

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.011

电絮凝处理受污染地表水中典型污染物中试分析

邸振华, 辛怡颖, 张泽瀚, 周律
(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 通过计算流体力学研究了电絮凝装置中电极间距对流场和浓度场的影响,并以此为依据进行了中试分析,考察了其对受污染地表水中典型污染物指标COD、NH₃-N、TP和浊度的去除效果及规律。结果表明,电极间距的改变会影响流体的流动状态,电极间距越大越容易形成大而不规律的低速区,影响处理效率。电絮凝装置对浊度、COD、NH₃-N、TP均有较稳定的去除效果,当电流密度为25 A/m²时,电絮凝主要出水水质指标可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水标准;当电流密度为15 A/m²时,可达到Ⅳ类水标准。

关键词: 电絮凝; 受污染地表水; 典型污染物; 电极间距

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0076-08

Pilot Study on Electrocoagulation for Treatment of Typical Pollutants in Polluted Surface Water

DI Zhen-hua, XIN Yi-ying, ZHANG Ze-han, ZHOU Lü
(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Effect of electrode spacing on the flow field and the concentration field in an electrocoagulation device was investigated by computational fluid dynamics (CFD). Based on this, a pilot test was carried out to investigate the removal performance and mechanism of typical pollutants such as COD, NH₃-N, TP and turbidity from the polluted surface water. The change in electrode spacing affected the flow state of the fluid between the electrodes. Larger electrode spacing was more likely to form a large and irregular low-velocity zone and thus affected the treatment efficiency. The electrocoagulation device had a relatively stable removal performance on turbidity, COD, NH₃-N, and TP. When the current density was 25 A/m², the main indicators of effluent met the class Ⅲ criteria specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). When the current density was 15 A/m², the effluent quality met the class Ⅳ surface water criteria.

Key words: electrocoagulation; polluted surface water; typical pollutant; electrode spacing

近30年以来,京津冀地区水资源开发程度较高,水系的水环境容量降低。根据2020年《中国生态环境状况公报》,京津冀地区主要污染物指标为化学需氧量(COD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})。2018

年,京津冀地区主要河流北运河21个监测断面显示,总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)均值都未达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅴ类水标准^[1]。该地区地表水的污染已严重制约了社会经

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105)

通信作者: 周律 E-mail: zhoulv@tsinghua.edu.cn

济的发展与京津冀一体化的进程,开发简易、高效的受污染地表水处理技术迫在眉睫。电絮凝是一种电化学水处理技术,在外电场的作用下,其可将铝、铁等金属阳极溶解,产生 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 等离子,通过水解产生络合物,进而以絮凝或吸附作用去除水中污染物^[2-3]。相比于其他受污染地表水处理工艺,电絮凝具有占地面积小、无需加药、操作简单等特点^[4-5],因此电絮凝在受污染地表水的处理过程中具有广泛的应用前景。目前,对电絮凝技术在水处理中的研究多集中于污染物浓度较高的污水,如印染废水^[6-7]、重金属废水^[8-9]等,对在地表水中的应用关注相对较少,且现有研究多处于实验室小试阶段,缺乏长期运行效果的考察。

笔者通过计算流体力学分析了电絮凝装置电极间距对流场和浓度场的影响,并采用中试系统研究了其处理受污染地表水过程中,对典型污染物指标COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、浊度等的去除效果及规律,旨在为电絮凝技术处理受污染地表水的应用提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 试验用水

试验用水取自河北省廊坊市龙河,龙河是廊坊地区重要的河流,近年来受工业发展和人口数量迅速增加的影响,龙河廊坊段水环境质量有所下降,常为V类或劣V类。本研究的中试装置设置在龙河下游,主要水质指标:COD为20~70 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为2.0~4.0 mg/L, TP为0.10~0.35 mg/L, 浊度为8~20 NTU, 电导率为740~900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH为7~9。

1.2 中试流程

中试系统的布局如图1所示。

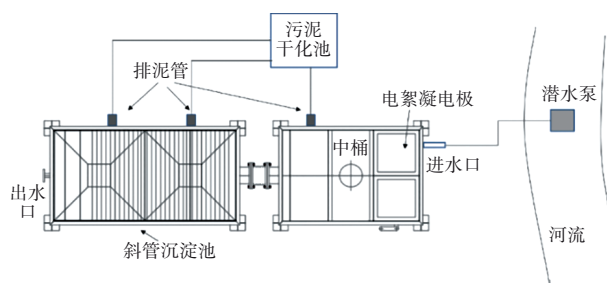


图1 中试系统的布局

Fig.1 Layout of electrocoagulation pilot system

该系统包括取水设施、电絮凝反应池、斜管沉淀池、污泥干化池及配套电源、搅拌设备。池体为

玻璃钢材质, 电极为铝板电极(0.5 m×0.5 m, 12片), 采用双电极连接方式, 通过恒流模式运行, 运行电流为80 A, 电压在4~10 V之间变化, 当电压超过10 V时, 进行电极清洗。清洗过程中, 用0.01 mol/L的稀硫酸与0.01 mol/L的稀氢氧化钠依次浸泡电极20 min后再用流动水清洗残垢。中试系统的设计处理量为100 m³/d, 电絮凝反应池的水力停留时间为0.7 h。

