

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.007

高效去除低温低浊地表水中有机物中试研究

李佩琪^{1,2}, 黄廷林^{1,2}, 燕军乐³, 薛睿康^{1,2}, 刘 茜³

(1. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710000;
2. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710000; 3. 陕西省引汉济
渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710010)

摘 要: 为提高西北地区饮用水水厂对低温低浊地表水中有机物的处理能力,通过建立网格絮凝—斜管沉淀和机械絮凝—气浮两个中试系统,探究两种工艺及预氧化强化混凝沉淀对低温低浊水中有机物的去除效果与机理。结果表明,网格絮凝—斜管沉淀工艺对浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 和DOC的去除效果更好,其总运行费用为0.068元/ m^3 ,低于机械絮凝—气浮工艺的0.180元/ m^3 。在此基础上,选择高铁酸钾、高锰酸钾和二氧化氯对网格絮凝—斜管沉淀工艺进行预氧化强化处理,发现当高锰酸钾投加量为0.6 mg/L时对有机物的去除效果最优。三维荧光光谱(EEMs)平行因子分析结果显示,不同预氧化药剂对不同组分有机物的去除各有侧重。

关键词: 低温低浊水; 絮凝; 沉淀; 气浮; 预氧化

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0047-07

Pilot Study on Efficient Removal of Organic Matters in Low-turbidity Surface Water at Low Temperature

LI Pei-qi^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2}, YAN Jun-le³, XUE Rui-kang^{1,2}, LIU Qian³

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology <Ministry of Education>, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710000, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710000, China; 3. Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project Construction Co. Ltd., Xi'an 710010, China)

Abstract: This paper established two pilot processes including grid flocculation combined with inclined tube precipitation and mechanical flocculation combined with air flotation, and investigated the performance and mechanism of the two processes and pre-oxidation enhanced coagulation precipitation for removing organic matters from low-turbidity water at low temperature, so as to improve the treatment ability of organic matters from low-turbidity surface water at low temperature in drinking water plants in Northwest China. The grid flocculation and inclined tube precipitation process showed better performances for turbidity, COD_{Mn} , UV_{254} and DOC removal, and its total operating cost was 0.068 yuan/ m^3 , which was lower than 0.180 yuan/ m^3 of mechanical flocculation and air flotation process. On this basis, potassium ferrate, potassium permanganate and chlorine dioxide were selected to enhance the

基金项目: 陕西省联合基金资助项目(2019JLM-61)

通信作者: 黄廷林 E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

pre-oxidation of the grid flocculation and inclined tube precipitation process. The removal performance of organic matters was the best when the dosage of potassium permanganate was 0.6 mg/L. The results of EEMs parallel factor analysis showed that different pre-oxidizing agents had different effects on the removal of different organic compounds.

Key words: low temperature and low turbidity water; flocculation; precipitation; air floatation; pre-oxidation

在我国西北地区,冬春季有3~5个月地表水源会呈现低温低浊特性,水的动力黏滞系数增大,微粒布朗运动动能减弱,水中胶体颗粒之间的排斥力大幅增强,污染物不易聚集,增加了处理难度^[1-3]。预氧化(尤其是化学预氧化)作为目前处理低温低浊水效果较好的技术之一,已被广泛应用于生产^[3]。目前,水厂中常用的氧化剂有高锰酸钾、次氯酸钠、二氧化氯和臭氧等,新型氧化剂有高铁酸钾及高铁酸盐复合药剂。高铁酸钾作为一种新型预氧化药剂,与传统水处理氧化剂相比,其可以同时扮演氧化剂、消毒剂和混凝剂等多重角色,且不产生其他对人和环境有害的衍生物,但制备条件苛刻且自身稳定性不佳,因此,其还未在水处理领域大规模应用^[4]。高锰酸钾是一种较早使用于给水处理药剂,其不仅使用方便,而且相对于其他氧化剂(如臭氧、次氯酸钠、二氧化氯等)产生的副产物较少,生成的副产物水合二氧化锰有吸附能力,并能被常规处理工艺去除^[5-6]。纯度较高的二氧化氯与有机物反应不会生成三卤甲烷,与氨氮反应不会生成氯胺,在原水水质稳定且二氧化氯消耗量低于1 mg/L时,基本不存在无机副产物超标风险^[7]。因此笔者选择高铁酸钾、高锰酸钾和二氧化氯作为预氧化药剂,分析网格絮凝—斜管沉淀和机械絮凝—气浮中试系统对浊度和有机物的去除效果,并对最优工艺进行预氧化强化处理,探究中试规模下高铁酸钾相比于高锰酸钾和二氧化氯对低温低浊水的处理效果,旨在为水厂处理低温低浊水提供参考。

