

# 纳米金-罗丹明 B 协同作用在食品安全快速检测中的研究概述

常晓曦<sup>1</sup>, 王佳<sup>1</sup>, 宋杨<sup>2</sup>, 陶晓奇<sup>1,3\*</sup>

1(西南大学 食品科学学院, 重庆, 400715) 2(西南大学 药学院, 重庆, 400715)

3(重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆, 400715)

**摘 要** 纳米金粒子(gold nanoparticles, GNPs)是一种制备简单的贵金属纳米材料,具有良好的生物兼容性和光学性质。罗丹明 B(rhodamine B, RB)是一种无毒的荧光染料,具备优异的水溶性、较高的消光系数和高的量子产率,二者在实验中均有较广泛的应用。研究发现, RB 可以通过静电作用吸附到 GNPs 的表面,该结合物会产生荧光和可见光信号的变化,且该信号强度随着待测靶标浓度的改变而呈现一定趋势的变化。该文详细介绍了基于不同原理和检测信号的 GNPs-RB 协同作用,在检测食品中农兽药残留、重金属离子、非法添加物和外源性化学污染物等有毒有害物质的研究进展,以为食品安全监控提供有益参考。

**关键词** 纳米金; 罗丹明 B; 食品安全; 快速检测

食品安全问题是全球公共性卫生安全问题,与民生直接相关。近年来,我国在食品安全方面不断进步,食品工业产值也逐渐增长,但仍有较多的食品安全恶性事件发生。这不仅造成了严重的经济损失,并且危害了人们的身心健康,食品安全问题也持续成为社会焦点问题<sup>[1-2]</sup>。因此,研究快速、准确地检测食品中有毒有害物质的方法,以预防和控制危害事件的发生,具有重要的现实意义和社会价值<sup>[3]</sup>。目前食品安全检测中常用的分析方法有化学分析法(chemical method of analysis, CA),薄层层析法(thin layer chromatography, TLC)<sup>[4]</sup>,气相色谱法(gas chromatography, GC)<sup>[5]</sup>,质谱法(mass spectrometry, MS)<sup>[6]</sup>,高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)<sup>[7]</sup>等。前 2 种方法灵敏度较低,后者仪器方法前处理复杂,耗时长,成本高,并且需要专业知识和操作技能。常见的快速检测方法有酶抑制法<sup>[8]</sup>,聚合酶链式反应法(polymerase chain reaction, PCR)<sup>[9]</sup>和酶联免疫吸附测定(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)<sup>[10]</sup>等,这些方法均存在各自的局限性,酶抑制法和 ELISA 易受生物酶活性不稳定因素的影响,

PCR 对实验条件和操作要求较高,不能实现现场检测。

随着纳米技术的逐步成熟,纳米材料得到了越来越多的关注。金纳米粒子(gold nanoparticles, GNPs)是一种应用广泛的光学纳米材料,其制备方法简单成熟,对实验设备要求低,催化活性高且生物相容性好,在诸多领域如生物催化、生物传感器、表面电化学分析、DNA 分析与检测等方面都有着广阔的应用前景<sup>[11]</sup>,利用 GNPs 作为传感平台设计分子探针在荧光<sup>[12]</sup>、电分析<sup>[13]</sup>、表面等离子共振<sup>[14]</sup>等研究领域已经得到了初步应用。罗丹明 B(rhodamine B, RB)是一种无毒的荧光染料,具有较好的水溶性、较高的消光系数和量子产率<sup>[15]</sup>,可作为性能优良的荧光探针。

GNPs 的表面有大量的高活性位点,很容易与其他原子结合<sup>[16]</sup>,带正电荷的 RB 分子可以通过静电作用吸附到带负电荷的 GNPs 表面<sup>[17]</sup>。一方面, RB 的发射光谱与 GNPs 的吸收光谱明显重叠,因此 RB 与 GNPs 之间能发生有效的荧光共振能量转移(fluorescence resonance energy transfer, FRET)<sup>[18]</sup>使得 RB 的荧光信号发生改变;另一方面, RB 对 GNPs 的吸附和解离会影响 GNPs 的分散和聚集状态,从而导致 RB-GNPs 溶液颜色的变化<sup>[19]</sup>。此外,两者的相互作用还能引起化学发光强度和电化学信号的变化。因此, GNPs-RB 协同作用被广泛应用于食品安全检测中,本文主要介绍了其基于几种不同的原理和信号在重金属离子、农兽药、非法添加物和外源性化学污染物等有毒有害物质检测中的应用,均具有较好专一性

