

基于过渡金属纳米材料检测葡萄糖的研究进展

史晨韵, 王子娜, 秦艺瑶, 汪李超*, 亚胜男*

皖南医学院医学影像学院医学工程学教研室, 安徽 芜湖

收稿日期: 2024年10月25日; 录用日期: 2024年11月19日; 发布日期: 2024年11月26日

摘要

糖尿病主要是由于胰岛素分泌不足或其生物作用受阻所致, 是一种慢性、内分泌代谢性疾病。目前糖尿病还无法完全治愈, 临床上主要采用对糖尿病患者血糖进行严格管控的治疗手段, 从而保证患者的血糖浓度处于正常范围。因此, 对糖尿病的临床诊断、对病人的个体血糖监测进行精确检测和动态监测是十分必要的。虽然传统的葡萄糖检测方法如酶电极法已经成熟, 但成本高、稳定性差等缺陷也日益显现。由于过渡金属纳米材料具有优异的催化性能、较高的表面积和较好的生物相容性等优点, 因此随着纳米技术的发展, 近年来在葡萄糖检测方面的应用前景更为广泛。本文还对基于过渡金属纳米材料的葡萄糖传感器的最新研究进展进行了综述, 对其传感原理和检测性能进行了探讨, 并对其在糖尿病管理及相关领域的研究提供了有益参考, 对未来的发展趋势进行了展望。

关键词

过渡金属纳米材料, 葡萄糖传感器, 糖尿病管理, 电化学, 性能优化

Advances in Glucose Detection Based on Transition Metal Nanomaterials

Chenyun Shi, Zina Wang, Yiyao Qin, Lichao Wang*, Shengnan Ya*

Department of Medical Engineering, School of Medical Imageology, Wannan Medical College, Wuhu Anhui

Received: Oct. 25th, 2024; accepted: Nov. 19th, 2024; published: Nov. 26th, 2024

Abstract

Diabetes mellitus is a chronic, endocrine-metabolic disease caused mainly by insufficient insulin secretion or obstruction of its biological action. Currently, diabetes cannot be completely cured, and the main clinical means of treatment is to strictly control the blood glucose of diabetic patients, so as to ensure that the patients' blood glucose concentration is in the normal range. Therefore, accurate

*通讯作者。

文章引用: 史晨韵, 王子娜, 秦艺瑶, 汪李超, 亚胜男. 基于过渡金属纳米材料检测葡萄糖的研究进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(11): 1337-1343. DOI: 10.12677/acm.2024.14113019

detection and dynamic monitoring of the clinical diagnosis of diabetes and individual patient glucose monitoring are essential. Although traditional glucose detection methods such as enzyme electrode method have matured, defects such as high cost and poor stability are becoming increasingly apparent. Since transition metal nanomaterials have the advantages of excellent catalytic properties, high surface area and good biocompatibility, they have been more widely used in glucose detection in recent years with the development of nanotechnology. This paper also reviews the latest research progress of glucose sensors based on transition metal nanomaterials, discusses their sensing principle and detection performance, and provides useful references for their research in diabetes management and related fields, and looks forward to the future development trend.

Keywords

Transition Metal Nanomaterials, Glucose Sensor, Diabetes Management, Electrochemistry, Performance Optimization

Copyright © 2024 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

葡萄糖是人体的主要能量来源之一，其浓度的异常波动与糖尿病等代谢性疾病的诊断与治疗息息相关。随着人们生活水平的提高，饮食结构和生活方式发生了显著变化，糖尿病的发病率随之上升[1]。根据国际糖尿病联盟(IDF)的估计，2021年全球约有5.37亿成年人患有糖尿病，且约670万人因糖尿病及其并发症死亡。预计到2045年，糖尿病患者人数将增至7.84亿。长期血糖水平失控可引发多种并发症，包括心血管疾病、肾病和视网膜病变，已成为重大公共卫生问题，对人类健康和生命构成严重威胁。因此，对血糖水平的早期检测和持续监测具有重要意义[2][3]，构建快速、灵敏、稳定的葡萄糖检测装置成为预防并发症和提高患者生活质量的必要诉求。过渡金属纳米材料在葡萄糖检测领域表现出了巨大的潜力，其催化性能优异，比表面积高，生物相容性[4]，从而帮助患者和医生更好地了解血糖的波动情况，成为传统血糖监测方法的有效补充和创新，有助于血糖达标评估、血糖高值识别、血糖波动量化。

