

“粮油真菌毒素控制与营养品质调控” 特约专栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.05.003

# 基于核酸适体-纳米金银染放大的玉米赤霉烯酮快速检测方法研究

孙淑敏, 马卫宾, 卫敏, 李倩, 谢岩黎✉

(河南工业大学粮油食品学院, 河南省粮油食品安全检测与控制重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 玉米赤霉烯酮 (Zearalenone, ZEA) 具有较强的生殖毒性、致突变和致畸作用。以 ZEA 适体为识别元件, 构建了基于纳米金诱导聚集和银染放大的 ZEA 适体比色可视化检测方法。结果表明, 在优化条件下, ZEA 浓度在 5~200 ng/mL 范围内与体系的吸光度值呈良好的线性关系, 其线性回归方程为  $y=0.2486+0.00046156x$  ( $R^2=0.9902$ ), 最低检测限为 5 ng/mL, 且方法特异性良好。进一步通过银染作用将该方法的灵敏度提高了 50 倍。经对比, 该方法对实际样品的检测结果与酶联免疫法基本一致, 为食品中 ZEA 的快速检测提供了简便有效的策略。

**关键词:** 玉米赤霉烯酮; 核酸适体; 比色法; 纳米金; 银染放大

中图分类号: TS207.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)05-0011-07

网络首发时间: 2020-08-20 10:28:44

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20200819.1813.003.html>

## A Colorimetric Aptasensor for the Fast Detection of Zearalenone Based on AuNPs Combined with Argentation Amplification

SUN Shu-min, MA Wei-bin, WEI Min, LI Qian, XIE Yan-li✉

(College of Food Science and Technology, Henan Key Laboratory of Cereal and Oil Food Safety Inspection and Control, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** Zearalenone (ZEA) has strong reproductive toxicity, mutagenicity and teratogenicity. A rapid visual aptasensor for sensitive and specific detection of zearalenone (ZEA) was developed in this study based on gold nanoparticle (AuNP) aggregation induced by the competitive absorption of aptamer between gold nanoparticle and zearalenone. The results showed that a good linear correlation between the concentration of ZEA and the absorbance of AuNPs was found within the range of 5-200 ng·mL<sup>-1</sup>, the linear regression equation is  $y=0.2486+0.00046156x$  ( $R^2=0.9902$ ). And the detection limit was 5 ng / ml with a good specificity. Furthermore, the sensitivity of the assay was further enhanced 50 times by combining with argentation amplification strategy. The reliability of the developed assay for detecting the actual corn and corn oil samples were verified by comparing with those detected by commercial ELISA kit. These results demonstrated that the developed assay has great potential in the rapid and specific detection of ZEA in foodstuffs.

**Key words:** zearalenone; aptamer; colorimetric assay; AuNP aggregation; argentation amplification

收稿日期: 2020-07-05

基金项目: 河南省高校科技创新团队计划资助 (20IRTSTHN023); 河南省科技攻关项目 (202102310469)

作者简介: 孙淑敏, 女, 1984 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为食品安全检测与控制。Email: xianyun730@163.com.

通讯作者: 谢岩黎, 女, 1971 年出生, 博士研究生导师, 教授, 研究方向为加工过程中营养与安全控制。Email: ylxie@haut.edu.cn.

玉米赤霉烯酮 (Zearalenone, ZEA) 是一种由镰刀菌产生的雌激素类毒素<sup>[1]</sup>, 主要污染小麦、玉米等农作物原料及其制品, 具有较强的生殖毒性、致突变和致畸作用, 还能引起雌性激素中毒症及诱发肿瘤<sup>[2]</sup>。因此亟需寻求简便高效的食品中 ZEA 检测方法, 保障食品安全和消费者健康。