第一作者:硕士研究生(陶晓奇副教授为通讯作者, E-mail: 7717 9000@qq.com)。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31672605);重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0242);重庆市基础科学与前沿技术研究(cstc2017jcyjAX0313);重庆市博士后科研项目特别资助(Xm2017074);中国博士后科学基金面上资助(2016M 590855)

收稿日期:2018-07-16, 改回日期:2018-08-20

和高效性。

## 1 基于荧光分析法和分光光度法的检测

### 1.1 基于荧光分析法的检测

荧光分析法是基于GNPs与RB相互作用可导致RB荧光增强或淬灭的原理,建立荧光信号强度与靶标物质浓度的线性关系<sup>[20]</sup>,通过观测荧光强度的变化从而对靶标物质进行定量检测的方法,该方法具有较高的灵敏度、专一性,并且操作简便。

XU等<sup>[21]</sup>基于未结合和结合的适配体对GNPs亲和力的不同来调节RB和GNPs之间信号转导的FRET效率,从而达到检测多巴胺的目的。当不存在靶标时,适配体可以与GNPs结合保护GNPs不受盐离子诱导的聚集,同时RB的荧光保持淬灭。当多巴胺存在时,适配体与多巴胺特异性结合使适配体失去了稳定GNPs的能力,盐离子诱导GNPs聚集,同时降低了其淬灭RB荧光的能力,荧光恢复。该方法的检测线性范围可达到 $26 \sim 2.9 \times 10^3$  nmol/L,检测限(limit of detection, LOD)为2 nmol/L,该方法线性范围较宽,且与基于适配体的比色法相比,灵敏度提高了30倍。将该方法用于鸡肝样品中的多巴胺的检测时,其回收率为91.4%~103.5%,变异系数(coefficient of variation, CV)为0.9%~2.3%,表明该方法对于实际样品中多巴胺的筛选具有高重现性和准确性。ZHAN等<sup>[22]</sup>利用无规则卷曲的适配体与 $\text{Ag}^+$ 结合时导致GNPs聚集状态发生变化,同时影响RB的荧光强度,从而达到检测银离子的目的。RB的荧光强度与 $\text{Ag}^+$ 的浓度在 $2.73 \sim 1\,500$   $\mu\text{g/L}$ 线性相关,LOD为 $2.73$   $\mu\text{g/L}$ 。使用该方法检测水样中的 $\text{Ag}^+$ 时平均回收率为99.9%~102.7%,CV为3.49%~5.21%。吕晶等<sup>[23]</sup>用同样的传感装置检测水样中的氨苄青霉素,该方法的检测范围为 $0.494 \sim 2\,000$  nmol/L,LOD为 $0.494$  nmol/L,回收率为89.84%~114.51%,CV为1.19%~3.79%。这些方法均具有线性范围宽,灵敏度高,重现性好等优点,且不需进行复杂的偶联反应,实验操作性强,耗时短。

TIRA等<sup>[24]</sup>以包被了RB的GNPs为探针建立了荧光传感器以检测饮用水中的 $\text{Zn}^{2+}$ ,RB通过静电作用吸附在GNPs的表面, $\text{Zn}^{2+}$ 存在时, $\text{Zn}^{2+}$ 与GNPs更强的作用力使RB从GNPs上释放得到荧光的恢复,该方法的LOD为 $0.05$  mg/L,线性范围为 $0.01 \sim 0.1$  mg/L。ZHENG等<sup>[25]</sup>使用巯基乙酸(TGA)修饰分散的GNPs,使GNPs的水溶性和稳定性进一步提高,通过

FRET淬灭RB的荧光,而 $\text{Hg}^{2+}$ 的浓度与RB荧光强度的恢复成正比,以此原理检测水中的 $\text{Hg}^{2+}$ 。该方法的LOD为 $4.0 \times 10^{-10}$  mol/L,线性范围为 $1.0 \times 10^{-9} \sim 3.1 \times 10^{-8}$  mol/L,回收率为98%~104%, $\text{Hg}^{2+}$ 浓度为 $5.0 \times 10^{-9}$  mol/L时CV为1.2%。该方法可通过调整RB-GNPs传感器的浓度改变线性范围,适应不同的检测需要。

