

基于壳聚糖的分子印迹电化学传感器研究及应用

林轩浩, 李迎丽*

重庆医科大学公共卫生学院, 重庆

收稿日期: 2026年2月4日; 录用日期: 2026年3月6日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

分子印迹技术是一种用于制备特异性分子识别聚合物的技术。分子印迹技术与电化学技术的结合催生了兼具高选择性与高灵敏度的分子印迹电化学传感器, 在快速、特异性检测中展现出显著优势, 具有重要应用价值, 广泛应用于环境监测、食品安全和临床检测等领域。壳聚糖作为一种可持续生物聚合物, 因具备优异的生物相容性、生物降解性、无毒特性及丰富的羟基与氨基官能团, 可充当分子印迹聚合物的功能单体, 使其具有稳定性、亲和性和特异性, 提升分子印迹聚合物对目标分子的识别效率与吸附容量。本文综述了基于壳聚糖的分子印迹电化学传感器的研究进展, 重点介绍了其制备原理、合成方法、壳聚糖作为功能单体的优势以及交联剂的作用机制, 还包括壳聚糖分子印迹电化学传感器在环境检测、食品检测、临床药物检测和分子手性识别等方面的应用。最后, 文章还从材料改性、复合增强和工艺优化三个角度, 展望了提升传感器性能的未来研究方向, 为绿色、高效、低成本的分子印迹电化学传感器的开发提供参考。

关键词

分子印迹技术, 壳聚糖, 电化学传感器, 特异性识别, 检出限

Research and Application of Chitosan-Based Molecularly Imprinted Electrochemical Sensors

Xuanhao Lin, Yingli Li*

School of Public Health, Chongqing Medical University, Chongqing

Received: February 4, 2026; accepted: March 6, 2026; published: March 19, 2026

*通讯作者。

文章引用: 林轩浩, 李迎丽. 基于壳聚糖的分子印迹电化学传感器研究及应用[J]. 有机化学研究, 2026, 14(1): 109-117.
DOI: 10.12677/jocr.2026.141010

Abstract

Molecular imprinting technology is a technique for preparing polymers with specific molecular recognition capabilities. The integration of molecular imprinting with electrochemical technology has led to the development of molecularly imprinted electrochemical sensors that combine high selectivity with high sensitivity. These sensors demonstrate significant advantages in rapid, specific detection and hold substantial application value, finding widespread use in environmental monitoring, food safety, and clinical diagnostics. As a sustainable biopolymer, chitosan serves as a functional monomer for molecularly imprinted polymers due to its excellent biocompatibility, biodegradability, non-toxicity, and abundant hydroxyl and amino functional groups. These properties confer stability, affinity, and specificity to the polymers, enhancing their recognition efficiency and adsorption capacity for target molecules. This review summarizes research progress on chitosan-based molecularly imprinted electrochemical sensors, focusing on their preparation principles, synthesis methods, advantages of chitosan as a functional monomer, and the mechanism of cross-linking agents. It also covers applications of chitosan molecularly imprinted electrochemical sensors in environmental detection, food testing, clinical drug screening, and molecular chirality recognition. Finally, the paper outlines future research directions for enhancing sensor performance from three perspectives: material modification, composite enhancement, and process optimization. This provides guidance for developing green, efficient, and low-cost molecularly imprinted electrochemical sensors.

Keywords

Molecular Imprinting Technology, Chitosan, Electrochemical Sensor, Specific Recognition, Detection Limit

Copyright © 2026 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

分子印迹技术(Molecular Imprinting Technology, MIT)是从仿生学的角度, 基于“抗原和抗体”、“酶和底物”相互作用原理建立的一门技术[1], 可用于合成能够特异性识别目标分子的聚合物, 合成的聚合物被称为分子印迹聚合物(Molecular Imprinted Polymer, MIP)。分子印迹聚合物的制备, 是在特定条件下通过共价或非共价相互作用使模板分子与功能单体结合形成复合物, 再加入交联剂进行交联并聚合, 之后通过洗脱剂去除模板分子, 即可在聚合物中留下与模板分子形状及作用力高度匹配的印迹空腔, 印迹空腔的选择性能实现目标分子的特异性结合, 最终得到分子印迹聚合物[2]。分子印迹聚合物因为其特异性分子识别能力, 可按需制定结构的实用性, 以及稳定性高、低成本、易制备等优点, 被广泛应用于包括样品预处理、色谱分离、化学和生物传感分析检测, 以及靶向给药、化学和生物试剂纯化、分子催化等领域[3]。

