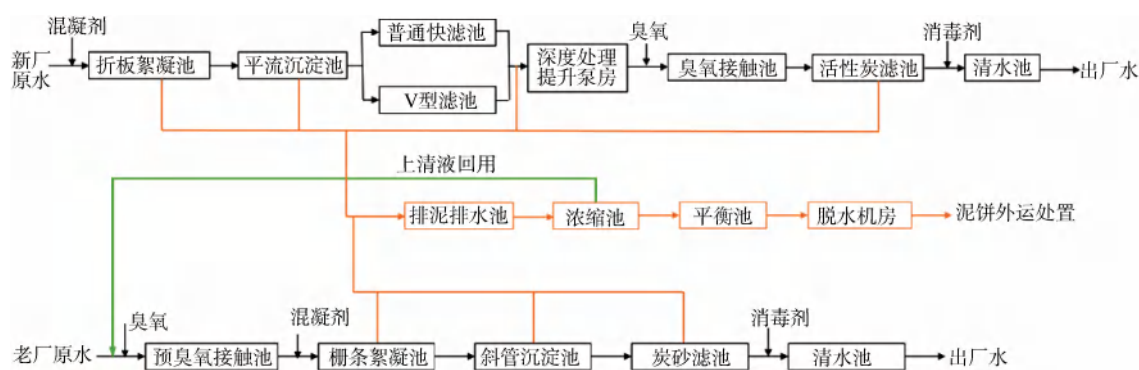


图2 水厂水处理工艺流程

Fig. 2 Process Flow of WTP

(GC/ECD, 7890B, Agilent) 测定^[23-24], 检测参数如下: 色谱柱型号为 RTX-5 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); GC 柱温升温程序为 30 ℃ 保持 10 min, 后以 14 ℃/min 的升温速率从 30 ℃ 升高至 72 ℃ 并保持 1 min, 再以 40 ℃/min 的升温速率从 72 ℃ 升高至 200 ℃ 并保持 2 min; 进样器和检测器温度分别设定为 200 ℃ 和 300 ℃, 载气(N₂) 流速为 3 mL/min, 进样体积为 2 μL。

2 结果与讨论

2.1 水厂浓缩池上清液及其来水水质特性

2.1.1 原水及浓缩池上清液水质特性

对水厂浓缩池上清液进行了连续 2 个季度的水质跟踪检测, 分别在 2023 年夏季 7 月—8 月共 4 次取样, 秋季 10 月—11 月共 5 次取样, 浓缩池上清液与原水的浑浊度、氨、高锰酸盐指数、菌落总数、铝盐及部分消毒副产物生成势的对比结果如图 3 所示。浓缩池上清液浑浊度变化较平稳, 整体上均小于 6 NTU, 秋季相对于夏季略低。与原水相比, 浓缩池上清液浑浊度较低, 可能由于浓缩池上清液在投加少量混凝剂后, 经絮凝沉淀调质, 其沉降性能优异。浓缩池上清液氨质量浓度为 0.04~0.12 mg/L, 部分时期上清液氨含量高于原水, 分析原因可能是浓缩池中污泥累积, 浓缩池中刮泥机械等设备将存在污泥沉积死角, 污泥堆积时间过长会导致污泥中有机物厌氧释放氨。浓缩池上清液的高锰酸盐指数呈现夏季高、秋季低的趋势, 与原水的高锰酸盐指数相当, 均小于 4 mg/L, 符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 规定的 II 类水质进水标准。浓缩池上清液菌落总数为 500~1 000 CFU/mL, 整体呈现夏季高、秋季低的趋势, 浓缩池上清液的菌落总数明显

高于原水的菌落总数, 这说明浓缩池上清液回用时需要关注菌落总数对水质的影响。水处理过程中加入铝盐混凝剂, 将导致沉淀池排泥水中铝盐沉降而进入生产尾水中。因此, 浓缩池上清液中铝盐含量高出原水中铝盐含量约为 10 倍, 检测周期内, 浓缩池上清液中铝盐质量浓度为 0.04~0.12 mg/L, 虽然低于我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 规定的饮用水中铝盐质量浓度不得超过 0.2 mg/L 的限制标准, 但从长远来看, 上清液回用过程中铝盐是否会富集导致超标需要重点关注。消毒副产物生成势代表水中有机前体物的含量, 比较浓缩池上清液及原水中 3 种典型消毒副产物(三氯甲烷、二氯乙酸和二氯乙腈)的生成势。浓缩池上清液的三氯甲烷、二氯乙酸和二氯乙腈生成势均比原水低, 可能是滤池反冲洗导致部分活性炭进入浓缩池中, 活性炭在浓缩池中对消毒副产物前体物起到吸附和助沉的作用。

2.1.2 浓缩池上清液来水水质特性

水厂浓缩池上清液来水的夏季和秋季的平均水质情况如表 1 所示。浑浊度上表现出滤池反冲洗水普遍高于沉淀池排泥水的现象, 可能由于滤料反冲洗废水中除了含有大量有机或无机杂质外, 还存在泄漏的活性炭或石英砂滤料。沉淀池排泥水和滤池反冲洗水的氨质量浓度为 0.4~0.5 mg/L, 高锰酸盐指数质量浓度为 2.0~3.7 mg/L。滤池反冲洗水的菌落总数高于沉淀池排泥水, 说明滤池反冲洗可能出现微生物泄漏的风险。沉淀池排泥水中铝盐含量明显高于滤池反冲洗水, 这是因为絮凝过程中投加的铝盐混凝剂在沉淀池中随絮体沉降进入排泥水中。滤池反冲洗水中典型消毒副产物的生