### 1.2 基于分光光度法的检测

GNPs表面可吸附染料后在可见光谱区同时具有GNPs和染料的特定吸收,因此GNPs-染料复合物可用作光谱检测的传感器。GNPs吸附染料后,表面电荷被中和导致部分发生凝聚。当金属离子存在时,若金属离子如 $\text{Hg}^{2+}$ 和染料的相互作用强于GNPs和染料的相互作用,则 $\text{Hg}^{2+}$ 能夺取GNPs表面的染料分子,使凝聚的GNPs重新分散;反之,如 $\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Cd}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ ,它们与染料的相互作用弱于GNPs和染料之间的相互作用,则加剧GNPs的凝聚。裴智明等<sup>[26]</sup>研究了在不同pH下将GNPs与RB等不同染料结合,构建具有一系列特征光谱的GNPs-染料传感器阵列,该方法通过紫外-可见分光光度计测定实现了对水中 $\text{Hg}^{2+}$ 的识别,LOD为 $0.2$   $\mu\text{mol/L}$ (1%)。

### 1.3 基于荧光和分光光度双读数法的检测

待测物影响RB对GNPs的吸附和解离,不仅可以导致RB荧光的变化,还会影响RB-GNPs溶液颜色的变化,可以通过比色和荧光双读数达到对靶标更灵敏和专一性的检测。LIU等<sup>[27]</sup>使用比色和荧光双读数法检测了有机磷和氨基甲酸酯类农药。RB吸附在GNPs上,RB与GNPs之间的作用力使RB的荧光淬灭,乙酰胆碱酯酶水解硫代乙酰胆碱生成乙酰胆碱,相比RB能更强地结合到GNPs表面,使RB从GNPs上解离,导致荧光恢复,同时GNPs发生聚集,溶液变为蓝色。不同浓度有机磷农药的存在会不同程度地抑制乙酰胆碱酯酶的水解作用,使RB的荧光和RB-GNPs溶液颜色呈现线性变化,使用荧光分光光度计和紫外-可见分光光度计可进行定量检测。作者用这种双读数机制检测了西维因,二嗪农,马拉硫磷和甲拌磷,LOD分别为 $0.1$ 、 $0.1$ 、 $0.3$ 、 $1$   $\mu\text{g/L}$ ,将此方法用于苹果汁、黄瓜和西红柿等真实样本的检测,得到了很好的响应。DONG等<sup>[28]</sup>基于荧光和比色双读数机制检测了卡塔普残留物(cartap),RB的荧光通过FRET被GNPs淬灭,而cartap与GNPs有良好的亲和力,cartap存在时会诱导GNPs聚集,溶液颜色从红色变为蓝色,同时RB的荧光得到恢复。用该

方法检测 cartap 的线性范围为  $1 \sim 180 \text{ nmol/L}$ , LOD 为  $0.88 \text{ nmol/L}$ 。将此方法用于自来水、河水和卷心菜等样品中时,平均回收率为  $96.75\% \sim 100.37\%$ , CV 为  $2.46\%$ 。CAO 等<sup>[29]</sup>同样用荧光和比色双读数的机制建立了检测三聚氰胺的方法,比色法的线性范围为  $1.3 \times 10^2 \sim 1.3 \times 10^3 \text{ } \mu\text{g/L}$ , LOD 为  $20 \text{ } \mu\text{g/L}$ 。相比之下荧光法的线性范围较好,为  $5 \sim 1\,000 \text{ } \mu\text{g/L}$ , LOD 低至  $0.18 \text{ } \mu\text{g/L}$ , CV 为  $2.1\%$ 。使用该方法检测牛奶和奶粉等样本,当三聚氰胺的浓度为  $5, 20, 1\,000 \text{ } \mu\text{g/L}$  时,回收率为  $95.9\% \sim 102.2\%$ , CV 为  $0.8\% \sim 3.0\%$ , 三聚氰胺的浓度为  $50 \text{ } \mu\text{g/L}$  时, CV 为  $3.4\%$ 。

荧光法具有灵敏度高,检测限低<sup>[30]</sup>,操作简便,成本低廉,专一性强,线性范围广等优点;分光光度法操作简便,快速,但是灵敏度较低,并且检测的线性范围较窄。而荧光和分光光度法双读数可以结合两者的优点,结果更可靠,灵敏度高,肉眼可观察到变化,操作简便,线性范围较广,有着良好的推广应用潜能。

