

## 电絮凝工艺的毛纺废水深度处理效能影响及优化研究

吴佳华, 张国智, 张海峰, 施雪卿\*, 赵飞, 王羚

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 为了研究毛纺废水中生物处理后难降解化学需氧量(COD)和总氮(TN)强化处理问题, 利用电絮凝技术对毛纺废水进行深度处理, 通过操作条件优化及响应面法实验, 强化生物单元尾水中难降解的 COD 和 TN 的去除效能。结果表明, 使用铁电极、初始 pH 值为 6、电流密度大于  $35 \text{ mA/cm}^2$  更有利于电絮凝去除污染物, 反应时间 30~60 min 去除率较高且能耗合理。由响应面法分析, 在最佳条件下 COD 和 TN 去除率分别为 57.8% 和 19.4%, 实验验证证明模型预测良好。三维荧光光谱分析显示, 经过电絮凝后荧光强度明显减小, 进一步说明其对有机物的削减效果显著。

**关键词:** 电絮凝; 毛纺废水; 响应面分析

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)01-0096-07

## Efficiency effect and optimization of tertiary treatment of wool scouring wastewater in electrocoagulation process

WU Jiahua, ZHANG Guozhi, ZHANG Haifeng, SHI Xueqing\*, ZHAO Fei, WANG Ling

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** To study the enhanced treatment of refractory chemical oxygen demand (COD) and total nitrogen (TN) after biological treatment in wool scouring wastewater, electrocoagulation technology was used for tertiary treatment in this work. Through the optimization of operating conditions and the response surface method experiments, the removal efficiency of refractory COD and TN in the tailwater of biological units was improved. The results demonstrated that using iron electrodes, maintaining the initial pH of 6, utilizing a current density greater than  $35 \text{ mA/cm}^2$  were favorable conditions for the effective removal of contaminants through electrocoagulation; the rate of removal was significantly higher and the energy consumption was reasonable during a reaction period of 30 to 60 minutes. According to the analysis by response surface method, the removal rates of COD and TN were 57.8% and 19.4% respectively under optimal conditions. The verification experiment demonstrated that the model predicted accurately. Three dimensional fluorescence spectroscopy revealed a significant reduction in the fluorescence intensity after electrocoagulation, further exhibiting its substantial effect on reducing organic matter.

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE236)

作者简介: 吴佳华(1997—), 男, 山西晋中人。硕士, 研究方向为工业废水难降解有机污染物生物强化处理。

E-mail: 630610388@qq.com.

\* 通信作者: 施雪卿(1985—), 男, 浙江杭州人。博士, 教授, 主要从事工业废水难降解有机污染物生物强化处理方面的研究。

E-mail: shixq85@163.com.

**Key words:** electrocoagulation; wool scouring wastewater; response surface method

随着生活品质的提升,人们对羊毛制品的需求量日渐增加,但在羊毛加工过程中会产生大量废水,每吨净毛耗水量达到 25~35 t<sup>[1]</sup>。由于原毛本身携带的油脂、植草、粪便等杂质及加工中大量洗涤剂的使用,使毛纺废水呈现出成分复杂、污染物浓度高等特点,导致使用生化工艺处理毛纺废水时往往存在相当数量的化学需氧量 COD(Chemical Oxygen Demand)和总氮 TN(Total Nitrogen)难以被去除,需要进一步处理。因此,选择毛纺废水深度处理工艺提高效能,是处理毛纺废水时面临的重要问题。

深度处理方法包括物理化学过程和化学氧化过程。物理化学过程例如混凝沉淀<sup>[2]</sup>,氧化过程例如芬顿反应<sup>[3]</sup>和臭氧氧化反应<sup>[4]</sup>等。混凝沉淀处理成本低、管理方便,但污泥产生多,铝元素的大量残留与某些神经性疾病联系在一起<sup>[5]</sup>。芬顿反应氧化效果强、设备简单,但 pH 适用范围窄、过氧化氢利用率不高。臭氧氧化反应速度快,条件温和,不产生二次污染,但电能消耗多、运行成本高。