近年的研究发现了壳聚糖(Chitosan, CTS)的独特分子结构, 开始探索其在分子印迹领域的潜在应用价值。壳聚糖是一种可持续的生物聚合物, 来源丰富, 不仅可从甲壳类动物外骨骼中的甲壳素提取而得, 还存在于某些真菌的细胞壁中。壳聚糖具有优异的生物相容性、抗氧化活性、生物降解性、无毒和成膜特性, 并且含有大量羟基和氨基, 对许多物质都具有离子交换、螯合和吸附等作用, 所以壳聚糖经常被

用作分子印迹聚合物的功能单体。以壳聚糖为功能单体制备的分子印迹聚合物具有制备容易、选择性识别能力强等优点。壳聚糖分子印迹聚合物不仅可以达到吸附专一性的效果,也可以扩大吸附容量,更可以选择性吸附生物大分子。此外,壳聚糖因其具有无毒、生物可降解及生物相容性等良好特性,成为了近年来分子印迹领域中常用有毒功能单体的良好替代物,为发展绿色分子印迹技术提供了有利支撑[4]。

在电分析化学的发展过程中,分子印迹技术和电化学技术的结合具有重大的意义。分子印迹聚合物与电化学传感器相结合得到的分子印迹电化学传感器(Molecularly imprinted electrochemical sensor, MIECS)不仅操作便捷、成本低廉、选择性优异,而且灵敏度较高[5]。分子印迹电化学传感器目前已被广泛用于药物分子[6]、环境污染物[7]、生物分子[8]的检测。

本文从壳聚糖分子印迹电化学传感器的制备和应用两方面对基于壳聚糖的分子印迹电化学传感器进行论述,介绍了壳聚糖在分子印迹电化学传感器制备中的作用,阐述了分子印迹聚合物和分子印迹电化学传感器的制备方法,总结了壳聚糖分子印迹电化学传感器的应用,并在此基础上展望了该技术的未来发展。

2. 壳聚糖分子印迹电化学传感器的制备

2.1. 分子印迹聚合物合成原理

分子印迹聚合物作为合成识别元件被引入分析化学领域,是由20世纪70年代Wulff等人[9]首次提出的,他们通过自聚合反应合成了具有特异性识别功能的分子印迹聚合物。分子印迹聚合物的制备主要包括模板分子、功能单体、交联剂等物质的参与,模板分子与功能单体在一定条件下形成复合物后,就可以使用交联剂让复合物发生聚合反应,进一步形成紧密的聚合物。之后对聚合物进行洗脱,将模板分子去除,就会在聚合物中形成三维印迹空腔[10][11]。分子印迹聚合物是通过共价或非共价作用缔合而成的高分子聚合物[12],洗脱模板分子后出现的空腔中会有功能单体衍生的功能残基,当模板分子(目标分子)与三维印迹空腔再次接触,就可进行特异性结合[13]。分子印迹聚合物的合成原理与识别如图1所示。

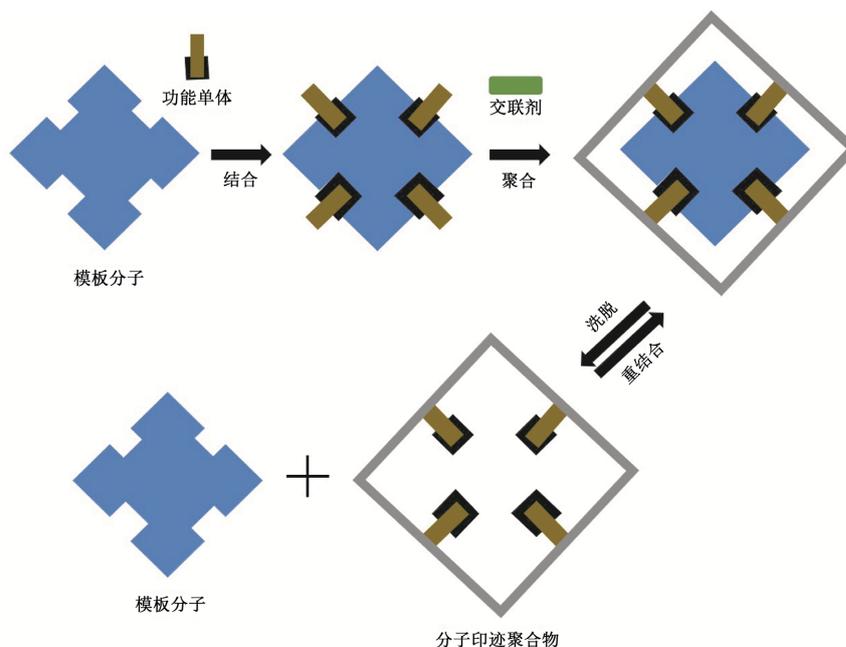


Figure 1. Synthesis principles and recognition of molecularly imprinted polymers
图1. 分子印迹聚合物的合成原理与识别

