

基于金纳米粒子的比色法在食品 安全检测中的应用

郎 爽, 贾 丽, 周慧娟*, 冯月超, 李 杨, 冯海静

[北京市科学技术研究院分析测试研究所(北京市理化分析测试中心),
北京市食品安全分析测试工程技术研究中心, 北京 100089]

摘 要: 金纳米粒子(gold nanoparticle, AuNPs)是一种有着良好的光学性质, 具有类似天然酶活性的纳米材料, 通过改变 AuNPs 的尺寸、形貌, 进行表面修饰, 优化局部环境及改变催化条件等手段, 可以改变 AuNPs 聚集状态, 其吸收峰发生变化, 从而引起溶液颜色发生改变, 也可以改变 AuNPs 的类酶活性, 促进有机底物发生颜色变化, 提高方法的灵敏度。基于 AuNPs 的比色法以其操作简便、可视性强、灵敏度高、检测成本低等优点在食品快速检测中有着很大的优势, 尤其是近年来随着纳米技术的快速发展, 此方法成为食品安全检测领域的研究热点。本文介绍了 AuNPs 的制备方法, 总结了基于 AuNPs 的比色法的显色机制, 重点介绍了近年来此方法在食品安全检测中的最新应用进展, 主要包括金属离子、农兽药残留、真菌毒素、微生物等检测方法的最新研究成果, 对两种显色机制的基于 AuNPs 的比色法在食品安全检测中的应用进行了对比, 就目前存在的问题提出建议, 对未来发展前景作了简要展望, 以期将此方法更好地应用于食品快速检测及现场风险筛查, 及时、快速、有效地从源头确保食品安全。

关键词: 金纳米粒子; 比色法; 食品安全

Application of colorimetric method based on gold nanoparticles in food safety detection

LANG Shuang, JIA Li, ZHOU Hui-Juan*, FENG Yue-Chao, LI Yang, FENG Hai-Jing

[Institute of Analysis and Testing, Beijing Academy of Science and Technology (Beijing Center for Physical and Chemical Analysis), Beijing Engineering Research Center of Food Safety Analysis, Beijing 100089, China]

ABSTRACT: Gold nanoparticle (AuNPs) is a kind of nano material with good optical properties and similar natural enzyme activity. By changing the size and morphology of AuNPs, surface modification, optimizing the local environment and changing the catalytic conditions, the aggregation state of AuNPs can be changed, and the absorption peak of AuNPs can be changed, thus causing the color of solution to change, and the enzymatic activity of AuNPs can also be changed to promote the color change of organic substrates, improve the sensitivity of the method. Colorimetric method based on AuNPs is of great advantages in rapid detection of food due to its simple operation, strong visibility, high sensitivity and relatively low cost. Especially with the rapid development of nanotechnology in

基金项目: 北京市自然科学基金项目(2214059)

Fund: Supported by the Beijing Natural Science Foundation Project (2214059)

*通信作者: 周慧娟, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全分析方法研究。E-mail: zfy8822@126.com

*Corresponding author: ZHOU Hui-Juan, Ph.D, Senior Engineer, Institute of Analysis and Testing, Beijing Academy of Science and Technology (Beijing Center for Physical and Chemical Analysis), No.27, West 3rd Ring Rd North, Beijing 100089, China. E-mail: zfy8822@126.com

recent years, colorimetry based on AuNPs has become a research hotspot in the field of food safety detection. This paper introduced the preparation method of AuNPs, summarized mechanisms of colorimetry based on AuNPs, and mainly introduced the latest applications of colorimetry based on AuNP in the field of food safety in recent years, including researches on metal ions, pesticide and veterinary drug residues, mycotoxins, microorganisms, etc. The application of 2 kinds of colorimetric methods based on AuNPs in food safety detection is compared, the existing problems are proposed, and the future development prospects are briefly prospected, so as to better apply this method to food rapid detection and on-site risk screening, and ensure food safety from the source in a timely, rapid and effective manner.

KEY WORDS: gold nanoparticle; colorimetry; food safety

0 引言

食品安全是一个全球性的大问题,关系到人们的健康和生命安全。食品从生产、加工到市场流通都面临诸多挑战^[1]。随着人们健康意识的不断提升,食品中农兽药残留、重金属污染、食品添加剂违规使用等问题引起了越来越多的关注^[2]。高效、精准、快速、经济的检测技术在保障食品安全过程中起到了至关重要的作用。

在食品分析与检测中,比色法是应用最广的传统化学检验方法,包括目视比色法和分光光度法。比色法是通过比较或测量有色物质溶液颜色深度来确定待测组分含量的方法,与一般的仪器分析方法相比,比色法在检测过程中不需要复杂的大型仪器设备,检测成本低,操作相对简便,可以进行现场测定,适合食品的快速检测。尤其是分光光度计以检测溶液吸光度变化对目标物进行定性定量分析,使得检测准确性和灵敏度得以提高^[3-4]。

在食品快速检测领域,目前使用较多的化学比色法、酶抑制比色法和基于免疫学技术的比色法仍存在一些不足。例如:化学比色法灵敏度有所欠缺,实验过程中容易受到外界因素的干扰;有些物质和酶结合后,有可能会发生假阳性反应,影响检测结果的真实性;对于大多数农药,由于其本身不含抗体,基于免疫学技术的比色法的应用受到一定限制^[5]。因此,需要采用一种灵敏度和准确度更高的方法,更有效地开展食品快速检测工作。

随着纳米技术的发展,金纳米材料因为化学性质稳定、粒径与形貌可控、生物相容性较好、表面可修饰性较强、光学活性特殊、局域表面等离子共振效应优异等优点,在催化、光学、电学、生物医学等众多科技领域得到了广泛的应用^[6-9]。近年来,在食品安全检测领域,基于金纳米粒子(gold nanoparticle, AuNPs)的比色法以其快速、高效、简便、特异性强、灵敏度高等特点,在食品重金属、农兽药残留、真菌毒素、食源性致病菌^[10-15]等污染物检测方面发挥了越来越大的作用,与其他比色法相比,基于金纳米粒子的比色法可以更好地满足现代食品检测快速、经济、高效的检测需求^[16],实现食品快速检测及现场风险筛查,

有利于及时、快速地从源头确保食品安全^[17-18]。

本文介绍了 AuNPs 的制备方法,总结了基于 AuNPs 的比色法的显色机制,重点探讨了近年来基于 AuNPs 的比色法在食品中金属离子、农兽药残留、真菌毒素、微生物等检测方面的应用实例,对比了不同显色机制的基于 AuNPs 的比色法在食品安全检测中的应用,以期其在食品安全领域更广泛的应用提供参考。