1 材料与方法

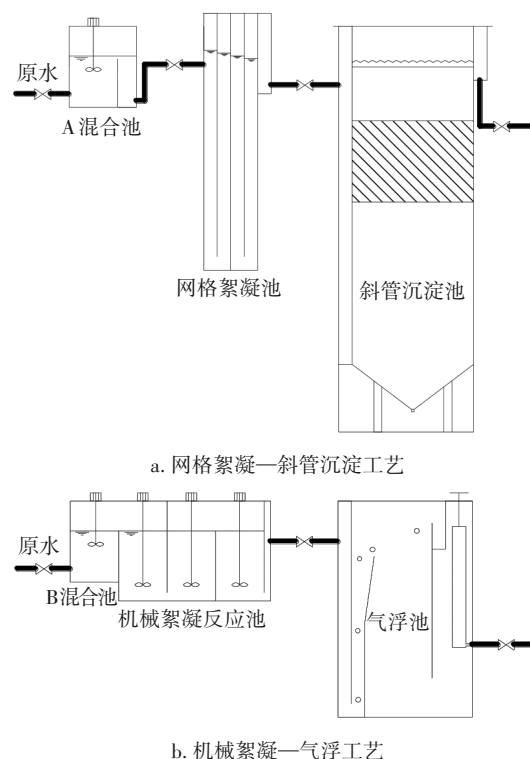
1.1 原水水质

实验时间为2019年10月—2020年1月。原水取自西北某水厂配水井,该水厂的水源为地表水,符合低温低浊特性。具体水质:温度为 $(9\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、pH为 7.3 ± 0.1 、浊度为 (3.75 ± 0.31) NTU、 UV_{254} 为 (0.080 ± 0.004) cm^{-1} 、 COD_{Mn} 为 (2.58 ± 0.27) mg/L、

DOC为 (2.22 ± 0.11) mg/L。

1.2 实验装置与运行条件

中试系统流程如图1所示。其中,网格絮凝池尺寸为 $0.75\text{ m}\times 0.54\text{ m}\times 2.55\text{ m}$,斜管沉淀池尺寸为 $1.53\text{ m}\times 0.45\text{ m}\times 3.37\text{ m}$,斜管长度为1 m,倾角为 60° 。机械絮凝池尺寸为 $1.38\text{ m}\times 0.54\text{ m}\times 1.05\text{ m}$,反应池设三级转速可调搅拌,气浮池尺寸为 $1.53\text{ m}\times 0.40\text{ m}\times 2.70\text{ m}$ 。



b. 机械絮凝—气浮工艺

a. 网格絮凝—斜管沉淀工艺

图1 中试系统流程

Fig.1 Flow chart of pilot test system

为保证进水水质相同,两个中试系统同时运行。网格絮凝—斜管沉淀工艺中,网格絮凝池的水力停留时间为13.33 min,斜管沉淀池1周排泥1次。机械絮凝—气浮工艺的运行参数参考黄廷林等人^[8]提供的最优参数,机械絮凝池停留时间分别为2.71、5.81、8.84 min,采用TS-I溶气释放器,溶

气罐压强为0.40 MPa,回流量为180 L/h,回流比为12%,水力溢渣,每2 h排渣1次。

1.3 实验方法

两个中试系统的进水量均为1.5 m³/h,混凝剂(PAC)和助凝剂(PAM)投量分别为20和1.0 mg/L,通过对比浊度和有机物去除效果优选最优工艺,并进行预氧化强化。在不同高铁酸钾、高锰酸钾和二氧化氯投加量下,通过比较浊度、COD_{Mn}和DOC去除效果,并结合对铁、锰含量和色度的分析,选出最适宜的预氧化药剂及其投加量。同时,利用平行因子分析方法深入分析三维荧光光谱(EEMs),探究不同预氧化药剂对不同有机物组分的去除效果。