2.2. 壳聚糖作为功能单体合成分子印迹聚合物

功能单体是分子印迹聚合物制备过程中的重要成分, 壳聚糖的官能团性质及其优良的吸附性能使其适合用作分子印迹聚合物的功能单体。制备分子印迹聚合物所需的功能单体需要同时具备与模板分子作用的能力, 以及与交联剂发生聚合反应的能力, 而壳聚糖表面含有的羟基、氨基、糖苷等多种官能团可以同时满足这两个条件, 所以壳聚糖能够很好地成为分子印迹聚合物的功能单体。壳聚糖作为功能单体合成分子印迹聚合物时, 可以在形成稳定刚性骨架的同时, 通过表面功能基产生较高的键合力来提高聚合物对模板分子的印迹效率和亲和能力[14]。壳聚糖作为功能单体合成的分子印迹聚合物, 可以用于特异性结合环境和食品中的污染物[15][16], 天然化合物[17][18], 金属离子[19][20]等多种目标物质, 如表 1 所示。在壳聚糖分子印迹聚合物的制备中有本体聚合、沉淀聚合、乳液聚合、悬浮聚合、表面印迹、溶胶-凝胶等方法。

Table 1. Chitosan as a functional monomer for the synthesis of molecularly imprinted polymers

表 1. 壳聚糖作为功能单体合成分子印迹聚合物

目标物质	模板分子	合成方法
环境污染物	DBP [15]	将壳聚糖和 DBP 混合在 PBS 缓冲溶液中, 使用交联剂合成分子印迹聚合物
食品污染物	3-MCPD [16]	将壳聚糖醋酸溶液和 3-MCPD 无水乙醇溶液混合后调整 pH 值, 再使用交联剂合成分子印迹聚合物
天然化合物	芦丁[17]	将壳聚糖乙酸溶液和芦丁溶液混合并加入 GN-CNTs-IL 复合材料, 再加入交联剂合成分子印迹聚合物
天然化合物	木犀草素[18]	将 BC-AgNP 修饰的玻璃碳电极浸入木犀草-壳聚糖混合液电聚合, 再浸入交联剂孵育制得分子印迹电化学传感器
金属离子	PB ²⁺ [19]	将 CTS/Pb 混合溶液滴加于玻璃碳电极表面, 加入交联剂合成分子印迹聚合物
金属离子	Cs ⁺ [20]	在壳聚糖、CsCl 和 SBA-15-CHO 的混合溶液中加入交联剂, 加热回流得到分子印迹聚合物

2.3. 交联剂对分子印迹聚合物的影响

交联剂在壳聚糖分子印迹聚合物的合成中起着重要作用, 可影响印迹效率、结合能力、洗脱性能及传感器稳定性。在聚合过程中交联剂可以将功能单体固定在模板分子上, 使得合成分子印迹聚合物后去除模板会产生高度交联且含有印迹空腔的刚性聚合物[21]。交联剂会影响分子印迹聚合物网络结构的疏水性, 使得聚合物模板的亲合力不依赖于外部变量, 保证了聚合物的稳定性[22]。在分子印迹聚合物的制备中, 戊二醛(Glutaric Dialdehyde, GA)和乙二醇二甲基丙烯酸酯(Ethylene Glycol Dimethacrylate, EGDMA)是常用的交联剂。

戊二醛作为交联剂在涉及壳聚糖的分子印迹体系中展现出不可替代的优势。在壳聚糖分子印迹传感器中, 戊二醛的两个醛基能够与壳聚糖上两个不同氨基发生 Schiff 碱反应, 形成共价键, 从而将壳聚糖的分子链连接起来, 构建出稳定的三维网络结构, 有效固定模板分子。例如在王苑的芦丁检测研究中[23], 以壳聚糖为功能单体、戊二醛为交联剂构建的传感器表现出宽线性范围(0.01~200.0 μM)和低检出限(6 nM)。同样, 在啮虫脛检测中, 采用壳聚糖为功能基体、戊二醛为交联剂制备的传感器显示出快速响应和良好的识别性能[24]。不仅如此, 戊二醛也被用于交联检测蛋白质的分子印迹聚合物, 它能与蛋白质的氨基形成共价键, 实现高效固定。一项研究通过壳聚糖和戊二醛修饰金纳米粒子电极, 成功构建了能检测七种不同