1 AuNPs 的制备

性能良好的 AuNPs 在比色分析中尤为重要。制备 AuNPs 的方法有物理法和化学法^[19],由于化学法具有生成 AuNPs 形状可控且操作简便的特点,被广泛应用于食品安全检测领域。目前,使用最多的是用还原剂还原氯金酸,使溶液中金离子还原称为金原子,金原子进一步聚集形成粒径为纳米级的 AuNPs,并通过调节温度、pH 和还原剂的种类和浓度来控制粒径范围。可以用柠檬酸钠^[20-25]、硼氢化钠^[26-27]、乙酰水杨酸^[28]等无机物作为还原剂。随着近年来基于发展环境友好型工业的需要,生物分子环境友好、绿色低毒的特点被研究者广泛研究,人们利用谷胱甘肽^[29]、壳聚糖^[30]等生物分子作为还原剂制备纳米材料越来越多。另外,由于某些目标物自身具有还原性,可以把目标物直接加入氯金酸溶液,利用目标物的还原性,使金离子还原成为金原子,金原子进一步聚集,原位生成 AuNPs^[31-32]。原位生成 AuNPs 无需事先制备 AuNPs,目标物的检测与 AuNPs 制备可同时完成,操作简便,更加适用于现场快速检测。

2 基于 AuNPs 的比色法显色机制

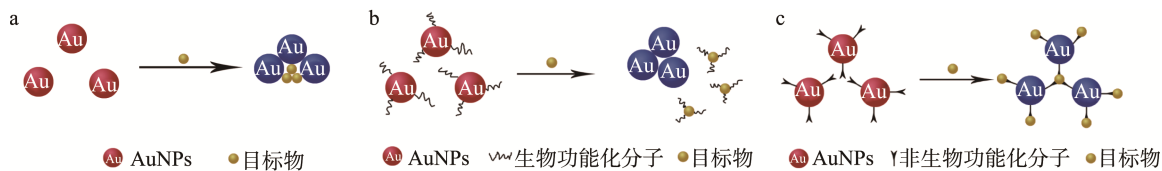
比较常见的基于 AuNPs 的比色法主要有以下两种显色机制,第一种是基于局域表面等离子体共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)显色机制。小尺寸的金纳米粒子强吸收峰在 520 nm 附近产生,溶液颜色呈酒红色,颗粒之间由于相互排斥力的存在使 AuNPs 分散在溶液中并保持稳定状态,当其稳定性下降发生聚集时, AuNPs 表

面等离子吸收带发生红移和变宽,在 600~700 nm 区域光吸收增强,溶液颜色从酒红色变为紫色甚至是蓝色^[33-36]。可以利用 AuNPs 聚集和解聚时溶液呈现出的不同颜色,也可以通过对 AuNPs 的形貌、组成成分及局部环境的调控,改变 AuNPs 尺寸,使溶液颜色发生改变^[31-32],建立比色法对目标物进行检测。AuNPs 聚集(图 1)和解聚(图 2)的原理主要有:一定条件下,带正电荷的目标物,可以使带负电荷的 AuNPs 稳定性下降并发生聚集^[28];使用生物或非生物功能分子对 AuNPs 进行功能化,目标物加入后,功能化分子与目标物的结合能力强于其与 AuNPs 的结合能力^[21],或形成目标物-功能化分子-AuNPs 复合物^[26],从而引起 AuNPs 聚集;某些改性试剂可以引起 AuNPs 发生聚集,待目标物加入后,改性试剂与目标物结合,引起 AuNPs 发生

解聚,通过溶液颜色变化对目标物进行检测^[20]。

另一种是基于 AuNPs 具有的模拟酶活性显色机制(图 3)。AuNPs 具有类似天然酶的催化活性,其中过氧化物酶样活性最具代表性,在食品安全检测中的应用最为广泛。在过氧化氢等氧化物存在下,AuNPs 可催化某些有机底物发生氧化反应,促进显色底物变色,从而建立基于 AuNPs 的比色法对目标物进行检测。通过改变纳米金粒子的形貌,进行表面修饰,改变催化条件,加入促进剂和增加光照等,都会对其酶活性产生影响^[37-39]。

基于 AuNPs 的比色法检测有机小分子具有操作简便、选择性好、灵敏度高优点,可以对食品中金属元素、农药残留、真菌毒素、非法添加剂等目标物进行检测。表 1 对基于 AuNPs 的比色法的应用进行了总结。



注: a. 目标物引起 AuNPs 稳定性下降发生聚集; b. 生物功能化分子引起 AuNPs 聚集; c. 非生物功能化分子引起 AuNPs 聚集。

图 1 基于 AuNPs 的 LSPR 显色机制示意图(AuNPs 聚集)

Fig.1 Schematic diagram of LSPR color rendering mechanism based on AuNPs (AuNPs gathered)

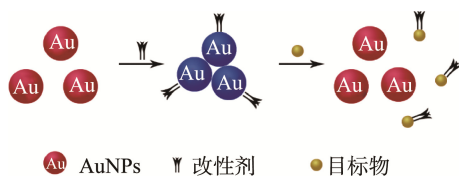


图 2 基于 AuNPs 的 LSPR 显色机制示意图(AuNPs 解聚)

Fig.2 Schematic diagram of LSPR color rendering mechanism based on AuNPs (AuNPs depolymerization)

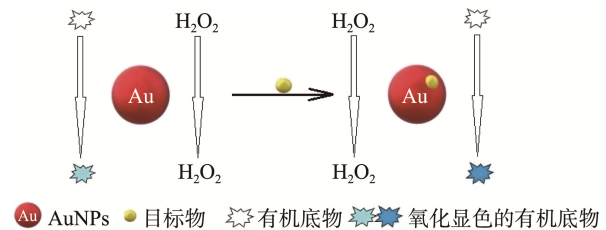


图 3 基于 AuNPs 模拟酶活性显色机制示意图

Fig.3 Schematic diagram of enzyme-like activity color rendering mechanism based on AuNPs mimetic enzymes