使用电絮凝的方法可以减缓上述这些不便,因为电絮凝工艺与其他电化学方法和化学絮凝相比,成本更低,操作更简单,产生的污泥更少<sup>[6-7]</sup>,已被广泛研究用于处理市政污水和工业废水。由于废水水质条件的变化和复杂程度不同,电絮凝处理废水的参数条件也常常会变化,因此优化电絮凝过程条件从而提高深度处理毛纺废水中难降解物质的效能值得深入研究。

本研究以某毛纺园区生化出水为研究对象,探讨电絮凝技术在深度处理中对毛纺废水难降解的 COD 和 TN 去除的效能提升和过程优化。通过不同工况条件对电絮凝工艺降解难降解物质的影响进行研究,并利用响应面分析法对电絮凝深度处理进行模型拟合及优化,提供一种毛纺废水难降解物质深度处理的技术解决方案。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 污水的来源与水质

研究中所采用的水样为山东某毛纺园区污水厂生化处理出水,废水主要经过“预处理+两段式 A/O”方式处理,生化出水中的可生物利用的有机物和氨氮已经被上述组合方式所处理,二级生化出水的水质情况即本研究中实验用水指标,如表 1 所示。

### 1.2 实验装置设置及分析方法

电絮凝装置由 1 个带显示屏的直流电源(0~30 V,0~6 A)、1 组电线、2 对铝或铁电极(4 cm×6 cm×1 mm)、1 个玻璃烧杯(300 mL)和 1 个磁力搅拌器构成。电絮凝实验是在室温(约 18~28 ℃)下进行的,磁力搅拌的速度大约为 200 r/min,每次实验用水的体积为 300 mL。实验前,电极用 1500 目砂纸打磨以消除氧化层。

实验中 COD 的测试方法为《快速消解分光光度法》(HJ/T 399—2007),TN 的测试方法为《碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)。固定时间间隔收集 3~5 mL 样品后取其上清液测试。

### 1.3 电絮凝单因素操作条件实验设置

电絮凝的主要影响因素有溶液的电导率、电极的材料、溶液的 pH 值、电流密度和反应时间等<sup>[8-9]</sup>。通常情况下,溶液的电导率高对电絮凝过程是十分有利的,由于本研究中电导率已经比较高,与电絮凝实验所需电导率十分契合,故不再讨论电导率对电絮凝效果的影响。为提升响应面法实验质量、降低实验组数,需要首先通过单因素操作条件实验来选取重要影响因素和经济条件。

### 1.4 响应面法优化实验设置

响应面法(Response Surface Method, RSM),是一种通过实验设计和数学模型优化寻找响应最优值

表 1 毛纺园区生化出水水质指标

水质指标	数值范围	平均值
pH	7.8~8.3	8.2
电导率/(mS·cm <sup>-1</sup> )	10.6~11.9	—
总悬浮固体/(mg·L <sup>-1</sup> )	246~430	—
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	320~600	468
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	5.1~21.3	14.1
亚硝态氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	<1	—
硝态氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	27~46	43
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	47~65	53
氯化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	1793	—
硫酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	480	—
氟化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.3	—
颜色	棕黄色	—

和对应条件的方法,可以实现实验的改进和优化<sup>[10]</sup>,其中中心复合设计为响应面法的一种实验设计。使用软件 Design-Expert 13 进行电絮凝工艺的统计和优化,采用中心复合设计来构建模型。根据单因素实验结果,中心复合设计实验以初始 pH 值、电流密度和反应时间为影响因子,COD 为响应值,进行响应面分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电絮凝单因素操作条件优化

