

富氮共价有机框架衍生的氮掺杂多孔碳 用于对乙酰氨基酚的高灵敏 电化学传感研究

张淑, 杨娟*

武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年4月2日; 录用日期: 2025年5月5日; 发布日期: 2025年5月13日

摘要

共价有机框架(Covalent Organic Frameworks, COFs)具有高比表面积、结构可设计以及易功能化修饰等特性。以COFs为前驱体, 通过直接煅烧制备的碳材料不仅具有高导电性, 还能保留多孔结构和杂原子掺杂特性, 显著提升材料的比表面积和催化活性。将COFs衍生碳材料用于构建电化学传感器, 能够增强其对待测物的吸附和传质作用, 提高传感性能。在本项研究中, 以含有丰富氮元素的COF_{TPPa}为前驱体, 成功制备了具有多孔结构的氮掺杂碳材料(NPC)。并采用循环伏安法(CV)、交流阻抗法(EIS)、差分脉冲伏安法(DPV)等一系列电化学检测技术, 对使用NPC材料构建的对乙酰氨基酚(Acetaminophen, AP)传感器的性能进行了评估。NPC/GCE电极在进行电化学检测时对AP表现出良好的响应效果, 经过一系列测试证明了其所构建的传感器具有优异的重复性、重现性、抗干扰等能力。

关键词

共价有机框架, 碳材料, 对乙酰氨基酚, 电化学传感器

Nitrogen-Rich COFs Derived Nitrogen-Doped Carbon Materials for Electrochemical Sensing of Acetaminophen

Shu Zhang, Juan Yang*

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Apr. 2nd, 2025; accepted: May 5th, 2025; published: May 13th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张淑, 杨娟. 富氮共价有机框架衍生的氮掺杂多孔碳用于对乙酰氨基酚的高灵敏电化学传感研究[J]. 材料科学, 2025, 15(5): 912-919. DOI: 10.12677/ms.2025.155095

Abstract

Covalent Organic Frameworks (COFs) exhibit remarkable properties, including a high specific surface area, a designable structure, and ease of functional modification. When COFs are employed as precursors for direct calcination, the resulting carbon materials not only possess high electrical conductivity but also retain their porous structure and heteroatom-doping features. This significantly enhances the specific surface area and catalytic activity of the materials. The utilization of COF-derived carbon materials in the fabrication of electrochemical sensors can facilitate the adsorption and mass transfer of analytes, thereby improving the sensing performance. In this study, nitrogen-doped carbon materials (NPC) with porous structure were successfully prepared using nitrogen-rich COF_{TpPa} as a precursor. A range of electrochemical detection techniques, such as cyclic voltammetry (CV), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and differential pulse voltammetry (DPV), were employed to evaluate the performance of the acetaminophen (AP) sensor fabricated with NPC materials. During electrochemical detection, the NPC/GCE electrode demonstrated a favorable response to AP. A series of tests confirmed that the sensor exhibits excellent repeatability, reproducibility, and anti-interference capabilities.

Keywords

Covalent Organic Framework, Carbon Materials, Acetaminophen, Electrochemical Sensor

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

对乙酰氨基酚(Acetaminophen, AP)作为常用的解热、镇痛及消炎药物,是大多数感冒与流感药物的主要成分,常用于发热、神经痛及术后镇痛等治疗场景[1]。在推荐剂量范围内,AP具有良好的治疗效果与耐受性。然而,过量使用AP危害极大,可引发急性肝损伤、呕吐、胃痛等症状,严重时甚至会致使心脏与肝脏发生病变,危及生命[2]。通常,当AP浓度高于 150 mg mL^{-1} 时,便会对人体产生不良影响[3]。所以,在药品质量检测等领域,开发一种快速、简便的分析技术,实现对AP的精准检测,对于确保用药剂量恰当、预防器官损伤而言至关重要。

