

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.08.009

连续回流生产废水对净水厂出水水质影响的中试研究

徐勇鹏^{1,2}, 朱世俊², 崔福义^{1,2}

(1. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 为考察连续回流净水厂生产废水对出水水质的影响, 采用中试实验模型, 研究东北地区夏冬两季连续回流净水厂生产废水 14 d 的水质变化规律. 夏季沉淀池污泥和反冲洗水最佳回流比分别为 4% 和 6%, 冬季为 2% 和 6%. 在满足沉后水出水浊度达标(<2.5 NTU)的前提下, 夏、冬两季废水连续直接回流工艺与不回用相比, 可分别节约 33.3% 和 18.2% 的混凝剂投加量. 在整个回流运行周期中, 连续监测浊度、色度、UV₂₅₄、TOC 等出水水质指标, 结果表明, 与不回流相比, 回流工艺可以有效提高污染物的去除, 而且, 较高温度时还可以提高污染物的去除率. 在连续回流过程中, 出水水质稳定, 未发现明显的污染物富集现象. 废水回流是强化混凝过程的有效方法.

关键词: 连续回流; 中试; 沉淀池污泥; 反冲洗水; 温度; 富集

中图分类号: TU991.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)08-0055-06

Effect of continuous pilot-scale study of direct recycling waste streams on effluent quality of drinking water treatment plant

XU Yongpeng^{1,2}, ZHU Shijun², CUI Fuyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To investigate the effects of direct continuous recycling of waste streams generated from drinking water treatment plant on effluent water quality, polite-scale experimental models was constructed and the changing rule of water quality was studied for 14 days both in summer and winter in the northeast China. The optimal recycle ratios of sedimentation sludge and filter backwash water were found to be 4% and 6% in summer, respectively, and was 2% and 6% in winter. Under the optimal recycle ratios, the continuous direct recycling waste streams could reduced the coagulant dosage by 33.3% in summer and 18.2% in winter compared to control trials based on reaching the sedimentation effluent standard (<2.5 NTU). Water quality parameters such as turbidity, color, UV₂₅₄, TOC in settled and filtrated water were monitored periodically. Results indicated that contaminants could be removed more effectively in the recycling process compared to the control trials. Moreover, relative higher temperature could improve removal efficiencies. Over the entire operation period, there was no significant contaminants accumulation. Recycling waste steams was a feasible approach for enhancing coagulation process.

Keywords: continuous recycling; pilot scale; sedimentation sludge; filter backwash water; temperature; accumulation

饮用水处理厂每天产生大量的生产废水,其中以沉淀池污泥和反冲洗水为主,约占水厂供水量的 4%~10%. 研究发现这些废水中除了含有天然有机物、病原微生物等有害物质外,还含有大量脱稳的颗粒、聚合胶体以及未反应的混凝剂^[1-2]. 污泥浓缩、脱水会增加水厂运行费用,而且,反冲洗水的直接排放

也不利于水厂节约成本. 废水回用技术引起广泛关注. 许多研究表明,污泥回流工艺广泛用于强化污水一级处理. 合理地回用给水处理中沉淀池产生的污泥可有效去除污水中的磷、硼、砷酸盐以及硫化物等污染物^[3]. 而且,污泥回流也可用于污水处理中化学预氧化阶段,其中 COD 的去除率可达 53%,效果等同于新添加混凝剂的作用. 近年来,越来越多的研究表明,废水回流技术可用于饮用水处理工艺中.

刘继平^[4]采用沉淀池排泥水回流法处理低温低浊水发现,当原水浊度为 5 NTU 时, PACl 的投加量为 15 mg/L,回流污泥的浊度为 15 NTU 时,运行效果最佳. 徐勇鹏等^[5]的研究表明,沉淀池污泥和反

收稿日期: 2015-06-13

基金项目: 国家“十二五”重大水专项(2012ZX07408001); 国家自然科学基金(51108118)

作者简介: 徐勇鹏(1976—),女,副教授,博士生导师;