蛋白质(包括 BSA、HSA 等)的传感器,而未使用戊二醛的对照传感器仅能检测含巯基的蛋白质[25]。对于体积小、结构简单的小分子而言,印迹空腔的精度要求会较高。EGDMA 形成的刚性聚合物网络高度交联,更加致密,适用于功能单体和模板分子均为小分子的分子印迹聚合物。被广泛应用于多种小分子的印迹传感器制备中,包括三聚氰胺[26]、唾液酸[27]、羟基多环芳烃[28]、氯氰菊酯[29]、金霉素[30]等。

不仅如此,许多壳聚糖分子印迹聚合物是用于水环境(如检测水体环境下 PFF 含量[31]、己烯雌酚环境水样检测[32])的,而戊二醛交联的壳聚糖亲水性强,在水溶液中能保持良好的溶胀性和生物相容性;但 EGDMA 交联形成的聚合物是疏水的,在这样的水相环境中应用效果会大打折扣。所以在制备壳聚糖分子印迹电化学传感器时主要选用的交联剂为戊二醛,在聚合过程中使聚合物的三维网络结构更加牢固,可耐高温高压,且可生成稳定的特异性识别印迹空腔。

2.4. 分子印迹电化学传感器的制备

电化学传感器是一种能够将化学信号转换为电信号的装置,也是电化学分析的一类技术,具有成本低、灵敏度高、选择性高、便于携带、易于操作等优点[33]。电化学传感器主要包括感应元件和信号转换系统,其原理是将待测物质置于电解池中并施加电反应条件,待测物质就会与感应元件相互作用并产生对应的信号,转换器就会将生成的信号转化为电信号,再将电信号进行修饰并放大处理从而得到高精度的结果,对物质进行定性和定量分析[34][35]。

电化学传感器大多为两电极或三电极系统,两电极系统的感应元件主要包括:工作电极(传感电极)和对电极(反电极),三电极系统会额外引入参比电极。工作电极是直接和目标物质发生电化学反应的电极;对电极与工作电极配合,构成电流回路,确保电流的稳定流动;参比电极则用于提供一个稳定的、已知的电势参考点,从而精确控制工作电极的电位,避免其在反应中发生极化,从而提升测量的稳定性和线性范围。在分子印迹电化学传感器的制备过程中,主要就是在传感器感应元件的工作电极上进行分子印迹聚合物的修饰,以提高电极的比表面积、反应催化效率和电子传递性能等[36]。

壳聚糖作为分子印迹功能性聚合物基质,与传统的分子印迹聚合物相比,具有性质温和、模板分子易于形成和洗脱的特点。因此,选择壳聚糖作为分子印迹材料,对分子印迹膜的合成和传感器的制作都有重要的作用[14]。在壳聚糖分子印迹电化学传感器的制备过程中,通常有两种策略可供选择。一种是先通过电沉积或电聚合将聚合物附着在工作电极上,再使用交联剂对电极上的聚合物进行交联[15][16][18][19];另一种是先在模板分子、功能单体等材料的混合溶液中加入交联剂,合成分子印迹聚合物,再将分子印迹聚合物滴加附着于工作电极上[17][20]。

3. 壳聚糖分子印迹电化学传感器的应用

3.1. 环境检测

壳聚糖分子印迹电化学传感器因其良好的稳定性、丰富的官能团和生物相容性,可以实现对复杂环境中目标物的高选择性和高灵敏度检测,已被成功开发用于检测环境中的有机污染物和金属离子等物质。

关于有机污染物,在新疆大学吐尔逊·阿不都热依木教授团队的研究中[37],壳聚糖分子印迹电化学传感器被用于检测环境内分泌干扰物双酚 A,传感器具有宽线性范围(0.005~100 μM)、低探测限(0.28 nM)、良好的抗干扰性能和卓越的稳定性,且真实样本中双酚 A 的标准回收率为 98.0%至 105.2%,相对标准差(RSD)为 3.45%至 5.69%。Juan Hidalgo 等人开发的复合壳聚糖分子印迹电化学传感器用于环境样品中农药莠去津的检测[38],检出限和灵敏度值分别为 0.57 ± 0.01 nM 和 6.63 nA/nM,线性范围为 2.70 至 6.50 nM,回收率为 98.72%,优于其他报道的用于莠去津检测的电化学装置。而在环境邻苯二甲酸二丁酯的检测上,Qingteng Zhou 等人制备的壳聚糖分子印迹电化学传感器可达 0.0026 μM 的检出限[15],优于其他

