

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2401045

## 电化学氧化法处理污水厂二级出水研究

李兆阳<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 李诚<sup>2</sup>, 王少坡<sup>1</sup>

(1. 天津城建大学, 天津 300384; 2. 天津市华博水务有限公司, 天津 300040)

**摘要:** 为了确定电化学氧化法对城镇污水处理厂二级出水的处理效果, 采用间歇式反应器, 以 COD、氨氮、总氮为主要考察指标, 对比了钌-石墨、钌-钛-石墨两种电极板的去除性能; 分析了氨氮、COD 的去除机理。结果表明: 以氨氮为去除目标时, 利用正交实验得到了去除氨氮的优化运行条件为 pH = 6.0, 电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup>, 极板间距 = 1.0 cm, 氯化物浓度为 2 000 mg/L, 反应时间为 50 min, 90% 以上的氨氮以氮气的形式被去除; 以 COD 去除率为考察目标时, 优化运行条件为 pH = 7.0, 电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup>, 极板间距为 1.0 cm, 氯化物浓度为 1 500 mg/L, 反应时间为 50 min; 优化条件下运行时, 氨氮去除率可达 99.0% 以上, COD 去除率为 41.1%; 三维荧光分析发现, 水中有机物荧光强度有明显下降。

**关键词:** 电化学氧化; 正交实验; 二级出水; 钌钛电极; 三维荧光光谱

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 2095-719X(2024)01-0045-07

### Research on the Treatment of Secondary Effluent from Wastewater Treatment Plant by Electrocatalytic Oxidation

LI Zhaoyang<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, WANG Shaopo<sup>1</sup>

(1. Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Huabo Water Limited Company, Tianjin 300040, China)

**Abstract:** In order to determine the effect of electrochemical oxidation on the secondary effluent of urban sewage treatment plant, a batch reactor was used, and COD, ammonia nitrogen and total nitrogen were taken as the main indicators. The removal performance of Ti/RuO<sub>2</sub> graphite and Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> graphite electrode plates was compared, and the removal mechanism of ammonia nitrogen and COD was analyzed. The results show that when ammonia nitrogen is taken as the removal target, the optimal operating conditions for removing ammonia nitrogen are obtained by orthogonal experiment as follows: current density of 10 mA/cm<sup>2</sup>, pH = 6.0, plate spacing = 1.0 cm, chloride concentration of 2 000 mg/L, and reaction time of 50 min. More than 90% of ammonia nitrogen is removed in the form of nitrogen. The optimal operating conditions for COD removal are as follows: pH = 7.0, current density of 10 mA/cm<sup>2</sup>, plate spacing of 1.0 cm, chloride concentration of 1 500 mg/L and reaction time of 50 min. Under the optimized conditions, the removal rate of ammonia nitrogen and COD can reach 99.0% and 41.1% respectively. Three dimensional fluorescence analysis showed that the fluorescence intensity of organic matter in water decreased significantly.

**Key words:** electrochemical oxidation; orthogonal experiment; secondary effluent; Ti/RuO<sub>2</sub> electrode; three dimensional fluorescence spectras

城镇污水处理厂二级出水中往往含有部分难生物降解有机物<sup>[1]</sup>, 尤其在一些原水中工业废水掺杂比例较高的污水处理厂, 其出水 COD 和氨氮往往难以达到现行标准。随着人们生活水平的提高, 污水厂中经过生物处理的二级出水中残留一定量的难降解 COD, 若直接排放至受纳水体, 会严重破坏生态环境, 危害

人体健康<sup>[2]</sup>。氨氮的超标排放会造成水体富营养化, 同时对水体中的鱼类及其他生物具有较大的毒害作用<sup>[3]</sup>。因此, 对于城镇污水的二级出水采用深度处理, 并进一步降低污染物浓度至关重要。

电化学氧化技术被称为“环境友好型技术”<sup>[4-5]</sup>, 近年来以其操作简便、灵活可控、适用范围广且无需外

收稿日期: 2022-01-24; 修订日期: 2022-05-06

作者简介: 李兆阳(1998—), 男, 河北保定人, 天津城建大学硕士生。

通讯作者: 王少坡(1975—), 男, 教授, 博士, 从事水污染控制研究。E-mail: wspf@sina.com

加试剂<sup>9</sup>等诸多优点逐渐成为水污染处理领域的研究热点. 其技术原理为: 以具有催化活性的极板作为阳极, 通过外加电压的作用产生羟基自由基<sup>7</sup>, 羟基自由基一方面可在极板表面与目标污染物直接发生反应, 另一方面系统内还会产生次氯酸、臭氧<sup>8</sup>等具有强氧化性的中间物质对污染物进行间接氧化. 目前, 电化学氧化技术作为预处理工艺对医药、纺织、染料、焦化等废水的处理研究较多, 作为深度处理工艺对城镇污水厂二级出水的处理研究和报道相对较少.