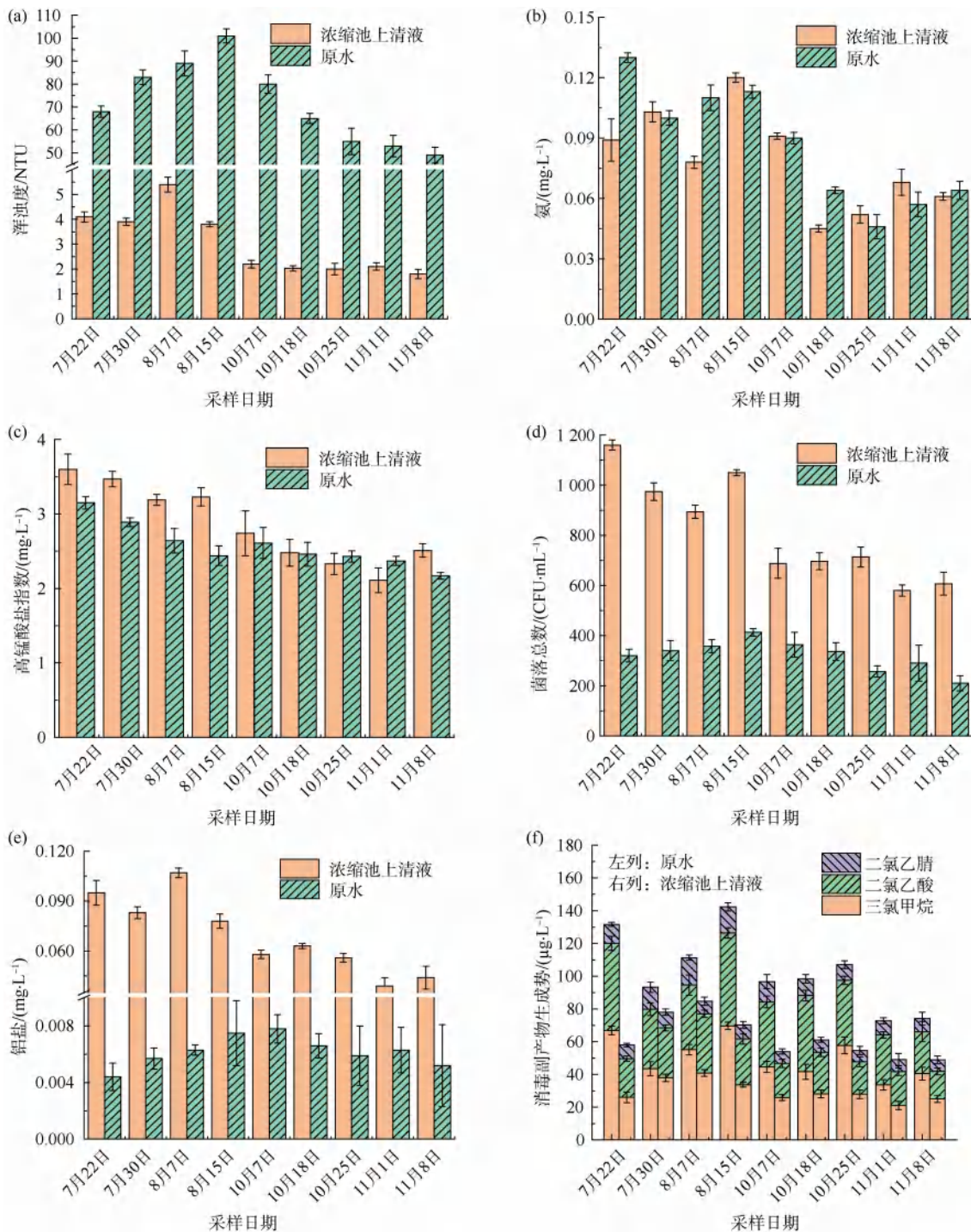


图3 浓缩池上清液水质特性

Fig. 3 Water Quality Characteristics of Supernatant of Sludge Thickener

成势明显高于沉淀池排泥水,一方面,由于过滤相比于沉淀截留了更多有机前体物,另一方面,也可能是滤池反冲洗带出了微生物和微生物代谢产物,微生物及其代谢产物是典型消毒副产物的一类重要前体物^[1]。由此可见,沉淀池排泥水是浓

缩池上清液中铝盐的主要来源,而滤池反冲洗水则是浓缩池上清液中浑浊度、菌落总数和典型消毒副产物前体物的主要来源。

2.2 水厂浓缩池上清液回用对原水水质的影响

将水厂浓缩池上清液按 3 : 1 回用比直接回用

表 1 浓缩池上清液进水水质特性
Tab. 1 Influent Quality Characteristics of Thickener Supernatant

季节	指标	新厂沉淀池 排泥水	新厂砂滤池 反冲洗水	新厂活性炭滤池 反冲洗水	老厂沉淀池 排泥水	老厂炭砂滤池 反冲洗水
夏	浑浊度/NTU	156	224	262	210	312
秋		130	195	238	206	275
夏	氨/(mg·L ⁻¹)	0.456	0.479	0.402	0.482	0.492
秋		0.444	0.426	0.342	0.467	0.486
夏	高锰酸盐指数/(mg·L ⁻¹)	2.867	2.361	2.641	3.054	2.487
秋		2.374	1.986	2.211	2.552	2.364
夏	菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	2 910	4 260	6 645	3 800	7 210
秋		2 540	3 380	4 972	3 748	6 874
夏	铝盐/(mg·L ⁻¹)	0.144	0.038	0.031	0.154	0.042
秋		0.131	0.034	0.037	0.138	0.034
夏	三氯甲烷/(μg·L ⁻¹)	45.8	52.6	59.4	60.5	68.4
秋		39.1	43.5	40.7	53.3	66.6
夏	二氯乙酸/(μg·L ⁻¹)	29.4	45.1	46.4	56.4	45.3
秋		25.5	37.9	44.2	39.8	37.2
夏	二氯乙腈/(μg·L ⁻¹)	7.4	8.3	10.6	6.7	13.7
秋		6.8	7.1	9.5	4.2	11.1