常规的玉米赤霉烯酮快速检测方法主要包括酶联免疫法和试纸条法<sup>[3-4]</sup>。但是这些依赖于抗体的免疫学方法存在抗体制备周期长, 成本高, 不易保存等缺陷<sup>[5]</sup>。核酸适体作为一种新型的识别分子, 具有特异性强, 可人工大量合成, 成本低, 稳定性好等优势<sup>[6]</sup>。尤其是对缺乏抗原的小分子污染物, 其比抗体更具有优势。目前, 在真菌毒素领域, 主要针对赭曲霉毒素和黄曲霉毒素, 构建了一系列基于适配体的电化学方法、荧光法及比色法<sup>[7-9]</sup>。其中比色法具有操作简便、显色快速、结果可视化, 具有良好的应用前景。纳米金因具有高消光系数、距离依赖效应和易合成等特点, 是比色法中最常用的显色探针<sup>[10]</sup>。近几年, 围绕纳米金 (AuNPs) 开发了各种各样的比色检测方法, 用于食品中农药残留<sup>[11]</sup>、抗生素<sup>[12]</sup>、真菌毒素<sup>[13]</sup>及病原微生物<sup>[14]</sup>的快速检测。目前, 纳米金比色法的原理主要有双链 DNA 保护法、单链 DNA 保护法、正电荷聚合物法、交联法以及解交联法<sup>[15]</sup>。其中单链 DNA 保护法直接利用单双链 DNA 与未修饰的纳米金之间的静电吸附能力差异实现显色反应<sup>[16-18]</sup>, 无需进行修饰和辅助仪器, 简单易行。但是, 比色法的灵敏度通常低于荧光法和电化学等传感方法, 因此需要通过信号放大体系进一步提高比色方法的灵敏度。

本研究以未修饰的纳米金 (AuNPs) 为传感指示剂, 玉米赤霉烯酮适配体为信号识别元件, 银染技术为信号放大策略, 开发了一种新型快速、高灵敏度的玉米赤霉烯酮比色传感器。该方法可应用于谷物和食用油中 ZEA 的快速检测, 为食品中 ZEA 的污染控制提供了新的检测途径。

## 1 材料与方 法

### 1.1 主要材料

玉米赤霉烯酮适体 (5'-GAT GGG GAA AGG GTC CCC CTG GGT TGG AGC ATC GGA CA-3') : 生工生物工程 (上海) 股份有限公司合

成; 玉米赤霉烯酮标准品 (ZEA)、黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 标准品 (AFB<sub>1</sub>)、赭曲霉 A 标准品 (OTA) : Sigma 公司; ZEA 酶联免疫试剂盒: 上海快灵生物科技有限公司; 福临门玉米油、玉米糝、玉米粒: 超市购买; 实验所使用水均为超纯水。实验中有有机溶剂均为色谱纯, 其他实验材料为分析纯。

RT-6000 型酶标分析仪: 深圳雷杜生命科学股份有限公司; Epoch 型微孔板扫描分光光度计: 美国伯腾仪器有限公司; HT7700 型透射电镜: 日本日立高新有限公司; PHS-3C 型酸度计: 上海仪电科学仪器股份有限公司; XMTD-8222 型电热恒温水浴锅: 上海精宏实验设备有限公司; UV-6100S 型紫外分光光度计: 上海美谱达仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 纳米金和银染液的制备

柠檬酸三钠还原法制备 13 nm 粒径纳米金<sup>[19]</sup>: 将 HAuCl<sub>4</sub> 配制成 1 mmol/L 水溶液, 取 100 mL 加热至沸, 搅动下准确加入 10 mL 38.8 mmol/L 柠檬酸三钠溶液, 加热煮沸 15 min。此时可观察到溶液由淡黄色很快变为灰色, 转而变为黑色, 逐渐稳定成红色。冷却至室温后, 用超纯水恢复至原体积。将所制备的 AuNPs 经透射电镜和紫外-可见光谱分析进行表征。

参考李向丽等<sup>[20]</sup>的方法分别配置银染增强实验中的引发液和增强液。引发液的配制如下: 准确称量对苯二酚 1.7 g, 加入超纯水 30 mL 溶解, 与 60 mL 1%明胶、10 mL 柠檬酸缓冲液 (pH 3.5) 充分混匀。增强液配制时准确称量硝酸银 0.5 g, 加入超纯水 2 mL 溶解。

#### 1.2.2 检测原理

ZEA 适配体可以通过静电作用吸附在 AuNPs 颗粒表面上, 使得纳米金在高盐浓度下仍保持分散稳定, 显色呈红色, 且由于适配体的保护作用, 纳米金无法催化 Ag<sup>+</sup>还原成单质银, 银染后不会出现黑色的银染信号; 而加入 ZEA 后, ZEA 适体与 ZEA 发生特异性结合而从纳米金表面解吸, 在高盐环境中 AuNPs 发生诱导聚集, 颜色由红色变为紫色或蓝色, 而裸露的纳米金表面可以催化 Ag<sup>+</sup>还原成单质银而在纳米金周围形成银染放大信号, 因此反应体系颜色和吸光度值大小与 ZEA 的浓度有关。见图 1。