2. 过渡金属纳米材料概述

2.1. 过渡金属纳米材料的分类

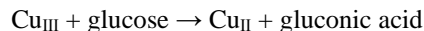
过渡金属纳米材料可采用电化学沉积法、水热法、溶剂热法和化学还原法等方法来制备，并根据其结构和组成可以分为单金属纳米材料、双金属纳米材料和金属化合物纳米材料等[5]。具体有金、银、铂等单金属纳米材料，具有极佳的催化性和导电性；通过调节金属各自的比例和成分，双金属纳米材料能进一步提高催化性能；氧化物、硫化物等金属化合物纳米材料具有多种、可调节的特性，为检测葡萄糖提供了更多的选择性。

2.2. 过渡金属纳米材料葡萄糖传感器的工作原理

主要基于这种材料的高催化性能，过渡金属纳米材料葡萄糖传感器通过直接电化学反应检测葡萄糖分子。其中，涉及的典型电化学反应例如：



铜基(Cu)材料: $\text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{CuOOH} + \text{e}^-$;



葡萄糖分子可在过渡金属纳米材料的表面被氧化,并释放出电子,这些电子通过外部电路流向工作电极,从而产生电流信号[6]。电流的大小与葡萄糖的浓度成正比,因此可以定量地测定葡萄糖的浓度,这是通过测量电流的变化而得到的。研究表明,这些材料在葡萄糖传感器中发挥关键作用,通过提供高效的电催化位点和优异的电子传输通道,实现了快速灵敏地检测葡萄糖浓度[7]。

3. 基于过渡金属纳米材料的葡萄糖传感器分类

近年来,研究人员开发了多种不同的针对葡萄糖检测的材料体系,主要分为单金属纳米材料、双金属纳米材料和金属化合物纳米材料三大类,下面对其中几种类型的材料进行综述,主要有以下几种类型:

3.1. 单金属纳米材料葡萄糖传感器

金(Au)、银(Ag) [8] [9]等单金属纳米材料因具有良好的导电性、催化性和生物相容性而被广泛应用于葡萄糖传感器。纳米微粒可以通过修饰电极表面的方法,如化学还原法,电化学沉积法等,从而构造出葡萄糖传感器。这种传感器对葡萄糖有很好的响应性能和稳定性,可以检测血液、泪液、汗液等葡萄糖在实际样本中的含量。例如,有相关研究采用溶胶-凝胶法以银纳米颗粒为基础构建基于银纳米颗粒的葡萄糖传感器,将银纳米颗粒修饰在聚苯乙烯磺酸膜上[10],结果显示该传感器线性宽、检出限低,可实现对葡萄糖的灵敏检测。

3.2. 双金属纳米材料葡萄糖传感器

针对葡萄糖传感器领域的双金属纳米材料的研究显示出了显著的优势,其中包括灵敏度的提高、选择性的提高和稳定性的提高。这些材料通常利用协同催化作用,展现出比单金属纳米材料更优异的性能[11] [12]。近年来,科学家们开发了多种基于双金属纳米复合材料的葡萄糖传感器,具有更长的保质期和更高的灵敏度,能够快速检测葡萄糖。如银纳米微粒/铜纳米线复合材料,用于构建电化学无酶葡萄糖传感器,其独特结构暴露出电化学反应的丰富位点,显示出高稳定性、高选择性、低成本等特点,适合检测葡萄糖。此外,还有研究者以铂和钯为材料[13],构筑一种基于Pt-Pd双金属纳米颗粒的葡萄糖传感器,发现利用该种材料有助于检测体液中的葡萄糖分子,并在特定的线性范围内表现出高灵敏度和低检测限。

