

BOD<sub>5</sub>/COD 废水，通过调节 pH，其吸附提升潜力也可能提高。这表明，在实际应用中，不能孤立地看待某一个参数，必须将 BOD<sub>5</sub>/COD 比值与 pH 值作为一个耦合系统进行综合调控。

#### 4.4 研究的理论与实践价值

**理论价值：**深化了对活性炭吸附过程中“水质特征-吸附剂性能”之间构效关系的理解，明确了生物降解潜力与物理化学吸附之间的内在联系，为复杂体系下的吸附理论提供了补充。

**实践价值：**为废水处理工艺的优化提供了明确指导。在实际工程中，可以通过快速测定废水的 BOD<sub>5</sub>/COD 比值和 pH，来预判活性炭吸附工艺的可行性与效率。

提出了精准调控策略：对于难生化降解废水（低 BOD<sub>5</sub>/COD），优先推荐采用“pH 预调控 + 活性炭吸附”作为核心预处理或深度处理单元；对于易生化废水（高 BOD<sub>5</sub>/COD），则可考虑将活性炭吸附与生化法联用，或评估其经济性，避免资源浪费。有助于降低运行成本，通过精准投加活性炭和减少 pH 调节的药剂消耗，实现高效经济的水处理目标。

#### 参考文献

- [1] 王琳, 王宝贞. 《废水可生化性的评价与探讨》. 中国给水排水, 2000.
- [2] Metcalf & Eddy, Inc., et al. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th ed., McGraw-Hill Education, 2013.
- [3] 张自杰 主编. 《环境工程手册: 水污染防治卷》. 高等教育出版社, 1996.
- [4] Stumm, W., & Morgan, J. J. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. 3rd ed., Wiley-Interscience, 1996.
- [5] Bansal, R. C., & Goyal, M. Activated Carbon Adsorption. CRC Press, 2005.
- [6] Dąbrowski, A. Adsorption—from theory to practice. Advances in Colloid and Interface Science, 2001.
- [7] 李鱼, 刘建林, 李晓良. 《不同pH值下活性炭对有机物的吸附特性研究》. 环境科学学报, 2005.
- [8] 高廷耀, 陈洪斌, 刘勇弟. 《pH值对活性炭吸附染料废水脱色效果的影响》. 同济大学学报, 2001.
- [9] Moreno-Castilla, C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. Carbon, 2004.
- [10] Hameed, B. H., et al. Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: kinetics and equilibrium studies. Journal of Hazardous Materials, 2007.
- [11] Fouladi Tajar, A., et al. The effect of pH on the adsorption of paraquat by activated carbons. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2009.
- [12] 魏健, 宋永会, 王淑莹. 《基于BOD<sub>5</sub>/COD的废水处理工艺选择与优化》. 环境科学研究, 2012.
- [13] Esplugas, S., et al. Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation. Water Research, 2002.
- [14] Crini, G., et al. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. Environmental Chemistry Letters, 2019.
- [15] Ali, I., et al. Graphene based adsorbents for remediation of noxious pollutants from wastewater. Environment International, 2019.

# The Development and Application of Electrochemical Sensors in the Rapid Detection of Wastewater pollutants

Yanli Zhang<sup>1</sup> Yuguang Hu<sup>2</sup>

1. Kunming Dianchi Water Environment Monitoring Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650220, China

2. Yunnan Taiyi Testing Technology Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650501, China

## Abstract

With the development of industry and the increasing demand for environmental governance, rapid detection of wastewater pollutants has become a key link in ensuring water environmental safety. Electrochemical sensors, with their advantages of fast response speed, low cost, strong portability and high sensitivity, have shown significant application potential in the field of wastewater pollutant detection. This article focuses on the core of the development of electrochemical sensors and analyzes their technological innovation directions from three aspects: sensitive material design, electrode structure optimization, and signal amplification technology. This paper systematically explores the application principles of sensors in the detection of typical wastewater pollutants such as heavy metal ions, organic pollutants, and inorganic anions, and proposes targeted optimization strategies. The aim is to provide theoretical references for the further promotion and upgrading of electrochemical sensors in the rapid detection of wastewater pollutants, and to facilitate the efficient and intelligent development of the water environment monitoring system.