崔福义(1958—),男,教授,博士生导师

通信作者: 徐勇鹏, xuyongpeng123@163.com

冲洗水相结合的回流工艺可以强化混凝,解决低温低浊水难处理的问题,并且当混合水浊度为10~20 NTU时,节约率可达25%~50%。周志伟^[6]研究不同助凝剂对回流效果的影响,初步分析絮凝后期的絮体结构特性,指出采用污泥回流工艺时,可以根据水厂实际工艺合理选择运行参数,更好地发挥组合药剂投配方式的混凝效能。因此,在污水处理和饮用水处理工艺中,废水回流技术是一种有效、经济的工艺。

之前的研究主要运用烧杯小试实验对出水水质和机理进行分析探讨,需要设计一组中试设施模型来进一步模拟水厂实际运行。由检测数据得知原水中并不含两虫(隐孢子虫卵囊和贾第鞭毛虫孢囊),本研究不考虑两虫生物的危害。中试实验分别在夏、冬两个季节连续运行2个系列,考察回流工艺与传

统工艺相比的节约率;连续回流对沉淀池出水水质参数的影响及污染物(TOC、UV₂₅₄、Fe、Al) 富集现象;提出在不同季节下合理的运行周期。

1 实 验

1.1 实验装置及运行参数

中试基地位于中国东北地区 ZY 饮用水处理厂。实验模型包括两套平行系统,其中一套用于废水回流工艺装置,记为1[#],另一套用于常规水处理工艺装置(不含回流设备),记为2[#]。工艺系统包括6个部分,分别为稳压井、静态混合器、网格絮凝池、斜板沉淀池、砂滤池、清水池,如图1所示。每套系统处理流量为336 m³/d(14 m³/h),混凝剂采用聚合氯化铁铝(PFAC)。

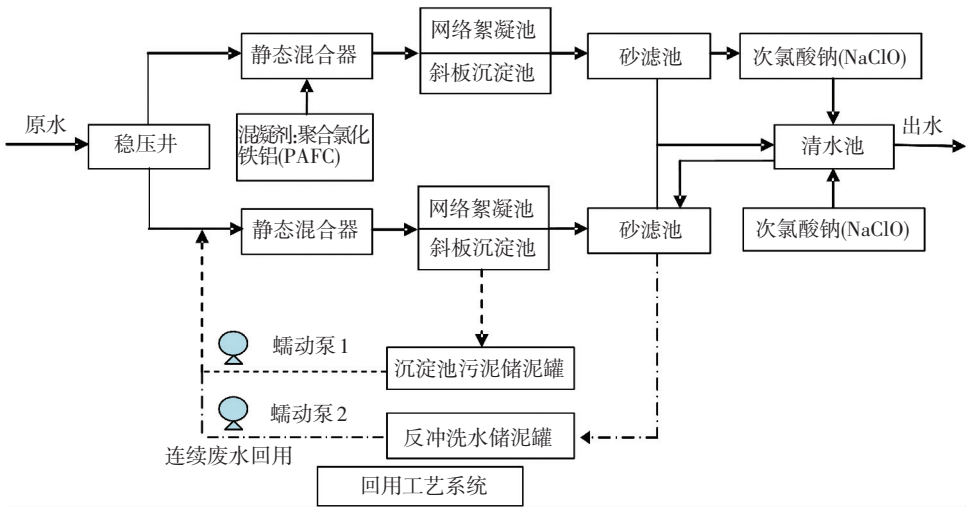


图 1 连续中试实验装置流程

Fig.1 Flow chart of the continuous pilot-scale system

沉淀池污泥由斜板沉淀池产生,通过穿孔排泥管回收于圆柱形不锈钢储泥罐中,内部设有机机械搅拌桨匀速搅拌,使污泥浓度均匀并防止沉淀。污泥通过蠕动泵1将排泥水回流至静态混合器前端(如虚线所示)。砂滤池每24 h反冲洗一次,反冲洗水收集于两个圆柱形不锈钢储泥罐中,通过蠕动泵2将反冲洗水回流至静态混合器前端(如点划线所示),与原水、混凝剂混合完全后经静态混合器进入后续处理单元。