目前测定AP浓度的常用检测方法有很多。其中包括光学分析,比如分光光度法、荧光法以及化学发光法;色谱分析,如高效液相色谱法、气相色谱法和薄层色谱法;电化学方法也是使用较多的一种分析方法[4]。与其他方法相比,电化学检测方法具有显著优势,在不需要进行样品前处理和大型仪器使用的条件下就能够实现对目标待测物的准确、快速测定[5]。

如今各种碳基纳米材料由于其出色的催化能力已经被应用到对乙酰氨基酚电化学传感器的设计中[6]。例如碳纳米管、石墨烯、共价有机框架衍生多孔碳等不同类型的碳材料。碳材料具有良好的导电性和电荷转移能力,并且在电化学分析技术中发展迅速[7]。其中由共价有机框架(Covalent Organic Frameworks, COFs)衍生的碳材料具有高孔隙率、良好导电性、COF前驱体结构可设计等多种优点,作为电极修饰材料在电化学传感器的构建中具有很大的应用潜力[8][9]。与传统碳基材料相比,COFs衍生碳材料保留了部分前驱体结构特性[10]。一方面,不同COFs前驱体及碳化参数设置,为COFs衍生材料带来更多杂原子掺杂和孔径选择[11][12];另一方面,COFs衍生碳材料密度更低,能暴露更多活性中心,更易与反应

介质连接[13][14]。总体而言, 以 COFs 为前驱体衍生的碳基材料, 通常具备高表面积、可调孔径和良好稳定性, 有助于强化传质和电子转移过程, 显著提升材料在催化、电化学和吸附等方面的性能[15]。这主要源于 COFs 衍生材料的高孔隙率, 能增强对分析物的吸附, 促进电化学反应; 良好的导电性利于电子传递; 且 COFs 结构可设计, 针对不同目标分析物, 合理设计 COFs 基复合材料前驱体结构, 可制得多样且性能优异的 COFs 衍生材料。因此, 基于 COFs 基衍生材料构建的电化学传感器, 可能在灵敏度、选择性和稳定性上表现出较好的效果。

本工作通过简单快速的方法在较短的时间内成功制备了 COF_{TpPa} 前驱体。在惰性氛围下通过高温热解步骤合成了氮掺杂的多孔碳材料 NPC。由此制备的氮掺杂碳材料具有丰富的多孔结构, 氮原子的存在也使得材料催化性能得到了提升。所制备的 NPC/GCE 电化学传感器表现出良好的催化效果, 能够实现对 AP 的快速灵敏检测。

2. 实验部分

2.1. 实验试剂与仪器

实验试剂: KCl 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、对苯二胺(PDA)、 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 、 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 、丙酮、1,4-二氧六环、三甲苯、乙酸从国药有限公司购买, 三醛基间苯三酚(Tp)从上海毕得制药有限公司购买, 对乙酰氨基酚(AP)从阿拉丁购买。所用试剂均为分析级试剂, 直接使用, 无需进一步纯化。

实验仪器: 采用场发射扫描电镜(SEM, GeminiSEM 300)和透射电镜(TEM, JEM-2100)对复合材料的微观形貌进行表征, X 射线衍射(XRD, Bruke D8, Cu K α)对复合材料的元素组成进行分析。使用 CHI760E 电化学分析仪(辰华公司)进行一系列电化学测试。以铂丝为对电极, 饱和甘汞电极(SCE)为参比电极, 玻璃碳电极(GCE, 直径 = 3.0 mm)或改性 GCE 为工作电极, 构建标准的三电极体系。