为了确定电化学氧化技术对城镇污水厂二级出水中 COD 和氨氮的去除效果, 本研究模拟了天津市某污水处理厂二级出水, 建立小试装置, 利用正交实验以得到最优电化学氧化运行参数. 同时, 借助三维荧光分析处理前后二级出水的污染物变化, 来分析电化学氧化技术对二级出水中污染物的去除机理, 以期为电化学氧化技术在污水厂二级出水深度处理方面的研究和应用提供支持.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验装置

实验装置采用间歇式反应器, 主要包括: 有机玻璃反应器(尺寸为 15 cm × 20 cm × 13 cm, 有效容积为 3 L), 钎钛、钎铍、石墨电极板(极板面积为 30 cm × 8 cm, 厚 2 mm, 浸入水中的面积为 80.0 cm<sup>2</sup>), 磁力搅拌器(型号 MS-H-S, 上海大龙), 直流稳压电源(TPR3010S, 深圳市安泰信科技有限公司)四部分, 装置如图 1 所示.

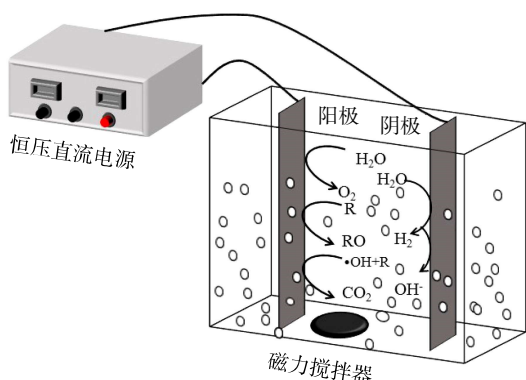


图 1 间歇式电化学氧化装置示意

### 1.2 实验步骤及检测指标

#### 1.2.1 极板对比实验

分别以钎铍和钎钛电极作为阳极, 石墨电极作为阴极, 以去离子水作为溶剂, 添加腐殖酸、氯化铵及磷

酸二氢钾, 分别提供 COD 73.2 mg/L、氨氮 32.0 mg/L 及总磷 0.4 mg/L. 设置电流密度为 6 mA/cm<sup>2</sup>, 极板间距为 2.0 cm, 调节 pH 值为 7.0. 添加 1 000 mg/L 氯化钠作为支持电解质, 调节磁力搅拌转速达到 250 r/min, 反应时间为 1 h. 水样经 0.45 μm 滤膜过滤后进行检测, 对比两种电极板对目标污染物的去除效果, 进而选取后续实验所用电极.

#### 1.2.2 氨氮转化过程分析

以钎钛电极为阳极, 石墨电极为阴极, 以去离子水作为溶剂, 溶液中添加氯化铵提供氨氮, 氨氮浓度为 30.0 mg/L. 另外添加浓度为 1 000 mg/L 的氯化钠作为支持电解质, 设置电流密度为 6 mA/cm<sup>2</sup>, 极板间距为 2.0 cm, 调节 pH 值为 7.0, 反应时间为 2 h, 调节磁力搅拌转速为 250 r/min. 水样经 0.45 μm 滤膜过滤后进行检测以此探究氨氮的转化过程.

#### 1.2.3 钎钛电极正交实验

对钎钛电极设计正交实验, 调节磁力搅拌转速为 250 r/min, 水样经 0.45 μm 滤膜过滤后进行检测, 确定氨氮及 COD 的优化去除参数.

#### 1.2.4 三维荧光测定

利用三维荧光技术对二级出水降解前后进行分析, 其参数设定为: 激发波长 Ex 为 200~450 nm; 发射波长 Em 为 200~550 nm; 狭缝宽带 Ex = 5 nm、Em = 5 nm; 步长为 10 nm; 扫描速度为 1 200 nm/min; 在 1 cm 石英荧光比色皿中测定.