河水通过潜污泵提升后, 经由进水管到达电絮凝反应池。在电絮凝反应池中与电极充分接触后, 进入混合区搅拌混合均匀。随后进入斜管沉淀池完成泥水分离。处理后的河水经出水口排入水体或进入后续处理单元, 沉淀产生的污泥经排泥管进入污泥干化池, 排泥周期为40 d。中试装置实物如图2所示。

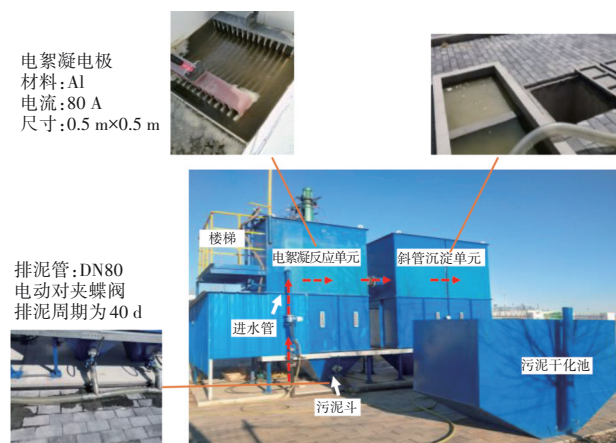


图2 中试装置

Fig.2 Set-up of electrocoagulation pilot system

1.3 分析项目及方法

pH和电导率采用多参数水质分析仪测定; COD采用快速消解分光光度法(HJ/T 399—2007)测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)测定; TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)测定; TP采用钼酸铵分光光度法(HJ 670—2013)测定; 浊度采用散射光式浊度仪测定。

2 结果与讨论

2.1 电极设计及优化

电极间距是电絮凝装置的重要参数, 其决定了流态与电场分布, 进而影响溶液电解 Al^{3+} 的浓度、絮体的形成和溶液的混合程度, 最终影响处理效果。本研究采用COMSOL有限元软件对电絮凝单元的多物理场进行模拟分析, 以确定最佳的电极间距。

2.1.1 数学模型

① 控制方程

连续方程见式(1)。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u 为 x 方向流体的流出速度(以质量计,下同), kg/s ; v 为 y 方向流体的流出速度, kg/s ; w 为 z 方向流体的流出速度, kg/s 。

动量方程见式(2)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u')}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u' u')}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u' v')}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u' w')}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w'}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; p 为流体在微元体上的压力, N/m^2 ; u' 为 x 方向的流速分量, m/s ; v' 为 y 方向的流速分量, m/s ; w' 为 z 方向的流速分量, m/s ; μ 为液体动力黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

② 稀溶液物质传质模型

在电化学反应中,离子传输到电极表面的方式有电迁移、对流、扩散3种方式。

电迁移:电荷为 z_A 的离子在电场中运动,其运动速度与电场强度 \bar{E} 成正比,迁移流量见式(3)。

$$N_{m,A} = z_A u_A c_A \bar{E} \quad (3)$$

式中: c_A 为离子体相浓度, kg/m^3 ; u_A 为离子淌度, $\text{m}^2/(\text{s}\cdot\text{V})$; $N_{m,A}$ 为迁移流量, $10 \text{ mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 。

其中,离子淌度表示单位场强下离子迁移的速率,与扩散系数 D_A 的关系见式(4)。

$$u_A = F \frac{D_A}{RT} \quad (4)$$

式中: D_A 为扩散系数; F 为法拉第常数, C/mol ; R 为热力学常数; T 为温度, K 。

电场强度 \bar{E} 和电位梯度的关系见式(5)。

$$\bar{E} = -\Delta\phi \quad (5)$$

式中: \bar{E} 为电场强度, N/C ; ϕ 为电位梯度; Δ 为拉普拉斯算子。

因此,迁移流量可变为式(6)。

$$N_{m,A} = -\Delta\phi z_A c_A \frac{FD_A}{RT} \quad (6)$$

扩散:向垂直平面扩散的物质A的扩散流量 $N_{d,A}$ 见式(7)。

$$N_{d,A} = -D_A \Delta C_A \quad (7)$$

式中: D_A 为扩散系数。

对流:对流流量 $N_{c,A}$ 与速度 V 成正比,见式(8)。

$$N_{c,A} = V c_A \quad (8)$$

因此,传质 $N_{T,A}$ 的表达见式(9)。

$$N_{T,A} = N_{d,A} + N_{m,A} + N_{c,A} = -\Delta\phi z_A c_A \frac{FD_A}{RT} - D_A \Delta C_A + V c_A \quad (9)$$