1.2 实验用水及测试方法

1.2.1 原水水质

中试原水来自中国东北地区DQ市某水库水源,

其主要物理化学指标见表1。夏季时,进水浊度为4.5~5.5 NTU,色度为30~50 CU,TOC为4.5~5.5 mg/L,pH为7.5~8.3,铝质量浓度为0.73~1.20 mg/L,铁质量浓度为0.25~0.35 mg/L;冬季时,指标略有提高,浊度为5.0~5.5 NTU,色度为50~60 CU,TOC为5.5~7.5 mg/L,pH为7.7~8.5,但铝质量浓度相对较低,为0.31~0.49 mg/L,铁质量浓度相近,为0.17~0.33 mg/L。可见,原水为典型的低浊度、高色度、中等有机物量的弱碱性水体。冬季低浊影响增加其常规水处理难度。

表 1 实验原水水质

Tab.1 Characteristics of the raw water for experiment

季节	温度/℃	pH	浊度/NTU	色度/CU	TOC/(mg·L ⁻¹)	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	ρ(Al)/(mg·L ⁻¹)	ρ(Fe)/(mg·L ⁻¹)
夏季	20±2	7.5~8.3	4.5~5.5	30~50	4.5~5.5	0.05~0.09	0.73~1.20	0.25~0.35
冬季	4±1	7.7~8.5	5.0~5.5	30~50	5.5~7.5	0.08~0.10	0.31~0.49	0.17~0.33

1.2.2 分析方法与仪器

水质参数均按照 USEPA 或标准方法测定. 温度、pH: DELTA-320 pH 计(梅特勒-托利多); 浊度: 2100AN 浊度仪(哈希, 美国); 色度: 比色皿厚度 5 cm, 采用 DR5000 紫外分光光度计(哈希, 美国); UV₂₅₄: 水样经 0.45 μm 滤膜过滤, 测试波长 254 nm, 比色皿厚度 1 cm, 采用 DR5000 紫外分光光度计(HACH, 美国); TOC: TOC-V CHP 分析仪(岛津, 日本).

1.3 实验方案及步骤

首先确定最佳运行工况. 在夏、冬两季均控制沉淀池出水满足水厂内控指标(<2.5 NTU)的情况下进行优化调试, 分别寻找最优回流参数以及常规处理运行参数, 包括最佳投药量、最佳混合水浊度范围、最佳回流配比.

以上述最佳回流比将沉淀池污泥和反冲洗水回流到静态混合器中, 连续运行 14 d. 因为当回流第 12 天时发现储泥罐中的沉淀池污泥有异味释放, 污泥絮体上浮, 发生了污泥腐化现象, 后续 2 d 回流实验进一步检验对出水水质的影响. 每天分别在上午 10 点和下午 3 点取样两次进行水质参数检测, 样品包括原水、混合水(回流废水+原水+混凝剂)、储泥罐中废水(沉淀池污泥和反冲洗水)、沉淀池出水、滤池出水.

2 结果与讨论

2.1 连续性废水回流工艺的评价

调节蠕动泵流量, 使在沉淀池污泥与滤池反冲洗水回流配比分别为 2% : 4%、2% : 5%、2% : 6%、

3% : 4%、3% : 5%、3% : 6%、4% : 4%、4% : 5%、4% : 6%, 其中 2%~4%和 4%~6%均为废水回流占水厂自产水量的比例. 通过控制沉后水浊度指标(<2.5 NTU)寻找最佳回流比和最适投药量. 通过调试优化实验得出夏季最佳回流比为 4% : 6%, 冬季为 2% : 6%.