表 1 基于 AuNPs 的比色法的应用

Table 1 Application of colorimetric method based on AuNPs

靶标	目标物	样品类型	显色机制	功能化分子/改性试剂/杂化材料	检出限	参考文献
金属离子	Pb ²⁺	水	类过氧化物酶活性	无	2 mol/L	[29]
	Hg ²⁺	水	类过氧化物酶活性	无	0.02 mol/L	[30]
	Hg ²⁺	水	类过氧化物酶活性	Fe-TCPP-MOF*	0.1 nmol/L	[40]
	Ag ⁺	水	聚集	无	0.05 nmol/L	[28]
	Hg ²⁺	水	聚集-解聚	铋试剂	0.05 g/L	[20]
	Hg ²⁺	水	聚集-解聚	N-乙酰-L-半胱氨酸	9.9 nmol/L	[41]
	As ³⁺	紫菜、虾类、水	聚集	无	10 g/L	[31]
农药残留	啉虫脒	-	聚集	适配体	1.3 mol/L	[21]
	氨基青霉素	鱼肉、猪肉	聚集	适配体	10 nmol/L	[22]
	氟苯尼考、氟苯尼考胺	鸡蛋	聚集	适配体	5.4、6.3 nmol/L	[42]
	雌二醇	牛奶、鸡蛋	聚集	适配体	0.2 nmol/L	[43]
	卡那霉素	猪肉	聚集	适配体	30 nmol/L	[44]

表 1(续)

靶标	目标物	样品类型	显色机制	功能化分子/改性试剂/杂化材料	检出限	参考文献
	孔雀石绿、隐性孔雀石绿	水产品	聚集	适配体	6.9、6.4 nmol/L	[45]
	啶硫磷	水、水果	聚集	2-氨基-4-噻唑乙酸	14.4 g/L	[26]
	毒死蜱	蔬菜	聚集	氯化镧	0.1 nmol/L	[46]
	土霉素、四环素、强力霉素	牛奶	聚集	无	14、18.9、2.0 nmol/L	[32]
	卡那霉素	牛奶、猪肉	类过氧化物酶活性	无	0.1 nmol/L	[47]
	孔雀石绿	水	类过氧化物酶活性	适配体	1.8 nmol/L	[48]
真菌毒素	黄曲霉毒素 M ₁	牛奶	聚集	适配体	0.002 ng/mL	[23]
	黄曲霉毒素 B ₁	水稻、花生	聚集	适配体	0.4 ng/mL	[49]
	玉米赤霉烯酮	玉米、玉米油	聚集	适配体	0.1 ng/mL	[50]
微生物	O157-H7 大肠杆菌	水	聚集	适配体	263 CFU/mL	[24]
	鼠伤寒沙门氏菌	生菜	分散	无	2.65 CFU/mL	[51]
	金黄色葡萄球菌	猪肉、牛奶	类过氧化物酶活性	适配体	10 CFU/mL	[52]
其他	三聚氰胺	牛奶	聚集	无	0.1 mol/L	[53]
	三聚氰胺	奶、奶粉	类过氧化物酶活性	无	0.2 nmol/L	[27]
	微囊藻毒素-LR	水	聚集	适配体	7.1 ng/mL	[25]
	I ⁻	水	聚集	无	4.2 nmol/L	[54]

注: *表示铁-5,10,15,20-四(4-羧基)-21h,23h-卟啉化合物; -表示文献中未提及。

3 基于 AuNPs 的比色法在食品安全检测中的应用

3.1 食品中有害金属离子的检测

有害金属离子会在食品生产、加工、贮存、运输过程中产生,由于其具有不可降解,易在生物体内蓄积的特性,当通过食物和饮用水进入人体后,会对人体健康构成极大危害。因此,开发选择性好、灵敏度高、准确快速且操作简便的检测技术,实现对食品中有害金属离子的现场快速检测尤为重要。

金属离子具有可特异性增强、激活或抑制 AuNPs 催化活性的特性,研究者利用金属离子对 AuNPs 类酶活性的影响对其进行检测。LIAO 等^[29]使用谷胱甘肽(glutathione, GSH)作为还原剂和稳定剂制备 AuNPs, Pb²⁺的加入使 AuNPs 在 H₂O₂ 存在下对过氧化物酶底物 3,3',5,5'-四甲基联苯胺的催化活性提高了近 10 倍,检出限为 2 mol/L。JIANG 等^[30]使用壳聚糖(chitosan, CS)制备 AuNPs, CS-AuNPs 的类过氧化物酶活性可以被 Hg²⁺显著增强,检出限可达 0.02 mol/L。Hg²⁺还可以结合到 AuNPs 表面形成金汞合金,使 AuNPs 的催化活性加强。利用这一原理, WANG 等^[40]将 AuNPs 固定在金属有机骨架(metal-organic frameworks, MOFs)上以避免聚集,由于金汞合金的形成, AuNPs 的催化活性加强,检测水中 Hg²⁺的检出限可达 0.1 nmol/L。

表面呈现电负性的 AuNPs, 由于颗粒之间静电斥力

与范德华引力相抵消, AuNPs 分散在溶液体系中并保持稳定状态,带正离子的金属盐离子加入时, AuNPs 稳定性下降并发生聚集。利用这一原理, SAFIA 等^[28]使用乙酰水杨酸(acetylsalicylic acid, aspirin, Asp)作为还原剂和稳定剂,制备 Asp-AuNPs 纳米粒子检测水溶液中 Ag⁺, 方法灵敏度高, 响应范围为 0.002~0.015 mol/L, 检出限为 0.05 nmol/L。通过添加改性剂, 可以提高选择性和灵敏度, 其原理为: 改性剂的加入, 首先破坏 AuNPs 的稳定性使其聚集, 待加入目标物后, 利用目标物与改性剂更强的结合能力, 使 AuNPs 发生解聚, 导致溶液颜色由蓝紫色变为红色。郭昱辰等^[20]使用铋试剂-II作为 AuNPs 的改性剂, 对样品中的 Hg²⁺进行检测。TANG 等^[41]将 N-乙酰-L-半胱氨酸(N-acetyl-cysteine, NAC)加入到已制备的 AuNPs 溶液中, 由于 NAC-Hg-NAC 共聚体的形成产生 AuNPs 解聚效应, 该方法检测水中 Hg²⁺, 检出限可达 9.9 nmol/L。

