Hans Journal of Nanotechnology 纳米技术, 2026, 16(4), 81-89
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/nat
https://doi.org/10.12677/nat.2026.164010

Hans汉斯

# 基于纳米酶生物传感器检测没食子酸的研究进展

王爽悦[1,2]，顾然然[1,2]，魏亚运[1,2]，崔韵婕[1,2]，时凯歌[1,2]，靳爱玲[1,2*]

[1]郑州师范学院化学化工学院，河南 郑州
[2]河南省煤基苯绿色催化原子经济性转化工程技术研究中心，河南 郑州

收稿日期：2026年10月5日；录用日期：2026年11月5日；发布日期：2026年11月17日

## 摘 要

**没食子酸(Gallic Acid, GA)是一种常见的酚类化合物，存在于五倍子、茶叶、葡萄和石榴等植物源性食品中。GA具有良好的抗氧化性，常被用作食品中的抗氧化剂，但其在人体内含量异常可能会引发多种疾病。因此，建立精准高效的GA检测技术，是保障食品安全、规范食品工业生产的核心刚需。本文系统梳理了基于纳米酶的比色、荧光及电化学生物传感器的最新研究成果，总结了各类传感器的催化机制、性能及实际样品检测情况，最后展望该领域的挑战与发展方向，为相关技术创新与应用提供参考。**

## 关键词

**纳米酶，没食子酸，生物传感器，比色法，荧光法，电化学**

# Research Progress on Detection of Gallic Acid Based on Nanozyme-Biosensors

**Shuangyue Wang[1,2], Ranran Gu[1,2], Yayun Wei[1,2], Yunjie Cui[1,2], Kaige Shi[1,2], Ailing Jin[1,2*]**

[1]College of Chemistry and Chemical Engineering, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou Henan
[2]Hennan Engineering Technology Research Center for Green Catalytic and Atom Economic Conversion of Coal-Based Benzene, Zhengzhou Henan

Received: October 5, 2026; accepted: November 5, 2026; published: November 17, 2026

## Abstract

**Gallic Acid (GA) is a common phenolic compound found in plant-derived foods such as Chinese**

*通讯作者。

文章引用: 王爽悦, 顾然然, 魏亚运, 崔韵婕, 时凯歌, 靳爱玲. 基于纳米酶生物传感器检测没食子酸的研究进展[J]. 纳米技术, 2026, 16(4): 81-89. DOI: 10.12677/nat.2026.164010

**gallnut, tea, grape and pomegranate. GA exhibits favorable antioxidant properties and is frequently employed as an antioxidant in foods. Nevertheless, abnormal levels of GA in the human body may trigger various diseases. Accordingly, establishing accurate and efficient detection techniques for GA constitutes an essential requirement for ensuring food safety and standardizing food industrial production. This paper systematically reviews the latest research advances of nanozyme-based colorimetric, fluorimetric and electrochemical biosensors. The catalytic mechanisms, analytical performances and practical-sample detection capabilities of these biosensors are summarized. Finally, the challenges and future prospects in this field are discussed, providing references for relevant technological innovation and practical applications.**

## Keywords

**Nanozyme, Gallic Acid, Biosensor, Colorimetry, Fluorimetry, Electrochemistry**

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

没食子酸(Gallic Acid, GA)，化学名：3,4,5-三羟基苯甲酸。在自然条件下，GA 可以以游离酸、酯类或与单宁的共轭形式存在，广泛分布于五倍子、茶叶、核桃、葡萄、山楂和石榴等植物源性食品中[1] [2]。因 GA 分子结构含有邻苯三酚基团，其自由基清除能力较强，抗氧化活性显著优于部分常规食品添加剂。基于此，GA 常被用作饮料及食品中的抗氧化成分。然而，作为一种典型的酚类化合物，GA 不易被生物降解，即使浓度较低亦有毒性，从而对人体健康构成潜在风险。因此建立精准高效的 GA 检测技术，对保障食品安全和规范食品工业生产具有重要的意义。迄今为止，研究人员已开发出多种 GA 检测技术，如高效液相色谱法(HPLC)、毛细管电泳法、电化学法、比色及荧光分析法等[3]-[5]。这类方法虽然需要依托大型仪器，但是在检测的灵敏度和准确性上表现出一定优势。

纳米酶是一类具有纳米材料独特性质和催化功能的人工模拟酶，主要包括过氧化物酶(POD)、氧化酶(OXD)、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)模拟物等[6]-[9]类型。与天然酶相比，纳米酶不仅克服天然酶在极端条件下耐受性差、易失活等局限性，还具有成本低廉、制备流程简单、催化活性可调等优势。近年来，纳米酶在食品检测、生物医学、环境检测等领域得到广泛应用[10]-[12]。纳米酶生物传感器技术的开发与应用，也为 GA 的快速、灵敏、低成本检测提供新的技术途径。