2.2. COF_{TpPa} 和 NPC 复合材料的制备

COF_{TpPa} 材料的制备: COF_{TpPa} 是根据已发表的文献合成的[16]。首先, 将 48 mg 的对苯二胺和 63 mg 三醛基间苯三酚装入 Pyrex 管中, 以三甲苯(1.5 mL)、1,4-二氧六环(1.5 mL)和乙酸(0.5 mL, 3 M)为溶剂。将混合物超声 10 min, 均匀分散。将 Pyrex 管在 77 K (液态 N_2)下快速冷冻, 并通过三次冷冻泵-解冻循环脱气。将试管封闭, 120 $^\circ\text{C}$ 下加热 3 天。然后将所得样品在丙酮中洗涤多次。所得粉末在 80 $^\circ\text{C}$ 下, 真空干燥 24 h 后得到 COF_{TpPa} 。

NPC 材料的制备: 称取一定质量的 COF_{TpPa} 前驱体, 将复合材料放置在瓷舟中, 在氮气气氛下加热至 900 $^\circ\text{C}$, 并在此条件下保持 2 h, 得到了衍生产物命名为 NPC。

2.3. 修饰电极的制备

首先对玻碳电极(GCE)进行预处理, 取适量氧化铝抛光粉置于麂皮上, 打磨 GCE 表面后, 用去离子水反复冲洗, 直至 GCE 表面清洁、光亮。完成 GCE 预处理后, 进行修饰电极的制备, 准确称取 2 mg NPC 样品, 将其加入 1 mL DMF 溶液中, 利用超声将其充分分散, 得到均匀的悬浮液。将一定体积的悬浮液滴涂在 GCE 表面, 置于红外灯下干燥, 待溶剂完全挥发, 成功制得 NPC 修饰的玻碳电极(NPC/GCE)。

3. 结果与讨论

3.1. 材料的形貌与结构组成

采用 XRD 对前驱体 COF_{TpPa} 及其衍生材料 NPC 的晶体结构进行表征, 结果如图 1(a)和图 1(b)所示。在图 1(a)中, 前驱体 COF_{TpPa} 的 XRD 谱图上, 5.0 $^\circ$ 、8.8 $^\circ$ 、26.7 $^\circ$ 处存在明显的衍射峰, 它们分别对应 COF_{TpPa}

材料的(100)、(220)、(001)晶面,这与文献的报道结果一致[17]。随后,将前驱体 COF_{TpPa} 在惰性氛围中进行 800°C 高温煅烧, COF_{TpPa} 被完全碳化 of NPC 材料。图 1(b)的 XRD 谱图显示, NPC 材料在 26.4° 、 43.5° 出现两个显著的衍射峰,对应碳的(002)、(001)晶面。衍生材料 NPC 中(002)石墨碳的存在,对降低材料电阻、提升材料的导热和导电性能有积极作用。上述 XRD 表征结果表明, COF_{TpPa} 和 NPC 材料的成功合成。