由表 2 可以看出, 在满足沉后水浊度在(2.0±0.5) NTU(ZY 水厂内控指标)的条件下, 夏季常规工艺连续性运行处理低浊水的投药量为 6 mg/L, 而废水回流工艺系统投药量可减少至 4 mg/L, 节约率高达 33.3%. 由此可见, 废水回流工艺不仅可以强化混凝, 还可以起到节水节药的作用, 对于节约水厂运行成本极其可观. 相比而言, 冬季废水不回流时投药量增加到 11 mg/L, 约为夏季时的 2 倍, 废水回流同样可以节约 2 mg/L 药剂, 节约率可达 18.2%. 一般而言, 寒冷地区的饮用水处理技术一直是一个难于解决的问题. 混凝剂在低温条件下水解困难, 胶体难于脱稳, 矾花也难以形成; 此外, 水的浊度低, 水中脱稳胶体颗粒相互接触的几率降低, 因而絮体的成长速度很慢; 水中浊度低, 形成的絮体密度小, 沉淀速度很慢, 造成停留时间很长、设备的体积很大. 特别是水中有机成分的增加, 进一步提高了水中胶体的稳定性, 使胶体更难脱稳. 低温低浊条件下, 混凝使得处理后水中的余铝质量浓度增高, 预投混凝剂的直接过滤和接触絮凝过滤是处理低浊度水的有效方法, 但同样存在出水余铝偏高的问题^[6]. 而水厂大多采用增加混凝剂投加量或额外投加助凝剂(如 PAM)的方法来解决低温低浊难处理的问题^[7]. 因此, 废水回流工艺对于强化低温低浊水的去除是可行且经济的方法.

表 2 不同季节连续回流时的参数比较

季节	混合水	沉淀池污泥	反冲洗水	投药量/(mg · L ⁻¹)		节约率/
	浊度/NTU	浊度/ NTU	浊度/ NTU	回流	不回流	%
夏季((20±2) ℃)	120~150	5 500~6 500	22~36	4	6	33.3
冬季((4±1) ℃)	50~70	2 300~2 800	17~31	9	11	18.2

此外, 在夏冬两季连续回流 14 d 中, 对混合水浊度、沉淀池排泥水浊度、滤池反冲洗浊度进行监测. 由表 2 可以看出, 在 20 ℃ 时混合水浊度为 120~150 NTU, 4 ℃ 时为 50~70 NTU, 二者均存在较小波动. 而反冲洗浊度差别不大, 在夏、冬两季的范围分别为 22~36 和 17~31 NTU. 因此, 导致混合水浊度差异较大的因素主要是排泥水浊度. 20 ℃ 沉淀池排泥水的浊度为 5 500~6 500 NTU, 而在 4 ℃ 时保持在较低的浊度范围, 即 2 300~2 800 NTU, 平均值约为夏季的 1/2. 温度会减弱颗粒的布朗运动, 在紊流状态下颗粒间的碰撞频率由方程(1)决定^[7]:

$$N = 12\pi N\beta n^2 d^3 \sqrt{\varepsilon/\mu}. \tag{1}$$

式中: N 为颗粒碰撞频率($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$), β 为常数, n 为颗粒浓度(粒/ cm^3), d 为颗粒粒径(cm), ε 为单位时间内水能量的耗散速率(粒/ cm^3), μ 为水力黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$). 较高颗粒浓度和较大颗粒粒径可以有效促进颗粒碰撞, 并有利于絮凝过程, 尤其是对于低浊水的处理. 因此, 夏季沉淀池污泥浊度高, 强化混凝效果好于低温.

低温时水的黏滞性增加, 会阻碍混凝剂的水解和扩散; 而且可以影响水解动力学平衡及金属氢氧化物的生成; 另外, 低温降低水的离子积常数, 从而

降低水中氢氧根的浓度.温度也会影响污泥的性质,在低温下形成的沉淀池污泥浊度较低,且絮体松散,具有较差的沉降性^[8].因此,在较高温度下形成的絮体有更好的强化作用.

