于润众, 卢利丰, 刘鑫怡, 等. 基于智能手机识别的适配体传感器可视化快速检测玉米赤霉烯酮和黄曲霉毒素 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 310−317. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060203
YU Runzhong, LU Lifeng, LIU Xinyi, et al. Visualized Rapid Detection of Zearalenone and Aflatoxin Based on Aptamer Sensor and Smartphone Recognition[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 310−317. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060203

· 分析检测 ·

基于智能手机识别的适配体传感器可视化快速检测玉米赤霉烯酮和黄曲霉毒素

于润众[1], 卢利丰[2], 刘鑫怡[2], 张丽媛[2,3,4,*], 郭增旺[5], 郝志强[6]
（1.黑龙江八一农垦大学电气与信息学院, 黑龙江大庆 163319;
2.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;
3.国家杂粮工程技术中心, 黑龙江大庆 163319;
4.黑龙江农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆 163319;
5.东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 151000;
6.黑龙江谱尼测试科技有限公司, 黑龙江哈尔滨 151000）

摘　要: 为了实现快速便捷检测杂粮中玉米赤霉烯酮（ZEN）和黄曲霉毒素（AFB1），本研究设计一种通过图像分析软件检测 ZEN 和 AFB1 的适配体传感器。该传感器以 ZEN 和 AFB1 适配体为识别元件，AuNPs 为指示剂，NaCl 为显色剂，通过智能手机采集图像，再利用 ImageJ 软件分析样品的图像，测量图像像元综合密度，实现对 10 种不同杂粮中 ZEN 和 AFB1 特异性快速检测。结果表明，在最佳条件下，基于酶标仪吸光度检测的适配体传感器对 ZEN 和 AFB1 的检测线性范围分别为 ZEN 0.05~3 ng/g、AFB1 0.2~8 ng/g，线性方程为 y=0.021x+0.3353（R^2=0.9983）、y=0.0207x+0.3075（R^2=0.9986），检出限分别为 0.035 ng/g 和 0.1 ng/g。利用智能手机进行图像采集，通过 ImageJ 进行图像分析，线性方程分别为 y=−16.141x+189.88（R^2=0.991）、y=−12.928x+247.08（R^2=0.9901），检出限分别为 0.037 ng/g 和 0.106 ng/g，ZEN 加标回收率为 85.88%~101.13%，相对标准偏差（RSD）为 1.56%~5.34%，AFB1 加标回收率为 87.76%~109.30%，相对标准偏差（RSD）为 0.9%~5.07%。使用该传感器成功的检测出 10 种杂粮中 ZEN 和 AFB1，结合智能手机图像分析，实现了杂粮中 ZEN 和 AFB1 的高灵敏、快速（15 min）、准确检测，为现场筛查提供了有效工具。

关键词: 适配体, 金纳米粒子, 玉米赤霉烯酮, 黄曲霉毒素 B1, 比色适配体传感器, 图像分析法
中图分类号: TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0310−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060203
本文网刊:

Visualized Rapid Detection of Zearalenone and Aflatoxin Based on Aptamer Sensor and Smartphone Recognition

YU Runzhong[1], LU Lifeng[2], LIU Xinyi[2], ZHANG Liyuan[2,3,4,*], GUO Zengwang[5], HAO Zhiqiang[6]
（1.College of Electrical and Information Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
2.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
3.National Engineering Technology Center for Coarse Cereals, Daqing 163319, China;
4.Heilongjiang Key Laboratory of Agricultural Products Processing and Quality Safety, Daqing 163319, China;
5.Food Science College, Northeast Agricultural University, Harbin 151000, China;
6.Heilongjiang Pony Testing Technical Co., Ltd., Harbin 151000, China）

收稿日期: 2025−06−18
基金项目: 国家重点研发计划项目（2022YFF1103102）; 中央支持地方高校改革资金优秀青年人才项目（20YQ16）; 黑龙江重点研发计划指导类项目（GZ20210071）。
作者简介: 于润众（1981−）, 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 数据挖掘与分析, E-mail: yrz0459@163.com。
*** 通信作者:** 张丽媛（1981−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全与质量溯源, E-mail: zly1981_2005@163.com。

Abstract: To enable rapid and convenient detection of zearalenone (ZEN) and aflatoxins (AFB1) in coarse cereals, this work developed an aptamer-based sensor integrated with image analysis software. The sensor utilized specific aptamers targeting ZEN and AFB1 as recognition elements, gold nanoparticles (AuNPs) as the colorimetric indicator, and NaCl as the chromogenic agent. Images of samples captured by a smartphone were analyzed using ImageJ software through measuring the integrated pixel density, allowing for specific and rapid detection of ZEN and AFB1 in ten different types of coarse cereals. Under optimal conditions, the aptasensor based on microplate reader absorbance measurement showed linear detection ranges of 0.05~3 ng/g for ZEN and 0.2~8 ng/g for AFB1, with calibration equations y=0.021x+0.3353 (R^2=0.9983) and y=0.0207x+0.3075 (R^2=0.9986), and detection limits of 0.035 ng/g and 0.1 ng/g, respectively. When using smartphone image acquisition combined with ImageJ analysis as an alternative method, secondary calibration equations were derived: y=−16.141x+189.88 (R^2=0.991) for ZEN and y=−12.928x+247.08 (R^2=0.9901) for AFB1, with LODs of 0.037 ng/g and 0.106 ng/g. Method validation confirmed good accuracy and precision, with spike recoveries ranging from 85.88%~101.13% (RSD 1.56%~5.34%) for ZEN and 87.76%~109.30% (RSD 0.9%~5.07%) for AFB1. The aptasensor successfully detected ZEN and AFB1 in all ten tested coarse cereal samples. By integrating smartphone image analysis, this approach achieves highly sensitive, rapid (15 min) and accurate detection of both mycotoxins in coarse cereals, making it an effective tool for on-site screening applications.