3.3. 金属化合物纳米材料葡萄糖传感器

3.3.1. 氧化铜纳米材料葡萄糖传感器

由于良好的催化性能和稳定性,葡萄糖传感器中广泛使用氧化铜纳米材料(CuO)。近期研究聚焦于葡萄糖传感器的性能提升,通过调控氧化铜纳米材料的形态和结构[14]。例如,研究表明,通过控制合成参数,可以制备出具有不同形态(如球体、血小板和针状体)的氧化铜纳米颗粒[15],这些不同形态的氧化铜纳米材料在非酶促葡萄糖传感中表现出不同的敏感性和稳定性,该传感器对葡萄糖具有良好的响应性能和选择性,此外,研究者们还探索了通过构建异质结构来进一步提升氧化铜基葡萄糖传感器的性能。例如,常温制备Cu₂O@CuO纳米片电催化剂,显示出对葡萄糖的高灵敏度和宽线性检测范围[16],这得益于铜多价种间的协同效应,为今后设计和应用无酶葡萄糖传感器提供了新的理念和技术支撑。

3.3.2. 氧化镍纳米材料葡萄糖传感器

氧化镍(NiO)纳米材料因其独特的电子结构和催化性能,在葡萄糖传感器中也有应用[17]。通过水热法、溶剂热法等方法,可以合成氧化镍纳米材料,通过使用无酶氧化镍薄膜电极,可以实现与葡萄糖的

直接电荷转移,这种方法避免了传统酶传感器中酶降解和间接电荷转移的问题,从而提高了传感器的可重复使用性和保质期[18]。葡萄糖可以在生物样本中被检测出来,传感器具有很好的反应性能,并且对葡萄糖具有很好的稳定性。例如,杨等人通过水热法等方法合成纳米花形 NiO 纳米酶复合材料,该材料具有更高的催化性能和导电性,从而构建了非酶葡萄糖传感器,结果显示葡萄糖检测线性范围为 3~5166 μM ,检测极限低至 0.28 μM ,具有极佳的选择性和重现性,实现对葡萄糖的快速、准确检测[19]。

4. 基于过渡金属纳米材料葡萄糖传感器的性能优化

4.1. 纳米材料形貌和尺寸的调控

纳米材料的形貌和尺寸对葡萄糖传感器对葡萄糖传感器的催化和电导作用有着重要的影响。通过调控纳米材料的形貌和尺寸,葡萄糖传感器的性能得以进一步优化。例如,采用电化学沉积、水热法等方法,合成具有特殊形貌和尺寸的纳米材料,这些材料可以更加精确控制,如纳米花、纳米棒、纳米球[20][21]等,从而实现葡萄糖检测性能的优化。这些特殊形貌和尺寸的纳米材料能够提供更高的表面积和更多的活动位点,同时显著提高葡萄糖传感器的灵敏度和响应速度。再如一些相关研究中,不同形态的氧化铜(II)纳米结构在非酶葡萄糖传感器中的应用表明[22],针状 CuO 纳米粒子对葡萄糖分子具有良好的敏感性,这主要的因素是其粒度和由此引入的电容相关性。此外,通过控制合成参数,如温度、pH 值和添加剂,可以进一步调控氧化铜(II)纳米颗粒的形态,从而优化其在葡萄糖传感中的性能。