#### 1.2.5 实验检测指标

pH、COD、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮及总磷, 总氮用硝酸盐氮、亚硝酸盐氮及氨氮之和表示. 除 COD 采用快速消解分光光度法外, 其余指标均采用国标法进行检测, 检测方法及其所用仪器见表 1.

表 1 检测设备名称及型号

检测指标	检测方法	仪器型号	生产厂家
pH	WTW 快速测定法	WTW 快速测定仪	德国 WTW
COD	快速消解分光光度法	DRB200、DR1900	美国哈希
氨氮	那氏试剂分光光度法	TU-1810 紫外可见分光光度计	北京普析
硝酸盐氮	紫外分光光度法	TU-1810 紫外可见分光光度计	北京普析
亚硝酸盐氮	分光光度法	TU-1810 紫外可见分光光度计	北京普析
总磷	钼酸铵分光光度法	TU-1810 紫外可见分光光度计	北京普析
三维荧光	荧光分光光度计	LS55	美国 PE

## 2 结果与讨论

### 2.1 极板对比实验

电极材料作为电化学氧化系统的核心,直接决定了污染物的降解效果.通常可将阳极分为活性阳极和非活性阳极.在 $\cdot\text{OH}$ 的作用下,活性阳极可通过自身化合价的升高使其本身具有氧化性,可直接与污染物进行反应,非活性阳极极板本身不直接参与污染物的降解反应.因此,活性电极相比于非活性电极的氧化方式更为广泛.本研究中所采用的两种电极均为活性电极,实验结果如图2所示.

由图2a可以看出:1 h反应时间内,COD浓度总体呈现下降的趋势,钌钛电极在40 min时对COD的去除率最高,为34.2%;钌铌电极在50 min时对COD的去除率最高,为27.9%;因此对去除COD来说钌钛电极优于钌铌电极.但不论使用哪种电极板,在反应40 min左右时COD浓度均出现了上下波动现象.由图2b可以看出:钌钛电极对氨氮的去除率为31.5%;钌铌电极对氨氮的去除率为38.7%.由图2c可以看出:

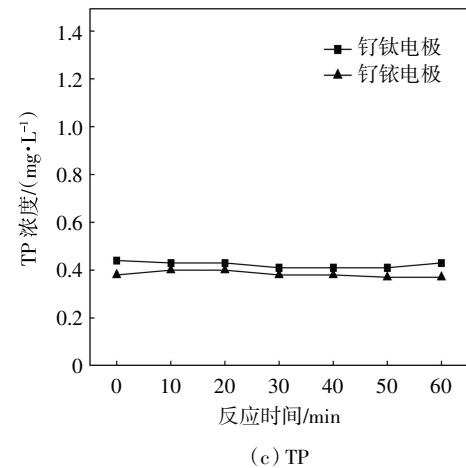
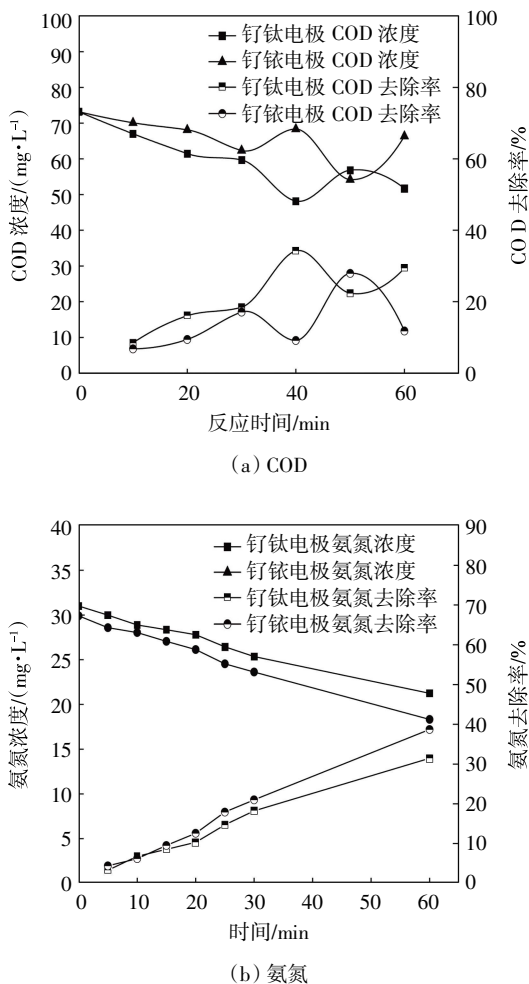