15 d,考察了其対原水水质的影响,结果如图 4 所示。回用前原水浑浊度为 46~93 NTU,回用后原水浑浊度出现下降,可能由于浑浊度较低的浓缩池上清液回用对原水起到了稀释作用。由于浓缩池上清液与原水中氨含量相差较小,浓缩池上清液回用对原水氨含量影响不大。回用后原水的高锰酸盐指数平均质量浓度由 1.9 mg/L 升高至 2.3 mg/L,这与浓缩池上清液的高锰酸盐指数高于原水有关。浓缩池上清液回用后,原水的菌落总数平均值由 306 CFU/mL 升高至 445 CFU/mL,铝盐平均质量浓度由 0.009 mg/L 升高至 0.046 mg/L。因此,需要重点关注浓缩池上清液回用对滤池出水中菌落总数及铝盐的影响。浓缩池上清液回用后原水的典型消毒副产物(三氯甲烷、二氯乙酸和二氯乙腈)总生成势平均质量浓度为 73.8 μg/L,略低于回用前的点生成势(91.3 μg/L),说明浓缩池上清液回用对原水的消毒副产物生成势具有一定的改善作用。

2.3 水厂浓缩池上清液直接回用对滤池出水水质的影响

水厂浓缩池上清液直接回用对滤池出水水质的影响如图 5 所示。浓缩池上清液回用前滤池出水的

平均浑浊度为 0.198 NTU,回用后滤池出水平均浑浊度为 0.199 NTU,说明浓缩池上清液直接回用对滤池出水浑浊度几乎没有影响。回用前滤池出水氨含量波动较明显,但回用后滤池出水相对稳定,且氨含量均远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的 0.5 mg/L 限值,说明浓缩池上清液直接回用对滤池出水氨没有影响。浓缩池上清液回用后滤池出水高锰酸盐指数由 0.86 mg/L 轻微上升至 0.94 mg/L,但仍远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的限值(3.0 mg/L)。尽管浓缩池上清液中菌落总数显著高于原水,但回用前后滤池出水中菌落总数均维持在较低的检出水平(接近于 0),表明浓缩池上清液直接回用不会对滤池出水菌落总数造成影响。浓缩池上清液回用前滤池出水的铝盐平均质量浓度为 0.041 mg/L,回用后滤池出水铝盐质量浓度上升至 0.047 mg/L,滤池出水中铝盐含量在浓缩池上清液回用的 1~5 d 内呈现波动趋势,但从第 6 d 开始变得平稳,且滤池出水铝盐质量浓度远小于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的限值(0.2 mg/L),说明浓缩池上清液直接回用不会导致滤池出水铝盐含量超标。