Key words: aptamer; gold nanoparticles; zearalenone; aflatoxins B1; color matching aptamer sensor; image analysis method

玉米赤霉烯酮（Zearalenone, ZEN）又称 F-2 毒素，是一种由多种镰刀菌通过聚酮途径生物合成的非甾体雌激素类真菌毒素，广泛存在于玉米、小麦、燕麦、大麦、大豆等粮食中[1−3]，ZEN 可以通过食物链进行富集，饲料中 ZEN 污染会对畜禽健康构成严重威胁。并且 ZEN 残留物可能存在于由受污染的原材料制成的食品中[4]。此外，被 ZEN 污染的植物和动物源性食品在摄入后会在体内积聚，从而影响人类健康[5]。黄曲霉毒素（Aflatoxin, AFB1）为黄曲霉和寄生曲霉菌产生的多肽复合物，是影响人类健康的毒性最严重的真菌毒素之一[6]。目前，已分离出 20 余种黄曲霉毒素及其衍生物，其中 AFB1 的毒性最强（约 20 mg 即可致成人死亡），且在自然界中产量最高、稳定性最强[7−8]。目前针对 ZEN 和 AFB1 的检测主要包括高效液相色谱法（HPLC）[9]、高效液相色谱-串联质谱（HPLC-MS）[10]、薄层色谱分析法（TLC）[11]、酶联免疫吸附法（ELISA）[12]，尽管这些方法灵敏度高、选择性好，但仍存在操作流程复杂、耗时较长、成本高昂、需专业人员实施等局限，难以满足快速及现场检测需求。

适配体是通过指数富集适配体系统进化（SELEX）在体外选择过程获得的一段单链寡核苷酸（ssDNA 或 ssRNA）分子，折叠的适配体可形成茎环、发夹等特异性二级或三级结构，与目标分子结合，具有较高的亲和力和特异性。适配体仅由四个碱基（DNA 或 RNA 的 A、G、C、T 或 U）组成[13]。适配体虽具备与抗体相当的高特异性和高亲和力，但其靶标识别范围远广于抗体。主要包括离子[14]、小分子[15]、蛋白质[16]、病毒[17]、细菌[18]、寄生虫[19]，甚至整个活细胞[20]。此外，适配体具有亲和力高、特异性强、分子量小、无批量变异、易修饰合成、稳定性好、易运输储存、无免疫原性等优点[21]，被认为是最具潜力的抗体替代品。适配体已广泛应用于分析化学[22]、生物学[23]、食品学[24] 和医学[25−26] 等多个领域。适配体技术已深度赋能真菌毒素检测，尤其在电化学/光电化学传感器中展现出超高灵敏度和现场适用性[27]。通过标准化适配体筛选、开发多毒素联检平台及智能终端集成，有望成为替代传统方法的主流快检工具，为食品安全监管提供技术支撑[28]。

基于此，本研究提出一种利用图像分析软件对 ZEN 与 AFB1 进行可视化检测的比色适配体传感器方案。ZEN 与 AFB1 适配体能够有效地保护 AuNPs，从而极大地提高 AuNPs 在高浓度盐溶液中的稳定性。利用 ImageJ 软件对检测样品进行图像分析，可以通过测量图像颜色的综合密度与 ZEN、AFB1 浓度联系起来，进而可以通过监测颜色的变化来确定 ZEN 和 AFB1 的浓度，实现对 ZEN 和 AFB1 的定量检测。最后，使用该传感器进行加标回收实验以及对 10 种不同粮食样品的检测，来验证该传感器的实用性。本研究旨在为粮食中真菌毒素的快速、现场检测提供一种有效的技术手段。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

核酸适配体（ZEN Apt5'-GAT GGG GAA AGG GTC CCC CTG GGT TGG AGC ATC GGA CA-3'、AFB1 Apt5'-GTT GGG CAC GTG TTG TCT CTC TGT GTC TCG TGC CCT TCG CTA GGC CCA CA-3'）　本研究中所使用的寡核苷酸序列均由上海生工生物技术有限公司合成和纯化；氯金酸（$HAuCl_4$）　国药集团化学试剂有限公司；玉米赤霉烯酮标准品、黄曲霉毒素 B1 标准品　青岛普瑞帮生物工程有限公司；柠檬酸钠、氯化钠、无水硫酸钠、无水硫酸镁、硫酸铵　上海麦克林生物科技有限公司；C18E　深圳安普生物医药有限公司；重铬酸钾、乙腈、甲酸、丙酮　上海麦克林生物科技有限公司；小米、小麦、黄豆、高粱（北旗）、高粱（龙杂 13）、苦荞麦、甜荞麦、玉米、红芸豆、大米　市售。