4.2. 复合材料的应用

将过渡金属纳米材料与其他材料复合,可以形成复合材料,能够克服单一材料的缺陷,进一步提高葡萄糖的检测效能。比如,采用碳纳米管、石墨烯等碳素材料复合导电性、催化性能好的过渡金属纳米材料,就能形成复合材料。例如, NiMoO₄ 包覆 NiCo₂O₄ 纳米针阵列碳布高效柔性电极,在葡萄糖检测中表现出了超高敏、检测极限低、响应时间超快的特点[23][24],这些复合材料可以显著提高葡萄糖传感器的灵敏度和稳定性,并通过协同效应拓宽其线性范围。它不仅改善了葡萄糖传感器的性能,同时也帮助促进传感器向柔性和穿戴式设备的方向发展。此外,将过渡金属纳米材料与聚合物、生物分子等材料复合,也可以形成具有特殊功能的复合材料,如具有更高的选择性、抗干扰能力等[25]-[29]。例如,在最新的研究进展中,作为催化剂负载材料 MXene [30],可以提高电子的导电性,增强催化剂材料的负载速率,并且具有应用于非酶葡萄糖传感器的潜力,展现了良好的检测效果和选择性。

4.3. 构筑无酶传感器的可穿戴设备

近年来,非酶传感器在便携性和穿戴性上逐渐发展起来。一些研究团队开发了基于柔性材料的非酶葡萄糖传感器,能够集成到智能设备中,实现无创血糖监测[31][32]。这些穿戴式装置通常采用柔性电极和新型复合材料,以增强感应器的灵敏度和稳定性。基于导电金属-有机框架(MOF)的无酶电化学传感织物在穿戴式应用中表现出潜力,这些材料不仅具有极佳的导电性,而且能够提供柔韧性和透气性,适合与皮肤直接接触,例如,Zhang 等人[33]以 NiSO₄·6H₂O 为金属源,以联吡啶(BPy)为有机配体,利用简单有效的溶剂热法,通过控制 BPy 的加入量,合成了五种不同形貌的 Ni-MOF,得到 PNMOF-3 在 2D 层状 Ni-MOF 中具有最佳葡萄糖氧化活性,灵敏度为 907.54 $\mu\text{A}\cdot\text{mM}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$,响应时间 < 3 s,线性响应宽度为 0.5~2665.5 μM 。实验还证明该传感器是一种具有应用前景、可稳定循环 4000 s、具有更好的选择性和再现性的非酶传感器材料。

在构筑无酶传感器的可穿戴设备时,研究人员还考虑了材料的生物相容性、机械柔性以及与人体界面的兼容性[34]。例如,一些传感器设计采用了柔性基底和水凝胶结构,以确保在日常活动中的舒适度和

耐用性。此外，无线通信技术的集成使这些传感器能够方便地进行远程监控和数据分析，将侦测数据实时传输到手持设备或云平台上。无酶传感器的可穿戴设备正逐步实现对人体健康参数的非侵入式、持续性监测[35][36]，通过利用先进材料的催化性能和柔性设计，对个性化医疗和实时健康管理具有重要意义。

5. 基于过渡金属纳米材料葡萄糖传感器所面临的挑战和未来展望

葡萄糖检测在糖尿病管理中扮演着至关重要的角色，本文简要总结了近年来基于过渡金属纳米材料的葡萄糖检测的部分研究进展以及在传感器性能方面的优化，这些研究使得血糖监测更加便捷与精准，使糖尿病患者的临床治疗安全性和生活质量得到显著提升，在糖尿病管理中，葡萄糖检测发挥了至关重要的作用。

虽然基于过渡金属纳米材料葡萄糖传感器在近年来取得了显著进展，但葡萄糖检测依然面临精准性、稳定性方面的挑战，包括如何进一步提高传感器的稳定性、减少背景干扰、以及在复杂生物样品中的实际应用等问题，为了应对这些挑战，以目前发展前景和商业化趋势被看好的可穿戴无创葡萄糖传感器为例，可通过使用新型材料和结构设计，提高传感器对葡萄糖的响应灵敏度，并增强其在不同环境条件下的稳定性。此外，也可开发具有良好生物相容性的耐用外膜材料，从而构筑具备更高准确性和耐用性的可穿戴葡萄糖传感器。