为了了解电絮凝运行效果的主要影响因素,考察了电极材料、初始 pH 值、电流密度、反应时间对污染物去除效果的影响,确定较优水平区间进行响应面分析。

1) 对比不同电絮凝电极材料对生化出水中 COD 和 TN 的去除效果的影响。如图 1 所示,在电流密度为  $20 \text{ mA/cm}^2$  的条件下,使用铁电极的 COD 去除率在 20 和 60 min 分别为 35.0% 和 46.9%,而使用铝电极在 20 和 60 min 分别为 33.0% 和 45.9%,两种电极对 COD 的去除效果影响不大,同理 TN 去除效果也相似。从成本角度分析,选择较为廉价的铁电极更经济。而且,铁电极产生的絮体与铝电极相比,颗粒小、密实、沉降速度快<sup>[11]</sup>。因此,选择铁电极进行后续响应面优化更为合适。

2) 考察初始 pH 值对电絮凝工艺处理过程中出水效果的影响。如图 2 所示,在初始  $\text{pH}=3\sim 6$  时,COD、TN 的去除率随 pH 的增大而增大,在  $\text{pH}=6$  时污染物的 COD 去除率达到最大值,为 45.0%, $\text{pH}>6$  时,去除率呈下降的趋势。由于  $\text{pH}<3$  的水中铁元素主要存在形态为  $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{pH}=3\sim 4$  时主要为  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,中性条件为  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , $\text{pH}>9.5$  时为  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ <sup>[12]</sup>,所以  $\text{pH}=6$  左右电性中和及絮凝作用发生概率高,处理效果好。因此,选择初始  $\text{pH}=5,6,7$  为响应面法优化因素水平。

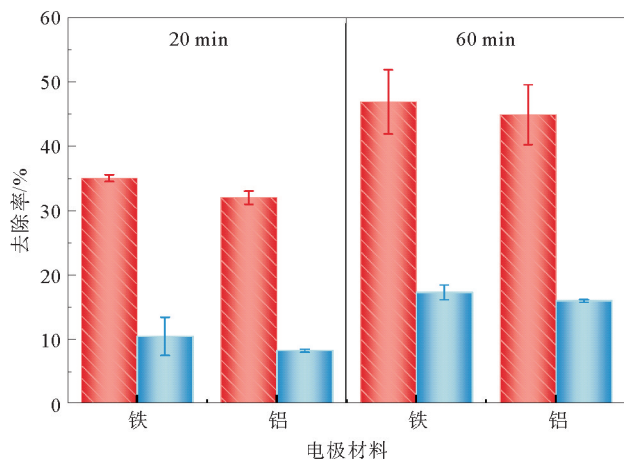


图 1 不同电极材料对去除 COD 及 TN 的影响  
■ COD; ■ TN

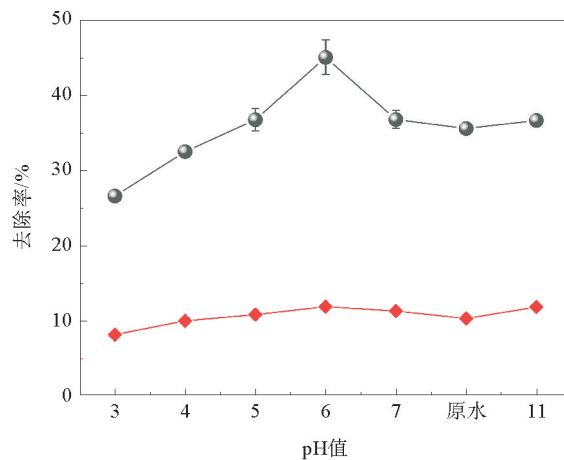


图 2 初始 pH 变化对去除 COD 及 TN 的影响  
—●— COD; —◆— TN

3) 初步考察了  $10, 20, 35, 60, 85 \text{ mA/cm}^2$  电流密度下电絮凝工艺对 COD 和 TN 的去除效果。如图 3 所示,随电流密度的增大 COD 和 TN 的去除率不断增加,当电流密度为  $85 \text{ mA/cm}^2$  时 COD 去除率最高可达 56.7%,电流密度为 60 和  $85 \text{ mA/cm}^2$  时 TN 的去除率在 20 min 后超过 20%。电流密度的增加会促进电极离子的释放,加快体系中絮体的产生,使得污染物的去除效果更好。值得注意的是,过高的电流密度可能会造成电极的钝化和极化现象,影响电絮凝效果。电流密度过大也会增加耗电量,造成不必要的能量浪费,所以在后续实验中需选择合适的电流密度范围。因此,后续响应面分析选择电流密度为 20、35、 $50 \text{ mA/cm}^2$ 。