基于 AuNPs 原位生成的比色法在金属离子检测中有着很好的应用前景, 该方法无需复杂的合成过程, 更加简便快捷。PU 等^[31]将目标物中的 As³⁺与氢化物反应生成 AsH₃, 利用 AsH₃ 的还原性, 在碘化钾的协同作用下还原氯金酸, 制备的 AuNPs 在氯乙烯醇的存在下具有很好的稳定性。随着目标物中 As³⁺含量的增加, 溶液颜色由淡黄色变为粉红色。在室温条件下, 整个分析过程仅需 30 min, 3 mL 样品中微量 As³⁺低至 10 g/L。该方法将 As³⁺还原成 AsH₃, 既可以有效降低基体干扰, 又可以利用 AsH₃ 的还

原性对氯金酸进行还原, 原位生成 AuNPs, 简单、快速、灵敏度高、选择性好, 可以用于现场检测, 对于食品污染源控制起到很好的监督作用。

3.2 食品中农兽药残留的检测

3.2.1 基于 AuNPs 的 LSPR 效应比色法在食品中农兽药残留检测中的应用

超标使用农兽药引起的食品安全问题不容忽视, 长期食用农兽药残留超标的食品, 体内蓄积的药物浓度达到一定量时会使人产生急慢性中毒。AuNPs 具有较大的比表面积, 其生物相容性好、表面可修饰性强, 可以使用生物分子或非生物分子对 AuNPs 功能化, 功能化的 AuNPs 可以提高对目标物质的特异性识别, 降低基体干扰, 提高食品中农兽药残留检测方法准确度。

适配体是目前使用最普遍的对 AuNPs 进行功能化的生物分子, 是可与待测目标物特异性结合的单链寡核苷酸链, 具有特异性好、亲和力强、稳定性高等特点。其原理为: 筛选或设计出对目标物具有高亲和性和特异性的适配体核酸序列吸附在 AuNPs 表面, 在高盐环境下可以使 AuNPs 仍保持稳定的分散状态, 目标物加入后, 由于适配体与目标物物质具有更高的亲和力, 适配体脱离 AuNPs 表面, 与目标物形成目标物-适配体复合结构, 裸露的 AuNPs 在高盐环境下发生团聚, 溶液颜色由之前的红色变为紫色或蓝色。利用这一原理, 可以对食品中的农兽药残留进行检测。在农药检测方面, 么亚男等^[21]设计的啉虫脒高亲和力适配体, 实现了啉虫脒的定量检测。在兽药检测方面, 适配体的应用更为广泛。张万方等^[22]设计合成了一条氨苄青霉素特异性核酸适配体 DNA 发夹和两条 DNA 发夹探针, 利用发夹之前序列互补杂交的方式实现信号的级联放大, 实现了对鱼肉和猪肉两种样品中氨苄青霉素进行检测。王琪等^[42]合成氟苯尼考高亲和力适配体, 可对鸡蛋中氟苯尼考进行分析。王欣等^[43]提出基于雌二醇特异性适配体的 AuNPs 比色检测法对牛奶和鸡蛋样品中雌二醇进行检测。袁爱梦等^[44]成功筛选出卡那霉素高亲和力适配体对猪肉样品中的卡那霉素进行检测。吴文伟等^[45]以具有双特异性识别能力的核酸适配体作为传感探针, 建立了免标记 AuNPs 比色法同时检测水产品中的孔雀石绿和阴性孔雀石绿。通过以上这些研究发现, 适配体功能化的 AuNPs 应用于食品中农兽药残留的检测, 一方面, 方法的灵敏度高, 尤其是王欣等^[43]对牛奶和鸡蛋样品中雌二醇进行检测, 检出限可达 0.2 nmol/L, 另一方面, 方法的抗基质干扰能力强, 可以完成对复杂基质中目标物的检测。另外, 王琪等^[42]将比色传感器与智能手机的成像分析相结合, 实现现场快速分析, 为食品现场快速筛查提供了更为便捷的途径。

与生物分子相比, 非生物分子成本低、官能团种类丰

富, 很多种类的分子链接剂和表面钝化剂都被用来链接 AuNPs。链接后的 AuNPs 在与目标物相互作用时, 会导致功能化的 AuNPs 发生聚集, 溶液颜色发生变化, 从而实现目标物的检测。LOGANATHAN 等^[26]将 2-氨基-4-噻唑乙酸 (2-amino-4-thiazoleacetic acid, ATA) 链接在 AuNPs 上, 溶液中噻硫磷浓度增加时, 由于 ATA 中的乙酸基团与噻硫磷中的硫原子形成氢键, ATA-AuNPs 被聚集在一起, 该方法具有良好的稳定性和抗基质干扰性, 在 150~1050 $\mu\text{g/L}$ 范围内呈良好的线性关系, 检出限为 14.4 $\mu\text{g/L}$ 。贝峰等^[46]将氯化镧固定在 AuNPs 表面, 镧³⁺与有机磷农药中的含氧基团结合, 形成不溶于水的纳米金-镧-毒死蜱复合物, 引起 AuNPs-La 发生聚集, 对蔬菜中毒死蜱残留进行现场检测, 检出限为 0.1 nmol/L。

AuNPs 原位生成比色法同样可以应用于食品中农兽药残留的检测。YUE 等^[32]开发了将 AuNPs 的原位生成与金染色技术耦合的操作更简便、灵敏度更高的四环素类药物检测方法。该方法直接利用含酚基的四环素类药物还原氯金酸溶液制备小尺寸 AuNPs, 在随后的金染色过程中, 继续加入羟胺作为还原剂, 氯金酸被还原成金原子, 并沉积在小 AuNPs 表面形成大的 AuNPs。AuNPs 原位生成, 方法简便快捷, 金染色技术作为一种扩增策略, 有效提高了方法的检测灵敏度, 二者耦合应用于牛奶样品中土霉素、四环素和强力霉素的检测, 检出限分别为 14、18.9 和 2.0 nmol/L。

3.2.2 基于 AuNPs 的模拟酶活性比色法在食品中农兽药残留检测中的应用

利用 AuNPs 的类酶活性, 在 H_2O_2 存在下引起底物发生颜色变化, 也可以对食品中的农兽药残留进行检测。WANG 等^[47]发现卡那霉素可以增强 AuNPs 的过氧化物酶活性, 并催化 3,3',5,5'-四甲基联苯胺与 H_2O_2 的显色反应。该方法成功地应用于牛奶和肉类样品中卡那霉素含量的检测, 检出限可达 0.1 nmol/L。AuNPs 的聚集状态也会引起催化活性改变, ZHAO 等^[48]开发了基于十六烷基三甲基溴化铵 (cetyltrimethylammonium bromide, CATB) 离子抑制 AuNPs 类过氧化物酶活性的比色传感器检测孔雀石绿的方法。针对孔雀石绿的带负电 RNA 适配体与带正电荷的 CATB 结合, AuNPs 呈现稳定的分散状态, 催化活性强, 在 H_2O_2 存在下, 有机底物 3,3',5,5'-四甲基联苯胺的颜色呈现深蓝色, 孔雀石绿存在时, 适配体与孔雀石绿特异性结合, 游离出的 CATB 则与 AuNPs 通过静电吸附, 使 AuNPs 聚集, 催化活性降低, 溶液显色呈浅蓝色, 孔雀石绿含量越高, 溶液颜色越浅, 并呈现良好的线性关系, 该方法特异性强, 方法灵敏度优于吴文伟等^[45]开发的适配体功能化 AuNPs 基于 LSPR 机制测定孔雀石绿的方法。