## 2 基于化学发光分析法的检测

化学发光(chemiluminescence, CL)是依据待测物浓度与体系的化学发光强度在一定条件下呈线性关系的原理,从而确定待测物含量的一种痕量分析方法。AMJADI 等<sup>[31]</sup>建立了基于 GNP<sub>s</sub>-RB 的化学发光分析法用于检测水中的氰化物, RB 在碱性条件下被高锰酸钾氧化产生微弱的 CL,游离的 GNP<sub>s</sub> 可以增强这种化学发光,待测氰化物存在时,与 GNP<sub>s</sub> 相互作用导致 CL 的强度逐渐降低,该方法的线性范围为  $0.01 \sim 0.5 \text{ } \mu\text{mol/L}$ , LOD 为  $2.8 \text{ nmol/L}$ 。RB-Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-</sup> 氧化反应在碱性条件下能产生高强度的 CL,而 RB 和 GNP<sub>s</sub> 之间的能量转移和碰撞会发生强烈的消光。VAHID 等<sup>[32]</sup>基于此原理实现了水样中 Hg<sup>2+</sup> 的定量检测, Hg<sup>2+</sup> 与 GNP<sub>s</sub> 的相互作用使得 RB 从 GNP<sub>s</sub> 表面释放, CL 的强度逐渐恢复,其动态线性范围为  $0.013 \sim 4.67 \text{ } \mu\text{g/L}$ , LOD 为  $5.42 \text{ } \mu\text{g/L}$ , 回收率达到了  $97\% \sim 102\%$ 。

化学发光分析法有较好的灵敏度和选择性,检测线性范围较广,但是变异较大导致重复性较差。以上两种方法分别通过淬灭型(turn off)和增强型(turn on)<sup>[33]</sup>反应模式来表征化学发光信号的变化。“turn off”模式下,探针本身具有较强的化学发光信号,与待测物作用后导致化学发光减弱甚至消失;“turn on”模式下,探针本身没有或仅有很弱的化学发光信

号,与被测物作用后导致化学发光信号的增强。相比之下,“turn on”模式优于“turn off”模式<sup>[34]</sup>,“turn off”策略易被样品中的其他成分干扰,造成假阳性,有一定的局限性,“turn on”策略的线性范围更广,而且探针本身弱的化学发光可以降低背景信号,增强探针的灵敏度。

## 3 基于电化学分析法的检测

GNPs 与 RB 之间电化学信号的变化也作为传感信号来检测食品中的有害物质残留<sup>[35-36]</sup>。PENG 等<sup>[37]</sup>通过罗丹明 B 酰肼(RBH)的氨基与 GNP<sub>s</sub> 之间的强作用力将其包被在 GNP<sub>s</sub> 表面,在 Cu<sup>2+</sup> 存在时, RBH 中的苊基团在 RBH 释放过程中与 Cu<sup>2+</sup> 发生配位作用,产生电化学信号的变化。该方法实现了对水中 Cu<sup>2+</sup> 的定量检测,检测限达到  $12.5 \text{ fmol/L}$ ,并在  $0.1 \text{ pmol/L} \sim 1 \text{ nmol/L}$  具有良好的线性关系,添加回收率为  $89\% \sim 110\%$ 。电化学分析法灵敏度高,稳定性好,再生性强,有很好的选择性和较宽的线性范围,电化学生物传感器的自动化、微型化和集成化使其具有很大的发展潜力<sup>[38]</sup>。

## 4 展望

食品安全隐患不容小觑,对食品质量的监控更是社会关注的焦点,因此开发快速检测食品中有毒有害物质的研究是非常必要的。食品快速检测技术的发展趋势将是高度灵敏、快速和集约化<sup>[39]</sup>。

纳米尺寸上的生物分析化学一直是国际分析科学领域研究的前沿,利用纳米材料来进行相关的食品检测,相比于传统的方法有操作简便,检验周期短,成本低和适用性广等优点。GNPs-RB 协同作用是一种高效,快速且准确的检测方法,可通过多种信号实现检测的目的,目前在荧光法和比色法上的应用较为广泛。GNPs 作为一种性能优良的信号探针,还有很多方面值得探索发现,例如如何制备尺寸小、粒径均一、高度分散、稳定性好和易于分离回收的 GNP<sub>s</sub><sup>[40-42]</sup>以得到更简单、稳定、灵敏性好的探针,微观尺度上探针信号的放大以及如何利用 GNP<sub>s</sub> 对样品进行准确定量的分析<sup>[43]</sup>。