## 2. 纳米酶生物传感器检测原理及在 GA 检测中的应用

纳米酶生物传感器是利用纳米酶构建的一种具有生物识别能力与催化能力的传感器。基于纳米酶的优良催化性能，通过纳米酶对催化体系的调控作用，实现待测物的灵敏度检测。本文归纳了近几年来检测 GA 的生物传感器：比色传感器、荧光传感器、电化学传感器，主要综述了这些生物传感器的技术原理与检测 GA 的应用，同时也对未来生物传感器技术的发展方向及其应用前景进行了总结与展望。

### 2.1. 比色传感器在 GA 检测中的应用

比色法检测操作简便、分析速度快，对仪器设备依赖度低，还可通过肉眼实现可视化半定量判别。基于上述优势，目前 POD、OXD 和 CAT 等不同类型的纳米酶已被用于构建比色传感平台，内容详见表 1。

**Table 1.** Colorimetric determination of Gallic Acid
**表 1.** 比色法检测 GA

| 材料名称 | 酶类型 | 线性范围(μM) | 检出限(μM) | 实际样品检测 | 加标回收率(%) | RSD (%) | 文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu NPs/NCNTs | POD | 1.0~40 | 0.92 | 绿茶 | 100.5~103.28 | 1.6~3.8 | [13] |
| | | | | 红茶 | 99.03~101.10 | 1.1~3.1 | |
| | | | | 乌龙茶 | 98.32~101.59 | 1.6~2.6 | |
| CoN-TiC | | 0.50~12 | 0.20 | 绿茶 | 100.00~103.00 | 1.42~4.92 | [5] |
| | | | | 葡萄 | 98.75~99.33 | 1.23~3.94 | |
| | | | | 葡萄酒 | 93.00~102.83 | 1.46~3.90 | |
| CuS@C | | 0.5~60 | 0.19 | 明前绿茶 | 98.10~105.75 | 1.68~2.01 | [14] |
| | | | | 减肥茶 | 96.20~102.00 | 1.49~2.33 | |
| | | | | 西瓜霜喉片 | 95.40~103.85 | 1.22~1.87 | |
| V/Co@NC | OXD | 0.005~5 和 5~25 | 0.005 | 蜂蜜 | 97.3~102.4 | 0.21~3.50 | [15] |
| | | | | 红糖 | 100.6~105.3 | 0.60~4.84 | |
| N-$Mn_3O_4$NSs | | 5~30 | 0.028 | 红茶 | 102.4~102.8 | 1.07~3.27 | [16] |
| | | | | 绿茶 | 99.8~103.6 | 1.66~2.89 | |
| $Co_3O_4$-NC | CAT | 0.25~20.00 | 0.077 | 绿茶 | 94.65~102.06 | 1.44~3.14 | [17] |
| | | | | 红茶 | 94.45~105.22 | 0.74~2.14 | |
| | | | | 乌龙茶 | 90.97~103.21 | 1.22~3.87 | |

#### 2.1.1. 基于 POD 活性纳米酶比色检测

比色传感检测 GA 的原理为：纳米酶催化无色 3,3',5,5'-四甲基联苯胺(TMB)发生氧化反应，生成蓝色的氧化产物 oxTMB；还原性的 GA 通过猝灭除反应活性氧，还原已经生成的 oxTMB，使得紫外－可见吸光度降低，从而实现对 GA 的定量检测。

Deng [13]等制备负载在 N 掺杂碳纳米管上的铜纳米颗粒 Cu NPs/NCNTs，基于该纳米酶材料的 POD 活性构建比色传感系统应用于 GA 检测。该方法的线性范围为 1.0~40 μM，检测限 LOD 为 0.92 μM，并针对绿茶、红茶、乌龙茶为实际样品开展加标回收实验，平均回收率在 98.32%~103.28%之间，相对标准偏差 RSD 为 1.1%~3.8%，表明该方法用于茶叶样品检测具有较高可靠性。Yuan [14]等以铜－苯二甲酸(Cu-BDC)纳米片作为前体制备碳负载 CuS 复合纳米材料(CuS@C)，该 CuS@C 比色传感系统对 GA 线性检测范围拓展为 0.5~60 μM，LOD 仅为 0.19 μM。研究选取明前绿茶、减肥茶和西瓜霜喉片为实际基质，加标回收率在 95.40%~105.75%范围内，RSD < 2.33%，证明该方法具有良好的准确度与精密度。对比上述两种铜基纳米酶传感体系可以看出，CuS@C 不仅实现宽泛的线性检测窗口与更低的检出限，同时将检测基质从茶叶饮品拓展至中成药，进一步展现了铜基纳米酶在 GA 实际样品检测中的应用潜力。