3.3 食品中真菌毒素的检测

虽然真菌被广泛应用于食品工业, 但有些真菌也能通过产生真菌毒素造成食品污染, 给人体健康带来危害。特异性适配体与目标物结合, AuNPs 聚集状态的改变, 可以快速、准确地对真菌毒素污染物进行检测, 尤其是反应中采用信号放大技术后, 可以进一步提高检测灵敏度。

LERDSRI 等^[23]合成黄曲霉毒素 M₁ 高亲和力适配体, 高盐环境下 AuNPs 聚集, 溶液颜色改变, 测量牛奶中的黄曲霉毒素 M₁, 检出限可达 0.002 ng/mL。JAMRAS 等^[49]利用特异性适配体、阳离子花探针和未修饰的柠檬酸稳定的 AuNPs, 开发了一种快速检测黄曲霉毒素 B₁ 比色法。溶液中适配体与阳离子花探针形成复杂结构, 使 AuNPs 不发生聚集, 目标物的加入, 使适配体与目标物特异性结合, 游离态阳离子花探针在溶液中诱导 AuNPs 聚集, 使颜色变蓝。该方法使用分光光度计进行检测, 检出限为 0.4 ng/mL。孙淑敏等^[50]以玉米赤霉烯酮适配体为识别元件, 构建了基于 AuNPs 诱导聚集和银染色放大的玉米赤霉烯酮适配体比色可视化检测方法。未经过银染色时方法最低检出限为 5 ng/mL, 通过银染色作用, 该方法灵敏度可提高 50 倍, 检出限可达 0.1 ng/mL。

3.4 食品中微生物指标的检测

食品的微生物污染通常由一些致病微生物引起。若食品被致病菌污染, 将会造成严重的食品安全问题。基于 AuNPs 的比色法可以对微生物指标进行现场快速检测。

指数富集的配体系统进化技术(systematic evolution of ligands by exponential enrichment, SELEX)和聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)技术的系统进化是获得特异性的两种常用方法。SELEX 技术用于选择适配体。在目标细菌存在下, 通过静电吸附在 AuNPs 上的特异性适配体离开 AuNPs 表面与目标细菌相互作用, 裸露的 AuNPs 在高盐环境下聚集, 溶液颜色会根据细菌的浓度从红色转变为紫色和蓝色。此外, PCR 技术获得的 DNA 片段也是构建比色法的一个很好的选择。PCR 产物可以预先设计, 不需要从 AuNPs 中解吸, 通过不对称 PCR 技术扩增产生的单链 DNA 产物, 可以保护 AuNPs 不受盐诱导发生聚集, 因此在目标细菌存在的情况下, 不对称 PCR 扩增的单链 DNA 被吸附在 AuNPs 的表面, 使其对高盐环境诱导的聚集保持稳定, 溶液仍保持红色。与之相反, 特定的高盐环境会导致溶液中含有未受单链 DNA 保护的 AuNPs, 溶液颜色由红色变为紫蓝色。利用以上技术, VAHID 等^[24]合成 O157-H7 大肠杆菌高亲和力适配体, 用于检测水中 O157-H7 大肠杆菌。方法在 876~107 CFU/mL 浓度范围内具有良好的线性响应, 低检出限为 263 CFU/mL。WANG 等^[51]研究发现不对称 PCR 扩增较长的单链 DNA 比较短的单链

DNA 能更有效地保护 AuNPs 不受盐诱导发生聚集, 开发了食品中沙门氏菌检测的方法, 检出限达到 2.65 CFU/mL。

AuNPs 蚀刻可增强过氧化物酶样催化活性。YAO 等^[52]发现, 金黄色葡萄球菌高特异性适配体功能化的 AuNPs 经磷酸/过氧化氢蚀刻后, 尺寸变小, 活性电位增加, 催化活性显著提高, 具有更高的底物亲和力。该方法与磁性免疫分离技术相结合, 在猪肉、牛奶等复杂的基质中选择性富集和快速分离目标细菌, 检出限可以达到 10 CFU/mL。

3.5 食品中其他指标的检测

违禁药物和食品添加剂的违规使用等现象, 也是食品安全中不可忽视的问题之一。三聚氰胺, 以其自身化学性质的特点, 被众多研究者发现可以与 AuNPs 发生诱导作用。孔英戈等^[53]发现, 三聚氰胺环外的 3 个氨基可以取代 AuNPs 表面的柠檬酸根, 并通过分子间氢键作用相互交联, 诱导 AuNPs 团聚, 引起溶液颜色改变。该方法应用于牛奶样品, 检测范围为 0.1~28.0 mol/L, 检出限为 0.1 mol/L。同样是针对三聚氰胺的检测, NI 等^[27]发现三聚氰胺可与 AuNPs 形成 AuNPs-三聚氰胺聚集体, 提高 AuNPs 的过氧化物酶样活性。通过与 3,3',5,5'-四甲基联苯胺-过氧化氢体系显色反应的耦合, 建立三聚氰胺显色检测方法, 该方法检出限可以达到 0.2 nmol/L。

生活饮用水水质关乎到人群身体健康, 利用基于 AuNPs 的比色法在水质检测方面也有着检测效率高、操作简单、特异性强等优势。吴袁袁等^[25]对已报道的微囊藻毒素-LR 的原始适配体序列进行优化, 筛选出微囊藻毒素-LR 高亲和力适配体。该方法最低检出限可达 7.08 ng/mL。SUN 等^[54]研发了一种在 CTAB 和 Hg²⁺存在下, 基于未修饰的 AuNPs 检测 I 的比色分析法。作为保护剂的 Hg²⁺可与 AuNPs 形成金汞合金, 防止作为聚集剂的 CTAB 通过静电吸引引起 AuNPs 的聚集。目标物的加入, HgI₂ 络合物的形成破坏了 Hg²⁺对 AuNPs 的保护作用, 导致 AuNPs 聚集, 溶液颜色发生改变。该方法应用于实际样品检测, 水溶液中 I 的检出限为 4.2 nmol/L。