图2 两种极板材料下COD、氨氮、TP的去除情况

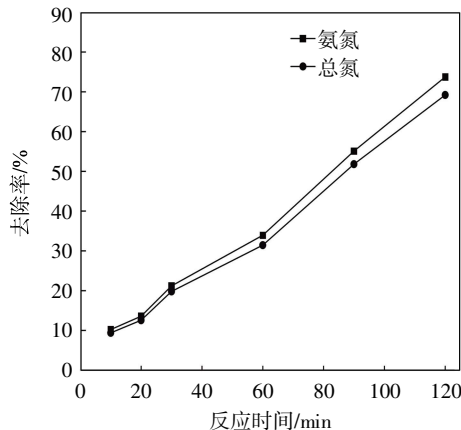
两种电极板对TP无明显去除效果;该实验水质中没有金属离子并且实验过程中两种极板无明显溶解现象,没有形成羟基配合物;因此磷酸盐不能被吸附去除.

分析认为,极板通电以后,在磁力转子的作用下,污水不断与极板碰撞接触,使得有机物在阳极表面通过直接氧化或羟基自由基的间接氧化作用被降解.对于腐殖酸模拟有机废水来说,钌钛电极的去除效果优于钌铌电极.钌钛电极采用热分解法制备,相较于钌铌电极,钌钛电极在加热过程中基体和涂层热膨胀系数不同,在热应力的作用下产生了裂缝,比表面积更大,可提供的活性位点更多.腐殖酸在电化学氧化作用下转化成小分子物质导致COD浓度短暂升高,COD去除率不高推测是在电化学氧化过程中腐殖酸等大分子物质降解为小分子物质,但是电化学氧化作用对中间产物小分子物质去除效果不佳,这与Qingqing Zhou等<sup>[9]</sup>得出的结论一致.

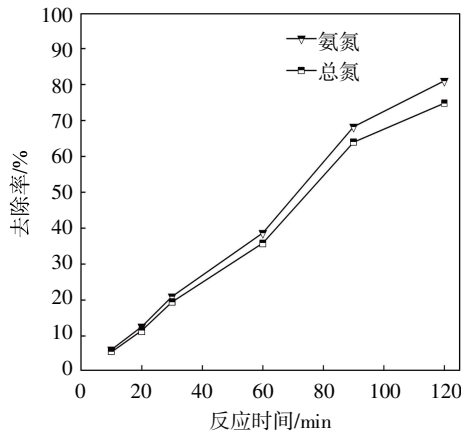
### 2.2 氨氮的转化过程

两种电极板都能够将氨氮氧化去除,氧化产物是硝酸盐氮.阳极进行氧化的同时,阴极也在进行还原反应,胡筱敏等<sup>[10]</sup>研究发现,利用电化学氧化技术处理硝酸盐氮废水时,一定条件下副产物大部分为氨氮.此时,只是发生了氮形态的转变,并未从根本上去除硝酸盐氮,因此总氮去除率较低.为进一步明确电化学氧化过程中氨氮的转化过程,溶液中只添加氯化铵及氯化钠,反应时间为2 h,期间每隔10 min取样进行检测,实验结果如图3所示.

0~120 min内,两种电极板对氨氮的去除率均不断升高,反应结束后,钌钛电极对氨氮的去除率为73.8%,对总氮的去除率为69.2%;钌铌电极对氨氮的去除率为81.0%,对总氮的去除率为74.8%.因此,无论是钌钛



(a) 钨钛电极



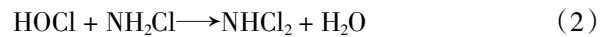
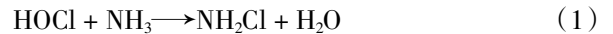
(b) 钨钨电极

图3 钨钛电极、钨钨电极氨氮和总氮的关系

电极板还是钨钨电极, 最终都有 90.0% 以上的氨氮以氮气的形式被去除, 10% 以内的氨氮转化成为了硝酸盐氮, 这与李伟等<sup>[11]</sup>的研究结果类似。