#### 2.1.2. 基于 OXD 活性纳米酶比色检测

相较于 POD 型纳米酶 GA 检测体系，OXD 催化体系无需额外添加 $H_2O_2$，这也为构建 GA 检测提供

新思路。Lu [15]等报道合成了 V/Co@NC 纳米酶，以此搭建的传感系统对 GA 的检测呈现出来两段线性检测，分别为 0.005~5 μM 与 5~25 μM，LOD 可达 0.005 μM。研究选取蜂蜜和红糖为实际样品基质，得到 97.3%~105.3%的回收率及 0.21%~4.84%的 RSD。该材料的分段线性会对缩小定量检测的有效窗口。Zhou [16]等成功开发具有 OXD 活性覆盆子状氮掺杂氧化锰纳米球(N-$Mn_3O_4$ NSs)。通过 N 掺杂优化材料的电子结构，诱导生成的氧空位可以提供高材料表面能、丰富活性位点，从而有效提升催化性能。该体系的线性范围为 5~30 μM，LOD 为 0.028 μM。实际茶叶样品检测发现，红茶和绿茶的回收率分别在 102.4%~102.8%和 99.8%~103.6%，RSD < 3.27%。然而上述体系线性检测区间较窄，对高浓度 GA 样品需要稀释前处理，同时复杂茶叶基质中的多酚类共存物质易对检测信号带来干扰。

#### 2.1.3. 基于 CAT 活性纳米酶比色检测

相较于 POD、OXD 型纳米酶，目前基于 CAT 活性的 GA 比色检测研究相对较少，相关体系的开发与应用仍处于初步探索阶段。类 CAT 纳米酶可模拟天然过氧化氢酶的催化机制、高效分解 $H_2O_2$，并且具有稳定性强、成本低廉、制备简便、不易失活等优势。胡晓霞[17]等以 ZIF-67 为前驱体，结合聚多巴胺改性与高温煅烧工艺，成功合成了 C、N 共掺杂具有 CAT 活性的 $Co_3O_4$-NC 纳米酶。GA 传感器的线性范围为 0.25~20.00 μM，LOD 为 0.077 μM。以市售的茶叶(红茶叶、绿茶叶和乌龙茶叶)为实际样品检测对象，回收率在 90.97%~105.22%之间，RSD 为 0.74%~3.87%，说明该方法具有良好的准确度与实用性。但总体而言，类 CAT 纳米酶用于 GA 比色检测的作用机制仍有待进一步解析，同时该体系抗复杂基质干扰能力还有待更多样品加以验证。

三类纳米酶比色检测 GA 体系各有优劣：其中，POD 型纳米酶(以铜基复合材料为主)技术体系最为成熟，具有较为宽泛的线性范围、较低的检出限、重复性能好等优点，但需加 $H_2O_2$，易受体系氧化还原环境的干扰。OXD 型纳米酶无需 $H_2O_2$ 辅助，简化了检测操作流程，适合微量 GA 的精准检测。CAT 型纳米酶目前研究体系相对较少，仍需深入开发优化。总体而言，比色法操作简便、可实现肉眼半定量，但体系普遍存在特异性不足、复杂基质易受多酚干扰等问题，材料制备与传感性能仍需优化。

### 2.2. 荧光传感器在 GA 检测中的应用

近年来，荧光生物传感器因制备简单、响应速度快、高灵敏度、信号可调的优势成为检测 GA 含量领域研究热点。现有多种 GA 荧光传感体系，信号响应依赖不同光物理机制，可划分为荧光共振能量转移(FRET)、内滤效应(IFE)、催化产物本征荧光三大类，实现对 GA 的精准定量，相较于比色检测，荧光传感有更低检出限、更强抗干扰能力，内容详见表 2。

**Table 2.** Fluorimetric determination of Gallic Acid
**表 2.** 荧光法检测 GA

| 纳米酶 | 荧光机制 | 酶类型 | 线性范围(μM) | 检出限(μM) | 实际样品检测 | 加标回收率(%) | RSD (%) | 文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe-MOF | FRET | POD | 0.05~60 | 0.9 | 红茶 | 90~94 | 1.89~2.85 | [18] |
| Co,N-CDs | | OXD | 0.01~15 | 0.00154 | 绿茶 | 98.25~103.01 | 1.02~2.13 | [19] |
| | | | | | 红茶 | 96.38~104.05 | 1.17~3.79 | |
| $Fe_3O_4$@Co/Ni/Al-LDH | IFE | POD | 0.5~120 | 0.137 | 红茶 | 96.3~104 | 1.71~6.87 | [20] |
| | | | | | 普洱茶 | 94.6~105 | 4.39~6.26 | |