2.2 回流工艺对出水浊度、色度的影响

如图 2 所示,在夏、冬两季时的沉淀池出水浊度均小于 2.5 NTU,连续 14 d 回流过程中满足该水厂内控指标,回流系统和常规不回流系统均满足出水指标的情况下,回流工艺有明显的节约性,即在混凝剂投加量相同时回流系统沉后水出水浊度低于不回流系统.从整体趋势可知,废水回流工艺系统中,夏季时的沉后水浊度在前 12 d 逐渐略微降低,12 d 后出现显著升高,后续几天连续运行中出现了较明显的波动.原因可能是厌氧导致储泥罐中污泥腐化并释放出异味,从而影响絮体形态结构而间接导致出水水质变差.因此,建议水厂回流运行和排泥周期需小于 12 d,尤其在夏季,运行周期可提前为 10 d.相比而言,冬季沉后水浊度的平均值高于夏季,且其浊度稳定在 2.0~2.5 NTU 的范围内.然而,低温对浊度的去除产生较大的负作用,导致在冬季回流工艺中混凝剂的投加量多出 5 mg/L 才可满足其出水标准.很多研究通过小试实验得出废水回流影响混凝效果的机理.当沉淀池污泥和反冲洗水以一定配比回用于混凝阶段时,增加原水浊度的同时增加了颗粒间的碰撞几率,从而为絮体的形成提供了充分的凝聚核心^[7,9];也有研究表明,来自沉淀池排泥水和滤池反冲洗水的高分子聚合物和金属水解盐可用作混凝剂来提高絮体捕获颗粒物的能力,从而强化混凝,节水节约^[10-11].当混合水中颗粒被吸附在三维结构絮体所产生的长化学分子链上时,物理吸附和架桥机理占主导作用^[12].

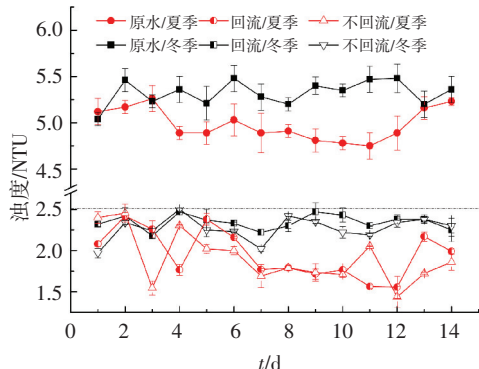


图 2 连续运行中沉后水浊度指标

Fig.2 Turbidity of settled water at continuous operation

如图 3 所示,冬季原水色度略高于夏季原水,在回流过程中,原水色度均有上升趋势,但在两套系统中沉后水均能保证出水水质平稳.夏季沉后水出水色度的范围是 18~26 CU,而冬季时在 10~18 CU.结

果表明,在节省混凝剂投加量的情况下,回流废水强化混凝对色度也有较明显的去除.且在连续运行过程中,沉后水色度指标并未出现富集现象.

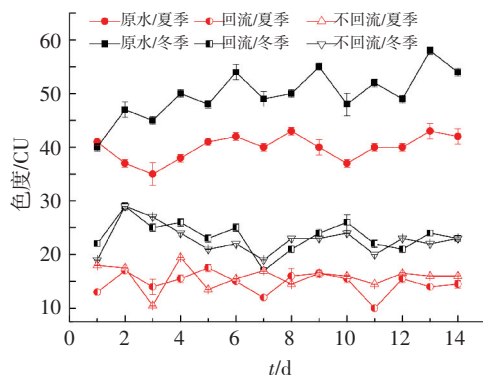


图 3 连续运行中沉后水色度指标

Fig.3 Color of settled water at continuous operation

对于滤池出水而言,回流工艺与常规工艺相比,二者出水水质没有较大差异.经检测可知,在 14 d 连续回流工程中,夏、冬两季滤后水浊度均在 0.4 NTU 以下,并且没有较明显波动;夏季滤后水色度均低于 4 CU,冬季时随着废水回流次数的增加,出水色度也逐渐趋于稳定并大致等于 4 CU.表明连续废水回流工艺不影响滤池出水,在整个运行周期内均能满足出水水质标准.

总之,此中试验中,在连续性运行中可获得持续性节约的效果,并且出水水质指标稳定,浊度、色度均未发现明显的富集现象.

2.3 回流工艺对出水天然有机物、金属的影响

传统水处理工艺对低浊水中天然有机物的去除效果不佳,这种微量有机物对人体健康有潜在性危害.本研究中,连续 14 d 运行周期内通过检测沉后水 TOC 和 UV_{254} 的质量浓度来评价回流工艺对有机物的去除效果和富集现象.