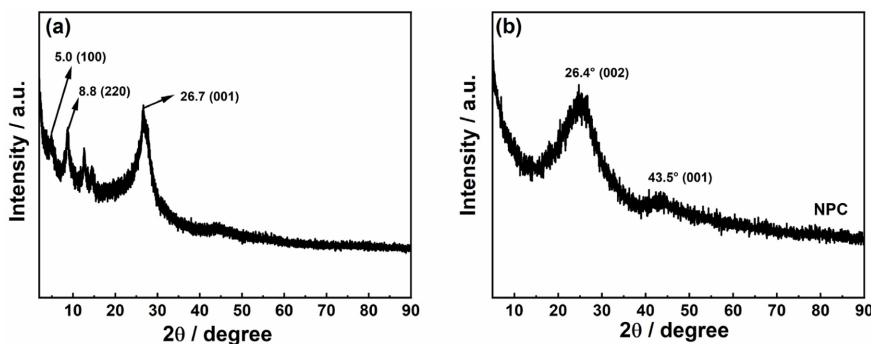


Figure 1. (a) XRD pattern of COF_{TpPa} ; (b) XRD patterns of NPC

图 1. (a) COF_{TpPa} 的 XRD 图谱; (b) NPC 的 XRD 图谱

采用扫描电子显微镜(SEM)与透射电子显微镜(TEM)两种微观表征技术,系统分析了 COF_{TpPa} 和 NPC 材料的微观形貌。图 2(a)为前驱体 COF_{TpPa} 的 SEM 图像,借助 SEM 高分辨率成像,能清晰观察到 COF_{TpPa} 由众多尺寸较为均一的球形小颗粒团聚而成。这些小颗粒相互聚集,形成了宏观上的块状形貌,侧面反映出 COF_{TpPa} 在合成过程中的自组装特性。图 2(b)展示的是 NPC 材料的 SEM 图像,从中可以看到, NPC 材料呈现出大面积的块状多孔结构。这些孔隙分布大小不一,为 NPC 材料提供了较大的比表面积,可能对材料的吸附、传输等性能产生积极影响。NPC 材料的 TEM 图像(图 2(c))同样表明, NPC 在微观尺度下维持块状结构。通过对 COF_{TpPa} 和 NPC 材料的 SEM 和 TEM 图像分析,为后续研究材料的性能和应用奠定了基础。

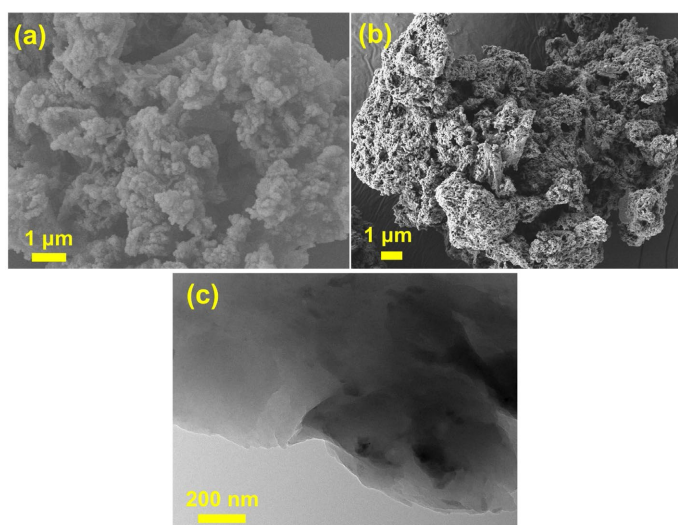


Figure 2. (a) SEM images of COF_{TpPa} ; (b) SEM images of NPC; (c) TEM images of NPC

图 2. (a) COF_{TpPa} 和 NPC (b)材料的 SEM 图像; (c) NPC 材料的 TEM 图像

3.2. 修饰电极的电化学表征

为探究不同材料修饰电极的电化学性能, 本研究选取 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 作为氧化还原探针, 运用循环伏安法(CV)和电化学阻抗谱法(EIS)两种电化学分析技术, 对各类修饰电极进行测试。图 3(a)显示的是循环伏安(CV)曲线, 测试结果表明玻碳电极(GCE)、 COF_{TpPa} 修饰玻碳电极($\text{COF}_{\text{TpPa}}/\text{GCE}$), 以及 NPC 修饰玻碳电极(NPC/GCE)均清晰地出现了一对氧化还原峰。这一现象归因于溶液中 Fe(II) 和 Fe(III) 之间发生的可逆氧化还原转换, 表明这些电极均可与 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 探针发生有效的电化学相互作用。然而不同电极的电流响应存在显著差异。 $\text{COF}_{\text{TpPa}}/\text{GCE}$ 电极的电流响应最低, 表明其对氧化还原反应的催化活性相对较弱。当 NPC 材料修饰于 GCE 表面后, 电极的电流响应值发生了明显变化。 NPC/GCE 电极的电流响应最大, 这充分表明 NPC 材料具有较高的电化学活性, 能够显著促进氧化还原反应的进行, 提高电极的检测灵敏度。图 3(b)是交流阻抗谱测试结果, 通过对不同材料修饰电极的电荷转移电阻进行比较, 发现其大小顺序为: $\text{COF}_{\text{TpPa}}/\text{GCE} > \text{GCE} > \text{NPC}/\text{GCE}$ 。电荷转移电阻是衡量电极反应动力学过程的重要参数, NPC/GCE 的阻值最小, 代表其具有最快的电子转移速率。这一特性使得 NPC/GCE 电极能够在溶液中迅速与对乙酰氨基酚发生作用, 实现对该物质的灵敏检测, 展现出 NPC 修饰电极在电化学传感领域的巨大应用潜力。通过 CV 和 EIS 测试, 揭示了不同材料修饰电极的电化学性能差异, 为进一步优化电极材料, 开发高性能电化学传感器提供了依据。