电极板通电后, 氨氮可通过直接电化学氧化或间接氧化作用被去除, 研究表明, pH 为 7.0~9.0 时, 氨氮以游离氨为主, 可被极板直接氧化去除。当溶液中含有氯离子时, 氯离子在阳极表面放电产生活性氯物

质, 活性氯可扩散至液相主体, 与氨氮发生间接氧化, 因此氨氮的去除率不断升高。通常认为, 与羟基自由基相比, 活性氯物质对氨氮的转化更为有效<sup>[12]</sup>, 其反应过程如式 1~4<sup>[13]</sup>所示。这一机制与折点加氯法相似, 但该过程的反应动力学与折点加氯法略有区别, 因为具有氧化性的中间产物是由外界的 Cl<sup>-</sup> 在电作为驱动力的条件下逐步生成的, 并不需要直接向溶液中投加 Cl<sub>2</sub> 或 HClO。反应过程中所产生的硝酸盐氮是由于在中性溶液中部分氨氮被羟基自由基氧化所致。由于钨钛电极对 COD 的去除效果优于钨钨电极, 而两者对氨氮去除效果接近, 因此综合考虑 COD 和氨氮的去除情况, 钨钛电极优于钨钨电极。



### 2.3 钨钛电极正交实验

正交实验通过用部分代表性实验代替整体实验的方式对结果进行分析优化, 可在一定程度上减少实验工作量。为了优化钨钛电极板对 COD 及氨氮的去除条件, 选取电流密度、极板间距、pH、氯化物浓度、反应时间五个因素, 每个因素水平数为 4, 设计 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>) 正交实验表, 16 代表实验组数, 4 代表每个因素的水平数, 5 代表因素数, 正交实验可将总实验次数由 4<sup>5</sup> 减少至 16 次。因素和水平数见表 2, 实验结果见表 3。

表2 钨钛电极正交实验因素水平

因素水平	pH	电流密度/(mA·cm <sup>-2</sup> )	极板间距/cm	氯化物浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	反应时间/min
1	6	4	1	500	30
2	7	6	2	1 000	40
3	8	8	3	1 500	50
4	9	10	4	2 000	60

表3 正交实验结果

实验组数	pH	电流密度/(mA·cm <sup>-2</sup> )	极板间距/cm	氯化物浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	反应时间/min	氨氮去除率/%	COD 去除率/%
1	6.0	4	1	500	30	28.42	12.44
2	6.0	6	2	1 000	40	75.15	16.22
3	6.0	8	3	1 500	50	100	25.59
4	6.0	10	4	2 000	60	100	22.33
5	7.0	4	2	1 500	60	20.79	15.08
6	7.0	6	1	2 000	50	100	27.74
7	7.0	8	4	500	40	56.80	21.29
8	7.0	10	3	1 000	30	77.62	16.82
9	8.0	4	3	2 000	40	58.21	8.54
10	8.0	6	4	1 500	30	50.85	12.23

续表

实验组数	pH	电流密度/(mA·cm <sup>-2</sup> )	极板间距/cm	氯化物浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	反应时间/min	氨氮去除率/%	COD去除率/%
11	8.0	8	1	1 000	60	100	26.33
12	8.0	10	2	500	50	86.04	17.03
13	9.0	4	4	1 000	50	39.00	19.18
14	9.0	6	3	500	60	54.74	23.34
15	9.0	8	2	2 000	30	74.94	9.91
16	9.0	10	1	1 500	40	100	27.88
COD	K1	19.145	13.810	23.597	18.525	12.850	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub>
	K2	20.233	19.883	14.560	19.637	18.482	
	K3	16.032	20.780	18.572	20.195	22.385	
	K4	20.077	21.015	18.758	17.130	21.770	
	R	4.201	7.205	9.037	3.065	9.535	E>C>B>A>D
氨氮	K1	75.892	36.605	82.105	56.500	57.958	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>4</sub> E <sub>3</sub>
	K2	63.802	70.185	64.230	72.942	72.540	
	K3	73.775	82.935	72.642	67.910	81.260	
	K4	67.170	90.915	61.663	83.287	68.882	
	R	12.090	54.310	20.442	26.787	23.302	B>D>E>C>A