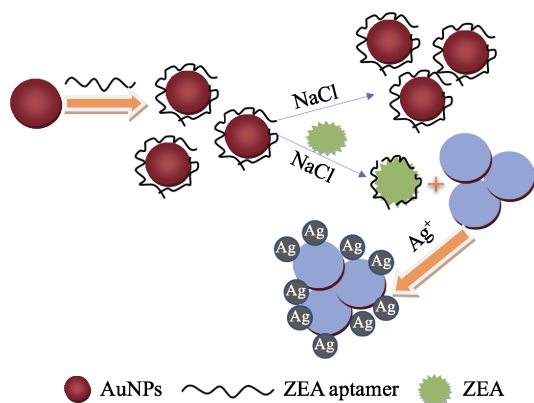


图 1 纳米金比色法检测 ZEA 的原理图

### 1.2.3 纳米金比色法的可行性研究

为考察纳米金比色法的可行性, 分别设置 3 组实验, 第一组实验仅在酶标板孔中加入 100  $\mu\text{L}$  纳米金和 10  $\mu\text{L}$  NaCl 溶液, 加入 PBS 缓冲液使总体积为 210  $\mu\text{L}$ ; 第二组实验在酶标板孔中依次加入 100  $\mu\text{L}$  纳米金液体和 50  $\mu\text{L}$  适体, 孵育 5 min 后加入 10  $\mu\text{L}$  NaCl 溶液, 加入 PBS 缓冲液使总体积为 210  $\mu\text{L}$ ; 第三组实验在酶标板孔中依次加入 100  $\mu\text{L}$  纳米金液体和 50  $\mu\text{L}$  适体, 孵育 5 min 后加入 50  $\mu\text{L}$  浓度 50 ng/mL 玉米赤霉烯酮标准品, 继续孵育 5 min, 最后加入 10  $\mu\text{L}$  NaCl 溶液。分别测定三组溶液在波长 520 nm 和 650 nm 处的吸光度值。

### 1.2.4 NaCl 浓度的优化

在酶标板孔中加入 50  $\mu\text{L}$  1  $\mu\text{mol/L}$  适体和 100  $\mu\text{L}$  AuNPs, 孵育 5 min 后, 加入 50  $\mu\text{L}$  浓度 50 ng/mL 玉米赤霉烯酮标准品, 继续孵育 5 min, 分别加入浓度为 0.1、0.5、1、2、3、4、5 mol/L 的 NaCl 溶液, 反应 5 min 后测定 520 nm 和 650 nm 波长处的吸光度值。

### 1.2.5 适体浓度的优化

在酶标板孔中分别加入 50  $\mu\text{L}$  浓度梯度为 0.05、0.1、0.3、0.5、1、3、5  $\mu\text{mol/L}$  适体和 100  $\mu\text{L}$  AuNPs, 孵育 5 min 后加入 50  $\mu\text{L}$  50 ng/mL 玉米赤霉烯酮标准品, 孵育 5 min 后加入 5 mol/L 的 NaCl 溶液, 反应 5 min 后测定 520 nm 和 650 nm 波长处的吸光度值。

### 1.2.6 纳米金与适体反应时间的优化

在酶标板孔中分别加入 50  $\mu\text{L}$  1  $\mu\text{mol/L}$  适体和 100  $\mu\text{L}$  AuNPs, 孵育 5 min 加入 50  $\mu\text{L}$  50 ng/mL 玉米赤霉烯酮标准品, 继续孵育 5 min 后加入浓

度为 5 mol/L 的 NaCl 溶液, 分别反应 5、10、20、30、40、50、60 min 后测定 520 nm 和 650 nm 波长处的吸光度值。

### 1.2.7 玉米赤霉烯酮的检测

在酶标板孔中加入 50  $\mu\text{L}$  1  $\mu\text{mol/L}$  ZEA 适体和 100  $\mu\text{L}$  AuNPs, 孵育 5 min 后分别加入 50  $\mu\text{L}$  浓度为 5、10、50、100、200 ng/mL ZEA 标准品, 继续孵育 5 min 后加入 10  $\mu\text{L}$  5 mol/L NaCl 溶液, 孵育 5 min 后测定 520 nm 和 650 nm 波长处的吸光度值。平行实验 3 次。以  $A_{650}/A_{520}$  值为纵坐标, ZEA 浓度为横坐标, 绘制标准曲线。

### 1.2.8 方法的特异性分析

在酶标板孔中加入 50  $\mu\text{L}$  1  $\mu\text{mol/L}$  适体和 100  $\mu\text{L}$  AuNPs, 孵育 5 min 后分别加入 50  $\mu\text{L}$  的 50 ng/mL OTA 标准品、50 ng/mL AFB<sub>1</sub> 标准品、50 ng/mL ZEA 标准品、10 mmol/L 金属离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ), 继续孵育 5 min 后加入 5 mol/L 的 NaCl 溶液, 孵育 5 min 后测定 520 nm 和 650 nm 处的吸光度值。