研究的 $0.06 \mu\text{M}$ [39] 和 $0.08 \mu\text{M}$ [40]。

在金属离子的检测方面, Hamada 等人研究的新型可持续双交联壳聚糖分子印迹聚合物可实现 15 秒反应时间内 Cd(II) 的回收率为 99.03%, As(V) 的回收率为 99.06% [41]。对于 PB^{2+} 的检测, 壳聚糖分子印迹电化学传感器的检出限为 $6.5074 \mu\text{M}$ [19], 优于金纳米颗粒检测法的检出限 $12.661 \mu\text{M}$ [42]。在王龙等人的环境铯离子检测研究中[20], 以 SBA-15 为基底、壳聚糖为功能单体、 Cs^+ 为模板离子制备了铯离子印迹聚合物, 并将其与 PVC、增塑剂和亲脂性盐复合修饰玻碳电极, 构建了一种新型铯离子电位传感器。该电化学传感器经过分子印迹聚合物的修饰, 显著增强了对 Cs^+ 的选择性识别能力, 传感器对 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Rb^+ 、 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等共存离子的选择性系数均在 10^{-2} ~ 10^{-4} 数量级, 表现出良好的抗干扰能力。在实际样品检测中, 传感器对城市加标水样中 Cs^+ 的测定结果与 ICP-MS 具有良好一致性, 回收率达 92.8%~93.4% 且 RSD 小于 1.5%, 显示出良好的准确性和实用性, 优于其他研究中 PAB 线形共聚物传感器的检出限 $10 \mu\text{M}$ [43]。

3.2. 食品检测

壳聚糖分子印迹电化学传感器在食品检测领域应用广泛, 主要用于检测抗生素残留、农药残留、食品添加剂及加工污染物等几大类物质。壳聚糖作为天然高分子材料, 能够通过分子印迹技术为目标分子创造特异性的识别位点, 从而在复杂的食品基质中实现对目标物的高选择性和高灵敏度检测。

有研究制备了壳聚糖分子印迹电化学传感器检测食品中的氯丙二醇(3-MCPD) [16], 该传感器对 3-MCPD 的检出限为 $0.018 \mu\text{M}$, 在饮用水和酱油样本中的验证显示回收率为 80.63%~127.00%, 优于对氨基噻吩酚金纳米传感器的检出限 $0.010 \mu\text{M}$ [44] 和荧光检测方法的检出限 $0.543 \mu\text{M}$ [45]。

壳聚糖分子印迹电化学传感器也可用于检测荞麦茶、芦丁片等食品样本中的芦丁[17], 研究表明其不仅线性检测范围宽, 检出限低至 6 nM, 回收率为 93.40%~97.70%, 而且选择性较高、重现性好、稳定性佳, 优于其他研究中有有机荧光纳米颗粒检测的检出限 $0.016 \mu\text{M}$ [46] 和硫化钴镍/多壁碳纳米管复合材料的电化学传感器的检出限 $0.014 \mu\text{M}$ [47]。

3.3. 临床医学和药理学检测

基于壳聚糖的分子印迹电化学传感器在临床医学和药理学领域展现出广阔的应用前景, 主要用于药物的检测以及手性药物的识别。木犀草素具有抗氧化、抗病毒、抗肿瘤、提高免疫力等作用, 可用于治疗各种疾病, 测定实际样品中的木犀草素具有一定的实际意义。魏鑫等人在研究中制备了检测木犀草素的壳聚糖分子印迹电化学传感器[18], 检出限为 7.12 nM 且加标回收率为 91.76%~102.37%, 优于 HAP-CNT 电化学传感器的检出限 $0.08 \mu\text{M}$ [48] 和二硫化钼/GN-CNTs 电化学传感器的检出限 $0.009 \mu\text{M}$ [49]。

在手性药物的识别方面, 有研究构建了壳聚糖电化学手性传感器, 利用壳聚糖的手性识别位点与苯甘氨酸对映体形成氢键能力的差异, 实现对映体的选择性识别[50]。该传感器在优化条件下具有良好的稳定性与重复性, 5 组电极识别效率的相对标准偏差为 1.68%。在实际样品检测方面, 该传感器成功用于区分左旋和右旋苯甘氨酸, 其峰电流比值(IR/IS)达 1.42, 表明其对目标对映体具有较好的识别能力。

张金萍等人的研究合成了选择性检测具有旋光活性的色氨酸(Trp)对映体的石墨烯/壳聚糖复合分子印迹电化学传感器[51], 证明了 L-Trp 比 D-Trp 具有更高的电化学响应, 可为分子药物及临床医学领域中手性对映体的识别提供思路。