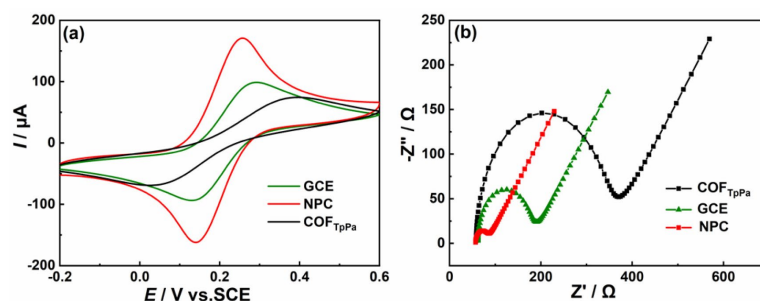


Figure 3. CV (a), electrochemical impedance spectroscopy (b) for different materials in 0.1 M KCl solution containing 5 mM $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$

图 3. 不同材料在含 5 mM $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 的 0.1 M KCl 溶液中的 CV 图(a)、交流阻抗图(b)

3.3. 对乙酰氨基酚在不同修饰电极上的电化学响应

对乙酰氨基酚(AP)作为一种在临床和日常生活中广泛使用的药物, 对其进行高效、灵敏的检测, 在药物分析、临床诊断以及环境监测等领域均具有重要意义。为了研究不同材料修饰电极对 AP 的响应, 以含 $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ AP 的磷酸盐缓冲溶液(PBS)为溶液, 运用循环伏安法考察不同电极在电化学传感领域的应用潜力, 实验结果如图 4 所示。在 PBS 缓冲溶液中添加 $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ AP 后, 玻碳电极(GCE)对 AP 产生的电流响应相对较低, 其响应电流值小于 $5 \mu\text{A}$ 。作为对比, COF_{TpPa} 修饰的玻碳电极($\text{COF}_{\text{TpPa}}/\text{GCE}$)对 AP 的电化学响应更为微弱, 几乎可忽略不计。这一现象主要源于前驱体 COF_{TpPa} 本身较差的导电性, 使得电子在电极与 AP 之间的转移过程受阻, 难以形成有效的电化学反应。然而, NPC 修饰的玻碳电极(NPC/GCE)对 AP 表现出显著的电流响应, 其电流响应值高达 $15 \mu\text{A}$ 。这一结果表明, NPC/GCE 对 AP 具有更为优异的电催化性能, 能够极大地促进 AP 在电极表面的氧化还原反应。NPC 材料优异的电催化活性, 可能与碳材料中氮元素的掺入密切相关[18]。氮的掺杂不仅可以改变材料的电子结构, 优化其电导率, 还能显著提升催化剂的活性与稳定性, 从而提高对 AP 的电催化效果。基于上述实验结果, 采用 NPC/GCE 构建快速、灵敏检测 AP 的电化学传感器是可行的方案。

