

分析测试

# 纳米材料修饰电化学传感器 在抗生素检测中的研究进展

代欣<sup>1\*</sup>, 丛航<sup>2</sup>

(1. 贵阳康养职业大学药学院, 贵州 贵阳 550081; 2. 贵州大学化学与化工学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 综述了金属纳米材料、金属氧化物纳米材料、碳基纳米材料、金属有机框架纳米复合材料以及分子印迹聚合物及其纳米复合材料在抗生素检测中的作用机制与研究进展, 旨在为抗生素的高灵敏度、高选择性检测方法的开发提供理论支持和技术参考, 同时, 总结了当前抗生素电化学传感器在实际应用中面临的主要挑战, 并对其发展前景进行了展望。

**关键词:** 纳米材料; 纳米复合材料; 抗生素检测; 电化学传感器

中图分类号: O657.1; TB383

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)06-0262-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.041

## Research progress on nanomaterial-modified electrochemical sensors for antibiotic detection

DAI Xin<sup>1\*</sup>, CONG Hang<sup>2</sup>

(1. College of Pharmacy, Guiyang Healthcare Vocational University, Guiyang 550081, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** This review summarizes the mechanism and research progress of metal nanomaterials, metal oxide nanomaterials, carbon-based nanomaterials, metal-organic framework (MOF) nanocomposites, and molecularly imprinted polymers (MIPs) and their nanocomposites in antibiotic detection. The work aims to provide theoretical support and technical references for developing highly sensitive and selective antibiotic detection methods. Additionally, it addresses the key challenges facing current electrochemical sensors in practical applications and discusses future development prospects.

**Key words:** nanomaterials; nanocomposite materials; antibiotic detection; electrochemical sensors

抗生素作为一类广泛应用于人类医疗、畜牧业和水产养殖的重要药物, 对控制和治疗细菌感染发挥了不可替代的作用。然而, 随着抗生素在临床和养殖领域的长期、过量甚至不合理使用, 其残留问题日益严重, 已成为全球关注的公共卫生与环境安全问题之一。抗生素残留不仅可通过食物链在人体内积累, 诱发过敏反应、耐药基因的传播以及肠道菌群失衡等健康风险, 还可能通过排放进入水体和土壤, 破坏生态环境, 促进耐药菌株的产生与扩散, 进而对生态系统和人类健康构成长期威胁<sup>[1]</sup>。因此, 建立快速、灵敏、准确的抗生素检测方法对于保障公共健康和生态环境安全具有重要意义。

目前, 抗生素的检测方法主要包括高效液相色谱法 (high performance liquid chromatography, HPLC)、气相色谱-质谱联用法 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、酶联免疫吸附测定法

(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA) 和电化学分析法等。其中, HPLC 和 GC-MS 虽具有高灵敏度和高选择性, 但设备昂贵、操作复杂、样品前处理烦琐, 难以满足现场快速检测需求; ELISA 方法虽然灵敏度较高, 但易受基质干扰, 且抗体成本较高, 重复性差<sup>[2-3]</sup>。相比之下, 电化学分析方法因设备便携、响应速度快、成本低廉、操作简便等优势, 在抗生素检测中展现出良好的应用前景。

电化学传感器的核心在于电极材料的选择与修饰。近年来, 纳米材料因独特的物理化学性质, 如大比表面积、优异的导电性、良好的催化活性和可调控的表面结构, 各种功能化纳米材料被广泛应用于修饰电极表面, 以提升传感器的检测性能。研究表明, 将金属纳米材料 (如金、银纳米粒子)、金属氧化物 (如 TiO<sub>2</sub>、ZnO)、碳基纳米材料 (如石墨烯、碳纳米管、碳量子点)、金属有机框架材料及分子印迹聚合

收稿日期: 2025-08-19; 修回日期: 2026-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (22262007); 贵州省卫生健康委科学技术基金项目 (gzwkj2026-502)