## Keywords

Electrochemical sensor Wastewater pollutants; Rapid detection; Sensitive materials; Electrode optimization Resistance, interference

## 电化学传感器在废水污染物快速检测中的开发与应用

张艳丽<sup>1</sup> 胡玉光<sup>2</sup>

1. 昆明滇池水务环境监测有限公司, 中国·云南昆明 650220

2. 云南泰义检测技术有限公司, 中国·云南昆明 650501

## 摘要

随着工业发展与环境治理需求提升, 废水污染物快速检测成为保障水环境安全的关键环节。电化学传感器凭借响应速度快、成本低、便携性强及灵敏度高的优势, 在废水污染物检测领域展现出显著应用潜力。本文围绕电化学传感器的开发核心, 从敏感材料设计、电极结构优化、信号放大技术三方面剖析其技术创新方向。系统探讨传感器在重金属离子、有机污染物、无机阴离子等典型废水污染物检测中的应用原理, 提出针对性优化策略, 旨在为电化学传感器在废水污染物快速检测中的进一步推广与升级提供理论参考, 助力水环境监测体系的高效化与智能化发展。

## 关键词

电化学传感器; 废水污染物; 快速检测; 敏感材料; 电极优化; 抗、干扰

## 1 引言

水环境污染治理的前提是精确、迅速掌握污染物种类与浓度, 而废水作为水环境污染物的主要源头之一, 其检测效率跟精度直接影响治理决策的及时性与有效性。传统废水污染物检测技术以原子吸收光谱、高效液相色谱等为代表, 虽然检测精度颇高, 但需专业人员开展操作、依赖实验室环境且检测周期偏长, 不具备现场实时监测能力, 难以适应突发水污染事件应急检测的要求, 也难以契合大规模废水排放企业日常自检所需的便捷性。电化学传感器凭借电化学反应

原理, 依靠识别元件, 实现对污染物的定性及定量测定。本文以传感器开发核心、应用场景等方向为切入点展开研究, 为技术升级与实际应用给出思路。

## 2 电化学传感器在废水污染物检测中的开发核心

### 2.1 敏感材料的设计与功能化

敏感材料为电化学传感器识别污染物的核心组件, 其对目标污染物的特异性作用直接决定传感器选择性与灵敏度的水平, 基于废水污染物的多样特性, 敏感材料应依照污染物类型实施功能化设计。检测重金属离子时, 常借助功能化纳米材料, 借助巯基、氨基等官能团与重金属离子形成配位键, 增强对重金属离子的特异性吸附效果。部分材料凭借

【作者简介】张艳丽(1989-), 女, 壮族, 中国云南文山州人, 本科, 分析员, 从事水质分析研究。

掺杂金属纳米颗粒可提升电子传递效率,增大检测信号<sup>[1]</sup>。对有机污染物进行检测时,大多采用导电聚合物,导电聚合物依靠 $\pi-\pi$ 共轭作用和有机污染物结合,酶或抗体凭借生物特异性识别精准抓取目标污染物。在对无机阴离子开展检测时,如氟根、氟离子等,可采用离子印迹聚合物,借助“模板聚合”技术于材料中形成与目标阴离子空间结构相匹配的印迹孔道,实现针对目标阴离子的高选择性识别。敏感材料功能化也需兼顾废水基质的复杂性,依靠表面修饰降低干扰物质的吸附量,如共存离子、有机物等,譬如在材料表面包覆亲水性聚合物薄膜,不会影响目标污染物的传输,又可阻挡大分子干扰物质附着,增进传感器在复杂废水环境里的适用性。

## 2.2 电极结构的优化与微型化

电极作为电化学反应所凭借的载体,其结构设计会影响到电子传递效率及检测稳定性,同时需契合废水现场检测的便携性需求,朝着微型化、集成化方向迈进。传统块状电极面临比表面积小以及电子传递慢的问题,优化方向是采用纳米结构电极,利用增大比表面积提升敏感材料负载量及污染物接触面积,提升电化学反应速度。针对多污染物同步检测的需求,开发出阵列电极,在同一基底集成多个独立工作电极,各电极修饰不同的敏感材料,可对多种污染物进行同步检测,减少所需样品用量和检测时间<sup>[2]</sup>。为契合现场检测,电极必须与微型化信号采集模块相结合,采用印刷电极技术实现电极的低成本批量制备,电极尺寸可缩小至毫米的级别,与便携式电化学工作站相配合,构建“传感器芯片+手持终端”的检测系统,实现废水现场即时检测需求。优化电极稳定性需兼顾废水的腐蚀性,采用表面覆盖耐腐蚀涂层,防止电极在酸性、碱性及含氧化剂的废水中遭腐蚀,延长其电极使用寿命。