综上所述，葡萄糖检测的研究和应用前景较为广阔，未来的葡萄糖检测方法与技术将朝着更高准确性、更长使用寿命、更好患者体验的方向发展。同时，随着人工智能和大数据技术的应用，葡萄糖检测技术将更加智能化，能够提供给糖尿病患者更加个性化的血糖管理建议。除此之外，无创葡萄糖监测技术的进一步研究和开发将依旧是未来的重点，从而实现真正的无痛、无创血糖监测。

基金项目

皖南医学院国家级大学生创新创业训练计划项目(202310368024, 202310368021); 教育部产学合作协同育人项目(231107601080648, 231005236242140, 230806617220524)。

参考文献

- [1] Murphy, H.R., Howgate, C., O'Keefe, J., Myers, J., Morgan, M., Coleman, M.A., *et al.* (2021) Characteristics and Outcomes of Pregnant Women with Type 1 or Type 2 Diabetes: A 5-Year National Population-Based Cohort Study. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, **9**, 153-164. [https://doi.org/10.1016/s2213-8587\(20\)30406-x](https://doi.org/10.1016/s2213-8587(20)30406-x)
- [2] Zou, Y., Chu, Z., Guo, J., Liu, S., Ma, X. and Guo, J. (2023) Minimally Invasive Electrochemical Continuous Glucose Monitoring Sensors: Recent Progress and Perspective. *Biosensors and Bioelectronics*, **225**, Article 115103. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115103>
- [3] Awang Dahlan, S., Idris, I.B., Mohammed Nawwi, A. and Abd Rahman, R. (2024) Family Planning Behaviours among Women with Diabetes Mellitus: A Scoping Review. *European Journal of Medical Research*, **29**, Article No. 41. <https://doi.org/10.1186/s40001-023-01626-1>
- [4] Huang, Q., Chen, J., Zhao, Y., Huang, J. and Liu, H. (2025) Advancements in Electrochemical Glucose Sensors. *Talanta*, **281**, Article 126897. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126897>
- [5] Akter, R., Saha, P., Shah, S.S., Shaikh, M.N., Aziz, M.A. and Ahammad, A.J.S. (2022) Nanostructured Nickel-Based Non-Enzymatic Electrochemical Glucose Sensors. *Chemistry—An Asian Journal*, **17**, e202200897. <https://doi.org/10.1002/asia.202200897>
- [6] Zhang, J., Liu, L., Yang, Y., Huang, Q., Li, D. and Zeng, D. (2021) A Review on Two-Dimensional Materials for Chemiresistive- and Fet-Type Gas Sensors. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **23**, 15420-15439. <https://doi.org/10.1039/d1cp01890f>
- [7] Xue, M., Mao, W., Chen, J., Zheng, F., Chen, W., Shen, W., *et al.* (2021) Application of Au or Ag Nanomaterials for Colorimetric Detection of Glucose. *The Analyst*, **146**, 6726-6740. <https://doi.org/10.1039/d1an01540k>
- [8] Su, Y., Guo, H., Wang, Z., Long, Y., Li, W. and Tu, Y. (2018) Au@Cu₂O Core-Shell Structure for High Sensitive Non-Enzymatic Glucose Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **255**, 2510-2519.