### 1.2.9 银染增强实验

将银染增强液和引发液在银染前 30 min 置于 4  $^{\circ}\text{C}$  储存, 银染时取 20  $\mu\text{L}$  增强液加入 1 mL 引发液中, 迅速混匀后立即每孔加入 100  $\mu\text{L}$  反应液, 记录 630 nm 波长处的吸光度值。银染增强过程在避光或弱光下进行。实验中考察银染时间对显色结果的影响。

### 1.2.10 样品检测验证

根据国标 GB/T 23504—2009 中粮食及粮食制品的处理方法, 对市售玉米处理, 得到滤液为实际样品液; 根据孟卫芹<sup>[21]</sup>对玉米油的处理方法, 得到滤液为实际样品液。在最优检测条件下, 分别对加标浓度为 10、50 和 100 ng/mL 的玉米油和玉米样品进行检测。记录吸光度值, 根据标准曲线的理论值计算回收率, 检验纳米金比色法对实际样品检测的可行性。

## 2 结果与分析

### 2.1 纳米金的表征

从图 2a 可知, 制备出的纳米金粒子的粒径大小较为一致, 粒径大小约为 13 nm, 成均匀分散的球形, 其在波长 520 nm 处产生了最高吸收峰,

溶液呈红色。而在加入高浓度盐溶液后(图 2b), AuNPs 变成了团聚状态, 溶液颜色为紫蓝色。其最大吸收波长红移至 650 nm 左右。

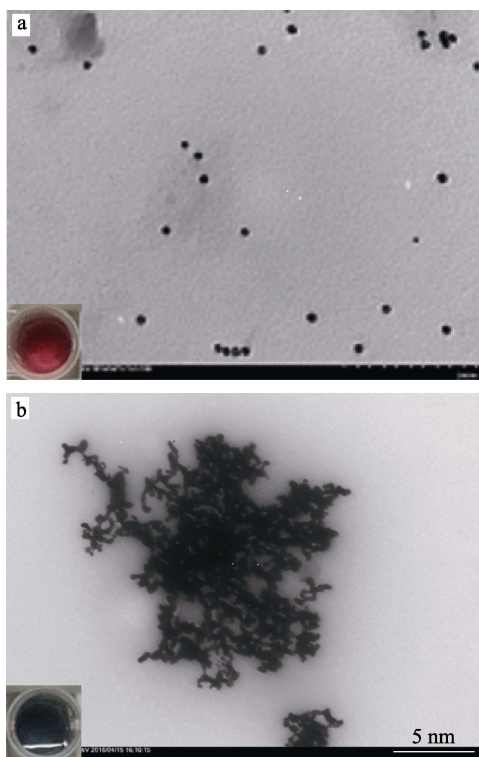


图 2 不同状态下纳米金粒子的 TEM 图。  
(a) 纳米金; (b) 高盐环境下的纳米金

## 2.2 纳米金比色法的可行性分析

由图 3 可发现, 在高盐环境中, 纳米金在 ZEA 适体的保护下免于聚集, 体系的吸光度和颜色均未发生明显变化, 而在加入 ZEA 后, ZEA 适体与 ZEA 的特异性结合使纳米金暴露在高盐溶液下, 发生聚集反应, 体系吸收波长发生红移, 颜色变为紫色, 初步验证了纳米金比色法对 ZEA 检测的可行性。