4 总结与展望

本文总结了近年来基于 AuNPs 的比色法在食品安全检测中的研究成果。可以看出, 首先, 众多研究者采用化学法制备 AuNPs 作为比色传感器, 尤其是 Turkevich-Frens 法^[55], 采用柠檬酸钠还原氯金酸制备的纳米粒子, 仍是目前最具代表性的方法。但利用多肽、蛋白质、氨基酸或植物提取液等生物分子制备 AuNPs 及 AuNPs 的原位生成法在食品安全检测中有着广泛的应用前景, 可针对目标物的性质予以开发及应用。其次, 更多的研究成果是根据目标物对 AuNPs 进行功能化, 功能化分子可以是适配体、钛、蛋白质等生物分子, 也可以是 ATA、氯化镧等非

生物分子。再次,针对同一目标物,可以设计基于不同显色机制的 AuNPs 比色法,例如: Hg^{2+} 、卡那霉素、孔雀石绿、三聚氰胺,基于酶活性机制的比色法检出限相对较低。为提高方法灵敏度,可以通过控制反应温度、溶液 pH、适配体浓度、盐浓度等实验条件,提高方法选择性和灵敏度,也可以将信号放大技术与基于 LSPR 机制的 AuNPs 比色法相结合,或根据目标物的性质,利用 AuNPs 的类酶活性,更多的研发基于酶活性机制的 AuNPs 比色法。最后,将比色传感器与智能手机的成像分析相结合,实现现场快速分析,为拓宽基于 AuNPs 的比色法的应用提供了新的思路。

但是,基于 AuNPs 的比色法也存在方法灵敏度、特异性和稳定性有待进一步提高的问题。我们可以通过引入磁分离技术、银染色和金染色等信号放大技术,进一步提高方法灵敏度。通过改变 AuNPs 的尺寸、进行表面修饰改性或空间结构调整,优化溶液环境和催化条件,提高方法的特异性和稳定性。另外,样品前处理技术也需要进一步优化,尤其是复杂基质的样品,需要尽可能去除基质带来的干扰,进一步提高基于 AuNPs 的比色法的准确性。

总之,基于 AuNPs 的比色法在食品安全领域取得了全新的成就,尤其是成本低、操作简便、无需复杂的大型仪器设备,更加适合食品现场检测和风险筛查,在未来能够获得更广泛的市场,在食品安全检测领域中发挥更重要的作用,有更广泛的应用前景。

参考文献

- [1] LIU XZ, GAO P, CHEN NJ, *et al.* Discussion on the problems and solutions of food testing at present [J]. *Agric Sci*, 2021, 11(7): 617–621.
- [2] LI CJ, LI CY, YU H, *et al.* Chemical food contaminants during food processing: Sources and control [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2020, 61(9): 1–11.
- [3] 庞健. 现代仪器分析技术在食品分析与检测过程中的应用[J]. *食品安全导刊*, 2018, (9): 84–85.
PANG J. The application of modern instrumental analysis technology in food analysis and detection process [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2018, (9): 84–85.
- [4] 周璇, 何新叶, 杨露峰, 等. 基于化学比色原理的食品安全快检产品评价方法的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(5): 1278–1283.
ZHOU X, HE XY, YANG LF, *et al.* Research on food safety inspection product evaluation method based on chemical colorimetric principle [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(5): 1278–1283.
- [5] 张友伟. 食品安全快速检测在食品生产加工企业中的应用[J]. *食品安全导刊*, 2022, (9): 29–32.
ZHANG YW. Application of rapid food safety detection in food production and processing enterprises [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2022, (9): 29–32.
- [6] 陈祥亭, 李忠. 金纳米材料的合成方法进展[J]. *山东化工*, 2021, 50(16): 100, 116.
CHEN XT, LI Z. Advances in synthesis methods of gold nanomaterials [J]. *Shandong Chem Ind*, 2021, 50(16): 100, 116.
- [7] HUONG VT, TA HKT, MAI NXD. Development of a highly sensitive sensor chip using optical diagnostic based on functionalized plasmonically active AuNPs [J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(33): 1361.
- [8] FAN XS, LUO Z, YE EY. AuNPs decorated PLA stereocomplex micelles for synergetic photothermal and chemotherapy [J]. *Macromol Biosci*, 2021, 21(7): 2100062.
- [9] YANG T, LUO ZW, TIAN YH. Design strategies of AuNPs-based nucleic acid colorimetric biosensors [J]. *TrAC Trends Anal Chem*, 2020, 124(C): 115795.
- [10] 刘丰源, 辛嘉英, 孙立瑞, 等. 纳米金的合成及其在重金属离子检测中的应用进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 218–227.
LIU FY, XIN JY, SUN LR, *et al.* Recent progress in synthesis of gold nanoparticles and its application in detection of heavy metal ions [J]. *Food Sci*, 2020, 41(7): 218–227.
- [11] HUA Z, YU T, LIU DH. Recent advances in gold nanoparticles-based biosensors for food safety detection [J]. *Biosens Bioelectron*, 2021, 179: 113076.
- [12] 赵文潇, 翟飞, 杨海龙, 等. 纳米酶生物传感器在食品质量与安全检测中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(24): 184–192.
ZHAO WX, ZHAI F, YANG HL, *et al.* Application of nanozyme-based biosensor in the analysis of food quality and safety [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(24): 184–192.
- [13] 王鹏飞, 杨敏, 朱龙佼, 等. 基于铂纳米团簇的生物传感研究进展[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(12): 8–15.
WANG PF, YANG M, ZHU LJ, *et al.* Advances in biosensors based on platinum nanoclusters [J]. *Biotechnol Bull*, 2021, 37(12): 8–15.
- [14] 李佳银, 罗磊, 熊莹姿, 等. 磁性纳米酶显色技术在食品安全检测中的应用[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(5): 1–8.
LI JY, LUO L, XIONG YZ, *et al.* Application of magnetic nanoenzyme colorimetric technology in food safety detection [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(5): 1–8.
- [15] 邱佩佩, 毋福海, 白研, 等. 纳米粒子在食源性致病菌检测中的应用进展[J]. *分析测试学报*, 2020, 39(9): 1160–1167.
QIU PP, WU FH, BAI Y, *et al.* Progress on analytical application of nanoparticles in foodborne pathogenic bacteria [J]. *J Instrum Anal*, 2020, 39(9): 1160–1167.
- [16] 梁梦帆, 李思凡, 王晓渊, 等. 我国食品检测技术发展现状及趋势[J]. *食品安全导刊*, 2019, (12): 129.
LIANG MF, LI SF, WANG XY, *et al.* Development status and trend of food detection technology in China [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2019, (12): 129.
- [17] PU HB, SUN DW, ZHOU XY. DNA functionalized metal and metal oxide nanoparticles: Principles and recent advances in food safety detection [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2020, 61(14): 21–20.
- [18] 林伟琦. 食品安全快速检测技术的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(3): 961–967.