③ 三次电流分布模型

忽略气泡扩散的影响,假设溶液各处均保持电中性,考虑阳极金属离子引起的浓差极化,假设体系中的多种离子不存在相互作用,电流密度 i_A 的表达见式(10)。

$$i_A = z_A N_{T,A} F \quad (10)$$

2.1.2 边界条件及工艺参数的确定

中试装置进水口为速度入口,出水口为压力出口。电解质的电导率为 $800 \mu\text{S/cm}$,阴极设为基础电位;忽略气泡扩散的影响,假设初始溶液为电中性。电絮凝中试装置模型如图3所示。中试装置为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 的长方体,通过池体下方的穿孔管进水,保证配水均匀,在靠近装置顶部位置设置堰口,通过溢流水。电极为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$ 的铝电极。

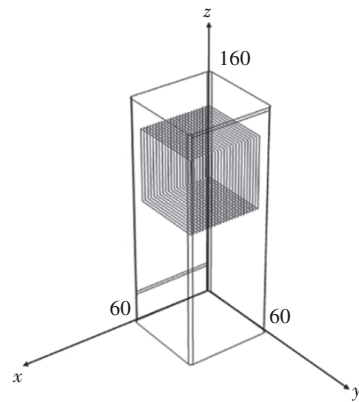


图3 电絮凝中试装置模型

Fig.3 Model of electrocoagulation pilot device

由于地表水的电导率低,因此需要选取较小的电极间距才能保证合理的能耗。焦跃腾^[10]的研究表明,使用0.5、1.0、1.5、2.0 cm的电极间距进行受污染地表水处理时,其浊度和COD去除率均大于50%。由于受污染地表水中杂质较多,且考虑电絮凝电极的钝化问题,0.5 cm的电极间距过小,不利于中试反应器的稳定运行,因此采用1.0和2.0 cm的电极间距进行模拟。

2.1.3 电极间距对速度场的影响

图4为不同电极间距时的速度云图。可以看出,由于进水布置在装置底部,流体进入装置后流速较快,随着流体的向上移动,流量逐渐向装置两侧分散。接近电极板时配水已基本均匀。流体受到电极板壁面的阻挡,形成了局部低速区,水流受到压迫向极板间隙流动。低流速甚至流速几乎为零的区域可能会造成生成的离子不能有效扩散,导致局部地区的浓差极化甚至结垢堵塞。当电极间距为1.0 cm时,形成的低速区较小且较规律;而间距为2.0 cm时形成的低速区较大且不均匀。这是由于电极间距较小时,受相邻壁面影响的流体互相作用,使极板间隙的流速均匀,而因为壁面影响的减小,电极间隙内的流速较为均匀。因此可以得出,电极间距的改变会影响电极间流体的流动状态,电极间隙越大越容易形成大而不规律的低速区,进而影响处理效率。

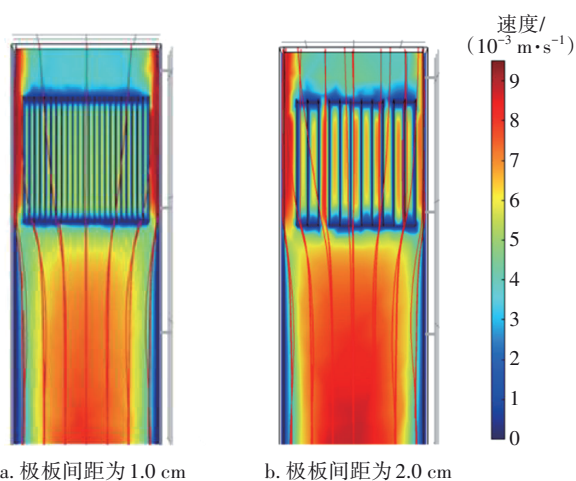


图4 不同电极间距时的速度云图

Fig.4 Velocity nephogram with different electrode spacing

2.1.4 电极间距对电流场的影响

图5为不同电极间距时电流密度的分布。考虑到两种工况下电极板数量不同,因此在电极间距为2.0 cm的模拟中使用的电流是电极间距为1.0 cm情况下的一半(40 A),以确保理论电流密度相同。从图5可知,当电极间距为1.0 cm时,电流密度变化不均匀,这是因为电极间距较小,电极附近的 Al^{3+} 浓度较高。因此,间隙内的电流密度受浓差极化的影响较大,造成电流密度分布不均匀,从而会抑制阳极 Al^{3+} 的生成。为进一步明确电流密度对絮凝反应造成的影响,还需考虑溶液 Al^{3+} 的溶出情况。