续表

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CoOOH/OPD/SiNPs | | POD | 0.4~12 | 0.16 | 绿茶 | 104.9~107.3 | 2.43~4.50 | [21] |
| | | | | | 红茶 | 104.4~109.8 | 0.36~2.56 | |
| | | | | | 香蕉 | 103.9~106.0 | 0.58~3.86 | |
| | | | | | 芒果 | 97.2~108.2 | 1.77~3.77 | |
| | | | | | 板栗 | 104.0~105.1 | 2.00~2.95 | |
| CDs@MIL-53(Fe)-$NO_2$ | | OXD | 0~20 | 0.017 | 绿茶 | 98.91~100.7 | 0.21~0.4 | [22] |
| CDs/CoOOH nanoflakes/OPD | | OXD | 2.0~60.0 | 1.2 | 绿茶 | 98.0~106.0 | 1.7~3.1 | [23] |
| NCA/$Fe_{SA+NC}$ | 催化产物本征荧光 | OXD | 0.0588~58.78 | 0.0162 | 绿茶 | - | 3.4~5.5 | [24] |
| | | | | | 红茶 | | 2.9~5.7 | |
| | | | | | 苹果 | | 2.0~2.8 | |

### 2.2.1. 基于荧光共振能量转移机理的 GA 荧光检测体系

具有荧光与类酶催化活性的纳米酶催化 TMB 生成 oxTMB，oxTMB 与纳米酶发生 FRET，导致荧光猝灭，GA 将 oxTMB 还原为 TMB，阻断 FRET，体系荧光恢复，实现 GA 定量检测。Li [18]等利用具有荧光和 POD 催化活性的 Fe-MOF 微球构建比色－荧光双模式 GA 检测平台，荧光检测线性范围为 0.05~60 μM，LOD 为 0.9 μM。在红茶实际样品检测中，回收率为 90~94%，RSD < 2.85%。Hu [19]等人通过一步水热法制备出有 OXD 活性与光致发光特性的 Co,N-CDs，基于 440 nm 荧光信号实现 GA 定量检测。该体系对 GA 的线性检测范围为 0.01~15 μM，LOD 为 0.00154 μM。在茶叶(红茶与绿茶)实际样品检测中，回收率为 96.38%~104.05%，RSD 为 1.02%~3.79%，荧光检测重现性与实际应用稳定性良好。

### 2.2.2. 基于内滤效应机理的 GA 荧光检测体系

具有荧光与类酶催化活性的纳米酶催化 TMB 生成蓝色 oxTMB，oxTMB 吸收激发光或发射光，IFE 削弱荧光强度，引入 GA，oxTMB 被还原为无色 TMB，体系中吸光物质消失，IFE 消失，荧光恢复，从而检测 GA 含量。Wu [20]等采用共沉淀方法制备具有类 POD 活性磁性核壳 $Fe_3O_4$@Co/Ni/Al-LDH 纳米球，该材料荧光信号在 0.5~120 μM 浓度区间呈现良好线性相应，LOD 为 0.137 μM。在茶叶(红茶与普洱茶)实际样品检测中，回收率在 94.6%~105%，RSD < 6.87%。

常规单通道荧光检测易受光源、pH 等环境干扰，而比率荧光凭借双通道信号自校准，可显著提升抗干扰性能，该类纳米酶探针多以邻苯二胺(OPD)催化产物 DAP 为信号介质，依靠 IFE 调控荧光信号。Yang [21]等构建 CoOOH/OPD/SiNPs 比率探针，采用 $F_{443}/F_{556}$ 比值定量检测 GA 含量，该检测范围为 0.4~12 μM，LOD 为 0.16 μM。在茶叶、水果实际样品检测中的回收率为 97.2%~109.8%，RSD 为 0.36%~4.50%，但体系需要静置 90 min，检测周期较长。

### 2.2.3. 基于催化产物本征荧光机理的 GA 荧光检测体系

区别于探针自身荧光发生 FRET、IFE 效应的传感策略，该体系利用纳米酶催化生成荧光小分子作为输出信号。反应以无荧光的 OPD 为反应前体，借助纳米酶催化生成具有荧光特征的 2,3-二氨基吩嗪(DAP)，GA 可消耗催化产生的活性氧自由基，阻断 OPD 氧化，DAP 产量降低，荧光信号减弱，利用荧光强度衰减程度实现 GA 分析。Chen 等[24]制备了铁原子－纳米簇共掺杂氮碳气凝胶(NCA/$Fe_{SA+NC}$)类 OXD 纳米酶，该体系在 0.0588~58.78 μM 浓度区间呈现良好线性关系，LOD 为 0.0162 μM，该方法用于茶叶、鲜果

等多类实际样品基质，RSD 为 2.0%~5.7%，该纳米酶稳定性优异，具备食品现场筛查的应用潜力。

综合三类 GA 荧光传感体系可知：FRET 的体系机理清晰，可构建比色－荧光双模式传感，检测重现性良好，适合 GA 痕量分析，但部分体系线性范围偏窄。IFE 的体系制备简便，磁性纳米酶可实现样品富集。比率荧光进一步依靠双通道自校准降低环境干扰，显著提升准确度，缺点是反应耗时，不利于现场快速检测。催化产物本征荧光的体系背景荧光低，材料稳定，适配食品复杂基质，现场筛查潜力大。总体而言，荧光传感检出限更低、抗干扰能力优于比色法，但灵敏度和检测速率难以兼顾，后续可通过多机理耦合、材料结构优化及简化反应流程，推动其用于 GA 现场快速检测。

