

电化学技术处理入湖河道典型抗生素的研究进展

杨玉坤¹, 邓冯丹^{2*}, 吴 优², 谭 耀², 赵 斌, 张彦辉^{1*}

¹中国建筑第八工程局有限公司, 上海

²玉溪师范学院化学与环境工程学院, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年10月12日; 发布日期: 2025年11月7日

摘 要

随着抗生素在医疗与养殖业的广泛使用, 其在湖泊、河流等水体中的残留已成为严峻的环境问题。传统生物处理法对难降解抗生素效率有限, 电化学技术因其高效、可控、环境友好等特性, 在抗生素深度去除领域展现出巨大潜力。本文综述了电化学氧化、电吸附、生物电化学系统及耦合工艺在去除水体典型抗生素(磺胺类、氟喹诺酮类、四环素类等)中的应用进展, 分析了其作用机制、关键影响因素(电极材料、水质条件、操作参数)并对未来发展方向进行了展望。

关键词

电化学处理, 抗生素污染, 入湖河道水体

Research Progress on Electrochemical Technology for Treating Typical Antibiotics of River Flowing into the Lake

Yukun Yang¹, Fengdan Deng^{2*}, You Wu², Yao Tan², Bin Zhao, Yanhui Zhang^{1*}

¹China Construction Eighth Engineering Division Corp, Shanghai

²College of Chemical and Environmental Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

Received: September 8, 2025; accepted: October 12, 2025; published: November 7, 2025

Abstract

With the widespread use of antibiotics in healthcare and aquaculture, their residues in lakes, rivers,

*通讯作者。

文章引用: 杨玉坤, 邓冯丹, 吴优, 谭耀, 赵斌, 张彦辉. 电化学技术处理入湖河道典型抗生素的研究进展[J]. 世界生态学, 2025, 14(4): 380-390. DOI: 10.12677/ije.2025.144045

and other water bodies have become a serious environmental problem. Traditional biological treatment methods have limited efficiency in treating difficult-to-degrade antibiotics, while electrochemical technology has shown great potential in the field of deep removal of antibiotics due to its high efficiency, controllability, and environmental friendliness. This article reviews the application progress of electrochemical oxidation, electroadsorption, bioelectrochemical systems, and coupling processes in the removal of typical antibiotics (sulfonamides, fluoroquinolones, tetracyclines, etc.) from water bodies. The mechanism of action, key influencing factors (electrode materials, water quality conditions, operating parameters), and future development directions are analyzed.

Keywords

Electrochemical Treatment, Antibiotic Contamination, The Water Body of the River Entering the Lake

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 入湖河道抗生素污染现状与迁移特征

抗生素在人类疾病治疗和畜禽养殖业中不可或缺，但其大量使用和不当排放导致其在全球水环境中广泛检出。湖泊是重要的水源地，也是生态系统的汇集单元和接纳污染物的终端，湖泊的水质情况直接关系到区域水生态安全和水资源的可持续利用。入湖河道是连接流域污染源和湖泊水体的关键通道，它已经成为抗生素迁移和转化的主要途径。研究表明，典型抗生素如磺胺类(SAs)、氟喹诺酮类(FQs)、四环素类(TCs)等，在入湖河道中频繁检出，浓度范围从 ng/L 到 $\mu\text{g/L}$ 不等[1]。这些污染物主要来源于沿线城镇污水处理厂尾水、养殖废水排放和农业面源污染，并随水文动态不断输入湖泊，构成持续性生态威胁。

1.2. 抗生素残留对湖泊生态系统的危害

抗生素残留在入湖河道和最终流入的湖泊里，不仅破坏水生生态平衡，还具有明显的迁移性和生物累积性。生物长期生活在低浓度抗生素的环境中，会让水生生物产生抗药性，进而导致抗生素耐药基因(ARGs)广泛传播。这一现象会大大削弱抗生素在医疗和养殖领域的治疗效果[2]。此外，抗生素对藻类、鱼类及底栖动物的生长、繁殖与发育具有抑制作用，从而影响湖泊生态系统的结构与功能。更需要注意的是，有些湖泊是饮用水的来源地。虽然从河道进入这些湖泊的抗生素残留浓度较低，但这些残留会通过食物链不断富集，最终可能威胁人类健康。所以，控制入湖河道的抗生素污染，是从源头保障湖泊水质安全的关键环节。