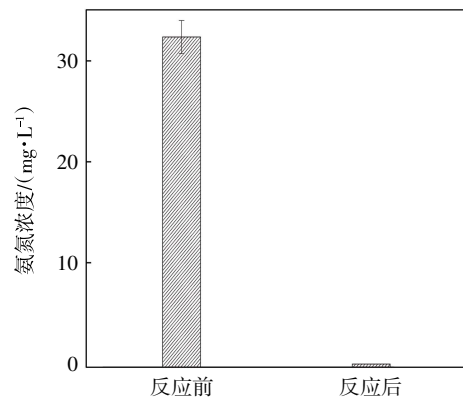
对实验结果进行极差分析,极差代表各因素不同水平下实验结果的最大值与最小值之差,其大小可反应该因素对实验指标的影响程度.极差越大,说明影响越大,极差越小,说明影响程度越小.极差分析结果显示,氨氮的主次影响为:电流密度(B)>氯化物浓度(D)>反应时间(E)>极板间距(C)>pH(A).COD的主次影响因素为:反应时间(E)>极板间距(C)>电流密度(B)>pH(A)>氯化物浓度(D).去除氨氮的优化运行条件:电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>,pH=6.0,极板间距=1.0 cm,氯化物浓度为2 000 mg/L,反应时间为50 min.去除COD的优化运行条件:pH=7.0,电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>,极板间距为1.0 cm,氯化物浓度为1 500 mg/L,反应时间为50 min.

#### 2.4 优化参数下COD、氨氮及色度去除效果及机理分析

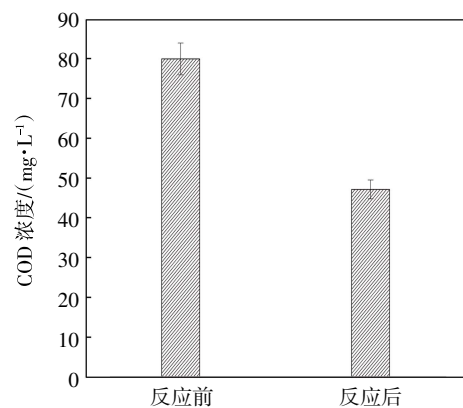
根据正交实验的结果设置运行参数,考察各指标在反应前后的去除效果,实验结果见图4.相同条件下,连续进行3组试验,反应结束后,氨氮几乎可被完全去除,COD平均浓度由79.9 mg/L降至47.1 mg/L,去除率为41.1%,高于正交实验中的16组实验结果.此外,研究过程中发现色度有明显的下降,设置运行参数与去除COD时相同,取进水及反应后出水分别测其色度,实验结果见图4c,色度由1 600倍降至271倍.因此,电化学氧化过程对发色基团有较好的去除效果,这与Lei Jiani等<sup>[14]</sup>的研究结果一致.

在室温下,大多数分子处于基态,当其受光(如紫外光)激发时,分子会吸收能量并进入激发态,但分子

在激发态下不稳定,很快就跃迁回基态,这个过程伴随着能量的损失,其中过剩的能量便会以荧光的形式释放出来,即“发光”<sup>[15]</sup>.有研究表明,二级出水中可能存在的几种荧光特征峰包括:① $\lambda_{Ex}=300\sim 370\text{ nm}$ 、 $\lambda_{Em}=400\sim 500\text{ nm}$ ,为腐殖酸类物质特征峰C;② $\lambda_{Ex}=$



(a) 氨氮浓度



(b) COD浓度

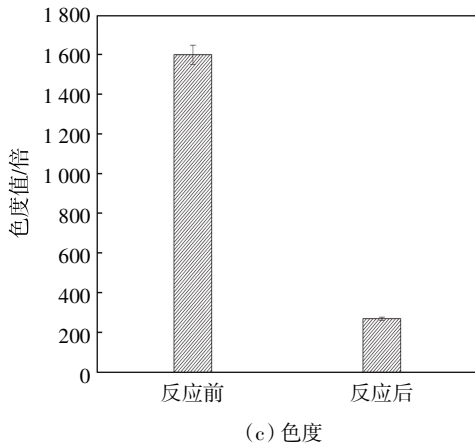


图 4 反应前后 COD 与色度去除效果

237~260 nm、 $\lambda_{Em} = 400\sim 500$  nm, 为富里酸类物质特征峰 A; ③ $\lambda_{Ex} = 235\sim 240$  nm、 $\lambda_{Em} = 340\sim 355$  nm 与  $\lambda_{Ex} = 280\sim 285$  nm、 $\lambda_{Em} = 320\sim 335$  nm, 为蛋白质类物质特征峰 T1、T2, 其中 T1 为酪氨酸类物质, T2 为色氨酸类物质<sup>[6]</sup>, 如图 5 所示。