## 2.3 信号放大与抗干扰技术

废水基质里有大量共存物质,容易引发背景信号干扰,低浓度污染物引发的电信号微弱不堪,需凭借信号放大与抗干扰技术增强检测精度。就信号放大而言,常用的技术包含纳米材料增敏、酶催化放大及电化学免疫放大。部分传感器还采用二次信号放大机制,进一步强化对低浓度污染物的检出水平。抗干扰技术须从“源头屏蔽”以及“信号区分”两方面切入。源头屏蔽凭借在电极表面构建选择性渗透膜,只允许目标污染物通行,阻隔干扰物质。信号区分凭借电化学技术特性,利用控制电位扫描方式削减背景电流干扰,或采用化学计量学方法对混合信号加以解析,区分目标污染物跟干扰物质的电信号响应。

# 3 电化学传感器在废水典型污染物检测中的应用

## 3.1 重金属离子检测

重金属离子为废水常见污染物,诸如铅、镉、汞、铬等,

呈现毒性强、易积累的特性,要实现痕量检测,电化学传感器借助敏感材料与重金属离子的特异性作用,借助不同电化学检测原理达成检测。在采用溶出伏安法之际,敏感材料先于还原电位下把重金属离子富集为金属单质,如铂膜修饰电极和巯基石墨烯,再借由氧化电位扫描产生氧化电流,电流峰值跟重金属离子浓度呈线性相关,可完成多种重金属离子的同步测定。针对诸如汞离子的特殊重金属,可采用电流型的传感器,凭借汞离子与金电极表面形成汞齐的特性,凭借电流变化直接呈现汞离子浓度。部分传感器借助引入DNA适配体,凭借适配体和汞离子的特异性结合,如T-Hg<sup>2+</sup>-T碱基对配对,造成电极表面电子传递效率的改变,实现对汞离子的高选择性检测。此类传感器所能检测的重金属离子浓度范围覆盖痕量至微量,且不要求复杂的样品预处理,仅需简单过滤废水样品即可实施检测,适用于针对工业废水的现场监测,诸如电镀废水、冶炼废水等。

## 3.2 有机污染物检测

废水所含有机污染物(如酚类、苯胺类、农药残留、抗生素)成分复杂多样,传统检测方法难以迅速区分,电化学传感器借助敏感材料的特异性识别达成精准检测。检测酚类污染物时,一般会用导电聚合物修饰电极,电极表面发生酚类物质的氧化反应,产生出氧化电流,电流大小同酚类浓度相互关联。部分传感器引入了诸如酪氨酸酶之类的酶,经由酶催化实现酚类氧化加速,增进检测灵敏度。检测抗生素时,如四环素、磺胺类药物等,往往采用免疫传感器或适配体传感器,依靠抗体或适配体同抗生素的特异性结合,引起电极表面阻抗或电流信号的变化;当适配体修饰电极结合抗生素后,会引发构象转变,导致电极表面电子传递的阻力增大,凭借阻抗变化可开展抗生素浓度的定量分析<sup>[3]</sup>。针对难氧化的有机污染物而言,如多环芳烃,可采用此类光电化学传感器,与光敏材料相结合,如二氧化钛纳米管等,光照之下产生光生电子-空穴对,有机污染物跟光生空穴反应产生电流信号,实现难氧化污染物的检测工作。有机污染物检测传感器的优势为可区分不同结构的有机化合物,避免干扰物质形成影响,可应用于制药废水、化工废水及农业废水的检测工作。

## 3.3 无机阴离子检测

虽部分废水无机阴离子属于植物必需营养元素,如氟根、氟离子、硝酸盐、磷酸根等,但过量排放会引起水体富营养化或毒性危害,需实现快速量化,电化学传感器凭借离子特异性识别以及电信号转化实现检测。检测氟根离子时,可采用电位型的传感器,采用银基敏感材料作为电极膜,氟根离子跟银离子形成稳定络合物,引发电极电位的改变,电位变化量同氟根浓度契合能斯特方程,可迅速检测出氟根离子。检测硝酸盐时,一般采用还原型传感器,采用修饰催化材料,在电极表面把硝酸盐还原成亚硝酸盐或氮气,生成还原电流,电流跟硝酸盐浓度呈线性联系;针对磷酸盐物质,