4. 展望

除了以上优点, 壳聚糖分子印迹电化学传感器也有不足之处。比如仅使用壳聚糖做为功能单体合成的分子印迹聚合物稳定性欠佳, 导致识别位点的可及性、传质效率及模板洗脱效果不是特别理想。此外,

壳聚糖在碱性和中性水溶液中的溶解性及孔隙率也不佳, 使得所构建的电化学传感器结构不稳定、结合效率低, 限制了其在复杂测量环境的应用。为了进一步提升壳聚糖分子印迹电化学传感器的性质, 可以从以下几方面进行研究: (1) 对壳聚糖进行改性或修饰, 进一步提高功能单体的性能; (2) 使用复合材料提升传感器稳定性并强化信号, 如引入 MOF 材料增加孔隙率; (3) 优化合成工艺, 提升分子印迹聚合物和电化学传感器的质量。

参考文献

- [1] 王瑜, 刘岑, 杨智翔, 等. 分子印迹技术在大环内酯类药物检测中的应用[J]. 饲料研究, 2024, 47(5): 172-176.
- [2] Linh, C.N., Duvanova, O.V., Yen, V.H., Zyablov, A.N. and Nesterenko, P.N. (2020) Modeling of Butyric Acid Recognition by Molecular Imprinted Polyimide. *Journal of Molecular Modeling*, **26**, Article No. 194. <https://doi.org/10.1007/s00894-020-04462-w>
- [3] 程寿年, 任书芳, 冯润妍, 等. 分子印迹技术在电化学传感领域的应用研究进展[J]. 分析科学学报, 2021, 37(6): 819-827.
- [4] 许龙, 黄运安, 朱秋劲, 等. 基于壳聚糖的分子印迹聚合物的制备和应用[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 847-855.
- [5] 黄桂珍, 汪庆祥, 陈金美, 等. 灵芝酸 A 分子印迹聚合物电化学传感器的制备及应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(1): 24-30.
- [6] Wang, Y., Yao, L., Liu, X., Cheng, J., Liu, W., Liu, T., et al. (2019) CuCo₂O₄/N-Doped Cnts Loaded with Molecularly Imprinted Polymer for Electrochemical Sensor: Preparation, Characterization and Detection of Metronidazole. *Biosensors and Bioelectronics*, **142**, Article ID: 111483. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111483>
- [7] Anirudhan, T.S., Athira, V.S. and Chithra Sekhar, V. (2018) Electrochemical Sensing and Nano Molar Level Detection of Bisphenol-A with Molecularly Imprinted Polymer Tailored on Multiwalled Carbon Nanotubes. *Polymer*, **146**, 312-320. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.05.052>
- [8] Zhang, G., Yu, Y., Zhang, L., Lin, B., Wang, Y., Guo, M., et al. (2020) Precise Detection of Prostate Specific Antigen in Serum: A Surface Molecular Imprinted Sensor Based on Novel Cooperated Signal Amplification Strategy. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **302**, Article ID: 126998. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126998>
- [9] Wulff, G. and Sarhan, A. (1972) Über die Anwendung von enzymanalog gebauten Polymeren zur Racemattrennung. *Angewandte Chemie*, **84**, 364-364. <https://doi.org/10.1002/ange.19720840838>
- [10] 荣毅, 张亮, 俞文英, 等. 基于分子印迹技术的手性药物拆分及对映体选择性释药系统研究进展[J]. 中国医药工业杂志, 2014, 45(4): 381-386.
- [11] Garg, M. and Pamme, N. (2024) Strategies to Remove Templates from Molecularly Imprinted Polymer (MIP) for Biosensors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **170**, Article ID: 117437. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117437>
- [12] 李增良, 顾丽莉, 唐徐禹, 等. 烟碱分子印迹聚合物的制备与应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(11): 37-41, 48.
- [13] 遇世友, 李卓航, 王鑫, 等. 基于分子印迹电化学技术的农药残留检测传感器的研究进展[J/OL]. 食品工业科技, 2025. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040199>, 2026-03-06.
- [14] 冯颖, 李齐雪, 邵娟, 等. 基于壳聚糖的分子印迹技术研究及应用[J]. 材料导报, 2022, 36(17): 214-221.
- [15] Zhou, Q., Guo, M., Wu, S., Fornara, D., Sarkar, B., Sun, L., et al. (2021) Electrochemical Sensor Based on Corn cob Biochar Layer Supported Chitosan-MIPs for Determination of Dibutyl Phthalate (DBP). *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **897**, Article ID: 115549. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115549>
- [16] Wu, N., Wang, X., Xu, R., Sun, C., Li, X. and Li, Q. (2025) A Visualization-Enhanced Electrochemical Sensing System with Mobile Data Transmission for Rapid 3-Monochloropropane-1,2-Diol Detection. *Food Chemistry*, **492**, Article ID: 145397. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.145397>
- [17] 王苑, 赵发琼, 曾百肇. 基于芦丁分子印迹壳聚糖-离子液体功能化石墨烯-碳纳米管的电化学传感器的制备及应用[J]. 分析科学学报, 2021, 37(4): 500-506.
- [18] 魏鑫, 刘卫国, 楚刚辉. 基于绿色还原的碳-银纳米粒子分子印迹电化学传感器用于木犀草素的检测[J]. 微纳电子技术, 2023, 60(6): 886-895.
- [19] Li, Y., Dang, W., Deng, Z., Chen, X., Tang, W., Zhang, J., et al. (2024) Preparation of a Novel DNA-Imprinted Sensor Based on Chitosan and Its Highly Sensitive Detection of Pb²⁺. *International Journal of Biological Macromolecules*, **272**, Article ID: 132703. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132703>