- LIN WQ. Research progress on application of rapid food safety detection technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(3): 961–967.
- [19] 李爽, 代昭, 韩阳. 金纳米粒子的合成方法及应用进展[J]. *精细石油化工*, 2019, (1): 66–70.
- LI S, DAI Z, HAN Y. Synthesis and applications of gold nanoparticles [J]. *Special Petrochem*, 2019, (1): 66–70.
- [20] 郭昱辰, 刘春红, 叶荣珂, 等. 基于纳米金粒子比色法的汞离子检测方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 382–387.
- GUO YC, LIU CH, YE RK, *et al.* Determination of Hg^{2+} based on gold nanoparticle colorimetry [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2020, 51(S2): 382–387.
- [21] 么亚男, 徐斐, 曹慧, 等. 纳米金比色法快速检测啮虫脒[J]. *分析试验室*, 2019, 38(7): 797–800.
- YAO YN, XU F, CAO H, *et al.* Rapid detection of acetamiprid based on gold nanoparticle by colorimetric assay [J]. *Chin J Anal Lab*, 2019, 38(7): 797–800.
- [22] 张万方, 何金娇, 康瑞丽, 等. 纳米金核酸适配体 HCR 放大比色法检测动物源食品中氯霉素残留[J]. *安徽农业大学学报*, 2021, 48(4): 590–594.
- ZHANG WF, HE JJ, KANG RL, *et al.* HCR amplification colorimetric assay for the detection of ampicillin residues in animal food based on gold nanoparticles [J]. *J Anhui Agr Univ*, 2021, 48(4): 590–594.
- [23] LERDSRI J, SOONGSONG J, LAOLUE P, *et al.* Reliable colorimetric aptasensor exploiting 72-Mers ssDNA and gold nanoprobe for highly sensitive detection of aflatoxin M_1 in milk [J]. *J Food Compos Anal*, 2021, 102: 103992.
- [24] VAHID S, SEYED MT, KHALIL A, *et al.* Point-of-care detection of escherichia coli O157:H7 in water using AuNPs-based aptasensor [J]. *Iranian J Med Sci*, 2020, 23(7): 901–908.
- [25] 吴袁袁, 冯俊丽. 基于适配体的纳米金比色法快速检测微囊藻毒素-LR 研究[J]. *核农学报*, 2021, 35(12): 2810–2820.
- WU YY, FENG JL. Rapid detection of microcystin-LR by aptamer-based gold nanoparticles colorimetry [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2021, 35(12): 2810–2820.
- [26] LOGANATHAN C, GOWTHAMAN NSK, ABRAHAM JS. Chain-like 2-amino-4-thiazoleacetic acid tethered AuNPs as colorimetric and spectrophotometric probe for organophosphate pesticide in water and fruit samples [J]. *Microchem J*, 2021, 168: 106496.
- [27] NI PJ, DAI HC, WANG YL, *et al.* Visual detection of melamine based on the peroxidase-like activity enhancement of bare gold nanoparticles [J]. *Biosens Bioelectron*, 2014, 60: 286–291.
- [28] SAFIA SM, SIRAJUDDIN, SHAHABUDDIN M, *et al.* Efficient development and characterisation of Asp-AuNPs based colorimetric sensor for the detection of Ag(I) from real water samples [J]. *Int J Environ Anal Chem*, 2020. DOI: 10.1080/03067319.2020.1784415
- [29] LIAO H, LIU GJ, LIU Y, *et al.* Aggregation-induced accelerating peroxidase-like activity of gold nanoclusters and their applications for colorimetric Pb^{2+} detection [J]. *Chem Commun*, 2017, 53(73): 10160–10163.
- [30] JIANG CF, LI ZJ, WU YX, *et al.* Colorimetric detection of Hg^{2+} based on enhancement of peroxidase-like activity of chitosan-gold nanoparticles [J]. *Bull Korean Chem Soc*, 2018, 39(5): 625–630.
- [31] PU S, SUN HF, HOU XD, *et al.* A colorimetric assay for the determination of trace arsenic based on in-situ formation of AuNPs with synergistic effect of arsine and iodide [J]. *Anal Chim Acta*, 2021, 1144: 61–67.
- [32] YUE NN, LI DM, FAN AP. A simple colorimetric analytical assay for the determination of tetracyclines based on in-situ generation of gold nanoparticles coupling with a gold staining technique [J]. *Anal Sci*, 2021, 37(11): 1583–1587.
- [33] ANKER JN, PAIGE HW, LYANDRES O, *et al.* Biosensing with plasmonic nanosensors [J]. *Nat Mater*, 2008, 7(6): 442–453.
- [34] 王燕, 周化岚, 施沁怡, 等. 基于金纳米粒子光学性质的比色传感器及其在食品安全检测中的应用[J]. *理化检验-化学分册*, 2019, 55(12): 1476–1482.
- WANG Y, ZHOU HL, SHI QY, *et al.* Optical sensor based on gold nanoparticles and its application to food safety inspection [J]. *Phys Test Chem Anal*, 2019, 55(12): 1476–1482.
- [35] 韩振宇, 孙铁强, 刘颖, 等. 基于局域表面等离子体共振的比色法用于食品质量安全检测的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(14): 5568–5576.
- HAN ZY, SUN TQ, LIU Y, *et al.* Research progress of colorimetry based on local surface plasmon resonance in food quality and safety detection [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(14): 5568–5576.
- [36] 白文荟, 刘金钊, 陈爱亮. 纳米金比色法在食品安全检测中的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(7): 1943–1950.
- BAI WH, LIU JC, CHEN AIL. Gold nanoparticle based colorimetry and its application in rapid detection for food safety [J]. *J Food Saf Qual*, 2014, 5(7): 1943–1950.
- [37] 陈达, 刘美含, 张伟, 等. 具有类过氧化物酶活性的纳米材料在比色分析中的研究进展[J]. *材料导报*, 2022, (13): 26.
- CHEN D, LIU MH, ZHANG W, *et al.* Progress in colorimetric analysis of nanomaterials with peroxidase-like activity [J]. *Mater Rev*, 2022, (13): 26.
- [38] 李艳, 王雨笠, 罗成. 纳米材料的过氧化物酶样活性增强策略[J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2021, 37(7): 847–855.
- LI Y, WANG YL, LUO C. Enhancement strategies for peroxidase-like activities of nanomaterials [J]. *Chin J Biochem Mol*, 2021, 37(7): 847–855.
- [39] 吕佳, 张浩春, 张冰, 等. 纳米材料比色分析传感器在食品检测中的应用进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(1): 20–28.
- LV J, ZHANG HC, ZHANG B, *et al.* application of colorimetric sensor based nanomaterials in food detection [J]. *Chem Ind Eng Prog*, 2017, 36(1): 20–28.
- [40] WANG XL, WANG H, GUO L, *et al.* Colorimetric detection of $Hg^{(ii)}$ based on the gold amalgam-triggered reductase mimetic activity in aqueous solution by employing AuNP@MOF nanoparticles [J]. *Analyst*, 2020, 145(4): 1362–1367.
- [41] TANG J, WU P, HOU XD, *et al.* Modification-free and N-acetyl-L-cysteine-induced colorimetric response of AuNPs: A mechanistic study