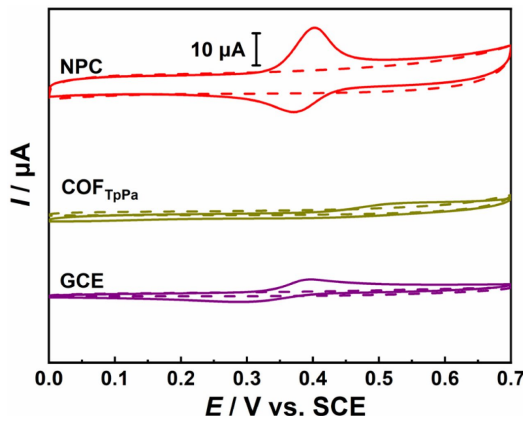


Figure 4. CV diagrams of different modified electrodes in the presence (solid line) and absence (dashed line) of AP
图 4. 不同修饰电极在 AP 存在(实线)和不存在(虚线)时的 CV 图

3.4. NPC/GCE 对对乙酰氨基酚的伏安检测

采用差分脉冲伏安(DPV)技术，研究了不同浓度 AP 对 NPC/GCE 的电化学响应。氧化峰电流与 AP 浓度有关，在 3.8~60 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 范围内存在线性关系，氧化峰电流与 AP 浓度呈现出良好的线性关系。实验结果表明在该浓度范围内，NPC/GCE 对 AP 浓度的变化能够作出稳定的响应。根据三倍信噪比(S/N = 3)计算出检测限(LOD)为 1.25 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 。与已报道的传感器相比，NPC/GCE 检测 AP 的线性范围更宽(表 1)，较宽的线性范围保证了在不同 AP 浓度下，该传感器都能提供可靠、准确的检测结果。因此 NPC/GCE 构建的电化学传感器有望用于 AP 检测的实际应用中。

Table 1. Comparison of NPC modified GCE with other sensors for AP detection
表 1. NPC 修饰后的 GCE 与其他 AP 检测传感器的比较

电极材料	线性范围(μM)	参考文献
ZnONPs/SBA	4~32	[19]
NiCo-MOF	5~400	[20]
Ni/C	0.2~54	[21]
AuNPs/SiW ₁₁ Cu/MWCNT	1~35	[22]
NPC	3.8~60	This work

3.5. NPC/GCE 的重现性、重复性和抗干扰能力

为了将设计的 NPC/GCE 传感器应用到实际分析应用中，本研究评估了其在复杂环境下的检测性能。系统的探究了 NPC/GCE 在多种干扰物质存在的情况下，对 AP 的检测性能。在检测溶液中添加高浓度干扰物，例如赖氨酸、甘氨酸、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 、半胱氨酸的添加量达到 AP 含量的 100 倍，葡萄糖、抗坏血酸的添加量也达到了 AP 含量的 50 倍。即使是在干扰物大量存在的情况下，NPC/GCE 传感器对 AP 的检测结果受到的影响较小，相对标准偏差(RSD)小于 5.0%。这一结果充分表明，NPC/GCE 传感器对 AP 具有出色的选择性，能够有效排除多种常见干扰物的影响。传感器的重复性和重现性也是衡量其性能优异的关键。采用同一 NPC/GCE 电极，对 AP 进行 6 次测量，其 RSD 为 5.9%，这一结果表明该传感器能够保持稳定的检测性能，重复性良好。为进一步评估传感器的重现性，使用 5 个 NPC/GCE 电极用于 AP 检测，五次结果的 RSD 仅为 2.3% (n = 5)，这说明传感器的重现性好。综上所述，NPC/GCE 传感器在选

择性、重复性和重现性方面均表现卓越, 这为在实际样品中 AP 的测定提供了保障, 有望在药物质量控制、临床诊断以及环境监测等多个领域发挥重要作用。

4. 结论

综上所述, 本工作以对苯二胺和三醛基间苯三酚为有机构建单体, 使用简单快速的水热反应制备了前驱体 COF_{TPa}。采用高温热解策略成功制备了氮掺杂的多孔碳材料 NPC, 制备的 NPC 材料具有多孔结构, 氮原子的存在可以提高材料的催化、稳定性能。将 NPC 与 GCE 组合成功制备了能够用于 AP 检测的电化学传感器, NPC 材料对 AP 的电流响应最大。以此构建的电化学传感器用于 AP 的检测时表现出良好的线性关系。因此通过简单的一步热解法将含有丰富 N 元素的 COF 进行煅烧, 制备的氮掺杂多孔碳材料在 AP 电化学传感器的构建中有很大的应用潜力。