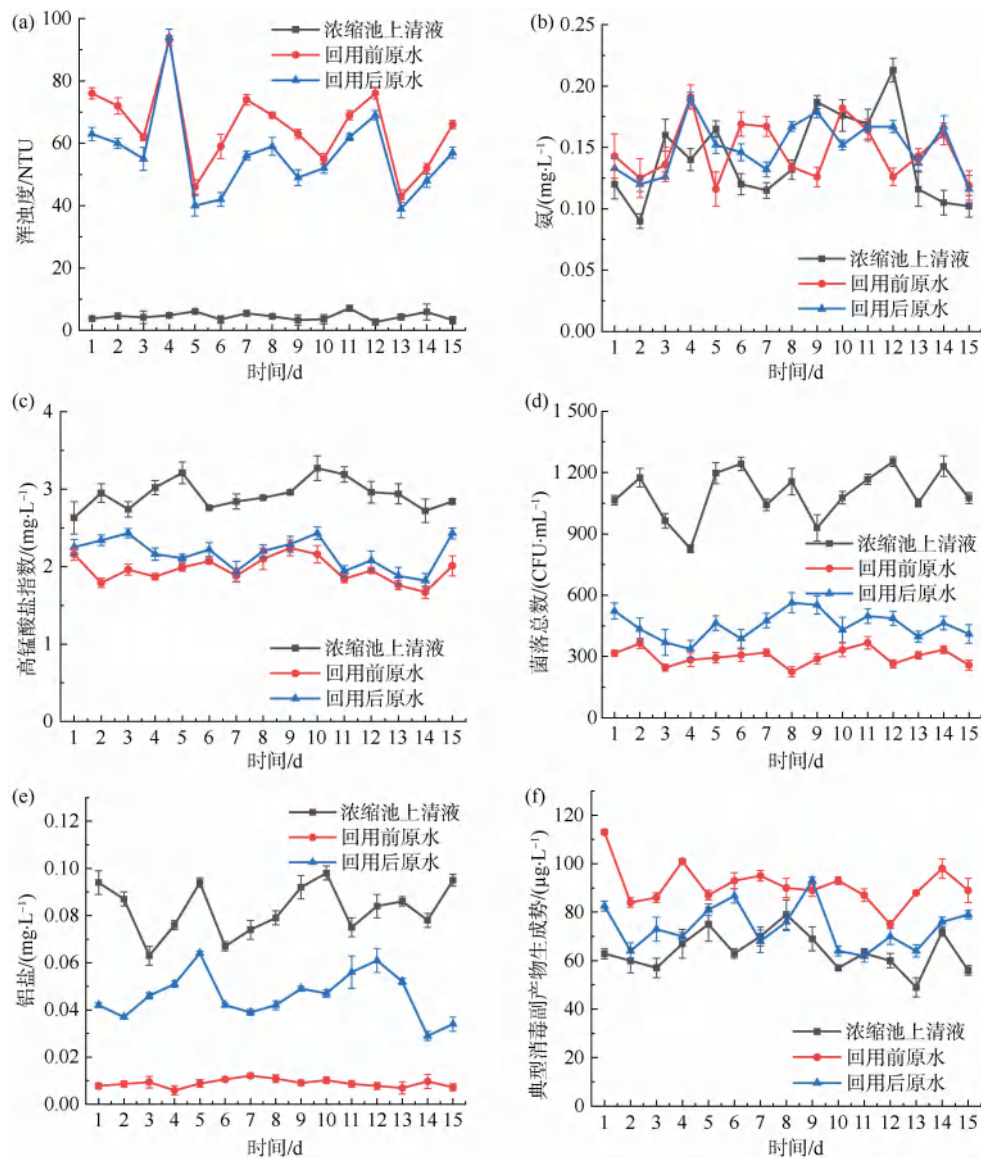


图4 浓缩池上清液回用对原水水质的影响

Fig. 4 Effect of Supernatant Reclamation from Thickener on Water Quality of Raw Water

与浓缩池上清液直接回用可降低原水的典型消毒副产物生成势结论类似,浓缩池上清液直接回用后,滤池出水中典型消毒副产物生成势从 $39.1 \mu\text{g/L}$ 降至 $31.3 \mu\text{g/L}$,说明上清液回用可改善滤池出水的典型消毒副产物生成势。

2.4 浓缩池上清液直接回用对尾水处理系统水质的影响

2.4.1 排泥水

图6反映了浓缩池上清液回用对沉淀池排泥水水质的影响。浓缩池上清液连续回流15 d期间,沉淀池排泥水浑浊度为120~160 NTU,与回用前的浑浊度基本相当,表明浓缩池上清液回用对沉淀池排

泥水的浑浊度影响不大。回用前沉淀池排泥水中氨质量浓度为 0.4 mg/L 左右,回用后前期氨含量波动较大,回用第3 d出现氨质量浓度高于 0.5 mg/L 的现象,但连续回用后期氨含量逐渐稳定在与回用前相当的水平。浓缩池上清液的高锰酸盐指数高于原水,其回用后导致沉淀池排泥水的高锰酸盐指数由 2.0 mg/L 轻微升高为 2.6 mg/L ,并处于稳定状态,说明浓缩池上清液连续回用不会造成高锰酸盐在沉淀池排泥水中的富集。浓缩池上清液回用前,沉淀池排泥水中菌落总数为 $2\,400 \sim 4\,500 \text{ CFU/mL}$,回用后,沉淀池排泥水中菌落总数为 $3\,100 \sim 5\,500 \text{ CFU/mL}$,整体上呈现稳定状态,表明浓缩池上清液连续回用不