1.4 检测项目及方法

温度采用温度计测定,浊度采用浊度计测定,色度采用铂钴比色法测定,COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾滴定法测定,铁、锰含量采用火焰原子吸收光谱仪测定,UV₂₅₄采用紫外可见分光光度计测定,DOC采用TOC分析仪测定,pH采用便携式pH计测定,三维荧光光谱采用荧光分光光度计获得。

2 结果与讨论

2.1 不同工艺效果分析

2.1.1 污染物去除效果

在进水相同的条件下,网格絮凝—斜管沉淀工艺与机械絮凝—气浮工艺对浊度、COD_{Mn}、UV₂₅₄和DOC的去除效果均存在差异,见表1。

表1 网格絮凝—斜管沉淀与机械絮凝—气浮工艺对污染物的去除效果

Tab.1 Removal effect of pollutants by grid flocculation-inclined tube precipitation and mechanical flocculation-air floatation processes

项 目	出水浊度/ NTU	出水UV ₂₅₄ / cm ⁻¹	出水COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	出水DOC/ (mg·L ⁻¹)
网格絮凝—斜管沉淀工艺	0.90~0.96	0.029~0.032	1.42~1.52	0.87~0.97
机械絮凝—气浮工艺	0.95~1.03	0.031~0.034	1.52~1.61	0.99~1.08

当进水浊度为3.69~3.76 NTU时,网格絮凝—斜管沉淀工艺和机械絮凝—气浮工艺对浊度的平均去除率分别为74.8%和73.1%;当进水UV₂₅₄为0.076~0.083 cm⁻¹时,对UV₂₅₄的平均去除率分别为61.9%和58.9%;当进水COD_{Mn}为2.66~2.84 mg/L时,对COD_{Mn}的平均去除率分别为47.0%和43.6%;

当进水DOC为2.18~2.28 mg/L时,对DOC的平均去除率分别为58.2%和53.1%。可见,网格絮凝—斜管沉淀工艺优于机械絮凝—气浮工艺,对浊度、UV₂₅₄、COD_{Mn}和DOC的平均去除率分别约高1.7%、3.0%、3.4%和5.1%。

赵阳^[9]对西北地区低温低浊水进行实验发现,在相同混凝工艺和混凝剂投加量条件下,气浮工艺对浊度、COD_{Mn}和DOC的平均去除率较斜管沉淀工艺分别高10.49%、13.58%和4.28%。这是由于低温低浊的特性使得水中胶体颗粒之间的碰撞减少、混凝剂的聚合反应速度降低、水的黏滞系数增大,造成絮体成长速度慢、体积小,不利于重力沉淀。因此,斜管沉淀池的效果受到限制。而何圣兵等人^[10]认为,有机物的去除效果取决于混凝工艺,与气浮或斜管沉淀等固液分离步骤关系不大。谢磊等人^[11]通过对比沉淀池出水浊度和颗粒数得出,网格絮凝在相同的原水水质、进水量和加药量情况下的絮凝效果比机械絮凝好,这是因为网格絮凝能增大紊流微涡旋的比例,提高颗粒之间的碰撞几率,从而提高絮凝效果,而机械絮凝容易混合不均,使得絮体大小不一,不利于后续固液分离。本实验中,虽然两个中试系统的混凝和固液分离工艺不同,但网格絮凝后形成的絮体更能达到沉淀工艺可有效去除的尺寸。因此,网格絮凝—斜管沉淀工艺比机械絮凝—气浮工艺对浊度及有机物的去除效果更好,混凝工艺在水处理工艺中占主导地位。

2.1.2 经济成本

两个工艺系统的运行费用主要由动力费和药剂费组成。电价按0.5元/(kW·h)计,每个系统的进水量为1.5 m³/h。网格絮凝—斜管沉淀工艺的动力设备主要为反应池的搅拌电机,机械絮凝—气浮工艺的动力设备包括反应池的搅拌电机、三级混合搅拌电机、回流泵和空压机,气浮池有12%的回流量损耗。PAC的单价为1 000元/t,PAM的单价为15 000元/t,两个系统所需费用如表2所示。可以看出,网格絮凝—斜管沉淀工艺的总运行费用为0.068元/m³,机械絮凝—气浮工艺的总运行费用为0.180元/m³,可见网格絮凝—斜管沉淀工艺的运行成本更低。因此,综合考虑两个工艺系统的去除效果及经济成本,选择网格絮凝—斜管沉淀工艺进行预氧化强化实验。