VICTOR Nivo 酶标仪　珀金埃尔默企业管理（上海）有限公司；UV-1500PC 紫外分光光度计　翰

艺仪器(上海)有限公司; JEM-2100F 透射电镜　日本电子株式会社; KQ-500DE 超声波清洗器　昆山市超声仪器有限公司; Vortex-Genie 2 漩涡振荡器　美国 Scientific Industries 公司; DFY-500 高速粉碎机　浙江省永康市金穗机械制造厂; TH2-82T 水浴恒温振荡器　常州荣华仪器有限公司; H2-16KR 台式高速离心机　湖南可成仪器设备有限公司; CYNS-12 水浴氮吹仪　上海力辰仪器科技有限公司; SMART-RO-15 纯水仪　上海和泰仪器有限公司; ZEN3700 激光粒度仪　上海百吉仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　混合标准溶液配制　取 100 μL 100 μg/mL 的 ZEN 与 AFB1 单标溶液各一份, 置于 1 mL 试管中混合。加入 800 μL 乙腈, 涡旋振荡混匀, 配制得 10 μg/mL 混合标准储备液。取该储备液, 用乙腈梯度稀释, 配制浓度系列为 5、10、20、50、100、150、200、300、400、600、800、1000 ng/mL 的混合标准工作溶液。

1.2.2　样品处理　用研磨机将高粱样品磨成粉末, 并通过 80 目筛。将 AFB1、ZEN 混合标准溶液(5、10、20、50、100、150、200、300、400、600、800、1000 ng/mL)加入样品中, 制成含有混合标准溶液的加标样品。每个加标水平做 3 组平行实验。共获得 30 个样品和 10 个加标水平(加标实验仅选取了上述 12 组浓度中的 10 个浓度, 每个浓度 3 个平行, 因此为 30 个样品; 所列 12 组浓度为配制标准曲线所用)。为了确保混合标准溶液的良好分布, 在每个样品中加入适量的丙酮以湿润样品粉末, 并进行充分搅拌, 然后在通风环境下风干 24 h 后再进行萃取。加标的样品保存在密封的瓶子里。

对现有的 QuEChERS[27−30] 样品预处理方法适当改进, 用电子天平称取 5.00 g(精确到 0.01 g)样品粉末, 置于 50 mL 的离心管内, 并向离心管内加入 5 mL 的蒸馏水, 用力摇匀使样品完全润湿, 然后向离心管内加入 10 mL 1%(甲酸酸化过)的乙腈溶液, 涡旋振荡 3 min 后, 超声萃取 10 min。再向离心管内加入 1 g NaCl 和 3 g $(NH_4)_2SO_4$, 涡旋振荡 2 min, 利用冷冻离心机在 4 ℃ 下以 11000 r/min 离心 10 min。用移液枪吸取 5 mL 上清液(有机相), 置于含有 0.2 g C_{18} 的 10 mL 离心管中, 涡旋振荡 2 min, 并利用冷冻离心机在 4 °C 下以 11000 r/min 离心 10 min。吸取 4 mL 上清液用移液枪转移到 10 mL 氮吹瓶中, 在水温为 40 °C 下利用氮吹仪对溶液进行氮气吹干浓缩, 接着将浓缩后的样品用 1 mL 乙腈溶液定容, 并将定容后的溶液用 0.22 μm 的 PTEE 滤膜过滤到 2 mL 样品瓶中备用。

1.2.3　金纳米粒子的制备　通过柠檬酸钠还原法制备 AuNPs 溶液的具体操作步骤: 首先将 100 mL 超纯水和 1 mL 1%($HAuCl_4$)溶液加入预先用铬酸洗液浸泡过的 250 mL 烧杯中, 对含有氯金酸($HAuCl_4$)的水溶液进行加热并搅拌直至沸腾。向沸腾的溶液中加入 2.5 mL 1% 柠檬酸钠溶液, 迅速搅拌 10 min, 可以看到溶液的颜色由浅黄色转变为黑色, 然后转变为紫红色, 最终转变为酒红色且透明。当溶液的颜色不再发生变化, 应停止加热, 接着搅拌 10 min。将 AuNPs 溶液冷却至室温并用 10 mL 试管进行分装, 将其放入冰箱中 4 ℃ 保存备用。

1.2.4　玉米赤霉烯酮和黄曲霉毒素 B1 的检测　向微孔板孔中加入 100 μL 金纳米粒子(AuNPs), 再分别加入 10 μL 浓度为 5 μmol/L 的 ZEN 适配体溶液和 10 μL 浓度为 0.7 μmol/L 的 AFB1 适配体溶液, 室温孵育 5 min。接着, 分别加入 10 μL 经过 QuEChERS 法处理的不同浓度粮食提取液(0、5、10、20、50、100、150、200、300、400、600、800、1000 ng/mL), 在室温下孵育 5 min。最后, 将 10 μL 浓度为 2 mol/L 的 NaCl 溶液分别加入到溶液中, 在室温下反应 5 min。用微孔板阅读器测定溶液的吸光度值($A_{650\ nm}$), 以吸光度值为纵坐标, ZEN 和 AFB1 浓度为横坐标, 分别建立工作曲线。

1.2.5　智能手机图像处理　首先使用智能手机将样品图像拍摄下来, 然后通过智能手机上的 ImageJ 软件对图像进行分析。分析流程为: 打开软件、选择 8 位图像类型、点击流程、减去背景、点击“椭圆选择”、利用矩形工具, 在离心管上选一个固定正方形区为分析区、点击“分析测量”, 得出 RGB 综合密度, 然后移至下一个样品图像进行成像分析。最后, 对 ZEN 和 AFB1 浓度(X 轴)与颜色综合密度(Y 轴)进行线性回归分析, 得到校准曲线图。

1.2.6　加标回收率和精密度实验　为探讨该方法的可行性和实用性, 用本文设计的传感器对小米、小麦、高粱进行 ZEN 和 AFB1 的加标回收率检测, 加入混合标准溶液浓度为(ZEN 为 100、200、300 ng/mL, AFB1 为 100、200、400 ng/mL)。按照实验方法进行实际样品的检测, 每个加标水平做 3 组平行实验。计算加标回收率和 RSD 值。