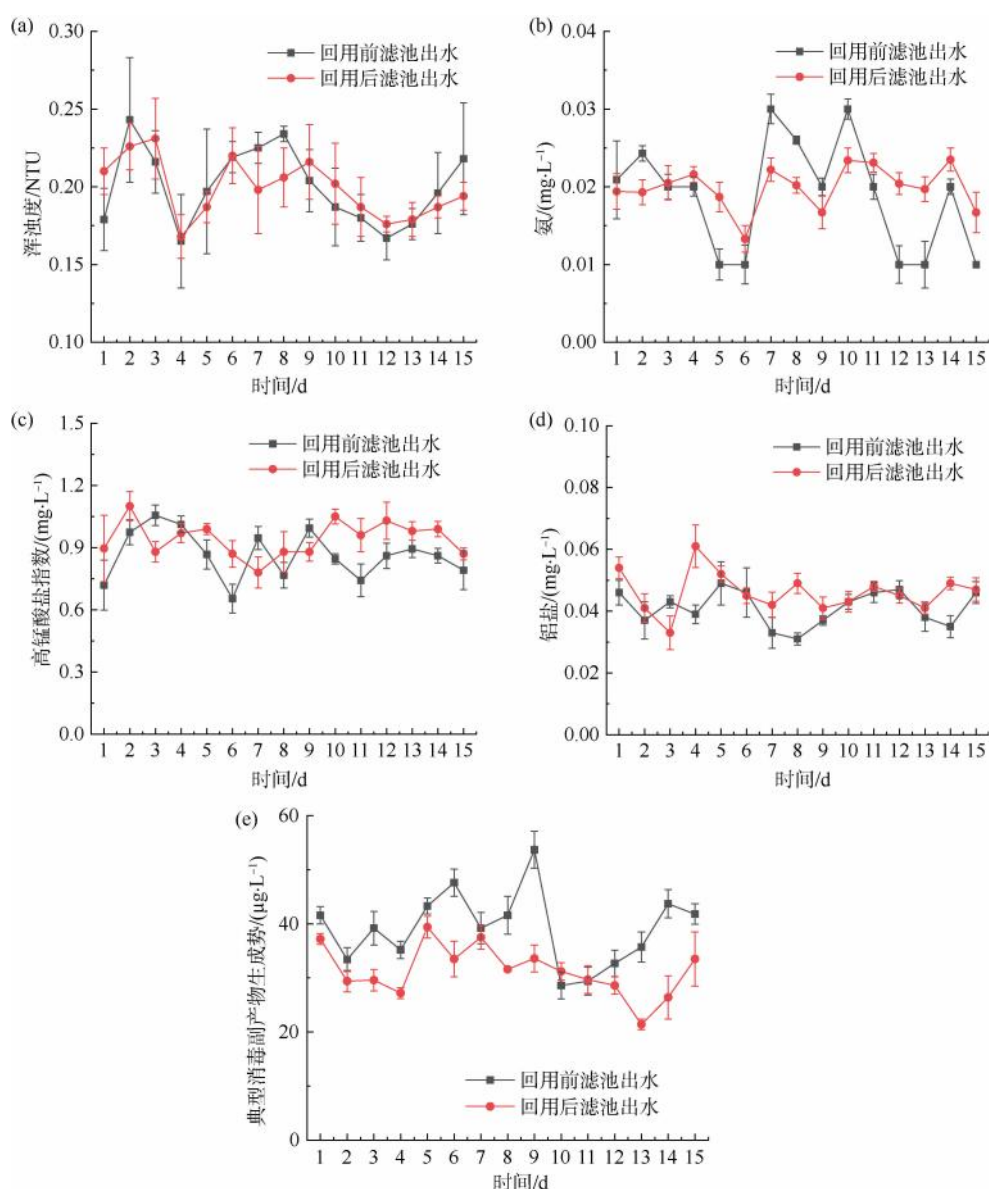


图5 浓缩池上清液回用对滤池出水水质的影响

Fig. 5 Effect of Supernatant Reuse from Thickener on Water Quality of Filtered Water

会造成菌落总数在沉淀池排泥水中富集。由于沉淀过程中投加铝盐混凝剂,浓缩池上清液回用前沉淀池排泥水中铝盐质量浓度为 0.13~0.16 mg/L。回用后沉淀池排泥水中铝盐含量与回用前相比变化不明显,可能由于浓缩池上清液中铝盐进入原水后起到了助凝作用,多余铝离子最终以氢氧化铝沉淀形式存在。浓缩池上清液回用前,沉淀池排泥水中典型消毒副产物生成势为 113.7 μg/L,连续回用 15 d 期间,沉淀池排泥水中典型消毒副产物生成势为 117.4 μg/L,且呈现稳定波动状态,说明浓缩池上清液回用不会造成消毒副产物前体物在沉淀池排泥水

中富集。

2.4.2 滤池反冲洗水

图 7 反映了浓缩池上清液回用对滤池反冲洗水水质的影响。可见,滤池反冲洗水的浊度在浓缩池回用后波动较大,在回用的前 9 d,滤池反冲洗水浊度达到峰值(424 NTU),但在回用第 12 d 及以后,浊度与回用前相当。浓缩池上清液连续回用后,滤池反冲洗水氨质量浓度波动也变大,但整体上仍稳定小于 0.5 mg/L。浓缩池上清液连续回用后,滤池反冲洗水的高锰酸盐指数由 1.38 mg/L 轻微上升为 1.53 mg/L,表明浓缩池上清液