作者简介: 代欣 (1997-), 女, 硕士, 助教, 研究方向为电化学传感器, 通讯联系人, 798211846@qq.com。

物等引入电极修饰中,可显著提高传感器的电化学响应性能,增强对抗生素分子的识别能力和检测灵敏度<sup>[4-5]</sup>。本文中系统综述这些纳米材料在抗生素电化学检测中的研究进展,旨在为开发高效、稳定的抗生素检测技术提供理论支持与实践参考。

## 1 金属纳米材料

金属纳米材料凭借高比表面积、优异导电性及易表面功能化,在电化学传感器领域展现出广阔的应用前景。特别是金(Au)、铂(Pt)、银(Ag)等贵金属纳米材料,因独特的界面效应与量子尺寸效应,良好的生物相容性和易于功能化,在抗生素检测中占据重要地位<sup>[6]</sup>。但是,贵金属纳米材料在电极修饰时容易出现团聚现象,这会极大地限制活性位点的充分暴露,进而制约其性能的充分发挥。针对这一问题,功能化复合策略成为了突破的关键,即可利用高比表面积的纳米材料作为负载基质,不仅能够有效分散贵金属纳米颗粒、抑制团聚的发生,还能凭借材料之间的协同效应,例如导电性与催化活性的耦合,极大地增强传感器的综合性能。如 Xie 等<sup>[7]</sup>开发了一种具有大尺寸暴露活性表面的石状金纳米颗粒(SL-AuNPs),并在其表面构建了富含氮原子、高比表面积的多孔氮掺杂碳气凝胶(NCA),形成 NCA@SLAuNPs。研究显示,SL-AuNPs 增强了电子传递效率与催化活性,NCA 的引入提供了高负载位点与化学稳定性,SL-AuNPs 与 NCA 的共组装使 NCA@SL-AuNPs 成为一种超灵敏的电化学适配体传感器(线性范围为  $10^{-15} \sim 10^{-11}$  mol/L,检测限低至  $3.2 \times 10^{-16}$  mol/L),用于四环素的检测。Meireles 等<sup>[8]</sup>开发了一种基于碳黑(CB)与绿色合成银纳米粒子(AgNPs)复合膜的低成本电化学传感器,用于定量检测广谱抗生素环丙沙星。通过采用黑茶水提取物中的生物代谢物作为还原剂与稳定剂,制备出了绿色环保的银纳米粒子(AgNPs),将 AgNPs 与 CB 纳米粒子嵌入交联壳聚糖(Ch)三维网络,构建于玻碳电极(GCE)表面(标记为 AgNPs-CB-Ch/GCE);相比于裸电极,AgNPs-CB-Ch/GCE 修饰的玻碳电极对环丙沙星不可逆氧化峰的电位增强了 17.3 倍。在优化工作条件下,使用方波伏安法对 AgNPs-CB-Ch/GCE 传感器进行分析,显示出 2 个线性浓度范围,分别为 3.1~24.8、36.9~130.3  $\mu\text{mol/L}$ ,检测限为 0.48  $\mu\text{mol/L}$ 。此外,该传感器还成功应用于合成尿样中环丙沙星的定量分析,回收率在 2 个线性浓度范围内均接近 100%。