1.3. 电化学技术在入湖河道治理中的优势与适用性

传统生物处理工艺(比如活性污泥法)，它处理难降解抗生素的效率比较有限。尤其是面对低浓度、高毒性、难被生物分解的污染物时，这种工艺的去除效果不太好[3]。入湖河道水体具有低抗生素浓度、高背景有机物、水质波动大等特点，这些特点对处理技术的适应性和效率提出了更高的要求。电化学技术因其高效、可控、环境友好、无需投加大量药剂等优势，特别适用于河道水体的深度净化与应急处理。电化学技术会通过多种机制发挥作用，像电氧化、电还原、电吸附以及生物电化学等。通过这些机制，

它能高效降解多种典型抗生素。而且它还有模块化、容易集成、响应速度快等优点,为入湖河道污染治理提供了有前景的技术方向[4]。所以,系统地研究电化学技术处理入湖河道典型抗生素的性能和机制,对于湖泊流域的污染治理来说,具有重要的理论价值和现实意义。

2. 入湖河道水体的典型特征及对电化学技术的挑战

2.1. 低离子强度与高电阻率

入湖河道的水体,大多属于地表II~III类水。这类水体的离子强度比较低,具体表现为电导率通常低于 $500\ \mu\text{S}/\text{cm}$,而离子强度低会直接导致水体的电阻率变高。这种高电阻率的情况,对电化学技术来说会带来明显影响。在使用电化学技术处理时,即使施加相同的电压,水体里的电流密度也很难提升。电流密度上不去,就会让水体里物质的传递效率变低,最终导致处理过程消耗的能量显著增加。

除此之外,在低电导率的环境下,电极表面的双电层结构会变得更厚。双电层结构变厚后,可能会对电化学技术中的电吸附过程,以及电极表面发生的化学反应效率产生不利影响,进而影响整体的抗生素处理效果[5]。

2.2. 高背景有机质(NOM)

入湖河道的水体里,含有较多腐殖酸、富里酸这类物质,它们都属于天然有机质(简称 NOM)。它们在电化学处理过程中会与目标抗生素竞争氧化剂(如 $\cdot\text{OH}$)或吸附位点,严重抑制抗生素的降解效率,并可能导致更多有害副产物的生成[6]。与此同时,这些天然有机质自身在处理过程中也会被氧化。这个氧化过程会消耗大量电流,而电流消耗增多,最终会让整个处理过程的成本变高。

2.3. 水质季节性波动

入湖河道的水质,会受到降雨、径流、水温等多种因素的明显影响。这些因素导致河道水质不仅有强烈的季节性变化,还会出现突发性的波动。例如,在丰水期的时候,河道里的水量比较大,之前存在的污染物浓度会因为水量增加而被稀释。但与此同时,地表径流会增多,这可能让水体里的天然有机质(NOM)含量跟着升高。而在枯水期时,河道水量减少,污染物没办法被充分稀释,可能会出现污染物浓度更高的情况。这种波动性对电化学系统的稳定运行和参数控制提出了极高要求,要应对这种挑战,就需要电化学系统具备良好的抗冲击负荷能力,这样才能在水质变化时依然保持较好的处理效果[7]。

2.4. 低浓度与复合污染下河道抗生素的电化学处理难题

河道中抗生素多以 $\text{ng}/\text{L}\sim\mu\text{g}/\text{L}$ 级浓度存在,属于微量污染。在此低浓度下,电化学反应的传质限制尤为突出,这就导致电流效率往往比较低,电化学技术的处理效果也会跟着受影响。除此之外,河道水体里除了抗生素,还可能同时存在其他多种微量污染物,比如重金属、其他类型的药物等。这些污染物和抗生素一起存在,会让电化学处理过程变得更复杂,而且处理结果的不可预测性也会增加,给稳定处理带来更多挑战[8]。

3. 电化学处理技术的基本原理

3.1. 电化学氧化

电化学氧化是利用电极表面产生的强氧化性物质(如羟基自由基 $\cdot\text{OH}$ 、臭氧等)将抗生素氧化分解为无害物质的过程。在电解过程中,阳极发生氧化反应,除了抗生素直接在阳极失去电子被氧化外,还会产生具有强氧化性的中间产物,这些中间产物能够进一步氧化降解抗生素[4]。