如图 4 所示,夏季时,随着废水回流次数的增加,前 11 d 沉后水 UV_{254} 逐渐缓慢上升,冬季时出现相反趋势.然而,后续 3 d 运行中二者均趋于平稳.如图 5 所示,在冬季时,回流工艺与不回流工艺的沉后水 TOC 质量浓度均保持在 5.5~6.5 mg/L.回流系统在连续运行前 12 d 较为稳定并伴随细小波动,但后续 2 d 运行中却出现了明显的升高现象.而在夏季时,沉后水 TOC 质量浓度保持在较低水平,稳定在 4.5~5.5 mg/L 的范围内,在连续性回流中未发现明显的有机物富集现象.如图 6 所示,由沉后水 Al 的质量浓度可知,夏冬两季回流工艺对 Al 的去除效果均好于常规工艺,同时两季节回流系统滤后水 Al 质量浓度均小于 0.2 mg/L,符合出水标准.由图 7 可知,夏季回流工艺对金属 Fe 的去除有明显优势,冬季时回流工艺效果相对不十分显著,但大部分沉后

水 Fe 质量浓度均小于不回流系统中的出水质量浓度,且两季节回流系统滤后水 Fe 均低于 0.04 mg/L,同样达标.此外,在长期连续回流过程中未发现金属元素的明显富集现象.

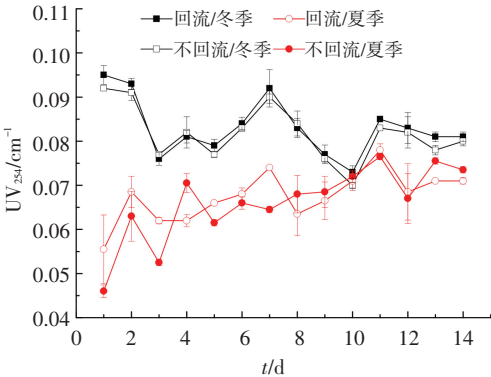


图 4 连续运行中沉后水 UV₂₅₄

Fig.4 UV₂₅₄ of settled water at continuous operation

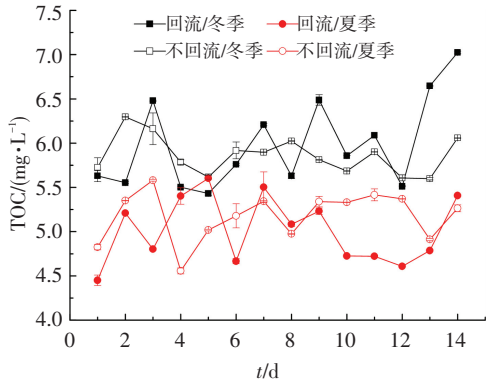


图 5 连续运行中沉后水 TOC 质量浓度

Fig.5 Concentration of TOC in settled water at continuous operation

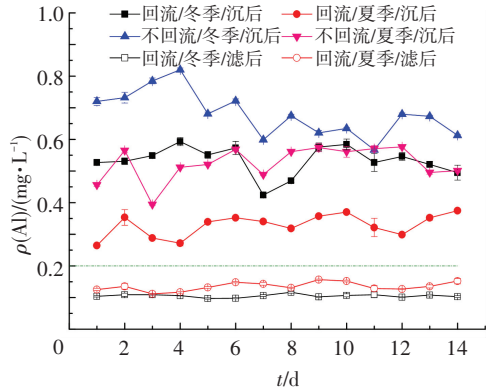


图 6 连续运行中剩余铝质量浓度

Fig.6 Contents of residual Al at continuous operation

2.4 回流工艺对各类污染物去除率的比较

如图 8 所示,夏、冬两季回流时对浊度的去除率分别在 60%~66%和 54%~58%内;夏季回流工艺对色度平均去除率为 64%,冬季为 52%.结果表明,夏、冬两季的回流工艺在节约混凝剂投加量的基础上还对浊度、色度具有相同的去除效果,可见回流工艺较常规工艺具有明显的优势;并且在温度较高时对色度有更好的去除效果.因为夏季混合水浊度比冬季

时高,其中含有更多的颗粒物,可作为天然有机物(如腐殖酸、富里酸等)黏附的附着点.同时回流的废水能够使显色的阴离子胶体物质更具疏水性,从而更容易吸附于絮体上^[13],提高了传统混凝工艺对色度的去除效果.