除了金纳米材料外,其他纳米材料例如银纳米材料<sup>[44]</sup>、二氧化钛纳米材料和二氧化硅纳米材料<sup>[45]</sup>等的应用潜力也被不断挖掘出来,并且已经在一些领域发挥着独特的作用。相信随着纳米技术研究的逐步深入,食品快速检测能得到更好的发展,满足多元检

测、大量筛查的需求,进而食品安全得到有效的监管。

## 参 考 文 献

- [1] LV Man, LIU Yang, GENG Jinhui, et al. Engineering nanomaterials-based biosensors for food safety detection [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2018, 106: 122 - 128.
- [2] MANGAL M, BANSAL S, SHARMA S K, et al. Molecular detection of foodborne pathogens: A rapid and accurate answer to food safety[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(9): 1 568 - 1 584.
- [3] 徐李舟. 基于量子点的荧光生物与化学传感器及其食品安全快速检测应用[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [4] SCHWACK W, PELLISSIER E, MORLOCK G. Analysis of unauthorized Sudan dyes in food by high-performance thin-layer chromatography [J]. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 2018, 410(22): 5 641 - 5 651.
- [5] FARAJZADEH M A, AFSHAR MOGADDAM M R, REZAEE A S, et al. Application of elevated temperature-dispersive liquid-liquid microextraction for determination of organophosphorus pesticides residues in aqueous samples followed by gas chromatography-flame ionization detection. [J]. *Food Chemistry*, 2016, 212: 198 - 204.
- [6] WU Ci, CHEN Xi, LIU Jianhui, et al. High-sensitive detection of multiple allergenic proteins in infant food with high-resolution mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2017, 35(10): 1 037 - 1 041.
- [7] CHEN Jieping, ZHU Xiashi. Magnetic solid phase extraction using ionic liquid-coated core-shell magnetic nanoparticles followed by high-performance liquid chromatography for determination of Rhodamine B in food samples [J]. *Food Chemistry*, 2016, 200: 10 - 15.
- [8] YANG Xiao, DAI Juan, YANG Li, et al. Oxidation pretreatment by calcium hypochlorite to improve the sensitivity of enzyme inhibition - based detection of organophosphorus pesticides [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2018, 98(7): 2 624 - 2 631.
- [9] HAYATI M, SUDJADI, ROHMAN A. Analysis of *Salmonella enteritidis* in chicken meat and egg by real time-polymerase chain reaction [J]. *International Food Research Journal*, 2017, 24(6): 2 689 - 2 693.
- [10] TIAN Wenhao, ZHANG Xiaoxiao, SONG Meirong, et al. An enzyme-linked immunosorbent assay to detect salinomycin residues based on immunomagnetic bead clean-up [J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10(9): 3 042 - 3 051.
- [11] SONG Yanchao, FENG Duan, SHAO Shuai, et al. Colorimetric detection of low dose gamma radiation based on the aggregation of gold nanoparticles and its application for the blood irradiation [J]. *Talanta*, 2018, 187: 308 - 313.
- [12] ASNAASHARI M, KENARI R E, FARAHMANDFAR R, et al. Fluorescence quenching biosensor for acrylamide detection in food products based on double-stranded DNA and gold nanoparticles [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2018, 265: 339 - 345.
- [13] FAN Taotao, DU Yan, YAO Yao, et al. Rolling circle amplification triggered poly adenine-gold nanoparticles production for label-free electrochemical detection of thrombin [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2018, 266: 9 - 18.
- [14] HASHEMI F, RASTEGARZADEH S, POURREZA N. A combination of dispersive liquid-liquid microextraction and surface plasmon resonance sensing of gold nanoparticles for the determination of ziram pesticide [J]. *Journal of Separation Science*, 2018, 41(5): 1 156 - 1 163.
- [15] JIAO Yang, ZHOU Lu, HE Haiyang, et al. A novel rhodamine B-based "off-on" fluorescent sensor for selective recognition of copper ( II ) ions [J]. *Talanta*, 2018, 184: 143 - 148.
- [16] WAN Liping, QIN Yun, XIANG Juan. Rapid electrochemical fabrication of porous gold nanoparticles for high-performance electrocatalysis towards oxygen reduction [J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 238: 220 - 226.
- [17] NI Xuan, XIA Bing, WANG Lumei, et al. Fluorescent aptasensor for 17 beta-estradiol determination based on gold nanoparticles quenching the fluorescence of Rhodamine B [J]. *Analytical Biochemistry*, 2017, 523: 17 - 23.
- [18] HUANG Chihching, CHANG Huan-tsung. Selective gold-nanoparticle-based "turn-on" fluorescent sensors for detection of mercury( II ) in aqueous solution [J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(24): 8 332 - 8 338.
- [19] CAI Huaihong, WANG Hui, WANG Jinhui, et al. Naked eye detection of glutathione in living cells using rhodamine B-functionalized gold nanoparticles coupled with FRET [J]. *Dyes and Pigments*, 2012, 92(1): 778 - 782.
- [20] WANG Chengke, TAN Rong, CHEN Dan. Fluorescence method for quickly detecting ochratoxin A in flour and beer using nitrogen doped carbon dots and silver nanoparticles [J]. *Talanta*, 2018, 182: 363 - 370.
- [21] XU Jingyue, LI Ying, WANG Luokai, et al. A facile aptamer-based sensing strategy for dopamine through the fluorescence resonance energy transfer between rhodamine B and gold nanoparticles [J]. *Dyes and Pigments*, 2015, 123: 55 - 63.