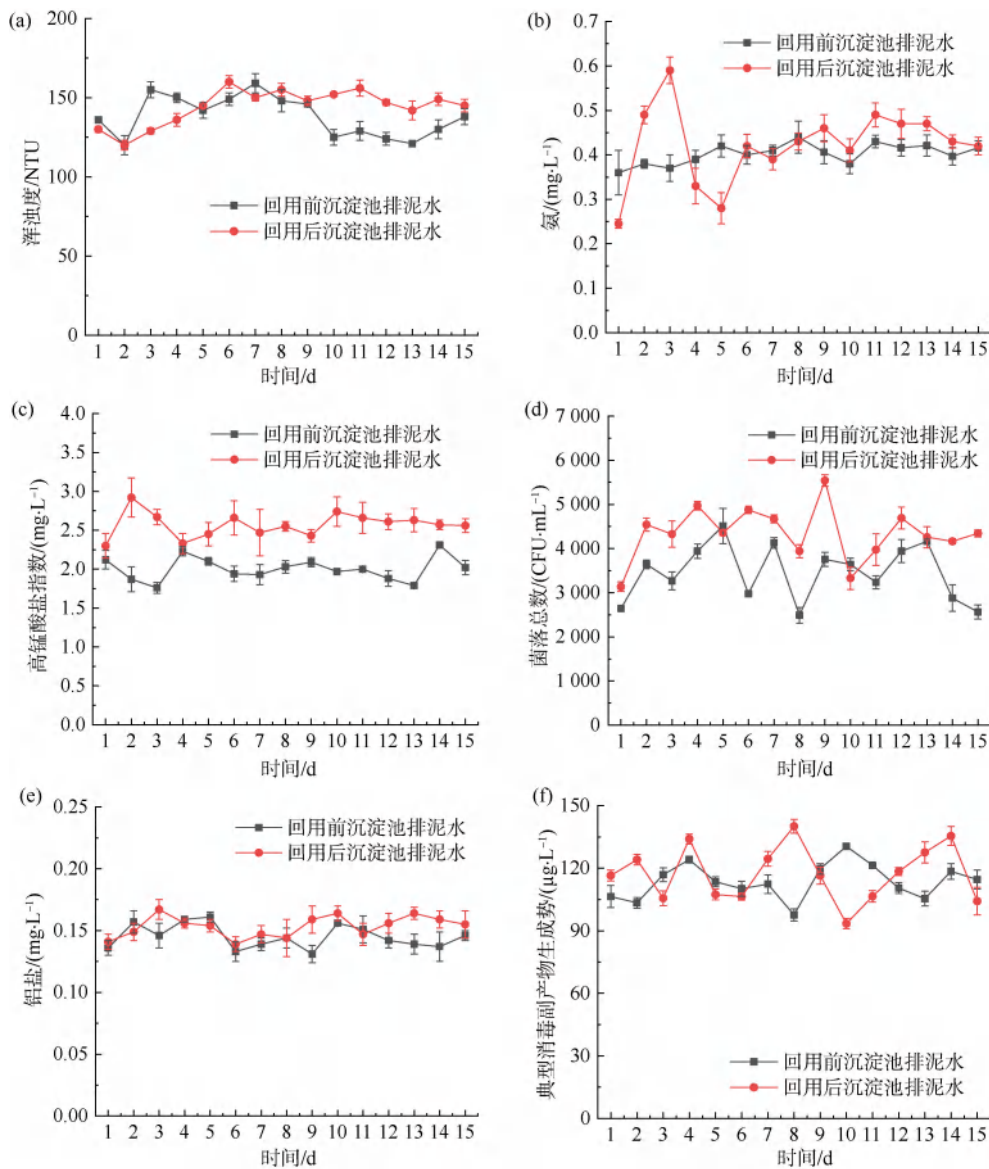


图6 浓缩池上清液回用对沉淀池排泥水水质的影响

Fig. 6 Effect of Supernatant Reuse from Thickener on Water Quality of Sludge Water from Sedimentation Tanks

回用对滤池反冲洗的高锰酸盐指数影响不大。滤池反冲洗水中菌落总数处于较高水平,最高可达 9 000 CFU/mL,但浓缩池上清液回用对其影响不大,表明浓缩池上清液回用不会造成菌落总数在滤池反冲洗水中富集。铝盐含量在滤池反冲洗水中波动较大,浓缩池上清液回用前后铝盐质量浓度均稳定在 0.2 mg/L 以下,表明浓缩池上清液回用不会造成铝盐在滤池反冲洗水富集。滤池反冲洗水中典型消毒副产物生成势 (139.5 μg/L) 明显高于沉淀池排泥水 (113.7 μg/L),说明滤池对消毒副产物前体物的截留效果较沉淀池的沉淀去除效

果好,但浓缩池上清液连续回用下,滤池反冲洗水中典型消毒副产物生成势含量变化较小,说明滤池对消毒副产物前体物控制效果稳定,浓缩池上清液回用不会导致消毒副产物前体物在滤池反冲洗水中富集。

3 结论

(1) 浓缩池上清液浊度变化平稳,整体上均小于 6 NTU,显著低于原水浊度,氨质量浓度在 0.04~0.12 mg/L,部分时期上清液氨含量高于原水,高锰酸盐指数呈现夏季高、秋季低的趋势,与原水的高锰酸盐指数相当,均小于 4 mg/L,菌落总数