并选取了来自不同产地的 10 种不同的粮食进行了实际样品的检测, 来证明该传感器的实用性, 每种粮食样品做 3 组平行实验。按照实验方法进行实际样品的检测。

1.3　数据处理

Origin 2021 用于图表制作, IBM SPSS Statistics 25 用于数据分析, Thermos Scientific 的 Velox 软件用于 TEM 图像采集, ImageJ 用于图像数字化处理。

2　结果与分析

2.1　ZEN 与 AFB1 的适配体传感器比色检测方法及原理

本实验原理如图 1 所示, 实验利用 ZEN 和

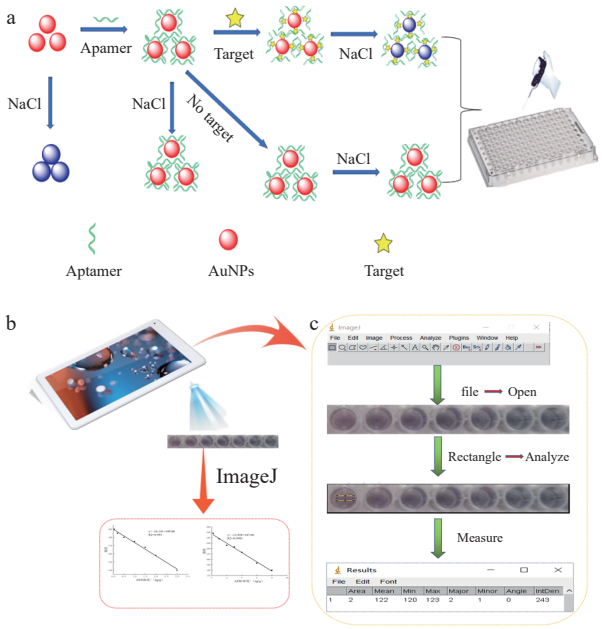


图 1　数字化图像检测流程图

Fig.1　Flowchart of digital image detection

注：a 为 ZEN 和 AFB1 检测原理；b 为真菌毒素智能检测流程；c 为 ImageJ 图像分析过程。

AFB1 适配体在靶标物质 ZEN 和 AFB1 存在下特异性结合形成结合物，由此构建了检测 ZEN 和 AFB1 比色传感器[29]。在没有 ZEN 和 AFB1 的情况下，ZEN 和 AFB1 适配体与 AuNPs 之间通过静电吸附作用包裹在 AuNPs 表面。因此，ZEN 和 AFB1 适配体可以保护 AuNPs 免受 NaCl 诱导的聚集。然而，ZEN 与 AFB1 适配体一旦特异性的与相应的真菌毒素结合后，适配体对于 AuNPs 的保护作用就会消失，由此导致 AuNPs 在高盐浓度溶液中的聚集，溶液颜色从酒红色转变为蓝色。因此，添加不同浓度的 ZEN 和 AFB1 会产生不同程度的 AuNPs 聚集。溶液的吸光度值与靶标 ZEN 和 AFB1 的浓度有关，通过 ImageJ 软件分析样本的图像发现通过测量图像像元综合密度，可以将其与目标浓度联系起来。实现对 ZEN 和 AFB1 的定性和定量检测[30]。

2.2　基于 AuNPs 比色传感检测玉米赤霉烯酮的线性范围与检测限

将一系列不同浓度的 ZEN 和 AFB1 混合标准溶液加入粉碎的高粱样品中，使样品中 ZEN 的终浓度分别为 0、0.05、0.1、0.2、0.5、1、1.5、2、3、4、6、8、10 ng/g。采用 QuEChERS 方法对样品进行处理，所绘制的工作曲线如图 2a 所示。随着 ZEN 浓度的增加，AuNPs 溶液在 $A_{650\ nm}$ 处的吸光度值逐渐上升；但当 ZEN 浓度超过 3 ng/g 后，吸光度值转而下降。其原因在于，在玉米赤霉烯酮(ZEN)的检测过程中，高浓度 ZEN 会与适配体充分结合并引发其构象变化，使适配体从 AuNPs 表面脱离，导致其对 AuNPs 的保护作用丧失，进而引起 AuNPs 聚集状态发生变化，共同导致吸光度下降。如图 2b 所示，ZEN 在

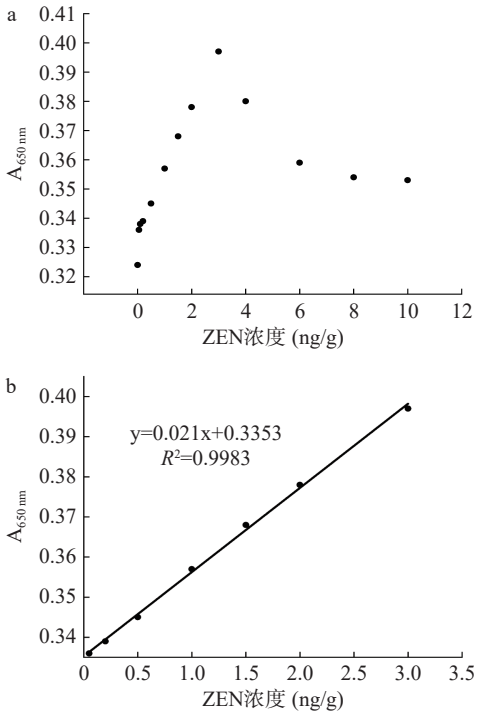


图 2　混标中不同浓度 ZEN 与 $A_{650\ nm}$ 的线性关系

Fig.2　Linear relationship between different concentrations of ZEN and $A_{650\ nm}$ in mixed standards