从图 3 中还可以看出,反应时间对去除效果也有较大的影响,低电流密度(如  $20 \text{ mA/cm}^2$ )比高电流密度(如  $85 \text{ mA/cm}^2$ )受反应时间影响更大,在 30 min 后不同电流密度下 COD 去除率均较高,但时间过长又会徒增能耗(如 60 min 后),因此后续响应面法优化也考虑反应时间的影响,根据去除率与能耗考量选择 20、40、60 min 为响应面法优化因素水平。

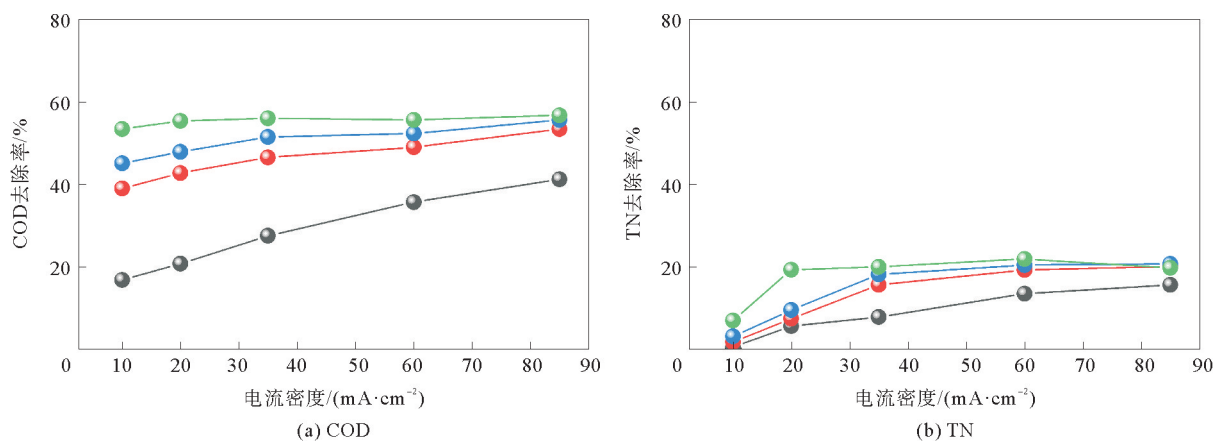


图 3 不同电流密度和反应时间对去除COD及TN的影响  
 —●— 10 min; —●— 20 min; —●— 30 min; —●— 60 min

2.2 响应面法实验结果及方差计算

在影响因素探究的基础上,进行响应面法中心复合设计分析,以初始 pH 值、电流密度、反应时间为实验因素,不同水平的中心复合设计实验因素水平编码如表 2 所示。根据表 2 的实验因素水平编码,以

表 2 实验因素水平编码

水平	初始 pH 值	电流密度/(mA · cm <sup>-2</sup> )	反应时间/min
-1	5	20	20
0	6	35	40
+1	7	50	60