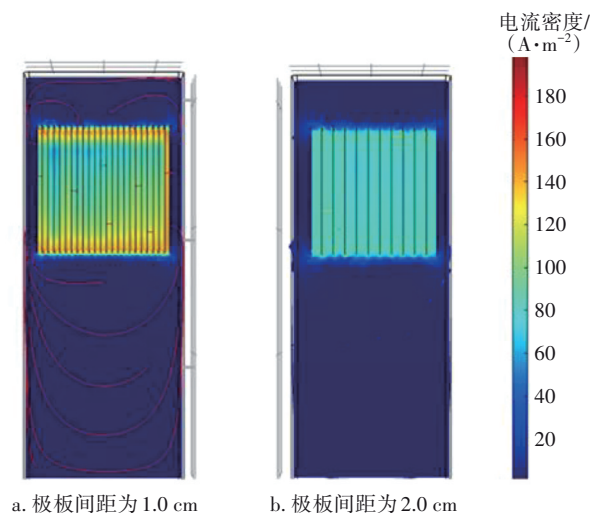


图5 不同电极间距时电流密度的分布

Fig.5 Current density distribution with different electrode spacing

2.1.5 Al^{3+} 浓度模拟及对电极的影响

图6为不同电极间距下 Al^{3+} 浓度的变化。 Al^{3+} 的主要作用是水解-聚合形成羟基多核配合物,这些物质可起到絮凝作用,且能够通过吸附和网捕作用有效去除污染物, Al^{3+} 浓度越大絮凝效果越好。从图6可以看出,当电极间距为1.0 cm时,因为电极板较多,溶液的 Al^{3+} 浓度较大。整个装置中阳极 Al^{3+} 浓度最高,是因为 Al^{3+} 主要通过阳极电解形成,并通过电离和扩散向阴极移动,因此越靠近阴极 Al^{3+} 浓度越低,也进一步验证了模型的准确性。

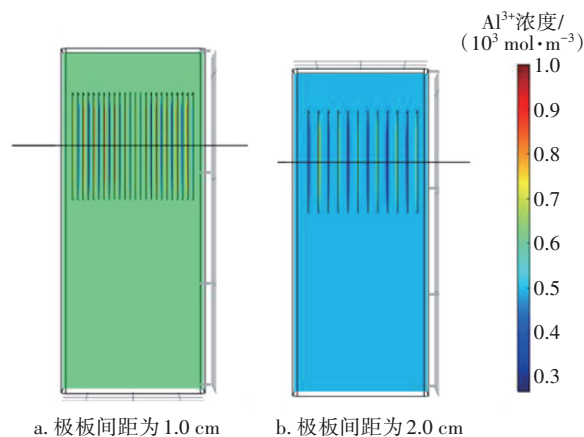


图6 不同电极间距下 Al^{3+} 浓度的变化

Fig.6 Change of Al^{3+} concentration with different electrode spacing

为进一步验证电极间隙 Al^{3+} 的分布情况,截取图6中的断面处($y=1.2$ m),分析其 x 方向的 Al^{3+} 浓度,结果如图7所示。可以看出,相比于电极间距为

2.0 cm,当电极间距为1.0 cm时产生的 Al^{3+} 较多。这是因为当电极间距为1.0 cm时,单位空间可以容纳更多的电极板,因此单位时间能够产生更多的 Al^{3+} 。同时,由于电极间距为1.0 cm的极板间流速比2.0 cm的大,因此流体可以将产生的 Al^{3+} 及时带离电极间隙,减少电极间的浓差极化现象。所以电极间距较小时,电极间距内 Al^{3+} 浓度的分布较为均匀,有更多的 Al^{3+} 生成,并且电极间距越小反应能耗越低。