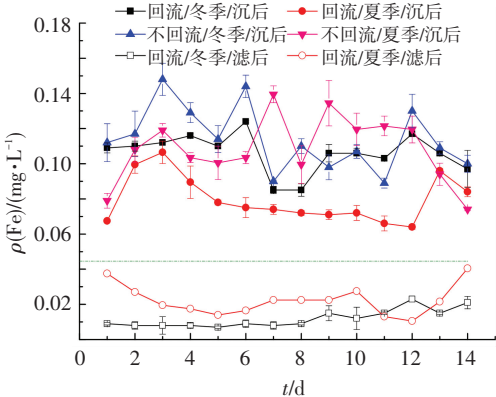
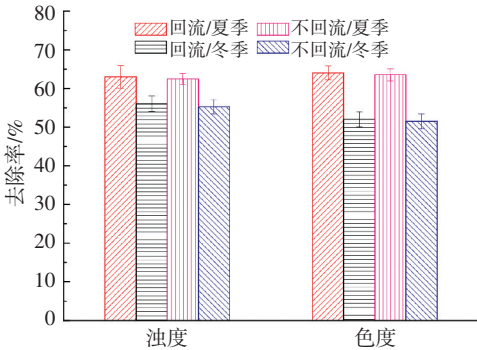
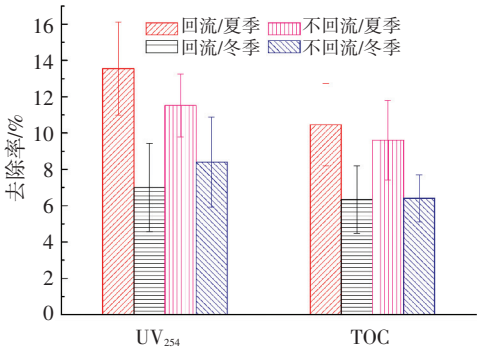


图 7 连续运行中剩余铁质量浓度

Fig.7 Contents of residual Fe at continuous operation



(a) 浊度与色度



(b) UV₂₅₄与 TOC

图 8 沉后水污染物指标的去除率

Fig.8 Removal efficiency of contaminants in settled water

夏季时,回流工艺对 TOC 和 UV₂₅₄ 的去除率分别为 (10.46±2.26)%和 (13.56±2.56)%,冬季时两者的去除率分别为 (6.34±1.86)%和 (7.00±2.43)%.结果表明,在较高温度时废水回流工艺对有机物的去除好于低温;夏季不回流系统对 TOC 和 UV₂₅₄ 的去除率分别为 (9.61±2.19)%和 (11.53±9.61)%,表明废水回流在节约的前提下对有机物的去除效果仍好于不回流工艺,而冬季时两组平行系统没有较大差异.之前的研究表明,混凝过程对于有机物的去除机

制主要为电中和、吸附和络合作用^[14].当废水回流于混凝单元时,提高原水浊度,在絮凝阶段会有大量絮体产生,有机物分子被吸附于矾花中^[15].同时,温度也会影响絮体的结构、大小和吸附容量.有研究表明,低温时混凝速率降低,混凝过程所形成的絮体为不规则结构^[16],且比较松散,沉降性差,不利于对有机物的吸附.

3 结 论

1)废水连续性回流工艺可作为强化混凝的一种有效方法,可用于不含两虫的低浊水源水处理.在夏季,沉淀池污泥和反冲洗水回流比为 4% : 6% 时为最佳运行工况,节约率为 33.3%;冬季二者最佳回流比为 2% : 6%,节约率为 18.2%,并在连续运行中没有明显变化.

2)在 14 d 的连续直接回流过程中,沉淀池出水没有明显的污染物富集现象,在不同季节内的出水水质均稳定.