## 2 金属氧化物纳米材料

金属氧化物纳米材料因良好的化学稳定性、可调控的结构以及优异的催化活性,能提供氧化还原催化位点,增强抗生素分子的电化学反应,被广泛应用于构建抗生素电化学传感器<sup>[9]</sup>。但由于单一金属氧化物的导电性能较差,研究人员常常通过结构调控(如纳米管、纳米片形貌设计)或复合改性(如与碳基材料、贵金属结合),制备出具有优异催化性能和导电性能的金属氧化物纳米复合材料。如 Zhang 等<sup>[10]</sup>使用水热合成法制备了棒状和片状 2 种不同形态的氧化锌(ZnO),并对其电催化性能进行了表征和比较。研究表明,棒状 ZnO 对环丙沙星具有较好的催化作用,因此将其与二氧化锰( $\text{MnO}_2$ )复合构建出了一种用于检测蜂蜜中环丙沙星含量的  $\text{MnO}_2/\text{ZnO}/\text{GCE}$  电化学传感器。该传感器检测环丙沙星的线性浓度范围为 0.5~120  $\mu\text{mol/L}$ ,检测限为 0.21  $\mu\text{mol/L}$ 。此外,采用  $\text{MnO}_2/\text{ZnO}/\text{GCE}$  传感器检测蜂蜜样品中的环丙沙星残留量,回收率为 95.3%~97.2%。结果表明,该复合材料修饰传感器具有良好的灵敏度,可实现蜂蜜中环丙沙星含量的快速检测,具有潜在的应用前景。Liao 等<sup>[11]</sup>在氮掺杂的空心碳球上原位生长了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒,制备得到 N-HCS/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs 电极材料,该电极材料可作为检测含氧氟沙星污染水的电化学传感器。合成的 N-HCS/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs 具有中空多孔结构,保证了吸附能力, $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与 N-HCS 的结合增强了 N-HCS/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs 的整体电子转移能力。通过相应测试显示,该电化学传感器的检测限为 0.028  $\mu\text{mol/L}$ (S/N=3),在 0.096~40  $\mu\text{mol/L}$  的线性工作范围内,灵敏度为 0.023  $\mu\text{A} \cdot \text{L}/\mu\text{mol}$ ,显示出该电化学传感器具有良好的抗干扰能力和稳定性,且该传感器已成功应用于实际的氧氟沙星污染水的检测。

## 3 碳基纳米材料

碳基纳米材料凭借高导电性、大比表面积、强吸附能力、化学稳定性及可修饰性,在抗生素检测中展现出高灵敏度、宽线性范围和强抗干扰能力,是构建高性能电化学传感器的理想材料<sup>[12]</sup>。然而,在实际应用过程中,碳基纳米材料仍面临一些亟待解决的关键问题,如易团聚、非特异性吸附及制备工艺复杂性等。为此,大量研究人员正在探索材料结构调控(如设计分级多孔结构)和表面功能化(如修饰特异性识别元件)等策略,以优化碳基纳米材料在抗生

素检测中的应用性能。

### 3.1 石墨烯

石墨烯是一种由碳原子以  $sp^2$  杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的二维碳纳米材料,具有超大比表面积、高导电性、良好的化学稳定性。其中,石墨烯修饰电极后,其  $sp^2$  杂化碳骨架可提供大量吸附位点,促进抗生素分子富集,因此被广泛用于抗生素检测<sup>[13]</sup>。但石墨烯存在易团聚、片层堆叠导致活性位点减少的问题,所以研究人员常常通过表面改性(如氧化、掺杂)或复合(如与碳纳米管、金属氧化物结合)改善其分散性,以此提高石墨烯基电化学传感器的选择性和灵敏度。Bhuvaneswari 等<sup>[14]</sup>通过共沉淀法和超声法合成了钨酸钴/氮掺杂还原氧化石墨烯( $CoWO_4/N-rGO$ )纳米复合材料,并用于呋喃唑酮抗生素药物的电化学检测。通过电化学测试表明, $CoWO_4/N-rGO$  修饰电极对呋喃唑酮检测限为  $0.022 \mu\text{mol/L}$ ,线性动态范围为  $0.09 \sim 799 \mu\text{mol/L}$ ,表现出优异的电催化活性、良好的重现性、高选择性和长期稳定性,同时,该系统可有效用于人体尿液和废水等实际样品中的呋喃唑酮检测。Pandiyani 等<sup>[15]</sup>开发了一种由铁酸镧(lanthanum ferrite, LFO)和还原氧化石墨烯(reduced graphene oxide, rGO)纳米复合材料修饰的玻璃碳电极(glassy carbon electrode, GCE),用于甲硝唑的电化学检测。由于 LFO 和 rGO 具有较高的比表面积、导电性和协同效应,改性后的 LFO/rGO/GCE 表现出优异的电化学性能,具有宽线性范围( $0.2 \sim 1221 \mu\text{mol/L}$ )、低检出限( $0.2 \sim 1221 \mu\text{mol/L}$ )和良好灵敏度、稳定性和可重复性的优点,有利于监测甲硝唑。