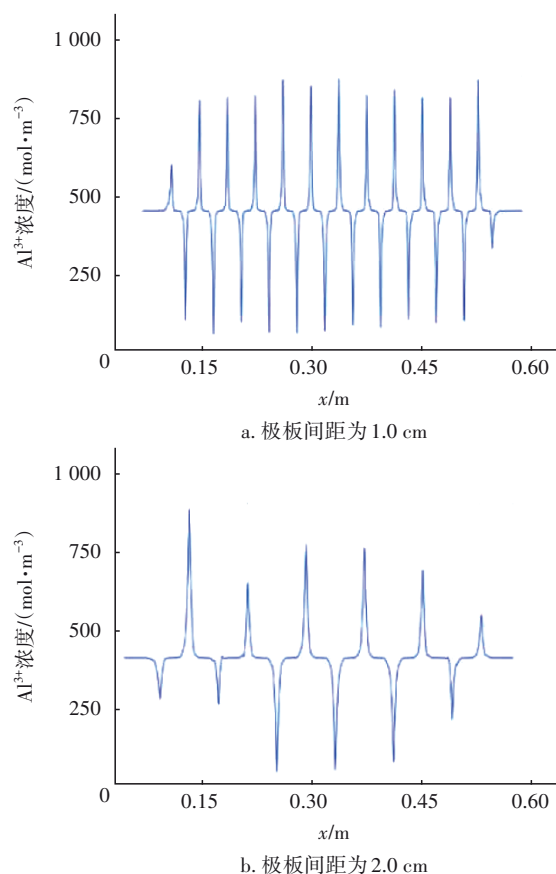


图7 不同电极间距下 Al^{3+} 浓度的变化

Fig.7 Change of Al^{3+} concentration with different electrode spacing

综上所述,使用间距为1.0 cm的电极有更好的流态,能产生更多的 Al^{3+} 提高絮凝效果。因此,确定电絮凝中试装置的电极间距为1.0 cm。

2.2 电絮凝中试装置对污染物的去除效果

2.2.1 对浊度的去除效果

电絮凝中试装置对浊度的去除效果如图8所示。可以看出,电絮凝对受污染地表水中浊度的去除率较高,经处理后出水浊度较为稳定。电絮凝装置对浊度的去除原理与传统混凝类似,即通过产生

的水解络合物的吸附、网捕等作用去除溶液中的疏水性胶体物质。当电流密度为 15 A/m^2 时,出水浊度可稳定在11 NTU左右,最高去除率达到44%;当电流密度为 25 A/m^2 时,出水浊度可稳定在8 NTU左右,最高去除率达到60%。但在进水浊度过低的条件下,电絮凝装置的处理效率较低,当进水浊度为7 NTU左右时,电絮凝装置对浊度的去除率几乎为零。这是因为进水浊度低时,水中悬浮颗粒物过于细小,无法形成较大的矾花,导致混凝效果较差。若需提升分离效果,可根据所需的出水浊度,设置后续处理工艺或增加沉淀池面积。

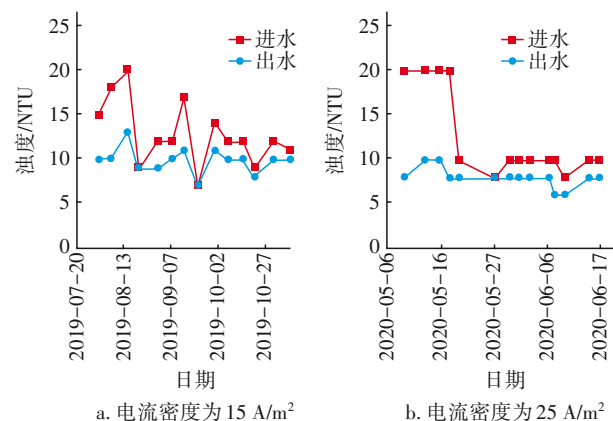


图8 电絮凝中试装置对浊度的去除效果

Fig.8 Removal effect of turbidity by electrocoagulation pilot device

2.2.2 对总磷的去除效果

电絮凝中试装置对总磷的去除效果如图9所示。可以看出,电絮凝中试装置对TP的去除效果较好,当电流密度为 15 A/m^2 时,出水TP浓度可以稳定在 0.30 mg/L 以下,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准;当电流密度为 25 A/m^2 时,出水TP浓度可稳定在 0.15 mg/L 以下。电絮凝除磷原理是典型的化学除磷过程,主要通过阳极产生的 Al^{3+} 和磷酸根反应生成难溶于水的磷酸盐而去除磷^[11]。因此,电解产生 Al^{3+} 的速率与TP的去除密切相关。电流密度是影响电絮凝除磷效果的主要因素之一,可决定阳极析出 Al^{3+} 的数量,进而影响絮凝剂的生成。中试运行过程中,当电流密度增大时,会增加单位时间电解出的阳离子,使产生的具有絮凝性质的胶团变多,因此去除效果也越好^[12-13]。在进水TP浓度为 0.33 mg/L 的条件下,当电流密度由 15 A/m^2 升高至 25 A/m^2 后,TP去除率由39.4%升