注：a 表示混标溶液中 0~10 ng/g ZEN 的添加量与吸光度的曲线；b 表示 0.05~3 ng/g ZEN 的添加量与吸光度的标准曲线。

0.05~3 ng/g 浓度范围内，$A_{650\ nm}$ 的吸光度值与 ZEN 浓度呈良好的线性关系，线性方程为 y=0.021x+0.3353，决定系数为 R^2=0.9983，线性范围为 0.05~3.0 ng/g。在空白溶液的优化条件下，检测限为 0.035 ng/g(S/N=3)，定量限为 0.05 ng/g(S/N=10)。

2.3　基于 AuNPs 比色传感检黄曲霉毒素 B1 的线性范围和检测限

在优化的实验条件下，将一系列不同浓度的 ZEN 和 AFB1 混合标准溶液加入粉碎的高粱样品中，使样品中 ZEN 的终浓度分别为 0、0.05、0.1、0.2、0.5、1、1.5、2、3、4、6、8、10 ng/g。用 QuEChERS 方法对样品进行处理，绘制工作曲线。如图 3a 所示，AuNPs 溶液在 $A_{650\ nm}$ 处的吸光度值随 AFB1 浓度的增加而升高，但在 AFB1 浓度增至 8 ng/g 的阈值后，吸光度值呈现下降趋势。该现象是由于当 AFB1 浓度超过阈值时，过量 AFB1 会与适配体结合，引发其构象变化并脱离 AuNPs 表面，这种保护作用的丧失最终导致了 AuNPs 的聚集。如图 3b 所示，AFB1 在 0.2~8 ng/g 浓度范围内，$A_{650\ nm}$ 的吸光度值与 AFB1 浓度呈良好的线性关系，线性方程为 y=0.0207x+0.3075，决定系数为 R^2=0.9986，线性范围为 0.2~8 ng/g，在空白溶液的优化条件下，检测限为 0.1 ng/g(S/N=3)，定量限为 0.2 ng/g(S/N=10)。

2.4　智能手机图像分析

利用图像分析软件对 ZEN 的检测结果如图 4 和图 5 所示，当混标溶液中 ZEN 的浓度由 0.05 ng/g

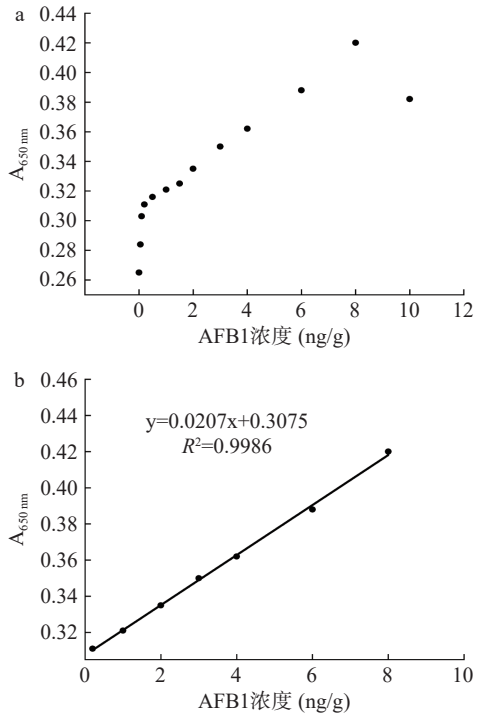


图 3 混标中不同浓度 AFB1 与 $A_{650\,nm}$ 的线性关系

Fig.3 Linear relationship between different concentrations of AFB1 and $A_{650\,nm}$ in mixed standards

注: a 表示混标溶液中 0~10 ng/g AFB1 的添加量与吸光度的曲线; b 表示 0.2~8.0 ng/g AFB1 的添加量与吸光度的标准曲线。

增加到 3 ng/g 时, 溶液图像像元综合密度相应下降, 在浓度为 0.05~3 ng/g 的范围内图像像元综合密度与 ZEN 浓度呈良好的线性关系, 线性方程为 y=−16.141x+189.88(R^2=0.991), 计算检测限为 0.037 ng/g, 检测结果与酶标仪分析结果一致, 表明本传感器适用于现场检测 ZEN。

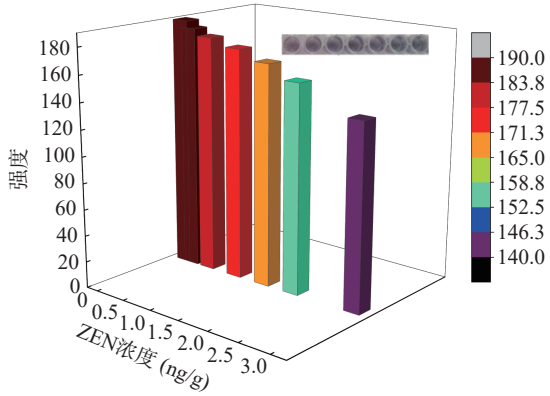


图 4 图像像元综合密度与 ZEN 浓度的 3D 校准图

Fig.4 3D calibration plot of image pixel integrated density and ZEN concentration

注: 插图为不同 ZEN 浓度下溶液颜色。

利用图像分析软件对 AFB1 的检测结果如图 6 和图 7 所示, 当混标溶液中 AFB1 的浓度由 0.2 ng/g 增加至 8 ng/g 时, 溶液图像像元综合密度相应下降, 在浓度为 0.2~8 ng/g 的范围内图像像元综合密度与 AFB1 浓度呈良好的线性关系, 线性方程为 y=