### 3.2 碳纳米管

碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)是一种具有独特管状结构的一维量子材料,主要分为单壁碳纳米管(SWCNTs)和多壁碳纳米管(MWCNTs),具备高比表面积、快速电子转移能力及化学稳定性等优势。碳纳米管结构中的碳原子主要以  $sp^2$  杂化形式存在(部分含  $sp^3$  杂化),形成了高度离域化的大  $\pi$  键,这种杂化特性使其形成高度离域的共轭  $\pi$  电子体系,为化学修饰及功能化复合材料提供了结构基础。通过羧基化、氨基化等表面修饰手段,可在其表面引入官能团,不仅能提升材料的溶解性与分散性,还能提供丰富的活性结合位点,进而通过构建稳定配合物或接枝特异性识别元件(如功能配体、生物分子)实现表面功能化调控。这些特性共同为开发新型、高效的功能化复合纳米材料电化学传感器提

供了重要支撑<sup>[16-17]</sup>。Shi 等<sup>[18]</sup>采用铋基双金属盐钼酸铋( $Bi_2MoO_6$ )和羧化多壁碳纳米管(MWCNTs-COOH)杂化电极作为传感平台,建立了电化学超敏选择性测定诺氟沙星的方法。MWCNTs-COOH 作为微球结构  $Bi_2MoO_6$  纳米颗粒的导电载体,通过循环伏安法和电化学阻抗谱法验证了  $Bi_2MoO_6$  和 MWCNTs-COOH 的协同效应增强了电极的电催化能力。循环伏安法检测显示,氧化峰电流在  $0.03 \sim 10 \mu\text{mol/L}$  的诺氟沙星浓度范围内呈线性关系,最低检测限为  $6.7 \text{ nmol/L}$  ( $S/N = 3$ )。此外,该  $Bi_2MoO_6$ /MWCNTs-COOH/GCE 传感器显示出良好的稳定性、重现性、重复性和选择性,用加标法测定牛奶和湖水样品中诺氟沙星的加标回收率分别为  $94.8\% \sim 96.9\%$  和  $90.2\% \sim 98.3\%$ 。Jain 等<sup>[19]</sup>基于自组装的 Cu-壳聚糖/f-MWCNT 修饰的玻璃碳电极,开发了一种检测大环内酯类抗生素红霉素的电化学传感器。利用壳聚糖(CHT)线性氨基葡萄糖链上含有活性氨基和羟基这一特性,将带负电荷的 f-MWCNT 与带正电荷的壳聚糖和  $Cu^{2+}$  结合,形成 Cu-壳聚糖/f-MWCNT/GCE。通过循环伏安法和电化学阻抗谱分析测试表明,与裸电极相比,Cu-壳聚糖/f-MWCNT/GCE 对红霉素的氧化表现出优异的电催化活性,氧化峰电流增加。此外,该传感器在红霉素测定过程中表现出高选择性、优异的稳定性和重复性,线性范围宽( $0.5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$  和  $10 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ )、检测限低( $0.2 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ )。

### 3.3 碳量子点

碳量子点(carbon quantum dots, CQDs)因优异的水溶性、低毒性和良好的电化学性能,在抗生素检测中展现出显著优势。高比表面积和优异的电子传递能力有助于提高传感器的灵敏度和响应速度,同时表面丰富的官能团(如羧基、羟基)便于进一步功能化,增强对抗生素分子的识别能力<sup>[20-21]</sup>。此外,CQDs 合成工艺简单、成本低,有利于传感器的批量制备与应用推广。然而,碳量子点在电化学检测中仍存在一定局限性,如对抗生素的选择性识别能力相对较弱,易受共存干扰物质的影响;又如 CQDs 修饰电极的长期稳定性仍有待提高,在长期使用或多次循环检测后可能出现信号漂移或性能下降。为克服上述问题,目前的研究主要聚焦于通过杂原子掺杂(如 N、S)、复合纳米材料(如石墨烯、金属氧化物)或结合分子印迹技术进一步优化 CQDs 性能,提升选择性和稳定性,从而促进在抗生素电化学检测中的实际应用。Devi 课题组<sup>[22]</sup>首次采用水热法合