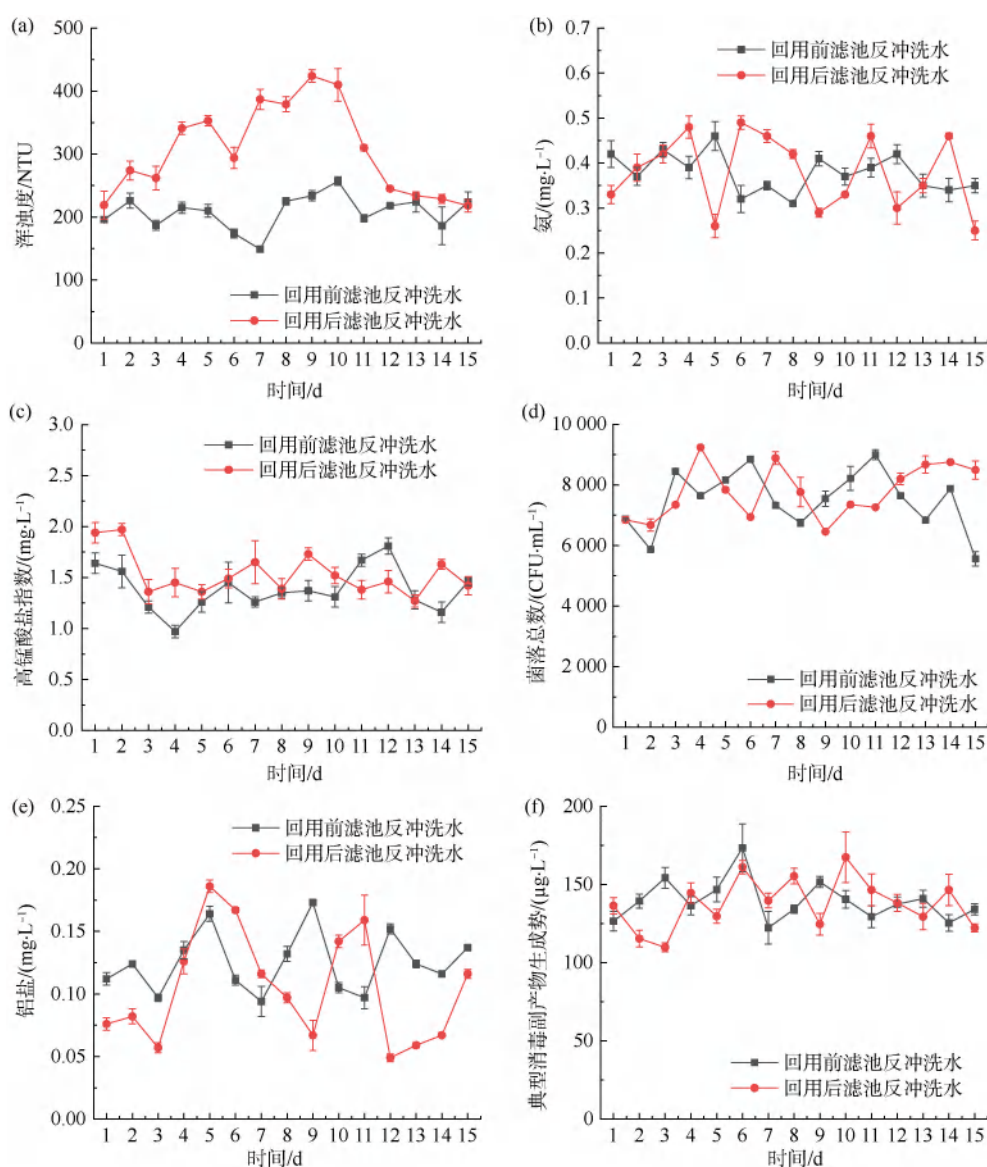


图 7 浓缩池上清液回用对滤池反冲洗水水质的影响

Fig. 7 Effect of Supernatant Reuse from Thickener on Water Quality of Filter Backwashing Water

明显高于原水,整体呈现夏季高、秋季低的趋势,铝盐含量高出原水中铝盐含量约 10 倍,整体为 0.04~0.12 mg/L,三氯甲烷、二氯乙酸和二氯乙腈生成势均低于原水。

(2)浓缩池上清液在回用比为 3:1 条件下直接连续回用后,原水浑浊度下降,氨含量变化不明显,高锰酸盐指数略微升高,菌落总数和铝盐含量明显升高,消毒副产物生成势略微下降。浓缩池上清液直接回用对滤池出水浑浊度、氨、高锰酸盐指数、菌落总数、铝盐、典型消毒副产物生成势等水质指标无明显影响。

(3)浓缩池上清液在回用比为 3:1 条件下,直接回用不会导致浑浊度、高锰酸盐指数、氨、菌落总数、典型消毒副产物生成势等指标在沉淀池排泥水和滤池反冲洗水中升高,也不会造成铝盐在沉淀池排泥水和滤池反冲洗水中富集。

参考文献

- [1] HU Y, QIAN Y K, CHEN Y N, et al. Characteristics of trihalomethane and haloacetic acid precursors in filter backwash and sedimentation sludge waters during drinking water treatment [J]. Science of the Total Environment, 2021, 775: 145952. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145952.

- [2] LI L C, XU G R, XING J. Diatomite enhanced dynamic membrane technology for simultaneous backwash sludge pre-dewatering and backwash wastewater recycling [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 1420–1426. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.283.
- [3] 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): 1–5,12.
SUN T X, TANG H H, ZHOU Y, et al. Study on the wastewater of advanced treatment in drinking water plant[J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(10): 1–5,12.
- [4] 李笑梅. 给水厂排泥水安全回用试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
LI X M. The experimental study for recycling sludge water safely in water plant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [5] HOU B W, LIN T, CHEN W. Evaluation of a drinking water treatment process involving directly recycling filter backwash water using physico-chemical analysis and toxicity assay [J]. *RSC Advance*, 2016, 6: 76922 – 76932. DOI: 10.1039/C6RA14912J.
- [6] YANG L, WEI J, LIU Z Y, et al. Material prepared from drinking waterworks sludge as adsorbent for ammonium removal from wastewater [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 330: 228–236. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.01.017.
- [7] 陈强,孙天晓,唐玉霖. 臭氧-生物活性炭池反冲洗水中的微生物群落研究[J]. *净水技术*, 2022, 41(12): 93–99.
CHEN Q, SUN T X, TANG Y L. Study on microbial community in backwash water of ozone-biological activated carbon filter [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(12): 93–99.
- [8] 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 D, DONG H Y, LI H H, 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.
- [9] 姚夏. 净水厂排泥水处理技术及回用安全研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
YAO X. Study on sludge water treatment technology and reuse safety in water treatment plant [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [10] 翁晓姚,陆劲蓉,叶辉. 上海市YP水厂滤池反冲洗水回用生产性试验[J]. *净水技术*, 2022, 41(s1): 90–96.
WENG X Y, LU J R, YE H. Full-scale research on recycling filter backwash water in YP WTP in Shanghai City [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(s1): 90–96.
- [11] 李世琪. 自来水厂反冲洗泥水处理与回用的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- LI S Q. Experimental study on treatment and reuse of backwash mud water in waterworks [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [12] ZHANG J N, LIN T, CHEN W. Micro-flocculation/sedimentation and ozonation for controlling ultrafiltration membrane fouling in recycling of activated carbon filter backwash water [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 325: 160–168. DOI: 10.1016/j.cej.2017.05.077.
- [13] 施诺,李伟英,张俊鹏,等. 自来水厂反冲洗废水生物稳定性及回用研究[J]. *给水排水*, 2017, 43(8): 33–37.
SHI N, LI W Y, ZHANG J P, et al. Bio-stability and reuse of filter backwashing wastewater in water treatment plants [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(8): 33–37.
- [14] 陈停. 净水厂生产废水回用强化低浊水混凝及水质安全性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
CHEN T. Research on drinking water plant (DWP) streams recycle for strengthen of low turbidity water coagulation efficiency and water quality safety [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [15] 吴灿东. 给水厂生产废水回用对水质安全性的影响[J]. *给水排水*, 2008, 34(8): 13–16.
WU C D. Influences of reusing wastewater produced in water supply processing on water safety in water supply plants [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(8): 13–16.
- [16] XU R, XU Y, CUI F, et al. Impact of untreated sedimentation tank sludge water recycle on water quality during treatment of low turbidity water [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 22(4): 79–86.
- [17] 吴玮,季倩,许晓毅,等. 苏州某自来水厂排泥水处理系统运行优化试验研究[J]. *给水排水*, 2022, 48(1): 56–62.
WU W, JI Q, XU X Y, et al. Experimental study on operation optimization of sludge water treatment system in a waterworks in Suzhou [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(1): 56–62.
- [18] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Editorial Board of *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method* State Environmental Protection Administration. *Water and wastewater monitoring analysis method* [M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [19] 王慧莹,吴坚如. 节能环保视域下生活用水微生物污染检测[J]. *能源与环保*, 2023, 45(2): 190–194.
WANG H Y, WU J R. Detection of microbial contamination of domestic water from perspective of energy saving and environmental protection [J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(2): 190–194.