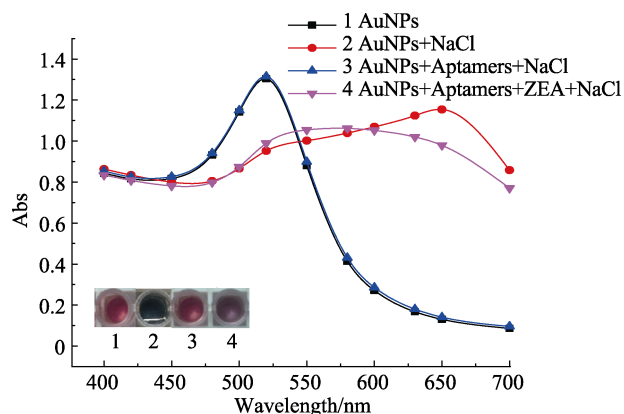


图 3 不同反应体系的紫外吸收光谱图及可视化结果

## 2.3 比色反应条件优化

在纳米金盐聚诱导比色反应中, 主要优化了 NaCl 的浓度、ZEA 适体的浓度以及比色反应时间。NaCl 浓度的大小与该反应中纳米金聚集变色有着直接的作用。如图 4a 所示, 当 NaCl 的浓度在 0~1 mol/L 时, 反应体系的出峰位置和峰强度没有改变。当 NaCl 的浓度 2 mol/L, 特征峰右移, 且反应体系变为紫色, 随着浓度的增加, 反应体系的出峰位置在 600~650 nm, 体系颜色由紫色变为蓝色。可见, 当 NaCl 浓度较小时, 不足以使未被保护的纳米金聚集, 当 NaCl 浓度为 2 mol/L 时, 体系颜色由红色变为紫色, 说明部分纳米金开始发生团聚, 随着其浓度的增加, 团聚现象越为显著, NaCl 浓度为 5 mol/L 时, 说明聚集反应已完全, 较高的浓度范围已经超出了适体对纳米金的保护能力, 所以 NaCl 的最优浓度为 2 mol/L。

适体的浓度是此实验的关键因素, 适体浓度要保证高于靶物浓度以达到完全与靶物反应的目的, 剩余的适体可保护纳米金在高盐溶液下部分聚集。因此适体浓度不能较低, 否则不能完全特异性结合靶物, 纳米金则在体系中完全聚集; 也不能完全过量, 否则在与靶物结合的基础上, 剩余的适体足够保护纳米金, 使反应体系无颜色变化。如图 4b 所示, 当反应体系中未加靶物时, 适体浓度较小则不足以保护纳米金, 使大部分纳米金在高盐溶液下聚集, 当适体浓度为 3、5  $\mu\text{mol/L}$  时, 其出峰位置在 520 nm 处, 峰强度相近, 且体系颜色为红色; 适体浓度为 1  $\mu\text{mol/L}$  时, 特征峰位置仍在 520 nm 处, 峰强度相对降低; 当适体浓度小于 1  $\mu\text{mol/L}$  时, 特征峰右移, 适体浓度为 0.1  $\mu\text{mol/L}$  时, 520 nm 处峰消失且在 650 nm 处出现新的特征峰。所以, 适体浓度不应小于 1  $\mu\text{mol/L}$ 。当反应体系加入靶物后, 反应体系按照实验原理应发生颜色的变化, 即适体浓度不宜完全过量。根据图 4c 结果可知, 当适体浓度为 3、5  $\mu\text{mol/L}$  时, 其出峰位置在 520 nm 处, 峰强度相近, 且体系颜色为红色, 说明适体已完全过量; 适体浓度为 1  $\mu\text{mol/L}$  时, 其特征峰右移, 体系颜色为紫色。所以适体最优浓度为 1  $\mu\text{mol/L}$ 。