成了氮掺杂碳量子点修饰的氧化钆(N-CQD@Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)纳米复合材料。该纳米复合材料具有纳米种子状结构,而非典型的Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米棒状结构。XRD与FT-IR验证了N-CQDs通过表面羧基与Gd<sup>3+</sup>配位,动态调控晶体生长方向。N-CQDs的氮掺杂提升了纳米复合材料的电子迁移率,Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的4f电子轨道增强了对氯碘羟喹的特异性吸附,通过循环伏安法和电化学阻抗谱法验证了N-CQDs和Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的协同效应增强了电极的电催化能力。该研究利用N-CQDs与稀土氧化物复合及形貌调控双重策略,突破传统Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米棒的结构限制,建立了目前最灵敏的氯碘羟喹电化学检测方法,测试显示,N-CQD@Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GCE传感器对氯碘羟喹的检测限低至2.1 nmol/L,灵敏度高至3.6 μA·L/(μmol·cm<sup>2</sup>)。此外,该传感器具有较高的稳定性、可重复性和再现性,且在实际样品分析中表现良好,回收率高,具有一定的实用性。Devi课题组<sup>[23]</sup>通过将氧化锰纳米修饰氮掺杂碳量子点,制备得到N-CQD@Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>NCs三维纳米立方体,用于抗生素药物磺胺嘧啶的检测。由于N-CQDs和Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>具有较高的活性位点、催化效率和协同作用,N-CQD@Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>NCs修饰电极表现出优异的电化学性能,具有低检出限(0.014 μmol/L)、高灵敏度[2.75 μA·L/(μmol·cm<sup>2</sup>)]、较宽的线性范围(0.5~663 μmol/L)、良好的再现性和稳定性。

#### 4 金属有机框架纳米复合材料

金属有机框架(metal-organic frameworks, MOFs)是一类由金属离子或金属簇与有机配体通过配位键形成的多孔晶体材料,具有高比表面积、可调控的孔径结构和良好的催化性能,在电化学传感器中展现出良好的应用前景。在抗生素检测领域,MOFs材料能够提供丰富的活性位点,增强电极对目标抗生素分子的吸附与识别能力,从而提高传感器的灵敏度和选择性。此外,其结构可设计性强,可通过调控金属节点和有机配体来优化材料的电化学性能<sup>[24]</sup>。MOFs材料虽然具有优异的结构性能,但导电性较差,因此,研究人员通常将其与导电材料如石墨烯、碳纳米管等复合使用,以提高导电性和检测性能,以此构建出性能更优越的传感器平台。Zhang等<sup>[25]</sup>报道了一种基于石墨炔(graphdiyne, GDY)和铁基MOF组装的具有强界面相互作用的先进纳米复合材料(Fe-MOF@GDY),实现对氯霉素的高性能检测。其中,石墨炔具有独特的电子结构,增强了

Fe-MOF的电荷转移,提高了电导率;Fe-MOF纳米颗粒在石墨炔上均匀复合,具有丰富的活性位点,有利于氯霉素的电化学还原。所制备的Fe-MOF@GDY具有良好的选择性、较宽线性范围(1 pmol/L~24 mmol/L)、超低检测限(0.54 pmol/L)、良好的重现性和贮存稳定性,3周后的保留率为98.4%。此外,基于Fe-MOF@GDY制作了便携式电化学芯片,成功用于湖泊水体中氯霉素的精确检测,回收率为97.2%~104.7%,具有实际的现场应用价值。Doan等<sup>[26]</sup>采用溶剂热法将Cu<sup>2+</sup>与均苯三甲酸有机配体按一定比例反应制备得到CuBTC金属有机骨架,将碳纳米管(carbon nanotube, CNT)修饰其中,研制了一种新型电化学传感器(CuBTC@CNT),用于定量检测恩诺沙星。研究显示,CuBTC和CNT之间的协同作用显著增强了恩诺沙星在CuBTC@CNT电极上的吸附溶出伏安信号,峰值电流是裸电极的12.5倍,线性范围为0.01~12 μmol/L,检出限为0.003 μmol/L。此外,该传感器具有良好的重现性、选择性和长期稳定性,能够在各种水样和模拟尿液中精确测定恩诺沙星,回收率为98%~101.5%,相对标准偏差为2.07%~6.42%。