COD、TN 的去除率为响应值,设计并进行了 20 组实验,得到结果如表 3 所示。

表 3 响应面法实验设计与实验结果

实验编号	初始 pH 值	电流密度/(mA · cm <sup>-2</sup> )	反应时间/min	COD 去除率/%	TN 去除率/%
1	7.0	20.0	20.0	32.8	6.3
2	5.0	20.0	20.0	28.7	7.4
3	4.3	35.0	40.0	51.1	16.8
4	6.0	35.0	73.6	60.5	20.5
5	6.0	35.0	40.0	56.6	18.4
6	6.0	35.0	40.0	56.6	19.4
7	6.0	35.0	40.0	58.1	20.2
8	5.0	20.0	60.0	54.2	18.4
9	6.0	60.2	40.0	58.3	20.6
10	7.0	50.0	20.0	38.8	15.3
11	6.0	9.8	40.0	46.6	6.8
12	5.0	50.0	60.0	55.0	18.7
13	7.7	35.0	40.0	53.3	16.9
14	6.0	35.0	40.0	58.1	17.5
15	6.0	35.0	40.0	55.5	19.8
16	6.0	35.0	40.0	63.5	21.2
17	6.0	35.0	6.4	14.8	5.4
18	7.0	50.0	60.0	56.6	19.6
19	5.0	50.0	20.0	39.3	10.9
20	7.0	20.0	60.0	52.5	17.4

根据中心复合法设计实验分析,以初始 pH 值、电流密度、反应时间为实验因素,COD、TN 的去除率为响应值,得到以下 2 个回归方程:

$$Y_{\text{COD}} = -123.223900 + 31.871230 \times A + 1.208240 \times B + 2.405370 \times C - 0.010250 \times A \times B - 0.022813 \times A \times C - 0.004862 \times B \times C - 2.506490 \times A^2 - 0.010724 \times B^2 - 0.019113 \times C^2 \quad (1)$$

$$Y_{\text{TN}} = -47.421840 + 10.028360 \times A + 0.494411 \times B + 0.995065 \times C + 0.061502 \times A \times B - 0.020847 \times A \times C - 0.004208 \times B \times C - 0.926053 \times A^2 - 0.007501 \times B^2 - 0.006217 \times C^2 \quad (2)$$

式中: $A$  为初始 pH 值; $B$  为电流密度,  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ;  $C$  为反应时间,  $\text{min}$ 。

对上述模型进行方差分析,模型的  $p$  值均小于 0.0001,远小于 0.01,说明模型显著。2 个模型的失拟项分别为 0.2801 和 0.3669,均大于 0.05,表示模型失拟性不显著,拟合良好。因此可以用式(1)、式(2)来分析预测初始 pH 值、电流密度、反应时间对 COD 和 TN 去除率的影响。

COD、TN 的去除率模型决定系数  $R^2$  分别为 0.9625、0.9610,表明去除率模型能够解释 96.3%、96.1% 的变异。校正拟合系数  $R^2_{\text{fitting}}$  分别为 0.9288 和 0.9259,预测系数  $R^2_{\text{Predicted}}$  分别为 0.7957 和 0.7999,校正拟合系数和预测系数的差值小于 0.2,说明模型拟合良好,可用于后续实验的继续优化。

### 2.3 响应面分析

基于中心复合设计的响应面实验分析,分别将初始 pH 值、电流密度和反应时间 3 个因素的中心值代入回归方程(式(1)、式(2)),绘制两因素交互作用的三维曲面和等高线,考察交互作用对响应值的影响,如图 4 所示。