电化学氧化分为直接电化学氧化和间接电化学氧化。直接氧化法是污染物在电极表面直接发生电子转移反应而被氧化降解，间接氧化法则是通过电化学作用产生的强氧化剂(如 $\cdot\text{OH}$ 、 ClO^- 、 H_2 、 O_2 、 O_3 等)降解污染物。

不同的电极材料对电化学氧化效果有显著影响。如直接氧化法中硼掺杂金刚石(BDD)电极具有较高的氧化电位，能够产生大量的 $\cdot\text{OH}$ 。研究表明，BDD 电极对 TAIC 生产废水中的有机污染物(包含抗生素类似物)展现出高效降解能力[9]；铁基电极则通过电芬顿反应产生 $\cdot\text{OH}$ ，强化对难降解抗生素的氧化分解，如图 1 和图 2 所示。

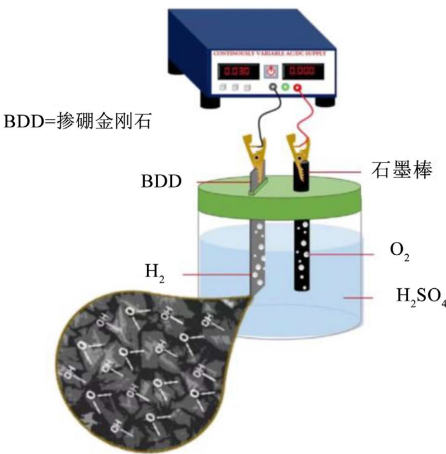


Figure 1. Schematic diagram of a two-electrode cell for electrolysis in an acidic medium [4]
图 1. 用于酸性介质中进行电解的双电极电池示意图[4]

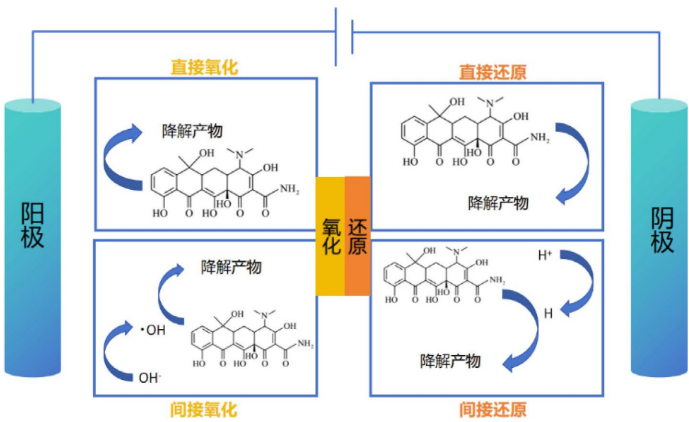


Figure 2. Electrocatalytic treatment mechanism of tetracycline antibiotics
图 2. 四环素类抗生素的电催化处理机制

3.2. 电化学还原

电化学还原是使抗生素在阴极得到电子，发生还原反应而被降解的过程。对于一些含硝基、偶氮基等易被还原基团的抗生素，电化学还原具有较好的处理效果。在还原过程中，电极表面提供电子，使抗生素分子中的不饱和键被还原，从而破坏其结构，达到降解的目的[10]。

直接电子转移(DET)：吸附物直接从电极获得电子被还原(如 BrO_3^- 在阴极直接 6e^- 还原为 Br^-) (如图 3 所示)。

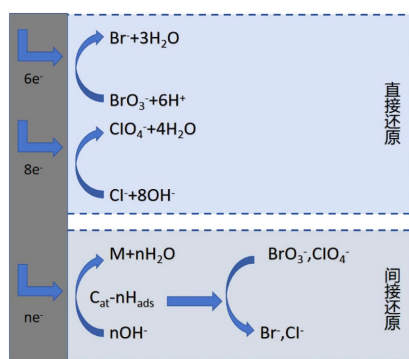


Figure 3. Direct electron transfer process of electrochemical reduction (taking bromide ions as an example)

图 3. 电化学还原直接电子转移流程(以溴离子为例)

间接电子转移(IET): 通过介质(如 Fe (III))传递电子间接还原污染物(如 Cr (VI)被 Fe (III)还原为 Cr (III)) (如图 4 所示)。