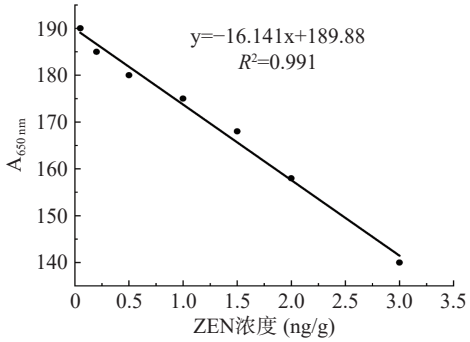


图 5 综合密度与 ZEN 浓度的线性关系图

Fig.5 Linear relationship diagram between integrated density and ZEN concentration

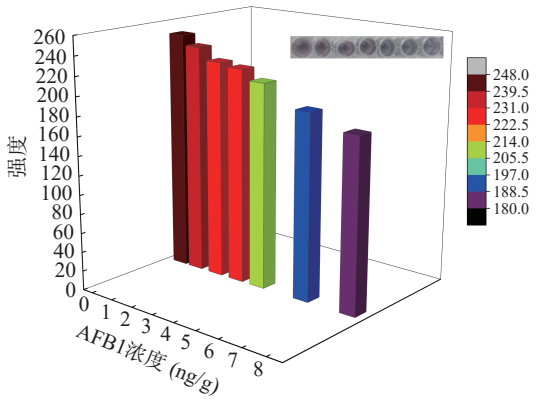


图 6 图像像元综合密度与 AFB1 浓度的 3D 校准图

Fig.6 3D calibration plot of image pixel integrated density and AFB1 concentration

注: 插图为不同 AFB1 浓度下溶液颜色。

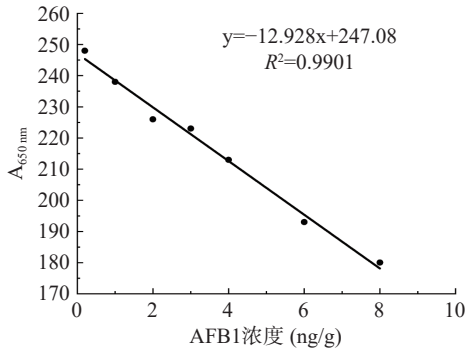


图 7 综合密度与 AFB1 浓度的线性关系图

Fig.7 Linear relationship diagram between integrated density and AFB1 concentration

−12.928x+247.08(R^2=0.9901)。计算检测限为 0.106 ng/g, 检测结果与酶标仪分析结果一致, 表明该传感器适用于现场检测 AFB1。

如图 4~图 7 所示, 通过图像分析软件对 ZEN 和 AFB1 的检测结果表明: 在各自浓度范围内(ZEN: 0.05~3 ng/g; AFB1: 0.2~8 ng/g), 溶液图像像元综合密度均随毒素浓度增加而下降, 且呈现良好线性关系(ZEN: y=−16.141x+189.88, R^2=0.991; AFB1: y=−12.928x+247.08, R^2=0.9901), 检测限分别为 0.037 ng/g 和 0.106 ng/g。两种毒素的检测结果均与酶标仪分析结果一致, 证明该传感器适用于 ZEN 和

AFB1 的现场检测。智能手机图像分析作为快速筛查工具，以接近实验室的准确性、极致的便捷性和低成本的优势更适合现场筛查，为粮食安全现场监管提供高效解决方案。

2.5　加标回收实验

选取三种不同粮食样品进行加标回收率分析。结果显示（表 1），ZEN 的加标回收率在 85.88%~101.13% 之间，相对标准偏差（RSD）为 1.56%~5.34%; AFB1 的加标回收率在 87.76%~109.3% 之间，RSD 为 0.9%~5.07%。结果表明，该方法具有良好的准确度和重复性，适用于复杂基质中 ZEN 与 AFB1 的定量检测。

2.6　实际样品检测

进一步对 10 种不同粮食样品中 ZEN 与 AFB1 的含量进行检测。结果（表 2）表明，ZEN 含量范围为 0.99~2.83 ng/g，RSD 为 2.09%~8.13%; AFB1 含量范围为 0.99~3.94 ng/g，RSD 为 1.4%~5.68%。所有检测结果均远低于国家标准 GB 2761-2017《食品中真菌毒素限量》规定的 AFB1 限量（5 μg/kg），说明本方法在实际样品检测中具备良好的适用性与可靠性。