参考文献

- [1] Gao, Y., Chu, T., Zhou, C., Huang, W. and Zheng, Y. (2024) Fe, Cu Co-Doped Carbon Nanosheets for Electrochemical-Colorimetric Detection of Acetaminophen. *ACS Applied Nano Materials*, **7**, 14321-14330. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c01798>
- [2] Perveen, S., Baig, J.A., Nur-e-Alam, M., Kazi, M., Memon, S., Kazi, T.G., *et al.* (2025) Electrocatalytic Detection of Acetaminophen by Sodium Ferrite. *Results in Physics*, **68**, Article ID: 108073. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.108073>
- [3] Pandey, R.R., Alshahrani, H.S., Krylyuk, S., Williams, E.H., Davydov, A.V. and Chusuei, C.C. (2018) Electrochemical Detection of Acetaminophen with Silicon Nanowires. *Electroanalysis*, **30**, 886-891. <https://doi.org/10.1002/elan.201700806>
- [4] Wei, M., Yuan, Y., Chen, D., Pan, L., Tong, W. and Lu, W. (2024) A Systematic Review on Electrochemical Sensors for the Detection of Acetaminophen. *Analytical Methods*, **16**, 6134-6155. <https://doi.org/10.1039/d4ay01307g>
- [5] Qiao, Y., Liu, Q., Lu, S., Chen, G., Gao, S., Lu, W., *et al.* (2020) High-Performance Non-Enzymatic Glucose Detection: Using a Conductive Ni-Mof as an Electrocatalyst. *Journal of Materials Chemistry B*, **8**, 5411-5415. <https://doi.org/10.1039/d0tb00131g>
- [6] Cernat, A., Tertiş, M., Săndulescu, R., Bediou, F., Cristea, A. and Cristea, C. (2015) Electrochemical Sensors Based on Carbon Nanomaterials for Acetaminophen Detection: A Review. *Analytica Chimica Acta*, **886**, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.05.044>
- [7] Barnes, T.M., van de Lagemaat, J., Levi, D., Rumbles, G., Coutts, T.J., Weeks, C.L., *et al.* (2007) Optical Characterization of Highly Conductive Single-Wall Carbon-Nanotube Transparent Electrodes. *Physical Review B*, **75**, Article ID: 235410. <https://doi.org/10.1103/physrevb.75.235410>
- [8] Sajjad, M. and Lu, W. (2021) Covalent Organic Frameworks Based Nanomaterials: Design, Synthesis, and Current Status for Supercapacitor Applications: A Review. *Journal of Energy Storage*, **39**, Article ID: 102618. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102618>
- [9] Kong, L., Liu, M., Huang, H., Xu, Y. and Bu, X. (2021) Metal/Covalent-Organic Framework Based Cathodes for Metal-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, **12**, Article ID: 2100172. <https://doi.org/10.1002/aenm.202100172>
- [10] Cao, Y., Peng, W., Li, Y., Zhang, F., Zhu, Y. and Fan, X. (2023) Atomically Dispersed Metal Sites in Cof-Based Nanomaterials for Electrochemical Energy Conversion. *Green Energy & Environment*, **8**, 360-382. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2021.11.005>
- [11] Lv, Z., Zhang, J., Zhang, Y., Li, K., Ye, X., Fang, M., *et al.* (2022) Selective and Efficient Removal of Radioactive Ions from Water with Well-Dispersed Metal Oxide Nanoparticles@n-Doped Carbon. *Separation and Purification Technology*, **285**, Article ID: 120366. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120366>
- [12] Li, Y., Xu, X., Hou, S., Ma, J., Lu, T., Wang, J., *et al.* (2018) Facile Dual Doping Strategy via Carbonization of Covalent Organic Frameworks to Prepare Hierarchically Porous Carbon Spheres for Membrane Capacitive Deionization. *Chemical Communications*, **54**, 14009-14012. <https://doi.org/10.1039/c8cc06855k>
- [13] Liu, H., Hu, L., Cai, W., Feng, X., Zhang, F., Shao, R., *et al.* (2022) Ultrafine Pt Nanoparticles Supported on Ultrathin Nanobowl-Shaped N-Doped Carbon for the Oxygen Reduction Reaction. *ChemElectroChem*, **9**, e202200123. <https://doi.org/10.1002/celec.202200123>
- [14] Li, Y., Ding, Z., Zhang, X., Li, J., Liu, X., Lu, T., *et al.* (2019) Novel Hybrid Capacitive Deionization Constructed by a