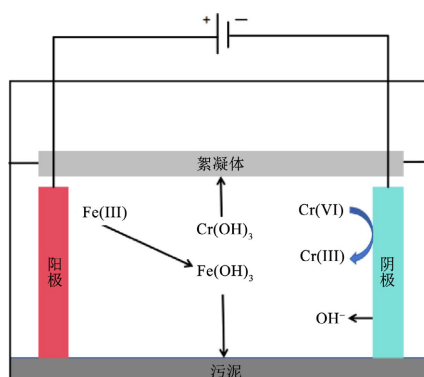


Figure 4. Electrochemical reduction indirect electron transfer process (taking chromium ions as an example)

图 4. 电化学还原间接电子转移流程(以铬离子为例)

3.3. 电化学吸附

电吸附是利用电极表面的静电引力将水体中的抗生素分子吸附到电极表面,从而实现分离去除的过程。该技术适用于处理低浓度的抗生素废水,具有能耗低、操作简单等特点[11]。电吸附效果受电极材料、电压、溶液 pH 等因素影响,通过选择合适的电极材料和优化操作参数,可以提高电吸附效率(如图 5 所示)。

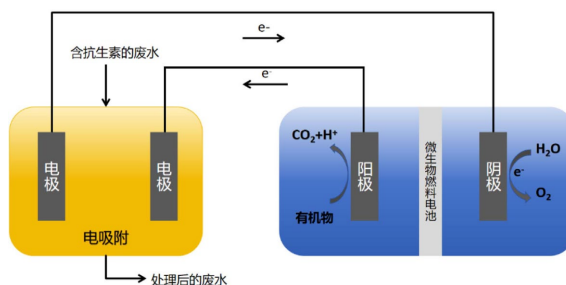


Figure 5. Schematic diagram of coupled electrodialysis and MFCs in the electrochemical adsorption hybrid process

图 5. 电化学吸附混合过程中耦合电渗析和 MFCs 示意图

3.4. 生物电化学技术

生物电化学技术是将微生物的代谢作用与电化学过程相结合的一种技术。在生物电化学系统中，微生物作为催化剂，将抗生素分解为无害物质，同时产生电能或其他形式的能量[12] [13]。该技术不仅能够去除抗生素，还能实现能源的回收，具有良好的可持续性。

以上四种电化学方法处理抗生素的具体效果，优缺点及适用场景见表 1。

Table 1. Comparison of effects and applicable scenarios of different electrochemical technologies for treating typical antibiotics [1] [9] [11]

表 1. 不同电化学技术处理典型抗生素的效果比较与适用场景[1] [9] [11]

处理技术	电化学氧化	电化学还原	电化学吸附	生物化学技术
抗生素品类	四环素	氯霉素	磺胺类	青霉素
	环丙沙星	甲硝唑	头孢类	红霉素
	阿莫西林	氟苯尼考		土霉素
去除率范围	80%~99%	70%~92%	85%~98%	60%~90%
适用水体基质	高浓度工业/医疗废水	含特定还原基团废水	低离子强度，低浓度废水	市政污水，低浓度有机废水
初始浓度范围 (mg/L)	10-100+	5~50	0.001~5	0.1~10
能耗 (kWh/m ³)	10-100+	5~30	0.5~5	<5
技术成熟度	实验室 - 中试	实验室	实验室 - 中试	实验室 - 中试
操作条件	需控制电流密度	碱性条件 阴极材料	电压 0.5~2.0 V	温度 25℃~35℃
	pH 6~8		吸附电极	DO2~4 mg/L
能耗	电极(BDD/DSA)	能耗中等 需控制 pH	中性 pH	污泥龄 15~30 d
	能耗较高		能耗低	能耗低
主要优势	无药剂消耗	针对性降解易还原基团的抗生素 选择性高	但电极需再生	但需投加营养剂
	氧化能力强		富集低浓度抗生素	成本低廉
主要局限性	矿化率高	适用抗生素类型有限 部分中间产物毒性可能增加	再生后电极可重复使用	适合大规模处理
	反应速度快		无二次污染	环境友好
适用场景	电极易钝化	特定结构抗生素定向处理	吸附容量有限	处理周期长
	高浓度废水能耗激增		高浓度废水需频繁再生	对难降解抗生素效果差
	可能产生有毒中间产物	工业废水预处理(含难氧化基团)	仅物理分离(非降解)	易受毒性抑制
	工业/制药高浓度废水预处理		低浓度抗生素废水(如市政尾水)预处理	市政污水中低浓度抗生素处理
	医疗废水深度处理		抗生素回收	制药废水生化段(预处理后)