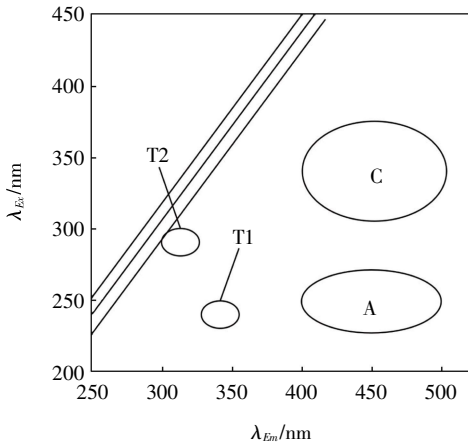
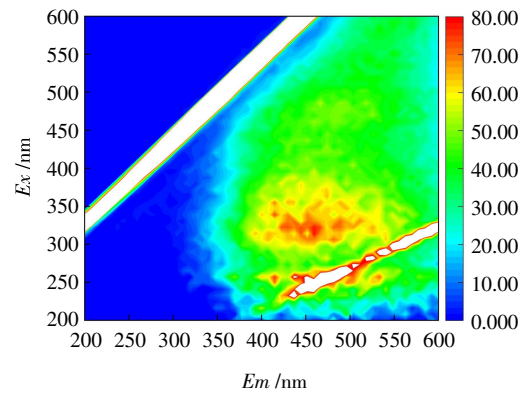


图 5 二级出水中荧光峰存在的位置<sup>[17]</sup>

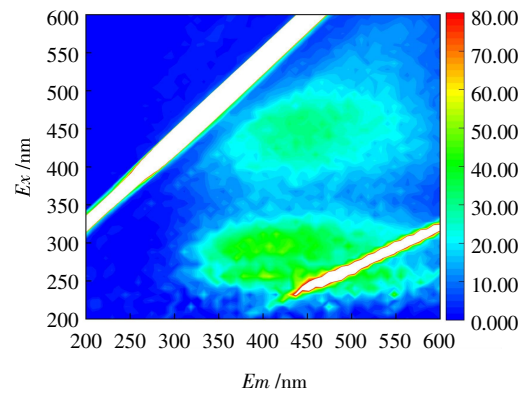
三维荧光技术利用分子的荧光性, 可对部分有机物进行定量或定性检测. 取实验原水与正交实验后的出水进行三维荧光检测, 结果见图 6.

分析方法参照姚璐璐等的荧光区域积分法, 通过 Origin8.0 计算某荧光区域的积分体积  $\Phi_i$ , 即具有相似性质有机物的累积荧光强度. 对某荧光区域的积分体积进行标准化, 得到某荧光区域积分标准体积  $\Phi_{i,n}$ , 从而反映了这一区域的特定结构有机物的相对含量<sup>[8]</sup>. 模拟的二级出水是以添加的腐殖酸来提供 COD, 因此荧光峰集中存在于  $Ex/Em = (250\sim 450)$  nm/ $(>380)$  nm, 如图 6a 中含有显著的腐殖酸类荧光峰(C 峰)以及较弱的富里酸类荧光峰(A 峰), 其荧光区域积分体积为 86.73. 反应结束后, 图 6b 出现了两个荧光峰且荧光强

度大幅度下降, 其中 C 峰荧光强度下降最为明显, 其荧光区域积分为 21.35. 荧光峰强度与荧光区域积分体积下降说明腐殖酸类物质与富里酸类物质得到了有效降解, 且电化学氧化对于腐殖酸类物质的去除效果优于对富里酸类物质的去除效果. 出水中如图 6b 仍可见一定程度的荧光峰, 说明出水中仍残留一定量的小分子中间产物, 这也导致了优化参数下 COD 处理效果不佳以及出水中残留较低色度.