表2 两个工艺系统所需费用

Tab.2 Cost calculation of two process systems

项目	总功率/ kW	动力费/(元· m ⁻³)	PAC投 加量/ (mg·L ⁻¹)	PAM投 加量/ (mg·L ⁻¹)	药剂 费/(元· m ⁻³)	总费 用/(元· m ⁻³)
网格絮凝— 斜管沉淀 工艺	0.100	0.033	20.0	1.00	0.035	0.068
机械絮凝— 气浮工艺	3.350	0.141	22.4	1.12	0.039	0.180

注：按相同出水量条件下所需费用计算。

2.2 预氧化强化混凝沉淀工艺效果分析

2.2.1 对浊度的影响

中试系统进水量为 1.5 m³/h, 温度为 (9±1) °C, pH 为 7.3±0.1。实验期间原水浊度低且变化小。随着预氧化药剂投加量的增加, 出水浊度均满足要求, 且 3 种不同预氧化药剂对浊度的去除率相差不大, 均达到 70% 以上, 但高铁酸钾对浊度的去除率略高于高锰酸钾和二氧化氯。预氧化药剂凭借强氧化能力, 可氧化胶体表面的有机物并降低其负电性, 促进混凝沉淀。已有研究证明, 高铁酸钾的氧化还原电位为 2.20 V, 高于高锰酸钾和二氧化氯的 1.70 和 1.95 V^[12], 具有更强的氧化能力; 且高铁酸钾的还原产物为三价铁离子, 能吸附带负电的胶体颗粒, 起到强化混凝的作用。通过测定预氧化前后的 Zeta 电位 (见表 3) 也可以看出, 随着药剂投加量的增加, 相比于高锰酸钾和二氧化氯, 高铁酸钾预氧化后的 Zeta 电位绝对值越来越小, 而 Zeta 电位越接近于 0 说明胶体颗粒越不稳定, 越有利于混凝, 反之亦然。所以, 高铁酸钾比高锰酸钾和二氧化氯更能促进胶体凝聚, 有利于沉淀。

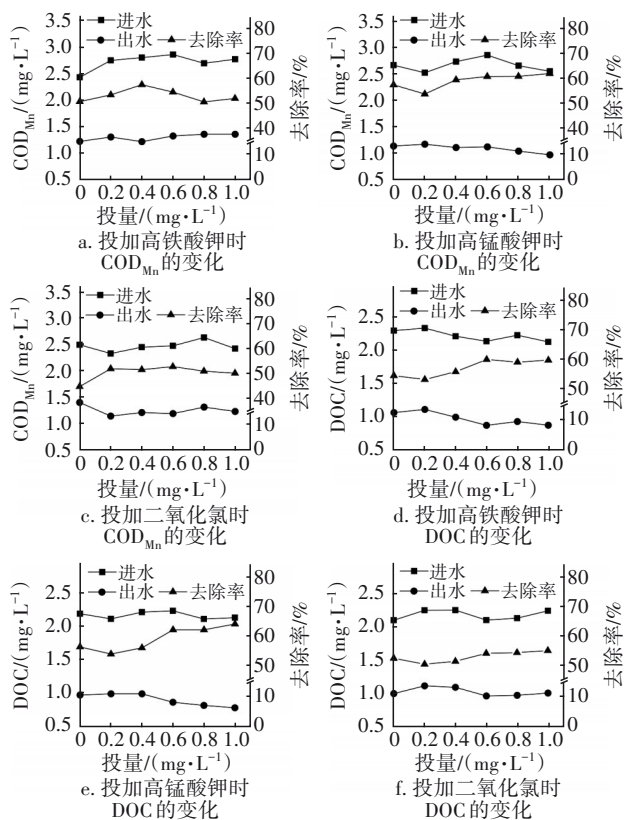
表3 不同投加量预氧化药剂预氧化后水的 Zeta 电位

Tab.3 Zeta potential of water after pre-oxidation with different dosages of pre-oxidation agents