## 2.3. 电化学传感器在 GA 检测中的应用

电化学生物传感器具有高选择性、高灵敏度等优势，是多酚类物质快速定量的主要分析方式。该传感体系以生物大分子(抗体、核酸、适配体等)为特异性识别单元，与目标分析物 GA 发生特异性相互作用，识别反应改变电极界面微观结构与电子传递阻力，富集目标物，将 GA 浓度信息转化为电流、电位等可精准采集的电化学信号，依托信号强度与目标物浓度的线性关系完成定量测定，内容详见表 3。

### 2.3.1. 碳基电化学传感器

碳基材料凭导电性优良、比表面积大、化学稳定性好、成本低廉等优势，成为修饰电极最基础的电极改性材料。常见碳材料包含还原氧化石墨烯、碳纳米管、石墨烯量子点、MOF 衍生多孔碳等单一碳材料及多种碳质填料复合体系。单纯碳材料电催化活性有限，常将其与多孔框架、无机填料复合改性提升传感性能。

Li [25]等结合垂直有序介孔二氧化硅薄膜(VMSF)、电化学还原氧化石墨烯(ErGO)及氮掺杂石墨烯量子点(NGQDs)，制备一种电化学传感器，依托三者协同作用有效放大 GA 检测信号。其线性浓度范围为 0.1~10 μM 和 10~100 μM，LOD 为 81 nM。绿茶实际样品检测中，回收率为 100%~106%，RSD < 3.5%。由于 VMSF 的尺寸排阻特性，传感器表现出高选择性，适用于食品样品中 GA 的灵敏电化学检测。

Falahi [26]等以海绵蛋白、阿塔卡 mite 及多壁碳纳米管(MWCNTs)制备一种简便、快速且灵敏的 GA 传感器。利用三维多孔海绵蛋白与 MWCNTs 的协同效应有效提高其对 GA 氧化的响应。测得峰电流与 GA 浓度在 500 nM~1 mM 内呈良好线性关系。将其用于红葡萄酒、绿茶和红茶中 GA 检测，回收率为 95.2%~102%，证实其作为 GA 测定可靠替代方法的巨大潜力。

### 2.3.2. 金属/金属化合物基电化学传感器

金属氧化物、金属硫化物、双金属复合氧化物等金属基材料具备可变金属价态，氧化还原位点丰富，对酚羟基具备优异的电催化活化能力，常被单独或者复合碳材料构筑 GA 电化学传感器。Wei [27]等合成一种新型卟啉(Cu)基共价有机框架 COF (Cu)，并首次利用方波伏安法(SWV)检测 GA。其独特的单位点赋予材料良好的导电性与高电催化活性。该传感器显示出较宽的线性范围(0.01~1000 μM)、较低的 LOD (2.81 nM)，且重现性、选择性及稳定性良好。实际茶叶样品检测中，红茶和绿茶的回收率分别为 98.5%~102.9%与 97.9%~103.3%；RSD 为 2.33%~5.81%和 0.60%~4.67%，回收率及 RSD 均表现良好，证明基于 COF (Cu)的电化学传感器有望为食品分析领域铺平道路。

Shahsavani [28]等开发了 CeO-ZnO 纳米球改性碳糊电化学传感器($CeO_2$-ZnO/CPE)，与普通碳糊电极相比，$CeO_2$-ZnO/CPE 对 GA 氧化具有明显增强的电催化活性。优化操作参数后，通过 SWV 成功检测 GA。其线性范围分别为 0.01~1.0 μM 和 1.0~100.0 μM，LOD 为 5.3 nM。在绿茶和红茶中 GA 的测定，回收率为 99.1%~101.7%，RSD < 4.1%。

两类 GA 电化学传感体系各有优劣：碳基传感器导电、稳定性好、成本低，复合多孔框架可实现分

子筛分、增强抗干扰，线性范围宽、重现性佳，适于常规样品批量检测；但纯碳材料电催化活性不足，常需复合改性增效。金属/金属化合物基传感器活性位点丰富，对 GA 酚羟基催化能力强、检出限低，痕量检测优势突出；但耐酸碱较差，电极长期循环稳定性不及碳基。相较于比色、荧光法，电化学传感选择性与灵敏度更优，不过电极修饰批次重现性、长期稳定性及复杂基质抗干扰仍需优化。

对比比色、荧光及电化学三种 GA 传感策略：比色法操作最简单、无需大型设备，可肉眼半定量，但特异性偏弱，易受多酚等基质干扰；荧光法检出限低、抗干扰能力优于比色法，支持比率/双模式信号构建，可视化潜力良好，难点在于灵敏度与检测速率难以兼顾；电化学法灵敏度高、选择性突出，器件易于小型便携，适合痕量快速检测，但电极修饰重现性、长期稳定性及复杂基质抗干扰仍有待提升。