#### 5 分子印迹聚合物及其纳米复合材料

分子印迹聚合物(molecularly imprinted polymers, MIPs)因对目标分子的高度选择性识别能力,在抗生素的电化学检测中展现出独特优势。MIPs通过模板分子引导合成,可在聚合物基质中形成与目标抗生素分子在形状、尺寸和功能基团上高度匹配的识别位点,从而实现高选择性检测<sup>[27-28]</sup>。此外,MIPs材料稳定性好、可重复使用,且不受生物样本中酶或蛋白的干扰,适用于复杂基质中抗生素的检测。近年来,研究人员通常将MIPs与纳米材料(如石墨烯、碳纳米管、金属有机框架等)复合,以此显著提升材料的导电性、比表面积和电化学活性,增强传感器的灵敏度和选择性。Shao等<sup>[29]</sup>制备了具有较高比表面积的介孔磁性纳米材料(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>@mTiO<sub>2</sub>),并通过在其表面修饰一种多巴胺功能化的可逆加成-断裂链转移试剂,将其作为分子印迹的载体。随后,在四环素存在下,通过表面引发的可逆加成-断裂链转移聚合反应,最终制备出磁性表面分子印迹聚合物(magnetic molecularly imprinted polymer, MSMIP)。通过将还原氧化石墨烯悬浮液和MSMIP滴在玻碳电极上,成功构建了一种基于表面分子印迹聚合物的电化学四环素传感器。在优化

条件下,峰值电流与四环素浓度在  $1.6 \times 10^{-9} \sim 8.8 \times 10^{-8}$  mol/L 范围内呈线性关系 ( $R^2$  为 0.999 6),检出限为  $9.16 \times 10^{-10}$  mol/L。所制备的电化学传感器可快速测定牛奶样品中的四环素,添加标准品时,回收率为 96.27%~103.84%。Nguyen 等<sup>[30]</sup>开发了一种基于双功能单体制备的分子印迹聚合物的丝网印刷电极(screen-printed electrode, SPE),用于水体环境中大环内酯类抗生素的检测。通过利用大环内酯类抗生素分子中的二醇基团与 3-氨基苯硼酸中的硼酸基团之间的可逆共价相互作用,以及大环内酯类与间苯二胺之间的非共价相互作用,构建了一种基于双功能单体的分子印迹聚合物,实现了对所有大环内酯类抗生素所共有的中心大环内酯结构的双重识别,从而有望实现对该类抗生素中各个个体成员的广谱识别。该传感器对红霉素、克拉霉素和阿奇霉素等大环内酯类抗生素的识别能力约为其非印迹对照材料的 4 倍,实现了较低的检测限(1.1~1.6 nmol/L)和定量限(3.8~5.3 nmol/L)。同时,在缓冲液和自来水样品中均表现出对大环内酯类抗生素优异的选择性、良好的回收率(93%~108%)。该研究有利于进一步开发便携式传感器,实现现场快速检测水环境中的大环内酯类抗生素残留。

## 6 总结与展望

系统综述了纳米材料修饰电极在抗生素检测中的研究进展。各类纳米材料如金属纳米材料、金属氧化物、碳基纳米材料、MOFs 和 MIPs 在提高传感器灵敏度、选择性和稳定性方面发挥了重要作用。其中,碳基纳米材料(如石墨烯、碳纳米管、碳量子点)因优异的导电性和催化活性,在抗生素检测中表现尤为突出。MOFs 和 MIPs 材料则因特异性识别能力和可调控性,在构建高选择性传感器方面具有独特优势。尽管目前基于纳米材料修饰电极的抗生素检测技术取得了显著进展,但仍面临一些挑战。例如,传感器的长期稳定性、抗干扰能力、多数传感器依赖实验室设备、缺乏真正的便携性等问题仍需进一步研究。未来的研究方向应聚焦以下方向。①材料复合设计:开发多功能复合材料(如石墨烯/MOFs 杂化物),构建具有高灵敏度、高选择性、良好稳定性、易于规模化和批量化生产的复合材料;②多目标检测:构建可同时检测多种抗生素的多功能传感器,提高检测效率;③实际样品应用验证:加强对传感器在复杂基质(如水样、食品、生物样本)中的适用性研究,确保在实际检测中的可行性;④现场检