- <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.09.056>
- [9] Dayakar, T., Venkateswara, R.K., Vinodkumar, M., Bikshalu, K., Chakradhar, B. and Ramachandra, R.K. (2018) Novel Synthesis and Characterization of Ag@TiO₂ Core Shell Nanostructure for Non-Enzymatic Glucose Sensor. *Applied Surface Science*, **435**, 216-224. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.077>
- [10] Lee, Y., Liao, B. and Weng, Y. (2018) Ascorbic Acid Sensor Using a PVA/Laccase-Au-NPs/Pt Electrode. *RSC Advances*, **8**, 37872-37879. <https://doi.org/10.1039/c8ra06280c>
- [11] Atta, S. and Vo-Dinh, T. (2023) Ultra-Trace SERS Detection of Cocaine and Heroin Using Bimetallic Gold-Silver Nanostars (BGNS-Ag). *Analytica Chimica Acta*, **1251**, Article 340956. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.340956>
- [12] Ning, C., Wang, L., Tian, Y., Yin, B. and Ye, B. (2020) Multiple and Sensitive SERS Detection of Cancer-Related Exosomes Based on Gold-Silver Bimetallic Nanotrepangs. *The Analyst*, **145**, 2795-2804. <https://doi.org/10.1039/c9an02180a>
- [13] Emir, G., Dilgin, Y., Şahin, S. and Akgul, C. (2024) A Self-Powered Enzymatic Glucose Sensor Utilizing Bimetallic Nanoparticle Composites Modified Pencil Graphite Electrodes as Cathode. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s12010-024-05068-1>
- [14] Yang, J., Chen, H., Zhu, C., Huang, Z., Ou, R., Gao, S., *et al.* (2022) A Miniature CuO Nanoarray Sensor for Noninvasive Detection of Trace Salivary Glucose. *Analytical Biochemistry*, **656**, Article 114857. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2022.114857>
- [15] Cao, X. (2022) CuO Nanowires Fabricated by Thermal Oxidation of Cu Foils Towards Electrochemical Detection of Glucose. *Micromachines*, **13**, Article 2010. <https://doi.org/10.3390/mi13112010>
- [16] Li, C., Kurniawan, M., Sun, D., Tabata, H. and Delaunay, J. (2014) Nanoporous CuO Layer Modified Cu Electrode for High Performance Enzymatic and Non-Enzymatic Glucose Sensing. *Nanotechnology*, **26**, Article 015503. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/1/015503>
- [17] Naikoo, G.A., Bano, M., Arshad, F., Hassan, I.U., BaOmar, F., Alfagih, I.M., *et al.* (2023) Non-Enzymatic Glucose Sensors Composed of Trimetallic CuO/Ag/NiO Based Composite Materials. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 6210. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32719-w>
- [18] He, G., Tian, L., Cai, Y., Wu, S., Su, Y., Yan, H., *et al.* (2018) Sensitive Nonenzymatic Electrochemical Glucose Detection Based on Hollow Porous NiO. *Nanoscale Research Letters*, **13**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2406-0>
- [19] Yang, H., Hu, Y., Yin, X., Huang, J., Qiao, C., Hu, Z., *et al.* (2023) A Disposable and Sensitive Non-Enzymatic Glucose Sensor Based on a 3D-Mn-Doped NiO Nanoflower-Modified Flexible Electrode. *The Analyst*, **148**, 153-162. <https://doi.org/10.1039/d2an01495e>
- [20] Zhang, X., Xu, Y., Wang, X., Chen, T., Yao, Q., Chang, S., *et al.* (2024) Enhanced Immunochromatographic Assay Using Multifunctional Gold@Iridium Nanoflower with Colorimetric Photothermal Catalytic Activity for the Detection of Staphylococcal Enterotoxin B. *Food Chemistry*, **460**, Article 140710. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140710>
- [21] Shoji, T., Iida, M., Matsumoto, M., Yuyama, K. and Tsuboi, Y. (2024) Measurements of Spontaneous and External Stimuli Molecular Release Processes from a Single Optically Trapped Poly(Lactic-co-Glycolic) Acid Microparticle and a Liposome Containing Gold Nanospheres. *Analytical Chemistry*, **96**, 12957-12965. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c05950>
- [22] Zhao, Y., Jiang, Y., Mo, Y., Zhai, Y., Liu, J., Strzelecki, A.C., *et al.* (2023) Boosting Electrochemical Catalysis and Nonenzymatic Sensing toward Glucose by Single-Atom Pt Supported on Cu@CuO Core-Shell Nanowires. *Small*, **19**, Article 2207240. <https://doi.org/10.1002/smll.202207240>
- [23] Wang, C., Zhou, E., He, W., Deng, X., Huang, J., Ding, M., *et al.* (2017) NiCo₂O₄-Based Supercapacitor Nanomaterials. *Nanomaterials*, **7**, Article 41. <https://doi.org/10.3390/nano7020041>
- [24] Yan, J., Wang, P., Lv, T., Fang, H., Wang, H., Wang, S., *et al.* (2020) *In-situ* Growth of Broussonetia-Like NiCo₂O₄ on Carbon Cloth with Tailored Aqueous Capacitance. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **20**, 909-917. <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.16729>
- [25] Wei, M., Qiao, Y., Zhao, H., Liang, J., Li, T., Luo, Y., *et al.* (2020) Electrochemical Non-Enzymatic Glucose Sensors: Recent Progress and Perspectives. *Chemical Communications*, **56**, 14553-14569. <https://doi.org/10.1039/d0cc05650b>
- [26] Liu, Y., Zeng, S., Ji, W., Yao, H., Lin, L., Cui, H., *et al.* (2021) Emerging Theranostic Nanomaterials in Diabetes and Its Complications. *Advanced Science*, **9**, Article 2102466. <https://doi.org/10.1002/advs.202102466>
- [27] Xu, J., Ma, J., Peng, Y., Cao, S., Zhang, S. and Pang, H. (2023) Applications of Metal Nanoparticles/Metal-Organic Frameworks Composites in Sensing Field. *Chinese Chemical Letters*, **34**, Article 107527. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2022.05.041>