4. 电化学处理湖河道典型抗生素的研究进展

4.1. 磺胺类抗生素

磺胺类抗生素是一类广泛使用的人工合成抗菌药物，磺胺类抗生素的高残留与农业面源污染(如畜禽粪便)和水产养殖直接相关，在湖河道中经常被检测出。研究表明，电化学氧化技术对磺胺类抗生素具有较好的降解效果。例如，采用 BDD 电极对磺胺嘧啶进行电化学氧化处理，在适宜的工艺条件下，磺胺嘧啶的去除率可达 90%以上[9]。其降解机理主要是通过·OH 等强氧化性物质攻击磺胺嘧啶分子中的氨基和苯环，使其发生开环、断键等反应，最终分解为 CO₂、H₂O 和无机离子。

生物电化学技术也被应用于磺胺类抗生素的处理。陶玥彤等研究发现，生物电化学系统对河道沉积

物中的磺胺类抗生素具有强化去除作用，通过微生物的代谢和电极反应的协同作用，提高了抗生素的降解效率[14]。

4.2. 喹诺酮类抗生素

喹诺酮类抗生素具有抗菌谱广、疗效好等特点，在环境中的残留也较为普遍，常与水产养殖和医疗废水排放相关。电化学还原技术对喹诺酮类抗生素的处理具有一定的优势。柯辉等研究了钴基催化剂电化学去除水体中低浓度喹诺酮类抗生素的性能及机理，结果表明，在阴极还原作用下，喹诺酮类抗生素分子中的酮基被还原，结构遭到破坏，从而实现降解[15]。

电吸附技术也可用于去除水体中的喹诺酮类抗生素。董雪通过试验研究发现，基于电吸附技术能够有效处理含喹诺酮类抗生素的高盐废水，通过优化电极材料和操作参数，可提高抗生素的去除率[11]。

4.3. 四环素类抗生素

四环素类的残留主要源于兽用抗生素的大量使用，其在土壤中的吸附性较强，通过淋溶进入水体。四环素类抗生素在水体中具有较高的稳定性，难以被生物降解。电化学氧化技术是处理四环素类抗生素的有效方法之一。采用铁基电极进行电化学氧化处理，在电芬顿的作用反应下，产生大量的 $\cdot\text{OH}$ ，能够快速降解四环素[16]。研究表明，溶液 pH、电流密度、反应时间等因素对四环素的降解效果有显著影响，在最佳工艺条件下，四环素的去除率可达到 85%以上。

5. 影响电化学处理效果的因素

5.1. 电极材料

电极材料是影响电化学处理效果的关键因素之一。不同的电极材料具有不同的电化学活性、导电性和稳定性。例如，BDD 电极具有较高的氧化电位和化学稳定性，对有机物的降解效率高，但成本较高；铁基电极在电芬顿反应中表现出良好的性能，成本相对较低，但易被腐蚀[16]。因此，选择合适的电极材料对于提高电化学处理效果和降低成本至关重要。

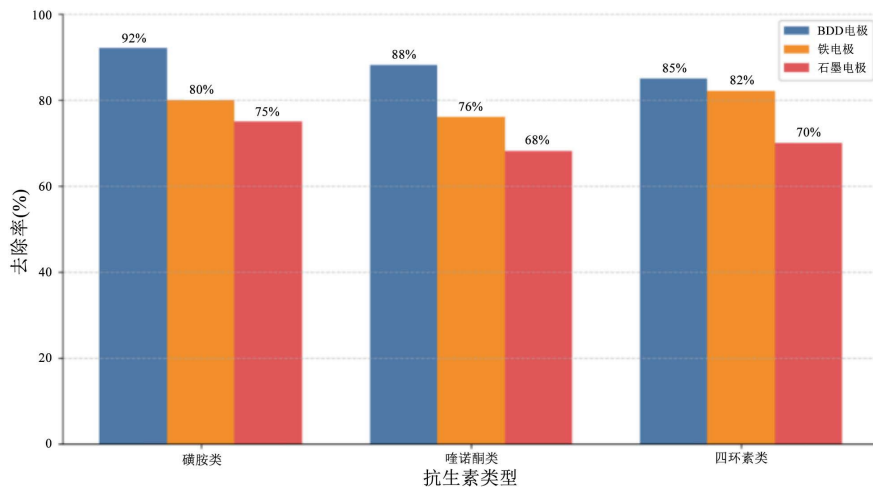


Figure 6. Comparison diagram of antibiotic removal rates by different electrode materials
图 6. 不同电极材料对抗生素去除率对比图