- Redox-Active Covalent Organic Framework and Its Derived Porous Carbon for Highly Efficient Desalination. *Journal of Materials Chemistry A*, **7**, 25305-25313. <https://doi.org/10.1039/c9ta07344b>
- [15] Ahmed, I., Lee, H.J. and Jung, S.H. (2024) Porous Carbon Derived from Covalent Organic Frameworks and Relevant Porous Polymers: Preparation and Application in Adsorption and Catalysis. *Chemical Engineering Journal*, **499**, Article ID: 156148. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156148>
- [16] Li, Y., Wang, J., Xu, S., Li, M. and Chen, F. (2024) The Preparation of 2D TpPa-COF/2D g-C₃N₄ Heterojunction via In-Situ Growth for Enhanced Visible-Light Photocatalysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, **60**, 1433-1441. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.118>
- [17] Huang, L., Mao, N., Yan, Q., Zhang, D. and Shuai, Q. (2019) Magnetic Covalent Organic Frameworks for the Removal of Diclofenac Sodium from Water. *ACS Applied Nano Materials*, **3**, 319-326. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b01969>
- [18] Jin, P., Ren, G., Gao, N., Qing, C., Zeng, H., Wang, X., *et al.* (2024) Electrochemiluminescence Reveals the Structure-catalytic Activity Relationship of Heteroatom-Doped Carbon-Based Materials. *Small Methods*, **9**, Article ID: 2401496. <https://doi.org/10.1002/smt.202401496>
- [19] Vomo, L.A., Deffo, G., Fotsop, C.G., Djemmo, L.G., Tchida, V.K., Eya'ane, F.M., *et al.* (2024) Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Based on Coffee Husks Embedded on Mesoporous Silica for the Sensing of Acetaminophen. *ChemElectroChem*, **11**, e202400088. <https://doi.org/10.1002/celec.202400088>
- [20] Liu, X., Guo, J., Wang, Y., Wang, A., Yu, X. and Ding, L. (2023) A Flexible Electrochemical Sensor for Paracetamol Based on Porous Honeycomb-Like NiCo-MOF Nanosheets. *Rare Metals*, **42**, 3311-3317. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02349-2>
- [21] Pierpaoli, M., Jakóbczyk, P., Dec, B., Giosuè, C., Czerwińska, N., Lewkowicz, A., *et al.* (2022) A Novel Hierarchically-Porous Diamondized Polyacrylonitrile Sponge-Like Electrodes for Acetaminophen Electrochemical Detection. *Electrochimica Acta*, **430**, Article ID: 141083. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141083>
- [22] Dong, P., Li, N., Zhao, H., Cui, M., Zhang, C., Han, H., *et al.* (2019) POMs as Active Center for Sensitively Electrochemical Detection of Bisphenol a and Acetaminophen. *Chemical Research in Chinese Universities*, **35**, 592-597. <https://doi.org/10.1007/s40242-019-8370-8>