预氧化药剂投 加量/(mg·L ⁻¹)	Zeta 电位/mV					
	加高铁酸钾		加高锰酸钾		加二氧化氯	
	原水	预氧化 后	原水	预氧化 后	原水	预氧化 后
0	-24.43	-22.63	-18.43	-17.50	-18.03	-18.00
0.2	-20.93	-18.60	-18.53	-17.03	-20.03	-18.97
0.4	-19.80	-17.50	-17.50	-16.97	-21.10	-19.70
0.6	-19.53	-15.33	-18.37	-15.63	-19.93	-18.07
0.8	-21.77	-14.30	-19.43	-16.90	-18.53	-17.83
1.0	-22.37	-13.33	-20.03	-18.57	-20.57	-18.33

2.2.2 对有机物浓度的影响

不同预氧化药剂投加量下 COD_{Mn} 和 DOC 的变化如图 2 所示。

图2 不同预氧化药剂投加量下 COD_{Mn} 和 DOC 的变化Fig.2 Change of COD_{Mn} and DOC under different dosages of pre-oxidation agents

实验过程中, 随着高铁酸钾投加量的增加, COD_{Mn} 去除率呈先增高后降低的趋势, 如图 2(a) 所示, 当高铁酸钾投加量为 0.4 mg/L 时去除率最大, 达到 57.0%。而高锰酸钾投加量增加时, COD_{Mn} 去除率整体呈升高的趋势, 当投加量为 0.6 mg/L 时, COD_{Mn} 去除率达到 60.8%, 继续增加投加量, 去除率基本不变, 如图 2(b) 所示。投加二氧化氯时, COD_{Mn} 去除率约为 50.0%, 如图 2(c) 所示, 且几乎不随投药量的变化而变化。投加不同预氧化药剂条件下, DOC 去除率随投加量的增加基本呈升高趋势, 当投加量达到 0.6 mg/L 时, 不同预氧化药剂条件下的 DOC 去除率均基本稳定, 分别达到 59.7%、61.8% 和 54.3% 左右。

烧杯实验中, 在相同水质和加药量条件下, 高铁酸钾比高锰酸钾对有机物的去除率高^[13]。但图 2 表明高铁酸钾比高锰酸钾对有机物的去除效果差。

程爽^[13]分析了高铁酸钾溶液的稳定性,发现当pH为2.0~12.0时,高铁酸钾溶液分解率先减小后增大,在pH为10.0左右时,分解率最小;一般情况下,高铁酸钾溶液的稳定性随着浓度的增大而降低。赵晨凯^[12]分析了高铁酸钾投加量对自分解特性的影响,认为在pH为7±0.05的条件下,当高铁酸钾投加量为150和300 mg/L时,高铁酸钾溶液在6 h后的分解率分别为88.76%和94.65%。

相比于烧杯实验,本实验中高铁酸钾溶液每12 h用弱碱性自来水配制1次,时间间隔长;因投药量的变化,高铁酸钾溶液配制浓度由170 mg/L升高至280 mg/L,浓度较高,因此对有机物的去除效果较差。若将高铁酸钾预氧化应用于实际水处理领域,建议使用高铁酸钾制备投加一体化设备现配现用^[13]。

2.2.3 对铁、锰含量和色度的影响

高铁酸钾与高锰酸钾预氧化前后,水中铁、锰含量均未超过饮用水水质标准限值;沉后水的色度随药剂投加量的增加而升高,但高铁酸钾和二氧化氯产生的色度比高锰酸钾小。当药剂投加量为1.0 mg/L时,高铁酸钾和二氧化氯的沉后水色度仍未超出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求;当高锰酸钾投加量为0.8 mg/L时,色度为20度,超出标准限值(15度),但考虑到实际工程应用中过滤系统也能去除一部分色度,因此色度暂不作为重点考察对象。

综合考虑预氧化对浊度和有机物的去除效果,以及对水中铁、锰含量和色度的影响,可以得出3种预氧化药剂的最优投加量均为0.6 mg/L,优选高锰酸钾作为预氧化药剂,在投加量为0.6 mg/L时,对浊度的去除率为74.5%,对COD_{Mn}的去除率为60.8%,对DOC的去除率为61.8%。