如图 4d 所示, 当反应时间为 5 min 时,

$A_{650}/A_{520}$  的比值最大, 当时间小于 5 min 时, 体系反应还未完成, 随着反应时间的增加, 反应体

系处于降解状态, 反应体系颜色逐渐变浅。所以, 最佳反应时间为 5 min。

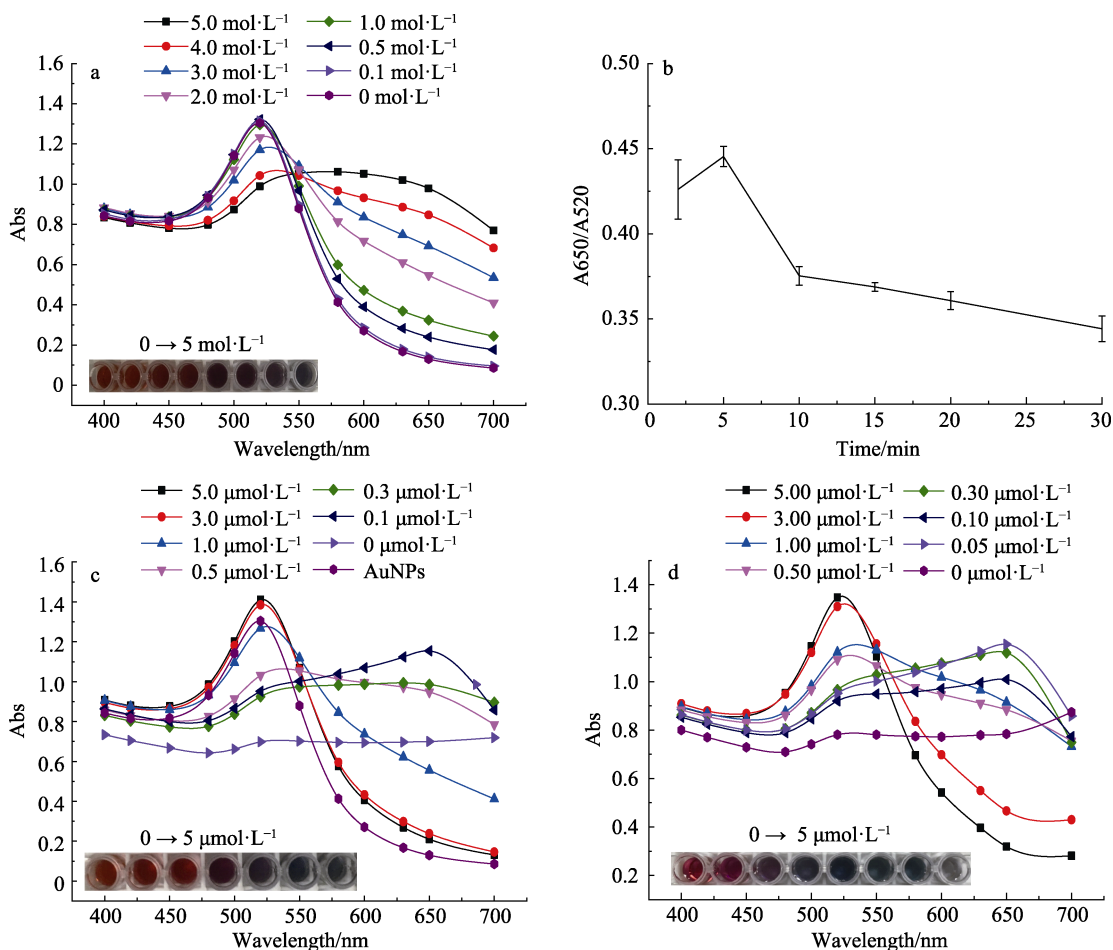


图 4 纳米金比色反应条件优化。(a) NaCl 浓度; (b) 反应时间; (c) 和 (d) ZEA 适体浓度。

### 2.4 纳米金比色法测定 ZEA

在前述优化条件下, 用纳米金比色法测定不同浓度的 ZEA, 得到了 ZEA 标准液浓度与  $A_{650}/A_{520}$  比值的线性关系。如图 5a 所示, 在线性范围 5~200 ng/mL 内, 得到线性回归方程  $y =$

$0.2493 + 0.0004C_{ZEA}$  ( $R^2 = 0.9821$ ), 其最低检测限为 5 ng/mL。由图 5b 可知, 在最优实验条件下分别检测 ZEA 和其他干扰物, 仅有加入 ZEA 的体系溶液由红色变为紫色, 其  $A_{650}/A_{520}$  显著高于其他干扰物, 表明该检测方法特异性良好。

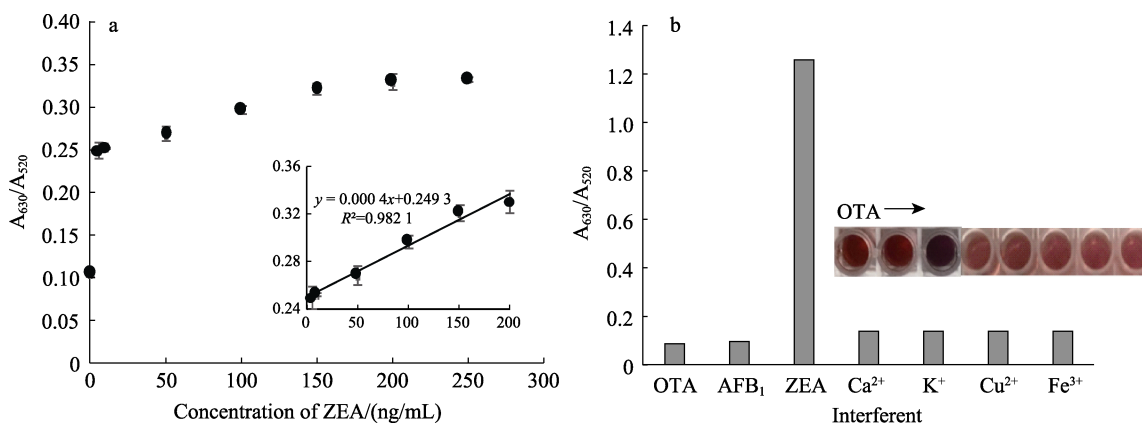


图 5 不同浓度 ZEA 与  $A_{650}/A_{520}$  比值的线性关系 (a) 及特异性分析 (b)