**Table 3.** Electrochemical determination of Gallic Acid
**表 3.** 电化学法检测 GA

| 材料名称 | 检测方法 | 线性范围(μM) | 检出限(μM) | 实际样品 | 加标回收率(%) | RSD (%) | 文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZIF-67@FePc | DPV | 0.005~4.5 | 0.0013 | 番茄<br>草莓<br>葡萄 | 97.7~101.9 | <3.0 | [29] |
| VMSF/NGQDs-ErGO/GCE | | 0.1~10 和 10~100 | 0.081 | 葡萄酒<br>绿茶 | 100~106 | 3.0~3.5 | [25] |
| Sp-At/MWCNTs/CPE | | 0.5~1000 | 0.0054 | 红葡萄酒<br>红茶<br>绿茶 | 95.2~97.1<br>97~98.2<br>98~102 | 3.3~4.0<br>2.3~3.2<br>2.9~3.6 | [26] |
| MIP/$TiO_2$@ CNTsc/GCE | DPV | 50~700 | 0.012 | 绿茶 | 97.65~99.30 | 2.86~4.20 | [30] |
| COF(Cu) | SWV | 0.01~1000 | 0.00281 | 红茶<br>绿茶 | 98.5~102.9<br>97.9~103.3 | 2.33~5.81<br>0.60~4.67 | [27] |
| $CeO_2$-ZnO/CPE | | 0.01~1.0 和 1.0~100.0 | 0.0053 | 绿茶<br>红茶 | 99.1~99.4<br>100.6~101.7 | 2.9~4.1<br>2.2~3.1 | [28] |
| poly(DPASA) | AdSSWV | 0.5~300 | 0.00435 | 蜂蜜<br>花生酱 | 94.62~99.63<br>97.25~103.20 | 1.6~2.3<br><3.4 | [31] |

## 3. 结论及展望

纳米酶凭借优异的类酶催化活性、结构可设计性与环境耐受性，已成为 GA 快速检测的核心传感材料。目前，已成功构建比色、荧光及电化学等传感体系，实现了低检出限、宽线性范围的高效检测，可有效应用于茶叶、水果等实际样品的微量 GA 分析。

当前该检测体系仍存在诸多局限：多数纳米酶特异性不足，复杂样品基质易产生干扰；部分复合纳米酶制备工艺繁琐，检测重复性有待提升，且现场快速检测的便携化设备开发滞后。未来研究可聚焦原子级催化位点与识别微环境的精准构筑，通过单原子/团簇纳米酶、分子印迹或适配体偶联策略实现 GA 特异性识别；开发简易合成路线，改善纳米酶的稳定性。在传感策略上，开发比率型、多模态协同信号输出体系降低背景干扰；融合智能手机图像采集与机器学习基质校正算法，简化样品前处理流程，构建一体化便携式检测。推动纳米酶传感技术从实验室条件下的精准定量，转向低成本、便携化、智能化的

GA 现场实时检测，进一步拓展其在食品检测、环境检测等领域的规模化应用场景。

## 基金项目

郑州师范学院大学生创新创业训练计划项目(DCZ2026012 和 DCZ2026025)；河南省大学生创新训练计划项目(S202612949023)；郑州地方高校教学改革研究与实践项目第十一批(ZZJG-B11007)；郑州师范学院本科教学改革研究重点项目(JXGGZD-65264224)。

## 参考文献

[1] Xiang, Z.Y., Zhu, B.Y., Yang, X., Deng, J., Zhu, Y., Gan, L., *et al*. (2024) Comprehensive Analysis of Phenolic Constituents, Biological Activities, and Derived Aroma Differences of *Penthorum chinense* Pursh Leaves after Processing into Green and Black Tea. *Foods*, **13**, Article 399. https://doi.org/10.3390/foods13030399

[2] Hadidi, M., Liñán-Atero, R., Tarahi, M., Christodoulou, M.C. and Aghababaei, F. (2024) The Potential Health Benefits of Gallic Acid: Therapeutic and Food Applications. *Antioxidants*, **13**, Article 1001. https://doi.org/10.3390/antiox13081001

[3] Zhang, K., Kong, X., Xu, W., Chen, G. and Zeng, X. (2023) Simultaneous Determination of Epi-Catechins and Their Oxidized Dimers, Gallic Acid and Caffeine in Tea by HPLC. *Science and Technology of Food Industry*, **44**, 366-372. (In Chinese) https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120093

[4] Terbouche, A., Boulahia, S., Mecerli, S., Ait-Ramdane-Terbouche, C., Belkhalfa, H., Guerniche, D., *et al*. (2022) A Novel Hybrid Carbon Materials-Modified Electrochemical Sensor Used for Detection of Gallic Acid. *Measurement*, **187**, Article ID: 110369. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110369