2.3 EEMs平行因子分析

使用MATLAB处理EEMs数据后,得到4种荧光组分物质,见图3。C1代表长波类腐殖质^[14],广泛存在于各类天然水体中,具有陆源腐殖质特征;C2代表紫外光区类富里酸^[15-16],是相对分子质量较大、相对稳定的有机物;C3代表陆源或海洋类腐殖质^[17-18],其相对分子质量大、结构复杂、相对稳定、不易被微生物降解或利用、芳香性大于富里酸^[19];C4代表类色氨酸^[17,19],被认为是由微生物和细菌降解代谢产生的溶解性微生物代谢产物^[20]。

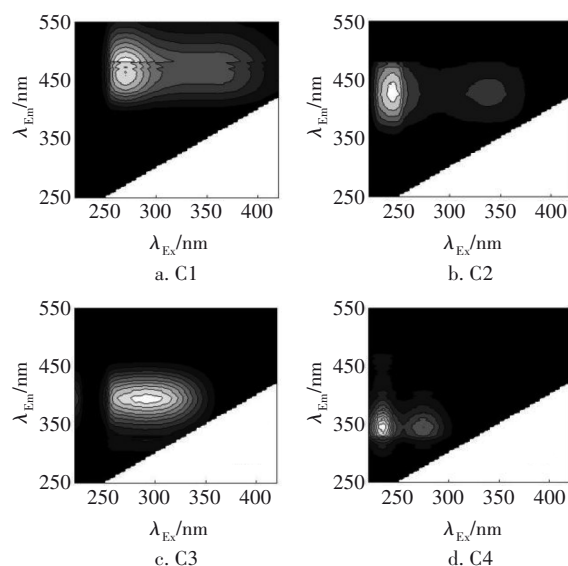


图3 4种组分的EEMs

Fig.3 EEMs of the four components

图4为未投加预氧化药剂和投加0.6 mg/L预氧化药剂条件下对不同组分有机物的去除率。

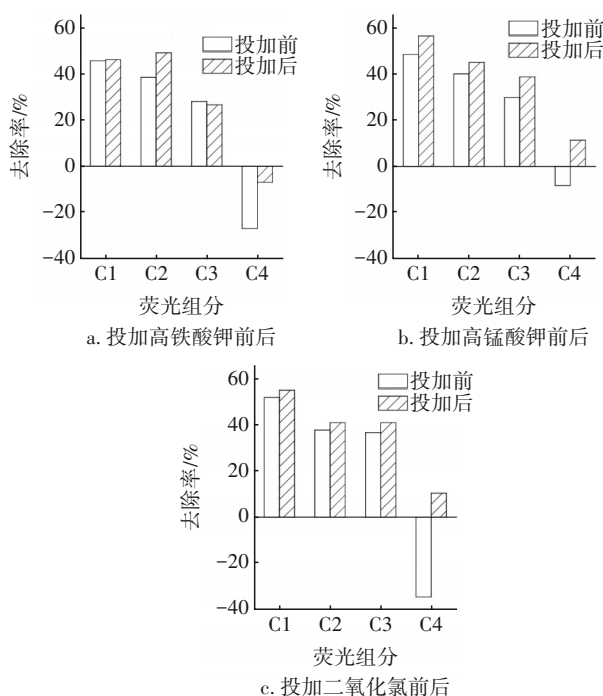


图4 3种预氧化药剂对不同荧光组分的去除率

Fig.4 Removal rates of different fluorescence components by three pre-oxidizing agents

由图4可知,相比于未投加预氧化剂,高铁酸钾对C2和C4组分有机物的去除率分别提高了10.7%、20.0%,而对C1和C3组分的去除差别不大。高锰酸钾和二氧化氯对4种组分有机物的去除率均有提高,但高锰酸钾对C1、C2和C3组分有机物去除

率的增加量高于二氧化氯,对C4组分的去除率提高了19.6%,低于二氧化氯对C4组分去除率的提高值45.0%。由此可以看出,不同预氧化药剂对不同组分有机物的去除各有侧重。因此,在对不同水源水进行预氧化处理时,可以首先分析水中有机物组分的种类,根据优势组分选择合适的预氧化药剂。