高至70.6%。

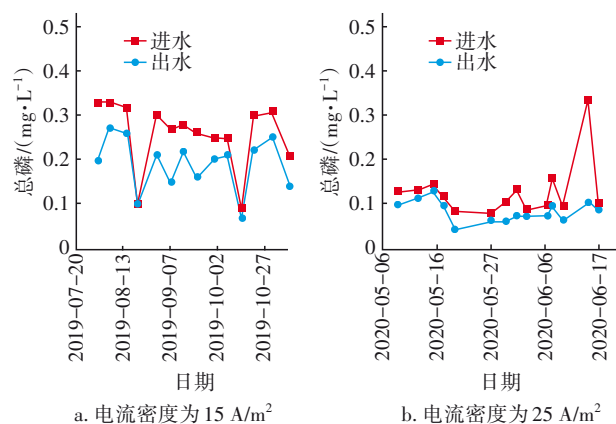


图9 电絮凝中试装置对总磷的去除效果
Fig.9 Removal effect of TP by electrocoagulation pilot device

2.2.3 对COD的去除效果

电絮凝中试装置对COD的去除效果如图10所示。

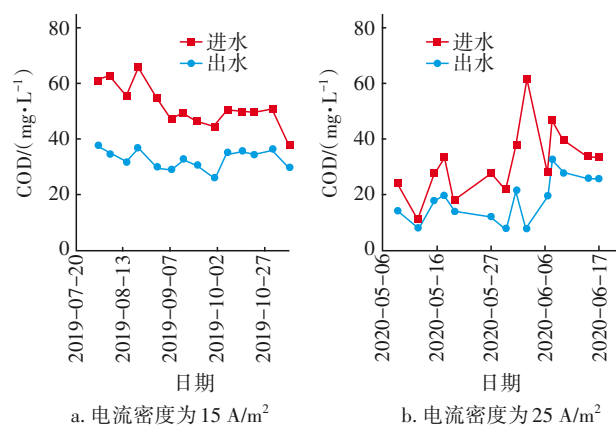


图10 电絮凝中试装置对COD的去除效果
Fig.10 Removal effect of COD by electrocoagulation pilot device

从图10可以看出,电絮凝中试装置对COD有稳定的去除效果。当电流密度为 15 A/m^2 时,出水COD浓度可稳定在 40 mg/L 以下,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅴ类水标准;当电流密度为 25 A/m^2 时,出水COD浓度基本稳定在 30 mg/L 以下,最高去除率达到90%。电絮凝装置对悬浮物(SS)与COD的去除具有较大的相关性,因此去除的COD主要是非溶解性COD,包括不溶于水的还原性无机物、有机物和疏水性的胶体物质等。当进水COD在 20 mg/L 以下时,电絮凝装置对COD的去除率显著下降。这是因为在进水COD浓度较低条件下,溶

液中可溶解性的污染物较多,一般难以通过混凝去除;而由于电絮凝槽的电压较低,电极氧化还原能力较弱,因此难以通过电化学氧化作用去除有机物,进而可溶性污染物难以通过电絮凝被去除^[14-15]。

2.2.4 对总氮和氨氮的去除效果

电絮凝中试装置对总氮和氨氮的去除效果如图11所示。

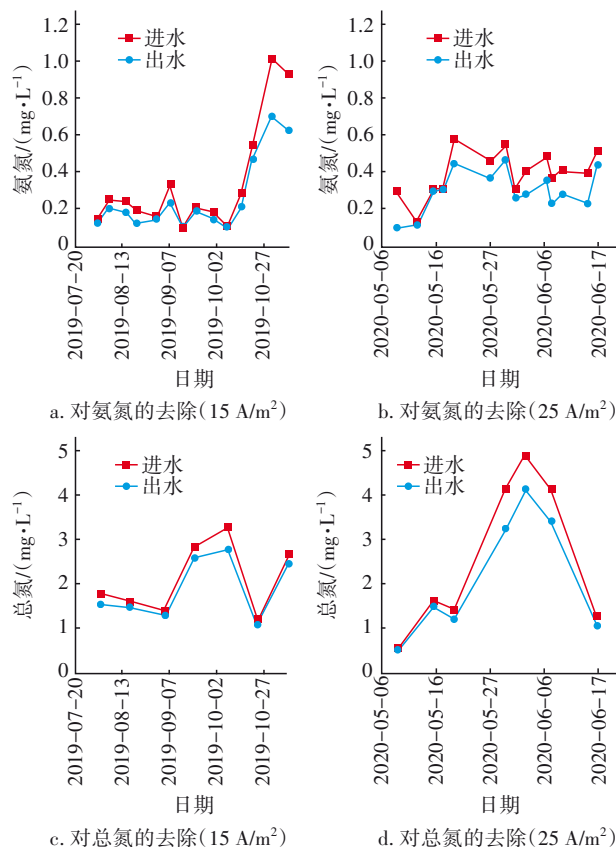


图11 电絮凝中试装置对氨氮和总氮的去除效果
Fig.11 Removal effect of $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN by electrocoagulation pilot device