- [20] 王龙, 王志明, 周措, 等. 基于表面印迹聚合物的铈离子电化学传感器的制备及应用[J]. 青海大学学报, 2020, 38(3): 81-88.
- [21] Pratama, K.F., Manik, M.E.R., Rahayu, D. and Hasanah, A.N. (2020) Effect of the Molecularly Imprinted Polymer Component Ratio on Analytical Performance. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, **68**, 1013-1024. <https://doi.org/10.1248/cpb.c20-00551>
- [22] 吕晓华. 改性壳聚糖基离子印迹复合吸附材料的制备及性能研究[D]: [博士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [23] 王苑. 壳聚糖基分子印迹电化学传感器的制备及应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [24] 黄咏星. 新型分子印迹电化学传感器的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学, 2010.
- [25] Jia, M., Li, Y., Qin, Z., Li, L., Peng, L., Yang, M., *et al.* (2026) The Preparation of Two Molecularly Imprinted Electrochemical Sensors Based on Gold Nanoparticles and Glutaraldehyde and Their Application in Protein Detection. *Microchimica Acta*, **193**, Article No. 119. <https://doi.org/10.1007/s00604-026-07887-x>
- [26] 殷锡峰, 周小华, 张文文, 等. 纳米金掺杂-三聚氰氨印迹修饰电化学传感器的制备及性能研究[J]. 分析试验室, 2021, 40(5): 593-597.
- [27] 普航. 基于 MIT 和 eATRP 技术制备唾液酸分子印迹聚合物纳米材料及电化学仿生传感器[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [28] 张利军. 基于 ZIF-8 封装贵金属异质结构的双模板分子印迹电化学传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 信阳: 信阳师范学院, 2022.
- [29] 秦吉. 钙钛矿-分子印迹光电化学传感器的构建及其在氯氰菊酯检测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- [30] 陈嫣然. 基于离子液体的表面分子印迹电化学传感器的研制及其对四环素类抗生素的检测[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2023.
- [31] 张育珍, 陈金明, 张晨雷, 等. 基于绿色化学制备印迹聚合物及富集丙溴磷的研究[J]. 分析科学学报, 2024, 40(5): 533-540.
- [32] 王露, 王芹, 宋鑫, 等. 用于分离富集己烯雌酚的磁性分子印迹聚合物的制备及其在环境水样检测中的应用[J]. 理化检验(化学分册), 2019, 55(10): 1180-1185.
- [33] 丁梓峻, 谷庆阳. 电化学传感器在检测生物标志物和离子中的应用进展[J]. 中国无机分析化学, 2026, 16(1): 59-67.
- [34] 韦思奕, 伍文琪, 崔润洋, 等. 电化学传感器分析技术在中药质量控制中的研究进展[J]. 江西中医药, 2025, 56(5): 67-71.
- [35] 马春慧, 秦旭阳, 许慧娟, 等. 电极修饰材料在分子印迹电化学传感器的应用研究进展[J]. 林产化学与工业, 2023, 43(4): 127-139.
- [36] 王艳, 包士雷, 孙立瑞, 等. 电化学技术在食品检测中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 295-306.
- [37] Ma, L., Cui, Y., Wang, Z., Cheng, Q., Zhou, Y., Zhang, G., *et al.* (2025) A Novel Molecularly Imprinted Sensors Using Chitosan on Nitrogen-Doped Hollow Carbon Nanospheres for Bisphenol a Detection. *Journal of Hazardous Materials*, **495**, Article ID: 139149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139149>
- [38] Hidalgo, J., Vilasó-Cadre, J.E., Tamás, K., Galambos, I., Reyes-Domínguez, I.A., Kovács, N., *et al.* (2026) An Ultrasensitive Electrode Modified with a Molecularly Imprinted Pedot-TiO₂ Nanocomposite for Voltammetric Atrazine Detection in Environmental Samples. *Talanta*, **297**, Article ID: 128780. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128780>
- [39] Xu, W., Zhang, X., Huang, W., Luan, Y., Yang, Y., Zhu, M., *et al.* (2017) Synthesis of Surface Molecular Imprinted Polymers Based on Carboxyl-Modified Silica Nanoparticles with the Selective Detection of Dibutyl Phthalate from Tap Water Samples. *Applied Surface Science*, **426**, 1075-1083. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.241>
- [40] Zhou, Z., Li, T., Xu, W., Huang, W., Wang, N. and Yang, W. (2017) Synthesis and Characterization of Fluorescence Molecularly Imprinted Polymers as Sensor for Highly Sensitive Detection of Dibutyl Phthalate from Tap Water Samples. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **240**, 1114-1122. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.092>
- [41] Hawash, H.B., Hagar, M., Elkady, M.F., Moneer, A.A., El-Qelish, M., El-Tahawy, M.M.T., *et al.* (2024) Microwave-assisted Supramolecular Double Crosslinked Chitosan-Based Molecularly Imprinted Polymer for Synergistic Recognition and Selective Recovery of Cd(II) and As(V) from Water: Performance and Mechanistic Insights. *International Journal of Biological Macromolecules*, **281**, Article ID: 136263. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136263>
- [42] Do Dat, T., Cong, C.Q., Le Hoai Nhi, T., Khang, P.T., Nam, N.T.H., Thi Tinh, N., *et al.* (2023) Green Synthesis of Gold Nanoparticles Using *Andrographis paniculata* Leave Extract for Lead Ion Detection, Degradation of Dyes, and Bioactivities.