从图 6 可以看出，BDD 电极对磺胺类抗生素的去除率最高，达到 92%，这是因为 BDD 电极能够产

生大量的 $\cdot\text{OH}$ ，氧化能力强[9]；石墨电极去除率相对较低，为 75%；铁电极通过电芬顿等反应，去除率为 80% [16]。

5.2. 电流密度

电流密度直接影响电化学反应的速率和能耗。在一定范围内，随着电流密度的增大，抗生素的降解率会提高，因为较高的电流密度会产生更多的强氧化性物质或提供更多的电子。但当电流密度超过一定值后，副反应(如析氧、析氢反应)加剧，会导致能耗增加，而降解率的提升不再明显[4]。因此，需要确定适宜的电流密度。

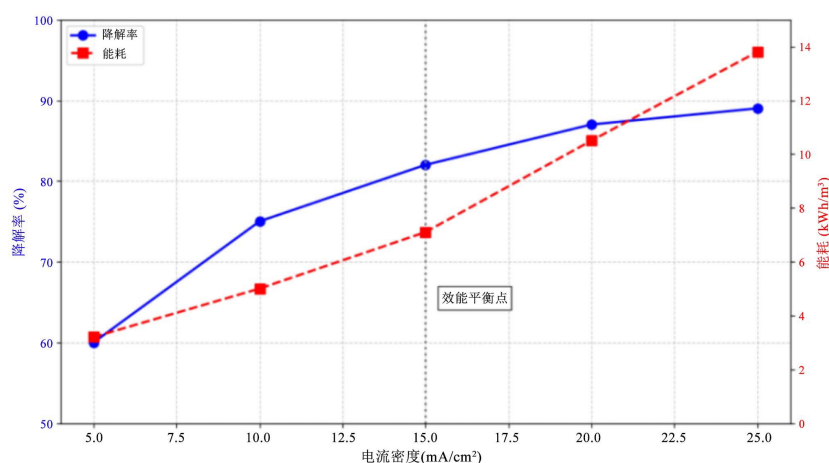


Figure 7. Effect of current density on degradation rate and energy consumption of quinolone antibiotics
图 7. 电流密度对喹诺酮类抗生素降解率及耗能的影响

由图 7 可知，随着电流密度的增大，喹诺酮类抗生素的降解率逐渐提高。当电流密度为 15 mA/cm² 时，降解率达到 85%；继续增大电流密度至 20 mA/cm²，降解率提升至 87%，但提升幅度减小，此时能耗会显著增加[4]。因此，15 mA/cm² 左右是较为适宜的电流密度。

5.3. 溶液 pH 值

溶液 pH 值会影响抗生素的存在形态、电极表面的电荷性质以及反应中产生的氧化性物质的种类和浓度。例如，在酸性条件下，电芬顿反应能够产生大量的 $\cdot\text{OH}$ ，有利于抗生素的降解；而在碱性条件下，可能会发生其他反应，影响处理效果[17]。不同的抗生素在不同 pH 值条件下的降解效果存在差异，因此需要根据具体情况优化溶液 pH 值。

多个研究表明，溶液 pH 是影响四环素去除效果的重要因素之一。例如，Daneshvar 等研究发现，随着溶液 pH 从 2 增加至 8 时，微藻对四环素的去除率从 0% 分别增加至 49% 和 37%；而当 pH 从 8 增加到 10 时，去除效率下降。这表明 pH 对微生物去除四环素具有显著影响，可能与微藻表面电荷和四环素的电离状态有关[18]。

随着 pH 值的增加，四环素的去除率逐渐上升，当 pH 值达到约 6 时，去除率达到峰值，随后在 pH 值为 8 时，去除率略有下降，但总体保持较高水平。这表明在中性偏碱条件下，去除效果最佳[19]。