由图11可知,当电流密度为 15 A/m^2 时,对氨氮和总氮的去除效果较差;当电流密度为 25 A/m^2 且进水氨氮和总氮较高时,装置的处理效果才会稍好,氨氮和总氮的去除率最高可分别达到42%和25%。水体中的氮包括各种有机和无机形态的含氮物质,主要有硝态氮、亚硝态氮、氨氮、氨基酸、有机胺等。水体中的氨氮污染,大部分是农业施加氮肥引起的^[16]。氨氮去除率达到42%后不再提升的原因是氨氮难以被絮体吸附,且由于电极电压较小,氧化能力不足以去除这部分物质^[17-18]。

2.2.5 三维荧光光谱分析

对装置进出水进行三维荧光光谱分析,结果如图12所示。从图12(a)可以看出,进水的峰主要出现在I、II、IV区,对应的污染物包括微生物代谢副产物、芳香类蛋白质、可溶性微生物、色氨酸等。从图12(b)可以看出,以上污染物出水峰值均有下降,可溶性微生物、微生物代谢副产物等小分子有机物残余较多,说明电絮凝能够有效去除污染物。

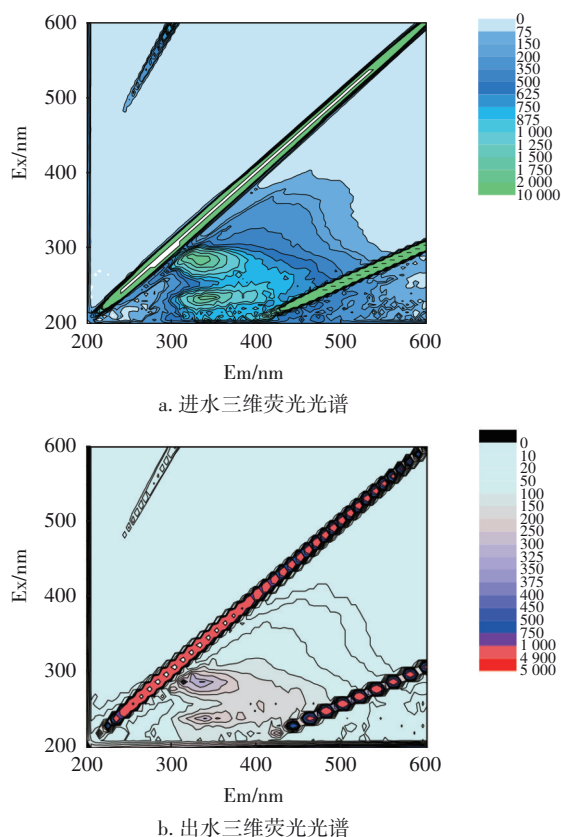


图12 进水和出水的三维荧光光谱

Fig.12 Three-dimensional fluorescence spectra of influent and effluent

3 结论

① 电极间距的改变会影响流体的流动状态,电极间距越大越容易在靠近电极处形成大而不规律的低速区,影响处理效率,但电极间距越大电流密度受浓差极化的影响越小。综合考虑,在处理受污染地表水的过程中,最佳电极间距为1.0 cm。

② 电絮凝装置对浊度、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP均有较稳定的去除效果,去除的有机物主要为微生物代谢副产物、芳香类蛋白质、可溶性微生物、色氨酸等。当电流密度为25 A/m^2 时,电絮凝装置大部分出

水水质指标可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水标准;当电流密度为15 A/m^2 时,大部分出水水质指标可达到Ⅳ类水标准。

参考文献:

- [1] 邸琰著. 北京市北运河主河道水质及排水量特征分析[J]. 水资源开发与管理, 2020(12):46-50,56.
DI Yanming. Analysis of water quality and discharge characteristics of the main channel of the North Canal in Beijing [J]. Water Resources Development and Management, 2020(12):46-50,56 (in Chinese).
- [2] XU T, ZHOU Y H, LEI X P, *et al.* Study on highly efficient Cr(VI) removal from wastewater by sinusoidal alternating current coagulation [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 249:10-19.
- [3] 黄永茂. 电絮凝- H_2O_2 氧化法处理邻苯二甲酸二甲酯废水的机理研究[J]. 化工环保, 2010, 30(4): 301-305.
HUANG Yongmao. Mechanism study on treatment of dimethyl phthalate wastewater by electrocoagulation- H_2O_2 oxidation process [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2010, 30(4): 301-305 (in Chinese).
- [4] 武道吉, 马军, 谭凤训, 等. 微砂强化混凝工艺处理微污染水库水研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21):47-49.
WU Daoji, MA Jun, TAN Fengxun, *et al.* Micro-sand enhanced coagulation for treatment of micro-polluted reservoir water [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(21):47-49 (in Chinese).
- [5] 陈明灿, 赵文学, 郭昌文, 等. 含油污水电絮凝净化装置室内外实验对比研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2019, 27(1):38-44.
CHEN Mingcan, ZHAO Wenxue, GUO Changwen, *et al.* Comparative study on indoor and outdoor experiments with an electrocoagulation purification device for oily sewage [J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2019, 27(1):38-44(in Chinese).
- [6] KHORRAM A G, FALLAH N. Treatment of textile dyeing factory wastewater by electrocoagulation with low sludge settling time: optimization of operating parameters by RSM [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018, 6(1): 635-642.
- [7] BILINSKA L, BLUS K, GMUREK M, *et al.* Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile

- wastewater reuse [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 358: 992–1001.
- [8] GOREN A Y, KOBAYASHI M, ONCEL M S. Arsenite removal from groundwater by aerated electrocoagulation reactor with Al ball electrodes: human health risk assessment[J]. Chemosphere, 2020, 251: 11–19.
- [9] 赵夏生, 崔兵, 徐舒宁, 等. 脉冲电絮凝处理电镀废水的工艺优化与应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(5): 85–90.
- ZHAO Xiasheng, CUI Bing, XU Shuning, *et al.* Optimization and application of pulse electrocoagulation process for electroplating wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(5): 85–90 (in Chinese).
- [10] 焦跃腾. 基于电絮凝水处理技术的微污染水体净化试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- JIAO Yueteng. Experimental Study on Treating Micro-polluted Water Based on Electrocoagulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 (in Chinese).
- [11] 虞少敏, 熊道文, 陈湘斌, 等. 周期换向电絮凝法用于处理含铬废水研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 118–122.
- YU Shaoqin, XIONG Daowen, CHEN Xiangbin, *et al.* Treatment of wastewater containing chromium with periodic reversal electrocoagulation [J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 118–122 (in Chinese).
- [12] 汤伟真, 李凤亭, 王家雷, 等. 污水处理厂出水的聚硅硫酸铝铁混凝除磷研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(4): 72–75, 83.
- TANG Weizhen, LI Fengting, WANG Jialei, *et al.* Study on phosphorus removal of effluent from municipal wastewater treatment plant by polyaluminum ferric sulfate silicate [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(4): 72–75, 83 (in Chinese).
- [13] MCBEATH S T, MOHSENI M, WILKINSON D P. Pilot-scale iron electrocoagulation treatment for natural organic matter removal[J]. Environmental Technology, 2020, 41(5): 577–585.
- [14] SNEHI S, SINGH H, PRIYA T, *et al.* Understanding the natural organic matter removal mechanism from mine and surface water through the electrocoagulation method [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2019, 68(7): 523–534.
- [15] KAC F U, KOBAYASHI M, GENGEK E. Removal of humic acid by fixed-bed electrocoagulation reactor: studies on modelling, adsorption kinetics and HPSEC analyses[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2017, 804: 199–211.
- [16] 居素伟, 万梅梁. 微生物接触氧化去除地表水氨氮的实用性研究[J]. 净水技术, 2018, 37(S1): 226–229.
- JU Suwei, WAN Meiliang. Practical study on removal of ammonia nitrogen from surface water by microbial contact oxidation [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(S1): 226–229 (in Chinese).
- [17] 郎林, 张浏, 朱艳, 等. 电絮凝法同步去除氨氮和磷的模拟试验[J]. 环境科学研究, 2013, 26(2): 181–187.
- LANG Lin, ZHANG Liu, ZHU Yan, *et al.* Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus by electrocoagulation process [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(2): 181–187 (in Chinese).
- [18] 梁增强. 京津冀典型城市环境污染特征、变化规律及影响机制对比分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- LIANG Zengqiang. Comparison of Environmental Pollution Characteristics Variation Law and Influence Mechanism of Typical Urban in Beijing–Tianjin–Hebei Region [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014 (in Chinese).

作者简介: 邸振华(1992–), 男, 山西吕梁人, 硕士, 主要研究方向为电化学和流态模拟等。

E-mail: 465390737@qq.com

收稿日期: 2021-06-06

修回日期: 2021-10-18

(编辑: 任莹莹)