-
- Biochemical Engineering Journal*, **200**, Article ID: 109103. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.109103>
- [43] 秦海跃, 刘壮, 谢锐, 等. 聚(丙烯酸-共聚-苯并-18-冠醚-6-丙烯酰胺)的铯离子响应特性及其铯离子检测性能[J]. 化工进展, 2022, 41(6): 3155-3161.
- [44] Özyurt, V.H., Can, G. and Anik, Ü. (2025) Development of Electrochemical 3-MCPD Sensor Based on Molecularly Imprinted Polymer Coating on Metal Organic Framework Modified Gold Electrode. *Journal of Food Composition and Analysis*, **138**, Article ID: 107004. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.107004>
- [45] Xu, T., Fu, Q., Qingru, Z., Wang, Z., Liu, X., Xiao, S., *et al.* (2024) A Simple Fluorescence Pyrocatechol-Polyethyleneimine Detection Method for 3-MCPD. *Analytical Methods*, **16**, 276-283. <https://doi.org/10.1039/d3ay01912h>
- [46] 陈丽娟, 陈畅畅, 刘长骏, 等. 叶酸调控的聚多巴胺荧光纳米探针对芦丁的分析检测[J]. 分析测试学报, 2025, 44(4): 702-707.
- [47] 黄青, 李美仪, 徐舒柔, 等. 基于硫化钴镍/多壁碳纳米管复合材料的电化学传感器检测芦丁[J]. 分析化学, 2024, 52(12): 1834-1843.
- [48] Gao, F., Chen, X., Tanaka, H., Nishitani, A. and Wang, Q. (2016) Alkaline Phosphatase Mediated Synthesis of Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Nanocomposite and Its Application for Electrochemical Determination of Luteolin. *Advanced Powder Technology*, **27**, 921-928. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.02.016>
- [49] Xu, B., Zhang, B., Yang, L., Zhao, F. and Zeng, B. (2017) Electrochemical Determination of Luteolin Using Molecularly Imprinted Poly-Carbazole on MoS₂/Graphene-Carbon Nanotubes Nanocomposite Modified Electrode. *Electrochimica Acta*, **258**, 1413-1420. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.12.004>
- [50] 谢立成, 陆秋娜, 姜艳. 基于壳聚糖的电化学手性传感器的制备及应用[J]. 化学研究与应用, 2025, 37(12): 3789-3795.
- [51] 张金萍, 范景彪, 黄艳, 等. 石墨烯/壳聚糖电化学传感器对色氨酸对映体的选择性识别[J]. 影像科学与光化学, 2018, 36(5): 398-407.