(下转第176页)

- 排水设计思考 [J]. 净水技术, 2024, 43(4): 140–144, 189.
- FU W, YU X R, LONG Z H, et al. Consideration on design of underground utility tunnel for emergency drainage in a southern city[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 140–144, 189.
- [2] 徐爽, 高聪聪, 王晓丽, 等. 雄安新区雄东片区综合管廊工程总体设计 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(10): 81–85.
- XU S, GAO C C, WANG X L, et al. Overall design of utility tunnel project in Xiongdong District of Xiong'an New Area[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(10): 81–85.
- [3] 王灿. 污水管道纳入综合管廊设计要点分析 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(15): 208–210.
- WANG C. Analysis on design point of sewage pipeline incorporating into comprehensive pipe gallery [J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9(15): 208–210.
- [4] 朱洁. 因子叠加法在控规层级综合管廊规划中的应用 [J]. 给水排水, 2023, 49(s2): 803–808.
- ZHU J. The application of factor superposition method in the utility tunnel planning of regulatory plan level [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(s2): 803–808.
- [5] BERGMAN F, ANDERBERG S, KROOK J, et al. A critical review of the sustainability of multi-utility tunnels for colocation of subsurface infrastructure [J]. Front Sustainable Cities, 2022, 4: 847819. DOI: 10.3389/frsc.2022.847819.
- [6] 葛晓光, 陈颖青, 谢璞, 等. 重力流污水管道纳入综合管廊设计要点分析 [J]. 隧道建设, 2024, 44(s1): 327–333.
- GE X G, CHEN Y Q, XIE P, et al. Key design points for gravity-flow sewage pipelines in utility tunnel [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(s1): 327–333.
- [7] 岳崇峰, 李驰昊, 许江城, 等. 综合管廊污水入廊分析及工程探究 [J]. 城市道桥与防洪, 2024(4): 299–303, 306.
- YUE C F, LI C H, XU J C, et al. Analysis and engineering investigation of sewage pipeline integration in utility tunnels [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2024(4): 299–303, 306.
- [8] 卢钢, 马升平, 房宝智. 综合管廊建设前期优化控制措施分析 [J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 988–991.
- LU G, MA S P, FANG B Z. Analysis of optimization control measures in the early stage of construction of comprehensive pipe gallery [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 988–991.
- [9] 张宇. 关于城市综合管廊建设中污水管道入廊问题的探讨 [J]. 建设监理, 2021(3): 64–66.
- ZHANG Y. On the problem of sewage pipe access in the construction of urban comprehensive pipe gallery [J]. Project Management, 2021(3): 64–66.
- [10] 刘文, 赵璐, 翟世鸿, 等. 分块预制综合管廊接缝性能研究 [J]. 混凝土, 2023(11): 210–214, 221.
- LIU W, ZHAO L, ZHAI S H, et al. Research on the joint performance of block prefabricated comprehensive pipe gallery [J]. Concrete, 2023(11): 210–214, 221.

(上接第 66 页)

- [20] PEUKERT A, SEUBERT A. Characterization of an aluminium (III)-citrate species by means of ion chromatography with inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry detection [J]. Journal of Chromatography A, 2009, 1216(45): 7946–7949.
- [21] 刘志明. 自动顶空-毛细管柱气相色谱法测定饮用水中三氯甲烷和四氯化碳 [J]. 中国卫生检验杂志, 2017, 27(15): 2146–2148.
- LIU Z M. Determination of chloroform and carbon tetrachloride in drinking water by auto headspace-capillary gas chromatography [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2017, 27(15): 2146–2148.
- [22] YAO D C, CHU W H, BOND T, et al. Impact of ClO₂ pre-oxidation on the formation of CX₃R-type DBPs from tyrosine-based amino acid precursors during chlorination and chloramination [J]. Chemosphere, 2018, 196: 25–34. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.12.143.
- [23] CHEN H, LIN T, ZHANG S S, et al. Covalent organic frameworks as an efficient adsorbent for controlling the formation of disinfection by-products (DBPs) in chlorinated drinking water [J]. Science of the Total Environment, 2020, 746: 141138. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141138.
- [24] DING S K, WANG F F, CHU W H, et al. Using UV/H₂O₂ pre-oxidation combined with an optimised disinfection scenario to control CX₃R-type disinfection by-product formation [J]. Water Research, 2019, 167: 115096. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115096.