测设备开发:结合微流控技术、便携式电化学工作站等,开发适用于现场快速检测的传感器设备。随着纳米材料科学和电化学传感技术的不断发展,基于纳米材料修饰电极的抗生素检测方法将在未来实现更广泛的应用,为食品安全、环境监测和公共健康提供有力保障。

## 参考文献

- [1] Sharma S, Chauhan A, Ranjan A, *et al.* Emerging challenges in antimicrobial resistance: Implications for pathogenic microorganisms, novel antibiotics, and their impact on sustainability[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1403168.
- [2] Yamin D, Uskoković V, Wakil A M, *et al.* Current and future technologies for the detection of antibiotic-resistant bacteria[J]. *Diagnostics*, 2023, 13(20): 3246.
- [3] Luo Y, Sun Y, Wei X, *et al.* Detection methods for antibiotics in wastewater: A review[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2024, 47(9): 1433-1451.
- [4] Sarakatsanou C, Karastogianni S, Girousi S. Promising electrode surfaces, modified with nanoparticles, in the sensitive and selective electroanalytical determination of antibiotics: A review[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5391.
- [5] 姚聪聪, 魏坚强, 林金玉, 等. 纳米材料在电化学传感器检测抗生素中的应用进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 51-61.
- [6] Lalmalsawmi J, Tiwari D, Lee S M, *et al.* Efficient electrochemical sensor for trace detection of sulfamethazine in spring water: Use of novel nanocomposite material coated with Ag or Au nanoparticles[J]. *Microchemical Journal*, 2022, 179: 107520.
- [7] Xie B, Peng H, Zhang R, *et al.* Label-free electrochemical aptasensor based on stone-like gold nanoparticles for ultrasensitive detection of tetracycline[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(10): 5678-5683.
- [8] Meireles L M, Silva R M, da Silva R C, *et al.* Low-cost electrochemical sensor for ciprofloxacin antibiotic based on green-synthesized silver nanoparticles and carbon black[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2024: 1-12.
- [9] Bozal-Palabiyik B, Erkmen C, Kurbanoglu S, *et al.* Electrochemical analysis for pharmaceuticals by the advantages of metal oxide nanomaterials[J]. *Current Analytical Chemistry*, 2021, 17(9): 1322-1339.
- [10] Zhang S, Yu S, Wang X, *et al.* An electrochemical sensor based on  $\text{MnO}_2/\text{ZnO}$  composites for the detection of ciprofloxacin in honey[J]. *Microchemical Journal*, 2023, 194: 109355.
- [11] Liao D, Wang R, Zheng Y, *et al.* In-situ growth of small-size  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles on N-doped hollow carbon spheres for electrochemical high-efficiency determination of ofloxacin-contaminated water[J]. *Microchemical Journal*, 2023, 191: 108927.
- [12] Aihaiti A, Li Z, Qin Y, *et al.* Construction of electrochemical sensors for antibiotic detection based on carbon nanocomposites[J]. *Nano-*