### 2.5 银染时间优化

如图 6 所示, 当时间小于 6 min 时,  $\Delta G$  (A630<sub>样</sub>-A630<sub>空白</sub>) 急剧增加, 在此时  $Ag^+$  在纳米金表面被大量还原成 Ag 单质; 当反应时间为 6 min 时,  $\Delta G$  的值最大, 此时反应速率达到最大; 随着反应时间的增加,  $AgNO_3$  自身氧化成核, 反应体系处于降解状态, 颜色逐渐变浅。所以, 最佳银染时间为 6 min。

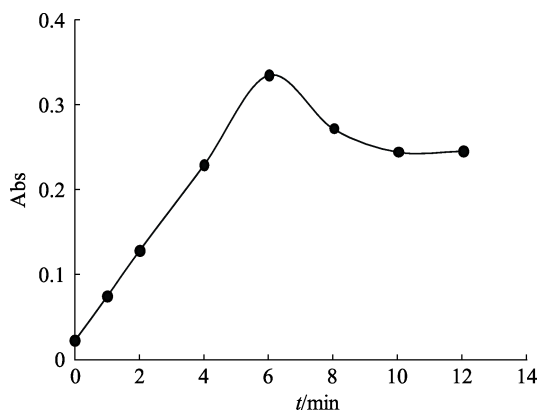


图 6 银染时间优化

### 2.6 银染增强性能

在最优银染条件下, 获得不同 ZEA 浓度与银染后溶液吸光度值的线性关系。如图 7 所示, 当 ZEA 浓度为 0.1~20 ng/mL 时, 其浓度-吸光度线性回归方程为  $y=0.0543x+0.8695$  ( $R^2=0.9819$ ), 回归线性较好, 最低检测限为 0.1 ng/mL。与银染之前的最低检出限 5 ng/mL 相比, 灵敏度提高了 50 倍。

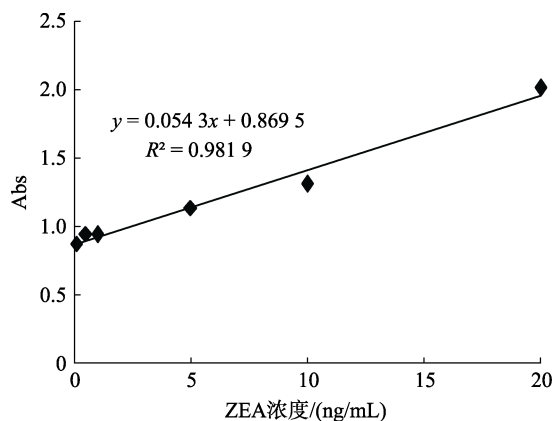


图 7 不同浓度 ZEA 与银染吸光度值的线性关系

### 2.7 样品检测验证

分别利用本实验建立的方法和酶联免疫法对加标浓度为 10、50 和 100 ng/mL 的玉米油和玉米

样品进行检测。结果如表 1 所示, 利用建立的方法测定实际样品的回收率为 81.23%~116.16%, 相对标准偏差 (RSD) 为 4.72%~7.65%, 与酶联免疫法测定的结果基本一致, 表明该方法对实际样品检测是可行的。

表 1 实际样品中 ZEA 的加标回收率 (n=3)

样品	ZEA 加标量 (ng·mL <sup>-1</sup> )	纳米金比色法		ELISA	
		回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSD/%
玉米油	10	81.23	7.65	95.75	2.92
	50	116.16	4.72	101.26	3.17
	100	89.50	5.21	112.34	2.07
玉米	10	82.61	5.96	92.36	5.76
	50	91.26	6.12	88.92	4.35
	100	98.25	5.33	83.31	8.76

## 3 结论

探究基于核酸适体技术-纳米金比色建立 ZEA 可视化的快速检测方法。在最优实验条件下, ZEA 浓度在 5~200 ng/mL 范围内与体系的吸光度值呈良好的线性关系, 最低检测限为 5 ng/mL, 且方法特异性良好。进一步通过银染作用将该方法的灵敏度提高了 50 倍。通过对实际样品进行检测, 其加标回收率较好, 成功的建立了一种简便、经济、结果可视化的 ZEA 检测新方法。