3)废水回流工艺与常规不回流相比有较明显优势,可以提高污染物(如浊度、色度、TOC、UV₂₅₄)的去除效率.

4)温度对混凝剂投量、混合水浊度范围、沉淀池污泥浓度等均有明显影响,夏季回流工艺所需混凝剂低于冬季,且对污染物的去除效果好于冬季.

5)夏季合理的运行和部分排泥周期为 10 d,冬季可适当延长为 12 d.

参考文献

- [1] 何利. 净水厂生产废水回用强化处理低温低浊水[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
HE L. Enhance the treatment effect of low temperature and low turbidity water by recycling the combined filter backwash water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [2] 孙丽华,李圭白,李星,等. 沉淀池污泥回流工艺强化低浊水处理效能研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2012(2): 187-193.
SUN L H, LI G B, LI X, et al. Study on effects of enhanced treatment of low turbidity water with technical of potassium permanganate, PAM and recycled sludge [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2012(2): 187-193.
- [3] BAI L, WANG C, PEI Y, et al. Reuse of drinking water treatment residuals in a continuous stirred tank reactor for phosphate removal from urban wastewater[J]. Environ Technol, 2014, 35(21/22/23/24): 2752-2759.
- [4] 刘继平. 污泥回流法处理低温低浊水的实验研究[J]. 给排水

水, 1995(1): 12-15.

- LIU J P. Study on sludge return method to treat raw water with low temperature and low turbidity [J]. Water & Wastewater Engineering, 1995(1): 12-15.
- [5] 徐勇鹏,何利,崔福义,等. 回用净水厂生产废水强化低温低浊水的混凝效能[J]. 中国给水排水, 2011, 27(7): 55-58.
XU Y P, HE L, CUI F Y, et al. Enhanced coagulation efficiency of low-temperature and low-turbidity water by reusing production wastewater from waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(7): 55-58.
- [6] 周志伟. 污泥回流强化混凝处理低温低浊水实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
ZHOU Z W. Experiment study on low temperature and low-turbidity water treatment by enhanced coagulation of recycling sludge [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [7] SUN L H, LV M, YANG Y L, et al. Enhanced treatment of water with low turbidity: combined effects of permanganate, PAM and recycled sludge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2009, 16(6): 863-868.
- [8] 曲久辉. 饮用水安全技术保障原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 139.
QU J H. Approaches principle of technologies for drinking water safety [M]. Beijing: Science Press, 2007: 139.
- [9] 俞文正. 混凝絮体破碎再絮凝机理研究及对超滤膜污染的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
YU W Z. Study on floc breakage and re-growth and its effect on ultrafiltration membrane fouling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [10] IPPOLITO J A, BARBARICK K A, ELLIOTT H A. Drinking water treatment residuals: a review of recent uses [J]. J Environ Qual, 2011, 40(1): 1-12.
- [11] XU Y P, CHEN T, XU R G, et al. Impact of recycling alum sludge on coagulation of low-turbidity source waters [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(15): 6732-6739.
- [12] SHARP E L, PARSONS S A, JEFFERSON B. Seasonal variations in natural organic matter and its impact on coagulation in water treatment [J]. Science of the Total Environment, 2006, 363(1/2/3): 183-194.
- [13] HUNDT T R, O'MELIA C R. Aluminum-fulvic acid interactions: mechanisms and applications [J]. Journal-American Water Works Association, 1988, 80(4): 176-186.
- [14] ZHOU Z W, YANG Y L, LI X, et al. Coagulation performance and flocs characteristics of recycling pre-sonicated condensate sludge for low-turbidity surface water treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2014, 123: 1-8.
- [15] ZHOU Z W, YANG Y L, LI X, et al. Coagulation efficiency and flocs characteristics of recycling sludge during treatment of low temperature and micro-polluted water [J]. J Environ Sci (China), 2012, 24(6): 1014-1020.
- [16] XIAO F, HUANG J H, ZHANG B, et al. Effects of low temperature on coagulation kinetics and floc surface morphology using alum [J]. Desalination, 2009, 237: 201-213.

(编辑 刘 彤)