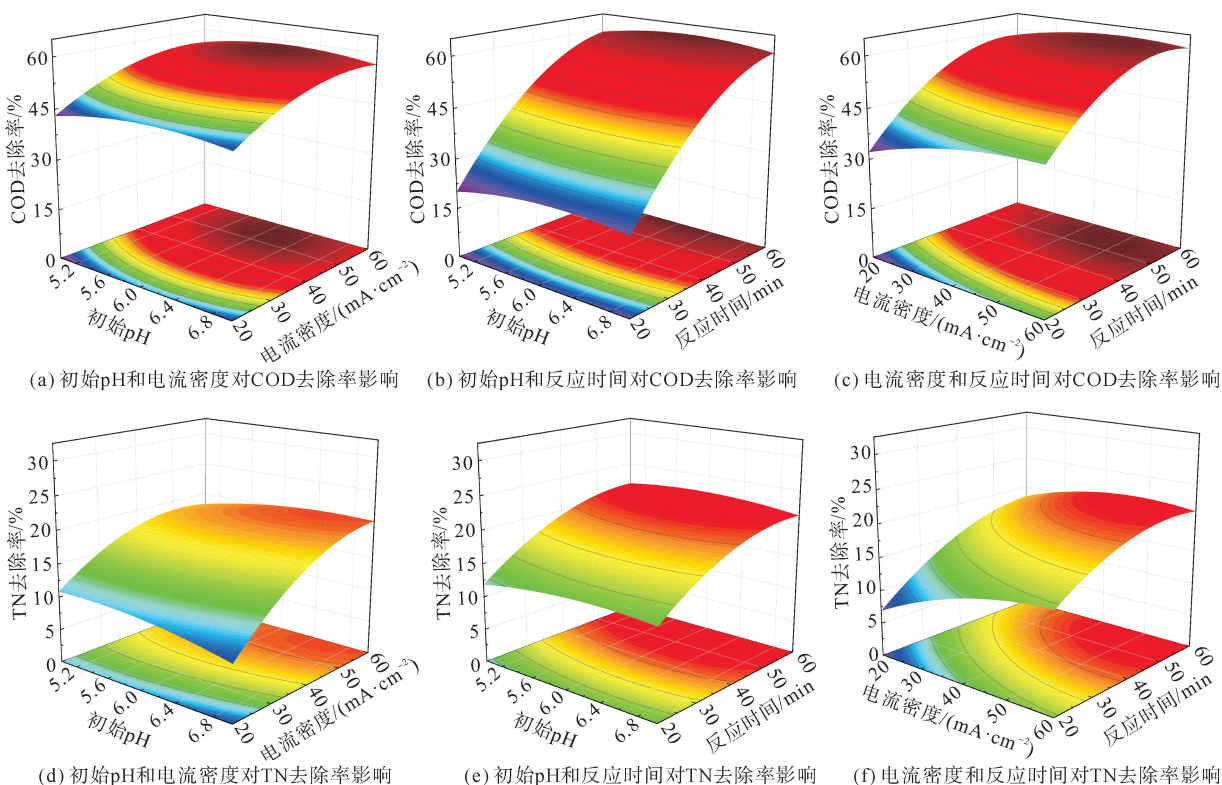


图 4 不同因素交互作用响应面

根据响应面曲线法的相关理论可知,等高线呈圆形表示各个因素之间交互作用不明显,若形状呈椭圆形,颜色越深,则交互作用越显著<sup>[13-15]</sup>。由图 4(a)(d)可知初始 pH 值和电流密度之间交互作用对 COD 和 TN 的去除影响不显著,说明初始 pH 值和电流密度的关联度较弱。由图 4(b)(e)可知初始 pH 值和反应时间之间交互作用对 COD 和 TN 的去除影响不显著,说明初始 pH 值和反应时间的关联度较弱。由图 4(c)(f)可知电流密度和反应时间之间的等高线偏向椭圆状,可以认为电流密度和反应时间之间交互作用

对 COD 和 TN 的去除影响相对显著,说明电流密度和反应时间交互作用对 COD 和 TN 的去除影响较大。

使用 Design-Expert13 软件预测最优值,选择初始 pH 为 5~7,电流密度为 20~50 mA/cm<sup>2</sup>,反应时间为 20~60 min,得到在初始 pH 值为 6.6,电流密度为 35.6 mA/cm<sup>2</sup>,反应时间为 40.5 min 时,COD 和 TN 去除率最优值分别为 57.8%和 19.4%。

在响应面法优化后的条件下进行验证实验,COD 和 TN 的去除率分别为 57.6%、18.3%,接近模型预测值。另外,电絮凝工艺也降低了大量的色度和总悬浮物浓度,电絮凝后铂钴色度由 493 降到 80 PCU,降低了 83.8%,总悬浮物浓度由 276 mg/L 降低到 14 mg/L,减少了 94.9%。