3 结论

① 对于西北地区低温低浊的地表水,网格絮凝—斜管沉淀工艺对有机物的去除效果优于机械絮凝—气浮工艺。根据经济成本分析,网格絮凝—斜管沉淀工艺的总运行费用为0.068元/m³,机械絮凝—气浮工艺的总运行费用为0.180元/m³,可见网格絮凝—斜管沉淀工艺的运行成本更低。

② 若采用高铁酸钾作为预氧化药剂,建议使用高铁酸钾制备投加一体化设备现配现用。

③ 优选高锰酸钾作为预氧化药剂,其最优投加量为0.6 mg/L,对浊度、COD_{Mn}、DOC的去除率分别为74.5%、60.8%、61.8%。

④ 本实验条件下,通过EEMs平行因子分析得出,高铁酸钾对C2和C4组分有机物的去除率分别提高了10.7%、20.0%,对C1和C3组分没有影响,高锰酸钾和二氧化氯对4种组分有机物的去除率均有提高。不同预氧化药剂对不同组分有机物的去除各有侧重,水处理过程中可以根据优势组分选择合适的预氧化药剂。

参考文献:

- [1] 汪志永,戴红玲,周政,等. 低温低浊水处理技术的研究与应用[J]. 水处理技术,2016,42(10):20-24.
WANG Zhiyong, DAI Hongling, ZHOU Zheng, *et al.* Research and application of low temperature and low turbidity water treatment technology [J]. Technology of Water Treatment, 2016,42(10):20-24(in Chinese).
- [2] 臧鹏. 低温低浊水处理技术研究进展[J]. 山西建筑,2016,42(30):125-127.
ZANG Peng. Research development of treatment technology for low temperature and low turbidity water [J]. Shanxi Architecture, 2016,42(30):125-127(in Chinese).
- [3] 申家宁. 某市供水工程低温低浊微污染水处理工艺设计及运行效果研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
SHEN Jianing. Study on Process Design and Operation Effect of Low Temperature and Low Turbidity Micro-pollution Water Treatment in Water Supply Project of a City [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).
- [4] 张运波,王一凡,王洪波. 绿色水处理剂高铁酸钾制备研究进展[J]. 工业水处理,2020,40(11):10-14.
ZHANG Yunbo, WANG Yifan, WANG Hongbo. Research progress in preparation of green water treatment agent potassium ferrate [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(11):10-14(in Chinese).
- [5] 熊晓雅. 高锰酸钾法去除饮用水中锰的试验与应用[D]. 南昌:南昌大学,2018.
XIONG Xiaoya. Experiment and Application of Removing Manganese from Drinking Water by Potassium Permanganate [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018(in Chinese).
- [6] 牛璐瑶,方月英,官泽玉,等. 高锰酸钾预氧化耦合混凝工艺对藻类及类蛋白物质的控制效果[J]. 净水技术,2020,39(4):102-107.
NIU Luyao, FANG Yueying, GUAN Zeyu, *et al.* Effect of processes of potassium permanganate preoxidation and coupled coagulation on control of algae and proteinoid substances [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(4):102-107(in Chinese).
- [7] 卢小艳,易娟,宋庆,等. 水厂二氧化氯预氧化工艺中副产物控制技术的工程应用[J]. 净水技术,2020,39(10):58-64,124.
LU Xiaoyan, YI Juan, SONG Qing, *et al.* Engineering application of byproducts control technology in process of chlorine dioxide preoxidation in WTP [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(10):58-64,124(in Chinese).
- [8] 黄廷林,赵阳,文刚. 西北地区低温低浊地表水气浮工艺中试研究[J]. 给水排水,2015,41(11):41-45.
HUANG Tinglin, ZHAO Yang, WEN Gang. Pilot study on air floatation to treat the low turbidity surface water in low temperature in northwest [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015,41(11):41-45(in Chinese).
- [9] 赵阳. 水质变动条件下传统水处理工艺优化中试研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
ZHAO Yang. Traditional Water Treatment Process Optimization of Pilot Study under the Condition of the Water Quality Change [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016(in Chinese).
- [10] 何圣兵,孟凡良,王宝贞,等. 溶气气浮法与沉淀法的处理效果比较[J]. 中国给水排水,2002,18(5):