[5] Lv, Y.T., Wang, H.B., Ji, K.X., Wei, Z.Y., Wang, Y. and Su, X.G. (2026) A Novel Co, N-Doped $Ti_3C_2T_x$ Mxene-Based Nanozyme and Cu Doped Silicon Quantum Dots for Colorimetric and Fluorometric Detection of Gallic Acid. *Talanta*, **306**, Article ID: 129670. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2026.129670

[6] Gupta, V., Jha, P., Maurya, S., Tomar, S., Payal, H., Kharb, A., *et al*. (2026) Multifunctional $Cu_2Te$/rGO Nanohybrid for Efficient Peroxidase-Mimic and Photocatalytic Water Remediation. *FlatChem*, **59**, Article ID: 101103. https://doi.org/10.1016/j.flatc.2026.101103

[7] Lin, Z., Yuan, J., Niu, L., Zhang, Y., Zhang, X., Wang, M., *et al*. (2024) Oxidase Mimicking Nanozyme: Classification, Catalytic Mechanisms and Sensing Applications. *Coordination Chemistry Reviews*, **520**, Article ID: 216166. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216166

[8] Xu, D., Wu, L., Yao, H. and Zhao, L. (2022) Catalase-Like Nanozymes: Classification, Catalytic Mechanisms, and Their Applications. *Small*, **18**, Article ID: 2203400. https://doi.org/10.1002/smll.202203400

[9] Liu, X., Li, W., Liu, C., Wu, Z. and Li, Y. (2026) Nanozymes with Superoxide Dismutase Activity: Mechanisms, Classification, and Biomedical Applications. *Free Radical Biology and Medicine*, **249**, 507-525. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2026.03.041

[10] Yang, M., Liu, R., Zhang, X., Han, X., Ren, B. and Ma, J. (2026) Recent Progress of Nanozymes Based on Performance Regulation Mechanisms in Food Detection. *Microchemical Journal*, **227**, Article ID: 118629. https://doi.org/10.1016/j.microc.2026.118629

[11] Hu, T., Zhang, X., Dong, M., Kong, F., Wang, Z., Li, K., *et al*. (2026) Nanozymes in IBD Therapy: Rational Design, Catalytic Mechanisms and Targeted Therapies Delivery. *Materials & Design*, **262**, Article ID: 115475. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2026.115475

[12] Xia, L., Huang, A., Niu, X., Wu, Z., Tang, Y., Zhou, J., *et al*. (2024) Laccase-Mimicking Activity of Octahedral Mn3o4 Nanoparticles and Fluorescence of Carbon Dots as Dual-Mode Signals for the Specific Detection of Arsenic(v) in Environmental Water Samples. *Science of the Total Environment*, **951**, Article ID: 175559. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175559

[13] Deng, L., Zhang, L., Qi, R., Chen, J., Song, W. and Lu, X. (2025) Copper Nanoparticles Loaded on *n*-Doped Carbon Nanotubes with Enhanced Peroxidase-Like Performance for Gallic Acid Detection in Food. *Inorganic Chemistry*, **64**, 8439-8447. https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5c00997

[14] Yuan, M., Yuan, X., Jin, Y., Shi, Y., Zou, Z. and Xiong, X. (2025) Smartphone-Assisted Colorimetric Sensing Platform Based on Cu(BDC) Nanosheets Derived CuS Nanoparticles Embedded in Porous Carbon with Peroxidase-Like Activity for Gallic Acid Detection. *Microchemical Journal*, **210**, Article ID: 112969. https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.112969

[15] Lu, Y.W., Zhang, X.D. and Huang, Y.M. (2022) Tuning Nanozyme Property of Co@Nc via V Doping to Construct

Colorimetric Sensor Array for Quantifying and Discriminating Antioxidant Phenolic Compounds. *Biosensors and Bioelectronics*, **215**, Article ID: 114567. https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114567

[16] Zhou, T., Chen, D.Q., Li, H.R., Ge, D.H. and Chen, X.J. (2024) Enhanced Oxidase Mimic Activity of Raspberry-Like N-Doped $Mn_3O_4$ with Oxygen Vacancies for Efficient Colorimetric Detection of Gallic Acid Coupled with Smartphone. *Food Chemistry*, **447**, Article ID: 138919. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138919

[17] 胡晓霞, 刘晓丹, 许萍, 邢彦军, 刘小杰. 基于 Co3O4-NC 的过氧化氢酶活性比色检测茶叶中的没食子酸[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 302-309.