## 2.4 三维荧光光谱分析

取电絮凝实验进水、反应第 10 分钟和第 40 分钟静置上清液进行三维荧光光谱分析,如图 5 所示。结果显示,进水中存在 A、B 两个荧光峰,峰 A 为激发波长  $E_x=350\sim 375$  nm、发射波长  $E_m=380\sim 415$  nm,峰 B 为  $E_x=280$  nm、 $E_m=380\sim 410$  nm,均在腐殖酸类物质区域。图 5(b)中的 C 峰  $E_x=245$  nm、 $E_m=380\sim 410$  nm,属于富里酸区域,通过查阅文献,C 峰的物质可能为含有 3~5 个芳环的富里酸类物质,比如菲、茈、芫茈和呋喃等<sup>[16]</sup>。对比图 5(a)(b),A 峰面积减小,B 峰面积增加,出现 C 峰,A 峰物质向 B 和 C 峰物质转化。由于电絮凝电性中和、网捕卷扫和吸附架桥不会改变物质结构,说明电絮凝初期有自由基发生氧化作用,将部分的腐殖酸类物质转化为富里酸物质,部分大分子有机物向小分子转化。由图 5(c)可知,当反应进行完全时,荧光区域的面积和荧光强度减小,利用荧光区域积分计算可得电絮凝前后三维荧光光谱体积减小了 50.2%,说明电絮凝过程有效减少了毛纺废水生化尾水中难降解有机物的浓度。

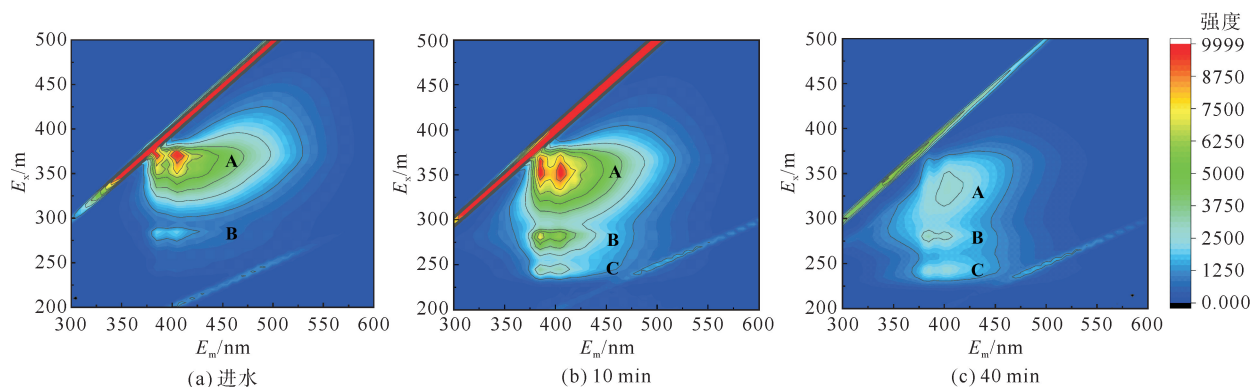


图 5 三维荧光光谱

## 3 结论

本研究通过操作条件优化及响应面法实验探讨了电絮凝技术对毛纺废水中深度处理难降解的 COD 和 TN 的效能提升和过程优化。在单因素操作条件优化实验时因经济性和处理效果选择铁作为后续实验电极材料;单因素条件优化实验发现初始 pH 值、电流密度、反应时间对污染物去除效果的影响较大,在初始 pH 值、电流密度、反应时间的条件分别为 pH=6、大于 35 mA/cm<sup>2</sup>、30~60 min 时去除率较高且能耗合理。在通过回归模型确定的最佳实验条件下,COD 去除率和 TN 去除率最优值为 57.8%和 19.4%,同时色度降低了 83.8%,总悬浮物减少了 94.9%。三维荧光光谱分析表明,经过电絮凝后荧光强度明显减小,体积减小了 50.2%,更加证实电絮凝对毛纺废水中有机物的处理效果显著。

### 参考文献 (References):

- [1] 杜仰民,马华继,张建民,等. 洗毛废水处理与资源回收利用[J]. 工业水处理,2000,20(7):16-18.  
DU Yangmin, MA Huaji, ZHANG Jianmin, et al. Treatment of wool scoring effluent and lanolin recovery[J]. Industrial Water Treatment, 2000, 20(7): 16-18.
- [2] WANG Dan, GUO Fang, WU Yihui, et al. Technical, economic and environmental assessment of coagulation/filtration tertiary treatment processes in full-scale wastewater treatment plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 1185-1194.