(a) 进水



(b) 出水

图 6 进水、出水三维荧光图

### 3 结论

(1) 综合氨氮与 COD 去除效果, 钎钛电极优于钎铌电极. 以二级出水中氨氮为主要污染物时, 电化学氧化法优化运行条件是: 电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup>, pH = 6.0, 极板间距 = 1.0 cm; 氯化物浓度为 2 000 mg/L、反应时间为 50 min. 以 COD 为主要目标污染物时, 优化运行条件是: 电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup>, pH = 7.0, 极板间距为 1.0 cm; 氯化物浓度为 1 500 mg/L, 反应时间为 50 min.

(2) 电化学氧化处理二级出水时, 去除氨氮效果

的主次影响为:电流密度>氯化物浓度>反应时间>极板间距>pH;COD降解效果的主次影响因素为:反应时间>极板间距>电流密度>pH>氯化物浓度。

(3)电化学氧化对二级出水中氨氮与色度的去除效果较好,对COD的去除效果一般。电化学氧化作用对于腐殖酸模拟废水的降解机理为:将腐殖酸等大分子有机物降解为小分子物质再逐步去除,通过三维荧光图谱分析,出水中含有一定量的荧光性物质,推测为小分子中间产物,即电化学氧化法对于腐殖酸类有机物氧化不彻底。

### 参考文献:

- [1] 王树涛,王虹,马军,等.我国北方城市污水处理厂二级处理出水的水质特性[J].环境科学,2009,30(4):1099-1104.
- [2] 肖羽堂,陈苑媚,王冠平,等.难降解废水电催化处理研究进展[J].工业水处理,2020,40(6):1-6.
- [3] 舒欣,丁晶,赵庆良.电化学法处理氨氮废水的实验研究[J].黑龙江大学自然科学学报,2012,29(2):246-250.
- [4] DAGHRIR R, DROGUI P, TSHIBANGU J. Efficient treatment of domestic wastewater by electrochemical oxidation process using bored doped diamond anode[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 131: 79-83.
- [5] MOREIRA F C, BOAVENTURA R A, BRILLAS E, et al. Electrochemical advanced oxidation processes: a review on their application to synthetic and real wastewaters[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 202: 217-261.
- [6] 胡承志,刘会娟,曲久辉.电化学水处理技术研究进展[J].环境工程学报,2018,12(3):677-696.
- [7] 卓琼芳,杨波,邓述波,等.用于有机物降解的电化学阳极材料[J].化学进展,2012,24(4):628-636.
- [8] 徐浩,乔丹,许志成,等.电催化氧化技术在有机废水处理中的应用[J].工业水处理,2021,41(3):1-9.
- [9] ZHOU Q, ZHOU X, ZHENG R, et al. Application of lead oxide electrodes in wastewater treatment: A review[J]. Science of The Total Environment, 2022, 806: 1-15.
- [10] 叶舒帆,胡筱敏,董俊,等.钛基修饰电极催化电解去除水中硝酸盐氮的研究[J].中国环境科学,2011,31(1):44-49.
- [11] 李伟,丁晶,赵庆良,等.电化学间接氧化法用于低浓度氨氮废水处理的研究[J].黑龙江大学自然科学学报,2014,31(5):646-650.
- [12] 樊佳炜,武海霞,陈卫刚.氨氮废水的高级氧化处理技术研究进展[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(2):142-151.
- [13] 周明明.电化学氧化去除氨氮的机理及其应用[D].杭州:浙江工业大学,2015.
- [14] JIANI L, ZHICHENG X, HAO X, et al. Pulsed electrochemical oxidation of acid Red G and crystal violet by PbO<sub>2</sub> anode[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(3): 1-10.
- [15] 汪之睿,于静洁,王少坡,等.三维荧光技术在水环境监测中的应用研究进展[J].化工环保,2020,40(2):125-130.
- [16] IMAI A, FUKUSHIMA T, MATSUSHIGE K, et al. Characterization of dissolved organic matter in effluents from wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2002, 36(4): 859-870.
- [17] 薛爽,梁雷,赵庆良,等.二级处理出水中溶解性有机物的荧光特性[J].环境科学与技术,2010,33(7):177-182.
- [18] 姚璐璐,涂响,于会彬,等.三维荧光区域积分评估城市污水中溶解性有机物去除[J].环境工程学报,2013,7(2):411-416.