- [22] ZHAN Shenshan, XU Hanchu, ZHAN Xuejia, et al. Determination of silver(I) ion based on the aggregation of gold nanoparticles caused by silver-specific DNA, and its effect on the fluorescence of Rhodamine B[J]. *Microchimica Acta*, 2015, 182(7-8):1 411 - 1 419.
- [23] 吕晶,徐鲁荣,杜高尚,等. 基于核酸适配体的纳米金淬灭罗丹明 B 荧光法检测氨基青霉素[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2017, 35(1):34 - 41.
- [24] TIRA D S, FOCSAN M, ULINICI S, et al. Rhodamine B-coated gold nanoparticles as effective "Turn-on" fluorescent sensors for detection of zinc II ions in water[J]. *Spectroscopy Letters*, 2014, 47(2):153 - 159.
- [25] ZHENG Aifang, CHEN Jinlong, WU Ganning, et al. Optimization of a sensitive method for the "switch-on" determination of mercury(II) in waters using Rhodamine B capped gold nanoparticles as a fluorescence sensor[J]. *Microchimica Acta*, 2009, 164(1-2):17 - 27.
- [26] 裴智明,莫志宏,吕佳,等. 纳米金-染料传感器阵列对汞(II)的模式识别[J]. *分析化学*, 2013, 41(6):841 - 845.
- [27] LIU Dingbin, CHEN Wenwen, WEI Jinhua, et al. A highly sensitive, dual-readout assay based on gold nanoparticles for organophosphorus and carbamate pesticides[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(9):4 185 - 4 191.
- [28] DONG Liang, HOU Changjun, FA Huanbao, et al. Highly sensitive fluorescent sensor for Cartap based on fluorescence resonance energy transfer between gold nanoparticles and rhodamine B[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2018, 18(4):2 441 - 2 449.
- [29] CAO Xianyi, SHEN Fei, ZHANG Minwei, et al. Highly sensitive detection of melamine based on fluorescence resonance energy transfer between rhodamine B and gold nanoparticles[J]. *Dyes and Pigments*, 2014, 111:99 - 107.
- [30] FILBRUN S L, DRISKELL J D. A fluorescence-based method to directly quantify antibodies immobilized on gold nanoparticles[J]. *Analyst*, 2016, 141(12):3 851 - 3 857.
- [31] AMJADI M, HASSANZADEH J, MANZOORI J L. Determination of cyanide using a chemiluminescence system composed of permanganate, rhodamine B, and gold nanoparticles[J]. *Microchimica Acta*, 2014, 181(15 - 16):1 851 - 1 856.
- [32] VAHID B, HASSANZADEH J, ABOLHASANI J, et al. Inhibition of rhodamine B-ferricyanide chemiluminescence by Au nanoparticles toward the sensitive determination of mercury(II) ions[J]. *Microchemical Journal*, 2016, 126:326 - 331.
- [33] 吴永祥. 用于细胞分析的新型荧光探针的设计、合成及传感性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2015.
- [34] 朱颖,刘沛,羊小海,等. 基于  $T-Hg^{2+}-T$  及 G 四聚体自身熄灭能力的"Turn on"型单标记 DNA 荧光探针用于碘离子的检测[J]. *高等学校化学学报*, 2012, 33(12):2 651 - 2 656.
- [35] 王青,刘卫,羊小海,等. 纳米金颗粒增强信号的电化学生物传感器用于谷胱甘肽和半胱氨酸的检测[J]. *高等学校化学学报*, 2013, 34(8):1 845 - 1 850.
- [36] 薛瑞,康天放,鲁理平. 层层自组装纳米金与乙酰胆碱酯酶电化学生物传感器检测有机磷农药[J]. *分析测试学报*, 2012, 31(8):940 - 944.
- [37] PENG D, HU B, KANG M, et al. Electrochemical sensors based on gold nanoparticles modified with rhodamine B hydrazide to sensitively detect Cu(II)[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 390:422 - 429.
- [38] XIN Jiaying, DOU Boxin, WANG Zhenxing, et al. Direct electrochemistry of methanobactin functionalized gold nanoparticles on Au electrode[J]. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology*, 2018, 18(7):4 805 - 4 813.
- [39] 耿美,李忠海,黎继烈,等. 基于纳米金的电化学 DNA 生物传感器的研究进展[J]. *食品工业*, 2013(7):117 - 120.
- [40] YU Wenbo, ZHANG Tingting, MA Mingfang, et al. Highly sensitive visual detection of amantadine residues in poultry at the ppb level: A colorimetric immunoassay based on a Fenton reaction and gold nanoparticles aggregation[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1 027:130 - 136.
- [41] LI Chao, YANG Yucai, ZHANG Bin, et al. Conjugation of graphene oxide with DNA-modified gold nanoparticles to develop a novel colorimetric sensing platform[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2014, 31(2):201 - 208.
- [42] SIMON T, SHELLAIAH M, STEFFI P, et al. Development of extremely stable dual functionalized gold nanoparticles for effective colorimetric detection of clenbuterol and ractopamine in human urine samples[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1 023:96 - 104.
- [43] LUO Hairui, WANG Xiaohui, HUANG Yiqun, et al. Rapid and sensitive surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) method combined with gold nanoparticles for determination of paraquat in apple juice[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2018, 98(10):3 892 - 3 898.
- [44] SONG Dandan, WANG Yuanzhe, LU Xiong, et al. Ag nanoparticles-decorated nitrogen-fluorine co-doped mono-