- [3] AZIZI A, ALAVI M M R, MAKNOON R, et al. Innovative combined technique for high concentration of azo dye AR18 wastewater treatment using modified SBR and enhanced Fenton process as post treatment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 95: 255-264.
- [4] CLEM V, DE MENDONÇA H V. Ozone reactor combined with ultrafiltration membrane; A new tertiary wastewater treatment system for reuse purpose[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315: 115166.
- [5] THE C Y, BUDIMAN P M, SHAK K P Y, et al. Recent advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(16): 4363-4389.
- [6] FERNANDES A, PACHECO M J, CIRIACO L, et al. Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates; Present and future[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 176/177: 183-200.
- [7] PAPADOPOULOS K P, ARGYRIOU R, ECONOMOU C N, et al. Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237: 442-448.
- [8] 刘宗, 唐佳伟, 张春晖, 等. 电絮凝法去除水中微量叔丁醇的研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 122-130.  
LIU Zong, TANG Jiawei, ZHANG Chunhui, et al. Removal of trace tert-butyl alcohol (TBA) in aqueous solution by electrocoagulation[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1): 122-130.
- [9] 周杰, 宋小三, 王三反. 水处理电絮凝技术的研究进展与挑战[J]. *化工进展*, 2020, 39(S2): 329-335.  
ZHOU Jie, SONG Xiaosan, WANG Sanfan. Research progress and challenge of electrocoagulation technology in water treatment[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(S2): 329-335.
- [10] 李琳琳, 刘长青, 乔春蕾, 等. 利用 RSM 对大宗固体废弃物烧制陶粒优化及其对水中砷的吸附[J]. *青岛理工大学学报*, 2020, 41(3): 75-81.  
LI Linlin, LIU Changqing, QIAO Chunlei, et al. Optimization of bulk solid waste sintered ceramsite by RSM and its adsorption of arsenic in water[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2020, 41(3): 75-81.
- [11] 张峰振, 杨波, 张鸿, 等. 电絮凝法进行废水处理的研究进展[J]. *工业水处理*, 2012, 32(12): 11-16.  
ZHANG Fengzhen, YANG Bo, ZHANG Hong, et al. Wastewater treatment using electrocoagulation technology: A review[J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, 32(12): 11-16.
- [12] SYAM B D, ANANTHA S S, NIDHEESH P V, et al. Industrial wastewater treatment by electrocoagulation process[J]. *Separation Science and Technology*, 2020, 55: 3195-3227.
- [13] GAUTAM P, KUMAR S, VISHWAKARMA S, et al. Synergistic optimization of electrocoagulation process parameters using response surface methodology for treatment of hazardous waste landfill leachate[J]. *Chemosphere*, 2022, 290: 133255.
- [14] 王利平, 李祥梅, 沈肖龙, 等. 响应面方法优化 Fenton 试剂处理甲萘酚废水[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(4): 1797-1802.  
WANG Liping, LI Xiangmei, SHEN Xiaolong, et al. Optimization of 1-naphthol wastewater treatment by Fenton reagent using response surface methodology[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(4): 1797-1802.
- [15] 田立江, 李杰, 王艳芳, 等. Fenton 体系氧化降解气相苯的研究[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(4): 1393-1398.  
TIAN Lijiang, LI Jie, WANG Yanfang, et al. Oxidative degradation of gaseous benzene by Fenton reagent[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(4): 1393-1398.
- [16] WEI Jian, SONG Yonghui, TU Xiang, et al. Pretreatment of dry-spun acrylic fiber manufacturing wastewater by Fenton process: Optimization, kinetics and mechanisms[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 218: 319-326.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)