-
- [28] Zahra, T., Javeria, U., Jamal, H., Baig, M.M., Akhtar, F. and Kamran, U. (2024) A Review of Biocompatible Polymer-Functionalized Two-Dimensional Materials: Emerging Contenders for Biosensors and Bioelectronics Applications. *Analytica Chimica Acta*, **1316**, Article 342880. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342880>
- [29] Wang, X., Wang, Y. and Ying, Y. (2021) Recent Advances in Sensing Applications of Metal Nanoparticle/Metal-Organic Framework Composites. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **143**, Article 116395. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116395>
- [30] Cui, X., Li, J., Li, Y., Liu, M., Qiao, J., Wang, D., *et al.* (2022) Detection of Glucose in Diabetic Tears by Using Gold Nanoparticles and Mxene Composite Surface-Enhanced Raman Scattering Substrates. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **266**, Article 120432. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120432>
- [31] Li, T., Chen, X., Fu, Y. and Liao, C. (2023) Colorimetric Sweat Analysis Using Wearable Hydrogel Patch Sensors for Detection of Chloride and Glucose. *Analytical Methods*, **15**, 5855-5866. <https://doi.org/10.1039/d3ay01738a>
- [32] Zhang, S., Zhao, W., Zeng, J., He, Z., Wang, X., Zhu, Z., *et al.* (2023) Wearable Non-Invasive Glucose Sensors Based on Metallic Nanomaterials. *Materials Today Bio*, **20**, Article 100638. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100638>
- [33] Zhang, Q., Li, P., Wu, J., Peng, Y. and Pang, H. (2023) Pyridine-Regulated Lamellar Nickel-Based Metal-Organic Framework (Ni-MOF) for Nonenzymatic Electrochemical Glucose Sensor. *Advanced Science*, **10**, Article 2304102. <https://doi.org/10.1002/advs.202304102>
- [34] Zafar, H., Channa, A., Jeoti, V. and Stojanović, G.M. (2022) Comprehensive Review on Wearable Sweat-Glucose Sensors for Continuous Glucose Monitoring. *Sensors*, **22**, Article 638. <https://doi.org/10.3390/s22020638>
- [35] Holzer, R., Bloch, W. and Brinkmann, C. (2022) Continuous Glucose Monitoring in Healthy Adults-Possible Applications in Health Care, Wellness, and Sports. *Sensors*, **22**, Article 2030. <https://doi.org/10.3390/s22052030>
- [36] Yao, Y., Chen, J., Guo, Y., Lv, T., Chen, Z., Li, N., *et al.* (2021) Integration of Interstitial Fluid Extraction and Glucose Detection in One Device for Wearable Non-Invasive Blood Glucose Sensors. *Biosensors and Bioelectronics*, **179**, Article 113078. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113078>