- 42-44.
- HE Shengbing, MENG Fanliang, WANG Baozhen, *et al.* Comparison on the treatment effects of dissolved-air flotation and sedimentation processes [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18 (5) : 42-44 (in Chinese).
- [11] 谢磊,董秉直,曹达文,等.机械絮凝和网格絮凝处理低浊度水源水的性能对比中试研究[J].*工业用水与废水*,2008,39(5):73-76.
- XIE Lei, DONG Bingzhi, CAO Dawen, *et al.* Comparison of performances of mechanical flocculation and grid flocculation treating low turbidity source water by pilot-scale experiment [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2008,39(5):73-76(in Chinese).
- [12] 赵晨凯.高铁酸钾的化学发光特性和降解应用研究[D].无锡:江南大学,2020.
- ZHAO Chenkai. Study on Chemiluminescence Characteristics and Degradation Application of Potassium Ferrate[D]. Wuxi:Jiangnan University, 2020 (in Chinese).
- [13] 程爽.高铁酸钾的制备及预氧化强化混凝效果研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- CHENG Shuang. Studying on Preparation of Potassium Ferrate and Its Pre-oxidation and Enhanced Coagulation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017(in Chinese).
- [14] 药怡良,赵卫红,苗辉.基于三维荧光光谱结合平行因子分析对春季北黄海有色溶解有机物的研究[J].*光谱学与光谱分析*,2016,36(8):2532-2537.
- YAO Yiliang, ZHAO Weihong, MIAO Hui. Studied on colored dissolved organic matter of spring in North Yellow Sea with three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factor analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016,36(8):2532-2537(in Chinese).
- [15] 李帅东,张明礼,杨浩,等.昆明松华坝库区表层土壤溶解性有机质(DOM)的光谱特性[J].*光谱学与光谱分析*,2017,37(4):1183-1188.
- LI Shuaidong, ZHANG Mingli, YANG Hao, *et al.* Spectroscopic characteristics of dissolved organic matter from top soils on Songhuaba Reservoir in Kunming [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017,37(4):1183-1188(in Chinese).
- [16] 祝鹏,廖海清,华祖林,等.平行因子分析法在太湖水体三维荧光峰比值分析中的应用[J].*光谱学与光谱分析*,2012,32(1):152-156.
- ZHU Peng, LIAO Haiqing, HUA Zulin, *et al.* Parallel factor analysis as an analysis technique for the ratio of three-dimensional fluorescence peak in Taihu Lake [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012,32(1):152-156(in Chinese).
- [17] HE W, HUR J. Conservative behavior of fluorescence EEM-PARAFAC components in resin fractionation processes and its applicability for characterizing dissolved organic matter[J]. *Water Research*, 2015,83: 217-226.
- [18] 张广彩,于会彬,徐泽华,等.基于三维荧光光谱结合平行因子法的蘑菇湖上覆水溶解性有机质特征分析[J].*生态与农村环境学报*,2019,35(7):933-939.
- ZHANG Guangcai, YU Huibin, XU Zehua, *et al.* The characteristics of dissolved organic matter in the overlying water of Moguhu Lake based on three dimensional fluorescence spectrum and parallel factor method [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019,35(7):933-939(in Chinese).
- [19] 张春华,黄廷林,方开凯,等.同温混合初期主库区沉积物间隙水DOM的光谱特征——以周村水库为例[J].*中国环境科学*,2016,36(10):3048-3055.
- ZHANG Chunhua, HUANG Tinglin, FANG Kaikai, *et al.* Spectral characteristics of DOM in sediment interstitial water of the main reservoir area during the initial stage of isothermal mixing: a case study of Zhouchun Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(10):3048-3055(in Chinese).
- [20] 张博,王书航,姜霞,等.太湖五里湖水体悬浮物中水溶性有机质(WSOM)的荧光光谱组分鉴别及其与氮形态的关系[J].*湖泊科学*,2018,30(1):102-111.
- ZHANG Bo, WANG Shuhang, JIANG Xia, *et al.* Identification of WSOM fluorescence spectral components in suspended solids and correlation analysis with nitrogen forms of Lake Wuli, Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30 (1) : 102-111 (in Chinese).

作者简介:李佩琪(1995-),女,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为天然地表水中藻类和有机物的高效去除。

E-mail:1163710627@qq.com

收稿日期:2020-12-25

修回日期:2021-01-31

(编辑:任莹莹)