### 参考文献:

- [1] 龙淼, 李鹏, 朱连勤, 等. 微生物降解玉米赤霉烯酮毒素及其机制[J]. 动物医学进展, 2011, 11: 116-119.
- [2] WU Z, XU E, CHUGHTAI M F J, et al. Highly sensitive fluorescence sensing of zearalenone using a novel aptasensor based on upconverting nanoparticles[J]. Food Chemistry, 2017, 230(SEP. 1): 673-680.
- [3] HE Q R, PENG H W, YANG J Y, et al. QuEChERS extraction followed by enzyme-linked immunosorbent assay for determination of deoxynivalenol and zearalenone in cereals[J]. Food Agric. Immunol. 2017, 28(6): 1477-1495.
- [4] LI S J, SHENG W, WEN W, et al. Three kinds of lateral flow immunochromatographic assays based on the use of nanoparticle labels for fluorometric determination of zearalenone[J]. Mikrokchim Acta, 2018, 185(4): 238.
- [5] BARTHELMEBS L, JONCA J, HAYAT A, et al. Enzyme-Linked aptamer assays (ELAAS), based on a competition format for a rapid and sensitive detection of ochratoxin a in wine[J]. Food Control, 2011, 22(5): 737-743.
- [6] 刘腾飞, 杨代凤, 邓金花, 等. 核酸适体的筛选制备及分析应用[J]. 生物技术通报, 2013(4): 39-48.
- [7] SELVARAJ J N, WANG Y, ZHOU L, et al. Recent mycotoxin

- survey data and advanced mycotoxin detection techniques reported from China: a review[J]. *Food additives & contaminants*, 2015, 32(4): 440-452.
- [8] SHIM W B, MUN H, JOUNG H A, et al. Chemiluminescence competitive aptamer assay for the detection of aflatoxin B<sub>1</sub> in corn samples[J]. *Food Control*, 2014, 36(1): 30-35.
- [9] MISHRA G K, SHARMA V, MISHRA R K. Electrochemical aptasensors for food and environmental safe guarding: A Review[J]. *Biosensors*. 2018, 8(2): 28.
- [10] GHOSH S K, PAL T. Interparticle coupling effect on the surface plasmon resonance of gold nanoparticles: from theory to applications [J]. *Chem Rev*, 2007, 107(11): 4797-4862.
- [11] WEERATHUNGE P, RAMANATHAN R, SHUKLA R, et al. Aptamer-controlled reversible inhibition of gold nanozyme activity for pesticide sensing[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(24): 11937-11941.
- [12] SONG K M, CHO M, JO H, et al. Gold nanoparticle-based colorimetric detection of kanamycin using a DNA aptamer[J]. *Analytical Biochemistry*. 2011, 415(2): 175-181.
- [13] SHIM W B, MIN J K, MUN H, et al. An aptamer-based dipstick assay for the rapid and simple detection of aflatoxin B<sub>1</sub>[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2014, 62(6): 288-294.
- [14] YUAN J L, WU S J, DUAN N, et al. A sensitive gold nanoparticle-based colorimetric aptasensor for *Staphylococcus aureus*[J]. *Talanta*, 2014, 127: 163-168.
- [15] 刘金钊, 吕珍珍, 陈爱亮. 适配体纳米金比色分析技术研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, (8): 2040-2046.
- [16] YANG C, WANG Y, MARTY J L, et al. Aptamer-based colorimetric biosensing of Ochratoxin A using unmodified gold nanoparticles indicator[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2011, 26(5): 2724-2727.
- [17] CHEN W, DENG H H, HONG L, et al. Bare gold nanoparticles as facile and sensitive colorimetric probe for melamine detection[J]. *Analyst*, 2012, 137(22): 5382-5386.
- [18] DENG H, XU Y, LIU Y, et al. Gold nanoparticles with asymmetric polymerase chain reaction for colorimetric detection of DNA sequence[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(3): 1253.
- [19] 张岭, 弓景波, 王瑜, 等. 核酸适体和胶体金检测皮质醇含量的方法与应用[J]. *军事医学*, 2012, (8): 630-633.
- [20] 李向丽, 谭贵良, 袁秀金, 等. 纳米金标记-银染信号放大快速检测福氏志贺氏菌[J]. *现代食品科技*, 2011, (11): 1387-1392+1362.
- [21] 孟卫芹, 武玉香, 唐世云, 等. 玉米油中玉米赤霉烯酮的 ELISA 测定[J]. *现代食品科技*, 2013, (6): 1431-1433. ㉞
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://llyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。

(审核: 伍松陵)