综上所述，本研究建立的检测方法操作简便、结果准确，可用于粮食样品中 ZEN 与 AFB1 的快速筛查与定量分析。

3　讨论

本研究采用 QuEChERS 法做为样品的前处理方法，使用 ZEN、AFB1 适配体和 AuNPs 构建了基于图像分析的比色适配体传感器，检测粮食中的 ZEN 和 AFB1。通过观察图像像元综合密度与 ZEN 和 AFB1 浓度的 3D 校准图，并与谢建国[31] 的研究进行比较，溶液的颜色变化与图像像元综合密度的变化规律基本相似，但是所得到的图像像元综合密度值高于文献所报的，分析造成的原因可能有几个方面。首先，所制备的 AuNPs 粒径不同，导致在高浓度下 NaCl 所诱导的 AuNPs 聚集程度不同，显示的颜色的强弱也不同，所以在利用软件分析时所显示的像元综合密度值不同。其次，是被检测物质的差异造成，不同的检测物质与适配体结合后形成不同结构的结合物，进而影响了 AuNPs 的聚集，所呈现的颜色强弱也就不同，则造成像元综合密度值的差异。最后，除了 NaCl 还有一些阳离子作为显色剂会引起 AuNPs 的聚集，但聚集的程度可能不同，显示的颜色也有所差异，经过图像分析软件分析后，所显示的图像像元综合密度也就不同。将本方法的检出限与国家标准 GB 2761-2017《食品中真菌毒素限量》中规定的限量值进行比较: ZEN 的限量（如玉米中为 60 μg/kg）远高于本方法的检出限（0.037 ng/g=0.037 μg/kg）; AFB1 的限量（其他谷物中为 5 μg/kg）也远高于本方法的检出限（0.106 ng/g=0.106 μg/kg）。这表明本方法的检测灵敏度完全满足国家标准对真菌毒素的筛查要求。同时，本方法在成本、速度和操作简便性等方面展现出显著优势，适用于现场快速检测。

表 1　实际样品中 ZEN 和 AFB1 的加标回收率

Table 1　Spike recoveries of ZEN and AFB1 in actual samples

样品名称	ZEN添加量（ng/g）	AFB1添加量（ng/g）	ZEN的加标回收率（%）	AFB1的加标回收率（%）	ZEN相对标准偏差（%）	AFB1相对标准偏差（%）
小米	100	100	87.46±2.75	87.76±2.78	3.14	3.18
	200	200	94.52±2.38	95.4±4.83	2.52	5.07
	300	400	100.58±1.84	102.05±1.21	1.83	1.18
小麦	100	100	89.05±4.76	92.59±2.79	5.34	3.01
	200	200	93.73±3.64	97.02±3.68	3.87	3.80
	300	400	97.94±1.59	101.25±1.84	1.62	1.83
高粱	100	100	85.88±2.38	89.37±3.94	3.2	4.41
	200	200	98.49±2.75	92.99±1.97	2.80	2.12
	300	400	101.13±5.8	109.3±1.00	1.56	0.90

表 2　实际样品中 ZEN 和 AFB1 的检测结果

Table 2　Detection results of ZEN and AFB1 in real samples

样品名称	ZEN浓度（ng/g）	AFB1浓度（ng/g）	ZEN相对标准偏差（%）	AFB1相对标准偏差（%）
大米	0.99±0.05	1.75±0.1	4.80	5.68
黄豆	2.81±0.14	3.66±0.1	5.07	2.71
小麦	1.93±0.08	2.82±0.4	4.22	1.4
玉米	2.83±0.08	0.99±0.04	2.87	3.98
红芸豆	1.34±0.05	1.39±0.06	4.05	4.32
高粱（北旗）	2.32±0.09	1.43±0.08	3.74	5.53
甜荞	2.39±0.08	2.17±0.06	3.61	2.78
苦荞	1.52±0.06	3.94±0.14	4.08	3.61
小米	1.24±0.03	1.94±0.1	2.09	5.12
高粱（龙杂13）	2.61±0.02	3.16±0.07	8.13	2.16

4 结论

本研究成功构建了一种基于图像分析的比色适配体传感器，用于粮食中 ZEN 和 AFB1 的快速可视化检测。该传感器对 ZEN 和 AFB1 的检测限分别达到 0.037 ng/g 和 0.106 ng/g，线性范围分别为 0.05~3 ng/g 和 0.2~8 ng/g。基于 AuNPs 的颜色变化，结合 ImageJ 软件分析，该方法可在无需精密仪器的情况下实现毒素的定性与定量分析。实验证明，该方法操作简便、快速且成本低，为现场快速筛查提供了有效工具。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] KHAN R, ANWAR F, GHAZALI F M. A comprehensive review of mycotoxins: Toxicology, detection, and effective mitigation approaches[J]. Heliyon, 2024, 10(8): e28361.

[2] LIU W H, PUSHPARAJ K, MEYYAZHAGAN A, et al. Ochratoxin A as an alarming health threat for livestock and human: A review on molecular interactions, mechanism of toxicity, detection, detoxification, and dietary prophylaxis[J]. Toxicon, 2022, 213: 59−75.

[3] RAI A, DAS M, TRIPATHI A. Occurrence and toxicity of a *Fusarium* mycotoxin, zearalenone[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(16): 2710−2729.

[4] LLORENS P, HERRERA M, JUAN-GARCÍA A, et al. Biomarkers of exposure to zearalenone in *in vivo* and *in vitro* studies[J]. Toxins, 2022, 14(5): 291.

[5] 李璇. 温度调控黄曲霉菌生长和产毒的代谢特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021. [LI Xuan. The metabolic characteristics of temperature-driven fungal growth and aflatoxin biosynthesis in *Aspergillus flavus*[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.]

[6] 陈敏. 花生油中黄曲霉毒素 B1 激光诱导荧光检测方法研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2021. [CHEN M. Detection of aflatoxin B1 in peanut oil using laser-induced fluorescence[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2021.]

[7] 刘情情, 詹珂, 胡骁飞, 等. 电化学免疫传感技术在食品安全中的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2): 419−425. [LIU Q Q, ZHAN K, HU X F, et al. Research progress in electrochemical immunosensing technology for food safety[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(2): 419−425.]

[8] HONG Feng, ZHAO Yongkun, PAN Shixing, et al. Click reaction-mediated fluorescent immunosensor based on Cu-MOF nanoparticles for ultrasensitive and high-throughput detection of aflatoxin B1 in food samples[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(11): 5975−5982.