- materials, 2022, 12(16): 2789.
- [13] Xie M. Progress in graphene-based electrochemical sensors for antibiotic residue detection [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2024, 18(7): 6020–6034.
- [14] Bhuvaneshwari C, Elangovan A, Sharmila C, *et al.* Fabrication of cobalt tungstate/N-rGO nanocomposite: Application towards the detection of antibiotic drug-Furazolidone [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 656: 130299.
- [15] Pandiyan R, Vinothkumar V, Chen S M, *et al.* Integrated LaFeO<sub>3</sub>/rGO nanocomposite for the sensitive electrochemical detection of antibiotic drug metronidazole in urine and milk samples [J]. *Applied Surface Science*, 2023, 635: 157672.
- [16] Hong J, Su M, Zhao K, *et al.* A minireview for recent development of nanomaterial-based detection of antibiotics [J]. *Biosensors*, 2023, 13(3): 327.
- [17] Alif M F, Zainul R, Mulyani A, *et al.* Comprehensive review of functionalized multi-walled carbon nanotubes: Emerging trends and applications in simultaneous detection of uric acid, dopamine and ascorbic acid [J]. *Adv J Chem A*, 2024, 7: 319–337.
- [18] Shi S, Zhou C, Chen A, *et al.* Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub>/MWCNTs-COOH/GCE electrochemical probe for ultrasensitively and selectively detecting antibiotic norfloxacin [J]. *Chemosphere*, 2024, 364: 143139.
- [19] Jain P, Jagtap S, Chauhan M, *et al.* Electrocatalytic behaviour of self-assembled Cu-chitosan/f-MWCNT on glassy carbon electrode for detection of erythromycin in various samples [J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2023, 41: 100568.
- [20] Ding G, Yan F, Yang S, *et al.* Recent advances in carbon quantum dots for antibiotics detection [J]. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 2025, 45(1): 151–173.
- [21] Wang F, Zhang Y, Li H, *et al.* Application of carbon quantum dots as fluorescent probes in the detection of antibiotics and heavy metals [J]. *Food Chemistry*, 2025, 463: 141122.
- [22] Devi R K, Ganesan M, Chen T W, *et al.* Surface engineering of gadolinium oxide nanoseeds with nitrogen-doped carbon quantum dots: An efficient nanocomposite for precise detection of antibiotic drug ciprofloxacin [J]. *New Journal of Chemistry*, 2022, 46(9): 4090–4102.
- [23] Devi R K, Ganesan M, Chen T W, *et al.* 3D-nanocubes of N-doped carbon quantum dots adorned manganese oxide: A functional electrocatalyst for the sensitive detection of sulfadiazine [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 648: 129141.
- [24] 王麟, 韩双, 陈吉平, 等. 基于金属有机框架的电化学传感技术在抗生素检测中的研究进展 [J]. *分析化学*, 2025, 53(4): 535–546.
- [25] Zhang K, Shi Z, Li Y, *et al.* Graphdiyne chelated iron-based metal-organic frameworks for electrochemical sensing of antibiotic chloramphenicol with ultralow detection limit [J]. *Microchemical Journal*, 2024, 201: 110526.
- [26] Doan T D, Tran T T, Nguyen T H, *et al.* A novel electrochemical sensor based on CuBTC metal-organic framework decorated with carbon nanotube for highly sensitive detection of enrofloxacin in water samples [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2025, 55(1): 189–202.
- [27] Zhao G, Zhang Y, Sun D, *et al.* Recent advances in molecularly imprinted polymers for antibiotic analysis [J]. *Molecules*, 2023, 28(1): 335.
- [28] Hasaneen N, Akhtarian S, Pulicharla R, *et al.* Surface molecularly imprinted polymer-based sensors for antibiotic detection [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 170: 117389.
- [29] Shao Y, Zheng R, Wang P, *et al.* A novel surface molecularly imprinted polymer electrochemical sensor based on porous magnetic TiO<sub>2</sub> for highly sensitive and selective detection of tetracycline [J]. *Environmental Science: Nano*, 2023, 10(6): 1614–1628.
- [30] Nguyen V B C, Ayankojo A G, Reut J, *et al.* Molecularly imprinted co-polymer for class-selective electrochemical detection of macrolide antibiotics in aqueous media [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 374: 132768. ■

## 先正达南通工厂首批产品下线出厂

近日,先正达南通新工厂迎来里程碑时刻,旗下全球专利种衣剂产品万粒佳®的首款包装产品正式下线,标志着这座智能化生产基地正式迈入运营新阶段。

作为先正达集团的重要战略布局,南通新工厂从建

设到投产始终坚持以高标准打造行业标杆。此次万粒佳®实现商业化生产,不仅验证了新工厂在产线调试、质量管控等环节的全流程能力,也证明其已具备稳定供应市场的能力。

(先正达)