[18] Li, Y., Chen, Z., Zhang, J., He, M., Huang, Y., Yang, S., *et al*. (2026) A Bifunctional Iron-Organic Framework Microsphere for the Dual-Mode Detection of Gallic Acid in Tea-Leaves. *Microchemical Journal*, **226**, Article ID: 118323. https://doi.org/10.1016/j.microc.2026.118323

[19] Hu, C., Yin, Y., Huang, C., Dong, Y., Liu, J., Xiao, F., *et al*. (2024) Cobalt-Nitrogen Co-Doped Carbon Dots for the Colorimetric and Fluorometric Dual-Mode Detection of Gallic Acid. *Microchemical Journal*, **197**, Article ID: 109735. https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109735

[20] Wu, Y., Xiao, Y., Ju, Y., Sun, Y., He, J., Liu, T., *et al*. (2024) Multi-Mode Sensing Platform for Gallic Acid Determination Based on the Peroxidase-Like Activity of Magnetic $Fe_3O_4$@Co/Ni/Al-LDH Nanospheres. *LWT*, **203**, Article ID: 116366. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116366

[21] Yang, C., Xu, G., Hou, C. and Zhang, H. (2024) Cobalt Oxyhydroxide Nanoflakes Enable Ratiometric Fluorescent Assay of Gallic Acid. *Food Chemistry*: *X*, **24**, Article ID: 101843. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101843

[22] Liu, J., Ma, W., Wang, Y., Gu, Q., Pan, Q., Zong, S., *et al*. (2024) Enhanced Oxidase-Mimic Constructed by Luminescent Carbon Dots Loaded on MIL-53(Fe)-$NO_2$ for Dual-Mode Detection of Gallic Acid and Biothiols in Food and Humans. *Food Chemistry*, **433**, Article ID: 137241. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137241

[23] Tan, Q., An, X., Pan, S., Zhen, S., Hu, Y. and Hu, X. (2022) A Facile and Sensitive Ratiometric Fluorescent Sensor for Determination of Gallic Acid. *Microchemical Journal*, **172**, Article ID: 106922. https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106922

[24] Chen, M., Lei, Y., Liu, J., Liu, Q., Song, X., He, T., *et al*. (2026) Iron Single-Atom/Cluster Nanozyme with Enhanced Oxidase-Like Activity for Fluorescent/Colorimetric Analysis of Total Antioxidant Capacity in Food. *Food Chemistry*, **505**, Article ID: 147883. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.147883

[25] Li, J.S., Lin, J.H., Luo, T., Liu, J.J., Liu, J.Y. and Zhong, W.N. (2024) Sensitive Detection of Gallic Acid in Food by Electrochemical Sensor Fabricated by Integrating Nanochannel Film with Nanocarbon Nanocomposite. *Frontiers in Nutrition*, **11**, Article 1491345. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1491345

[26] Falahi, S., Falahi, S., Zarejousheghani, M., Ehrlich, H., Joseph, Y. and Rahimi, P. (2023) Electrochemical Sensing of Gallic Acid in Beverages Using a 3D Bio-Nanocomposite Based on Carbon Nanotubes/Spongin-Atacamite. *Biosensors*, **13**, Article 262. https://doi.org/10.3390/bios13020262

[27] Wei, M.J., Li, J., Wei, Z.Q., Zhang, S.F., Wang, Z.X., Li, H.Y., *et al*. (2023) A Single-Site Porphyrin (Cu)-Based COF Electrocatalyst for the Electrochemical Detection of Gallic Acid Sensitively. *Analytica Chimica Acta*, **1283**, Article ID: 341975. https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341975

[28] Shahsavani, M. and Tashkhourian, J. (2026) Facile Construction of $CeO_2$-ZnO Nanospheres Modified Carbon Paste Electrochemical Sensor for the Determination of Gallic Acid as a Crucial Antioxidant. *Materials Science and Engineering*: *B*, **327**, Article ID: 119181. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2026.119181

[29] Li, J.J., Yang, Y.Q., Li, Y.H., Zhao, P.C., Fei, J.J. and Xie, Y.X. (2023) Detection of Gallic Acid in Food Using an Ultra-Sensitive Electrochemical Sensor Based on Glass Carbon Electrode Modified by Bimetal Doped Carbon Nanopolyhedras. *Food Chemistry*, **429**, Article ID: 136900. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136900

[30] Qin, F.X., Hu, T.J., You, L.X., Chen, W., Jia, D.S., Hu, N.N. and Qi, W.H. (2022) Electrochemical Detection of Gallic Acid in Green Tea Using Molecularly Imprinted Polymers on $TiO_2$@CNTs Nanocomposite Modified Glassy Carbon Electrode. *International Journal of Electrochemical Science*, **17**, Article ID: 220426. https://doi.org/10.20964/2022.04.06

[31] Bitew, Z., Kassa, A. and Misgan, B. (2022) Poly(Diphenylamine-4-Sulfonic Acid) Modified Glassy Carbon Electrode for Voltammetric Determination of Gallic Acid in Honey and Peanut Samples. *Arabian Journal of Chemistry*, **15**, Article ID: 103853. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103853