5.4. 反应时间

反应时间也是影响处理效果的重要因素。在反应初期，抗生素的浓度较高，降解速率较快；随着反

应的进行，抗生素浓度逐渐降低，降解速率减慢。当反应达到一定时间后，抗生素的降解率趋于稳定[9]。因此，需要确定合理的反应时间，以在保证处理效果的前提下，提高处理效率(如图 8 所示)。

随着反应时间的延长，喹诺酮类抗生素的降解率逐渐提高。在反应前 60 分钟，降解速率较快，60 分钟时降解率达到 78%；90 分钟后，降解率趋于稳定，120 分钟时为 87% [9]。

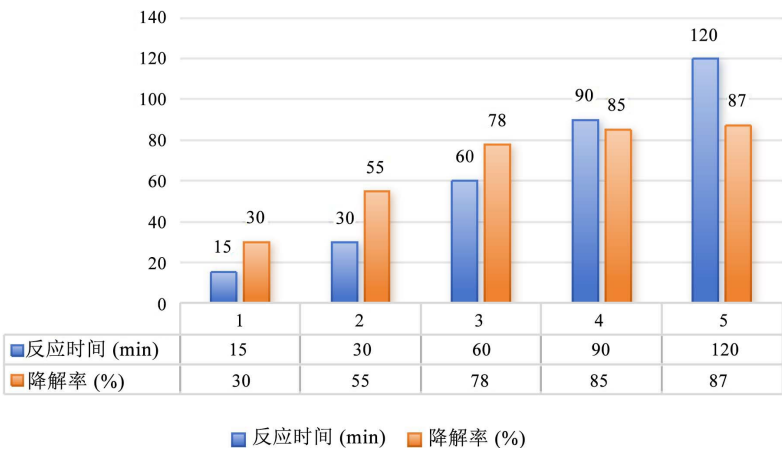


Figure 8. Relationship diagram of reaction time and quinolone degradation rate
图 8. 反应时间与喹诺酮降解率关系图

5.5. 共存物质

湖泊河道水体中存在多种共存物质，如氯离子、硫酸根离子、有机物等，这些共存物质会对电化学处理效果产生影响。例如，氯离子在阳极可能被氧化产生氯气或次氯酸等物质，这些物质具有氧化性，可能促进抗生素的降解；但高浓度的氯离子也可能导致电极腐蚀，影响电极寿命[11]。共存有机物可能与抗生素竞争氧化剂，从而降低抗生素的降解率。

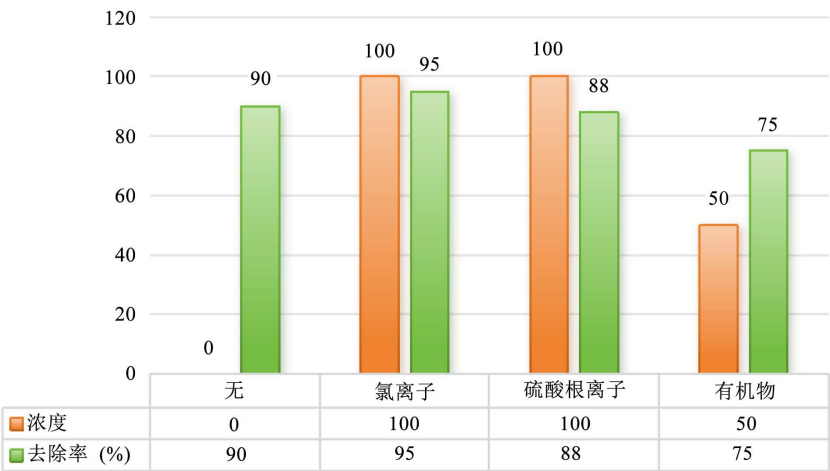


Figure 9. Effect of different coexisting substances on the degradation rate of sulfonamide antibiotics
图 9. 不同共存物质对于磺胺类抗生素降解率的影响

从图 9 可以看出，低浓度的氯离子对电化学处理磺胺类抗生素有促进作用，去除率从 90%提高到 95%；硫酸根离子对处理效果影响较小，去除率为 88%；而有机物的存在则会显著降低处理效果，去除