layer  $\text{MoS}_2$ , nanosheet for highly sensitive electrochemical sensing of organophosphorus pesticides [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2018, 267:5–13.

[45] RAJABI M, RAHIMI M, HEMMATI M, et al. *Chemi-*

cally functionalized silica nanoparticles - based solid - phase extraction for effective pre - concentration of highly toxic metal ions from food and water samples[J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 2018, 32(2):e4012.

## Research progress on the application of gold nanoparticles together with rhodamine B in rapid detection for food safety

CHANG Xiaoxi<sup>1</sup>, WANG Jia<sup>1</sup>, SONG Yang<sup>2</sup>, TAO Xiaoqi<sup>1,3\*</sup>

1 (College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

2 (College of Pharmaceutical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

3 (Chongqing Engineering Research Center of Regional Food, Chongqing 400715, China)

**ABSTRACT** Gold nanoparticles (GNPs) are simple noble metal nanomaterials with good biocompatibility and optical properties. Rhodamine B (RB) is a non-toxic fluorescent dye with excellent water-soluble property, high extinction coefficient and high quantum yield. Both GNPs and RB have been widely used in researches. It was found that RB could absorb to the surface of GNPs through electrostatic interactions, resulting in variations in fluorescence and visible signals along with the concentrations of analytes. Development of detecting toxic and harmful substances in foods, such as pesticides, veterinary drugs, heavy metal ions, illegal additives, and exogenous chemical pollutants, based on different mechanisms and detecting signals for the synergistic effect of GNPs-RB was described in detail in this paper, providing useful references for food safety monitoring.

**Key words** gold nanoparticles; rhodamine B; food safety; rapid detection