- and sensitive Hg²⁺ detection [J]. *Talanta*, 2016, 159: 87–92.
- [42] 王琪, 王欣. 基于纳米金比色法可视化检测鸡蛋中的氟苯尼考[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(2): 238–247.
WANG Q, WANG X. Visualized detection of florfenicol in eggs by colorimetry based on gold nanoparticles [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(2): 238–247.
- [43] 王欣, 孙涵颖. 基于核酸适配体的牛奶和鸡蛋中雌二醇纳米金比色检测[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 319–328.
WANG X, SUN HY. Gold nanoparticles colorimetric detection based on aptamer for 17 β -estradiol in milk and eggs [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2020, 51(9): 319–328.
- [44] 袁爱梦, 蔡珺珂, 李彤, 等. 金纳米基比色传感器法测定动物源食品中卡那霉素残留[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(12): 179–182.
YUAN AIM, CAI JK, LI T, *et al.* Kanamycin detecting in animal foods by a gold nanoparticle colorimetric biosensor [J]. *Food Ferment Ind*, 2016, 42(12): 179–182.
- [45] 吴文伟, 王奕, 刘可鑫, 等. 免标记比色核酸适配体传感器同步快速检测孔雀石绿和无色孔雀石绿[J]. *色谱*, 2020, 38(11): 1332–1339.
WU WW, WANG Y, LIU KX, *et al.* Simultaneous and rapid determination of malachite green and leucomalachite green by a label-free colorimetric aptasensor [J]. *Chin J Chromatogr*, 2020, 38(11): 1332–1339.
- [46] 贝峰, 聂梅, 艾仕云, 等. 纳米金比色法快速检测蔬菜中毒死蜱方法的研究[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(20): 115–118.
BEI F, NIE M, AI SY, *et al.* Gold nanoparticles-based colorimetric assay for rapid detection of chlorpyrifos in vegetable [J]. *Food Res Dev*, 2015, 36(20): 115–118.
- [47] WANG CK, CHEN D, WANG QQ, *et al.* Kanamycin detection based on the catalytic ability enhancement of gold nanoparticles [J]. *Biosens Bioelectron*, 2017, 91: 262–267.
- [48] ZHAO C, HONG CY, LIN ZZ, *et al.* Detection of malachite green using a colorimetric aptasensor based on the inhibition of the peroxidase-like activity of gold nanoparticles by cetyltrimethylammonium ions [J]. *Mikrochim Acta*, 2019, 186(5): 322.
- [49] JAMRAS L, WISAN C, JANTIMA U, *et al.* Label-free colorimetric aptasensor for rapid detection of aflatoxin B₁ by utilizing cationic perylene probe and localized surface plasmon resonance of gold nanoparticles [J]. *Sens Actuators B Chem*, 2020, 320: 128356.
- [50] 孙淑敏, 马卫宾, 卫敏, 等. 基于核酸适配体-纳米金银染放大的玉米赤霉烯酮快速检测方法研究[J]. *粮油食品科技*, 2020, 28(5): 11–17.
SUN SM, MA WB, WEI M, *et al.* A colorimetric aptasensor for the fast detection of zearalenone based on Au NPs combined with argentation amplification [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2020, 28(5): 11–17.
- [51] WANG LJ, WU X, HU HX, *et al.* Improving the detection limit of *Salmonella* colorimetry using long ssDNA of asymmetric-PCR and non-functionalized AuNPs [J]. *Anal Biochem*, 2021, 626: 114229.
- [52] YAO S, LI J. Colorimetric immunoassay for rapid detection of staphylococcus aureus based on etching-enhanced peroxidase-like catalytic activity of gold nanoparticles [J]. *Microchim Acta*, 2020, 187(9): 504–504.
- [53] 孔英戈, 张少云, 潘萍, 等. 基于纳米金颗粒团聚反应的分光光度法测定牛奶中三聚氰胺的含量[J]. *理化检验(化学分册)*, 2018, 54(11): 1303–1307.
KONG YG, ZHANG SY, PAN P, *et al.* Spectrophotometric determination of melamine in milk based on agglomeration of gold nanoparticles [J]. *Phys Test Chem Anal*, 2018, 54(11): 1303–1307.
- [54] SUN XX, ZHAO YQ, CUI XQ, *et al.* Colorimetric sensing of iodide ions based on unmodified gold nanoparticles and the distinctive antiaggregation-to-aggregation process [J]. *Luminescence*, 2020, 35(7): 1036–1042.
- [55] DARUICH DSC, RIBEIRO NB, ROSTELA MECM. Review of the methodologies used in the synthesis gold nanoparticles by chemical reduction [J]. *J Alloy Comp*, 2019, 798: 714–740.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



郎 爽, 副研究员, 主要研究方向为色谱及质谱在食品与环境领域检测技术开发。
E-mail: 13641083632@163.com



周慧娟, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全分析方法研究。
E-mail: zfy8822@126.com