率降至 75%，这是因为有机物与抗生素竞争氧化剂[11]。

6. 结论

综上所述，电化学处理技术在湖河道典型抗生素去除中展现出显著优势和应用潜力。其核心技术包括电化学氧化、电化学还原、电吸附及生物电化学技术等，通过电极反应产生强氧化性物质、电子转移、静电吸附或微生物-电极协同作用等机制，可有效降解磺胺类、喹诺酮类、四环素类等常见抗生素。不同技术各有特点：BDD 电极电化学氧化降解效率高但能耗与成本较高；生物电化学技术能耗低且环境友好，但对高浓度抗生素耐受性有限；电吸附技术操作简便，适用于低浓度场景。

然而，该领域仍存在诸多挑战：部分技术能耗偏高、高效电极材料成本昂贵且稳定性不足[5]；湖河道水体成分复杂，共存物质易干扰处理效果[11]；现有研究多处于实验室阶段，处理规模与实际应用存在差距，且缺乏统一的技术标准[18]。

未来，研究应聚焦于开发高效低成本电极材料(如新型铁基、钴基复合催化剂)[15][17]，优化工艺参数以提升复杂水体适应性，推动电化学技术与生物处理、膜分离等技术的联用[3]；同时需扩大处理规模验证工程可行性，降低运行成本，并建立相关技术标准[20]，从而促进电化学技术在湖河道抗生素污染治理中的实际应用，为保护水体生态环境提供有力支撑。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(2024A019, 2025A003)。

参考文献

- [1] 杜实之. 环境中抗生素的残留、健康风险与治理技术综述[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(9): 37-48.
- [2] 王佳豪, 许锴, 刘康乐, 等. 水中磺胺类抗生素去除技术的研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(7): 1796-1801.
- [3] 黄燕. 基于环境监测实验的电化学废水处理难生物降解方式[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(2): 147-149.
- [4] 肖旭, 梁曼丽, 袁维波, 等. 电化学技术在化工废水处理中的研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(11): 39-47.
- [5] 邢思奇, 易娟, 吴旭. 除氮电解器应用于低电导率清淤尾水的性能研究[J]. 环境工程学报, 2025, 19(2): 333-341.
- [6] 周春地, 隋铭皓. 环境水体中腐殖酸与共存物的相互作用[J]. 化学进展, 2023, 35(7): 1018-1029.
- [7] 朱世丹, 张飞, 张海威, 张贤龙. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1707-1721.
- [8] 张文潇, 莫凌云. 重金属与抗生素污染的联合毒性作用研究进展[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(5): 1057-1064.
- [9] 周成谦, 谈娟娟, 庄思逸, 等. BDD 电极电化学氧化处理 TAIC 生产废水研究[J]. 精细化工中间体, 2024, 54(4): 71-77.
- [10] 韩岳松, 刘晨阳. 电化学技术处理重金属废水最新研究进展[J]. 有色设备, 2025, 39(2): 34-41.
- [11] 董雪. 基于电吸附技术处理抗生素高盐废水的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- [12] 张海军, 杨大卫, 杨子明, 等. 生物电化学技术在废水处理领域的研究[J]. 清洗世界, 2025, 41(1): 96-98.
- [13] 郭学飞. 废水处理中生物电化学技术的应用研究[J]. 山西化工, 2024, 44(12): 129-131.
- [14] 陶玥彤, 李茹莹. 生物电化学系统对河道沉积物中抗生素的强化去除[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1383-1392.
- [15] 柯辉. 钴基催化剂电化学去除水体低浓度抗生素和硝酸盐污染物性能及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2023.
- [16] 张弛. 高效铁基催化剂的构建及其在污水处理中的应用[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2025.
- [17] 李鋈, 赵国萍, 黄光法, 李佳男, 陶怡恺, 谢诚哲. 电化学氧化法处理低浓度氨氮废水[J]. 工业水处理, 2025, 45(7): 140-146.
- [18] 吴亨宇, 熊倩, 孙悦宏, 等. 微藻-细菌协同去除抗生素机理及其共适应机制[J]. 环境化学, 2023, 42(12): 4354-

4365.

- [19] 赵传起, 巩思诺, 陈宇轩, 等. Zn-Fe 共活化磁性生物炭吸附四环素与重金属铬的性能比较与机理分析[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(8): 2201-2210.
- [20] 杨婷, 王伟. 化学工艺在废水处理中的应用标准[J]. 大众标准化, 2025(9): 126-128.