[9] DENG Kai, ZHANG Yining, XIAO Hang, et al. Nafion-immobilized functionalized MWCNT-based electrochemical immunosensor for aflatoxin B1 detection[J]. ACS Omega, 2024, 9(8): 8754−8762.

[10] 郑嘉, 王红旗, 刘继红, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法检测小麦中 19 种真菌毒素[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(16): 5382−5390. [ZHENG Jia, WANG Hongqi, LIU Jihong, et al. Determination of 19 kinds of mycotoxins in wheat by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(16): 5382−5390.]

[11] YU Zhichao, QIU Chicheng, HUANG Lingting, et al. Micro-electromechanical microsystems-supported photothermal immunoassay for point-of-care testing of aflatoxin B1 in foodstuff[J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(8): 4212−4219.

[12] XU Lin, QU Wenli, HAO Xiaotong, et al. Immunochromatographic strip based on tetrahedral DNA immunoprobe for the detection of aflatoxin B1 in rice bran oil[J]. Foods, 2024, 13(15): 2410.

[13] XIAO Yu, PAN Tao, DA Wuren, et al. Aptamer-drug conjugates-loaded bacteria for pancreatic cancer synergistic therapy[J]. Signal Transduction and Targeted Therapy, 2024, 9: 272.

[14] LIU Meiqing, ZHAO Lu, CHEN Yuying, et al. Aptamer-modified Nb_2C multifunctional nanomedicine for targeted photothermal/chemotherapy combined therapy of tumor[J]. Molecular Pharmaceutics, 2024, 21(8): 4047−4059.

[15] WANG Zijian, CHEN Erning, YANG Ge, et al. Research advances of aptamers selection for small molecule targets[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2020, 48(5): 573−582.

[16] KUO C W, WANG S H, LO S C, et al. Sensitive oligonucleotide detection using resonant coupling between Fano resonance and image dipoles of gold nanoparticles[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(12): 14012−14024.

[17] APAYDıN B B, ÇAMOĞLU T, CANBEK ÖZDIL Z C, et al. Chitosan-enhanced sensitivity of mercaptoundecanoic acid (MUA)-capped gold nanorod based localized surface plasmon resonance (LSPR) biosensor for detection of alpha-synuclein oligomer biomarker in Parkinson's disease[J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2025, 72(1): 150−163.

[18] XU Zhou, LONG Lingli, CHEN Yanqiu, et al. A nanozyme-linked immunosorbent assay based on metal-organic frameworks (MOFs) for sensitive detection of aflatoxin B1[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128039.

[19] ZHAO J Q, TANG S X, STORHOFF J, et al. Multiplexed, rapid detection of H5N1 using a PCR-free nanoparticle-based genomic microarray assay[J]. BMC Biotechnology, 2010, 10(1): 74.

[20] BARROS M M, CASTRO J, ARAÚJO D, et al. Application of DNA aptamers to block enterotoxigenic *Escherichia coli* toxicity in a *Galleria mellonella* larval model[J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 12: 1425903.

[21] JIANG Li, WANG Qian, KANG Zhanhai, et al. Novel environmentally friendly RNAi biopesticides: Targeting *V-ATPase* in *Holotrichia parallela* larvae using layered double hydroxide nano complexes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(20): 11381−11391.

[22] CHEN Pu, CHEN Yukun, XIA Ningbo, et al. A pyruvate transporter in the apicoplast of api complexan parasites[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(25): e2314314121.

[23] GUO Xiaodong, WANG Mengzhi. Recent progress in optical and electrochemical aptasensor technologies for detection of aflatoxin B1[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(33): 13093−13111.

[24] TAO Xiaoqi, WANG Xin, LIU Biwu, et al. Conjugation of

antibodies and aptamers on nanozymes for developing biosensors［J］. Biosensors and Bioelectronics, 2020, 168: 112537.

［25］ WANG Weiya, SUN Jiadi, GAO Yifei, et al. Ultra-sensitive detection of norovirus using a three-in-one CRISPR platform based on a DNA hydrogel and composite functional nanomaterials［J］. Journal of Hazardous Materials, 2025, 482: 136523.

［26］ LIU Xingyi, LI Mingming, WANG Hao, et al. Enhanced detection of acetamiprid via a gold nanoparticle-based colorimetric aptasensor integrated with a hybridization chain reaction［J］. Analytical Methods, 2024, 16(26): 4301−4309.

［27］ YAN Xiaoxian, ZHANG Hongyan, ZHU Zhehui, et al. Simultaneous determination of 78 pesticide residues and 16 mycotoxins in tsampa by an improved QuEChERS method coupled with ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry［J］. Analytical Methods, 2024, 16(30): 5178−5190.

［28］ ALBERO B, FERNÁNDEZ-CRUZ M L, PÉREZ R A. Simultaneous determination of 15 mycotoxins in aquaculture feed by liquid chromatography-tandem mass spectrometry［J］. Toxins, 2022, 14(5): 316.

［29］ ZHANG L, CHEN J, LU L, et al. A smartphone-assisted colorimetric aptasensor based on aptamer and gold nanoparticles for visual, fast and sensitive detection of ZEN in maize［J］. Food Chem X, 2023, 19: 100792.

［30］ YANG Y F, FENG Y J, HU X P, et al. Smartphone-based visual sensing platform based on molecular imprinted polymers and aptamers synergistic recognition for simultaneous detection of aflatoxin B1 and ochratoxin A［J］. Microchemical Journal, 2025, 212: 113361.

［31］ 谢建国. 基于核酸适配体和图像分析的农药污染检测研究［D］. 芜湖: 安徽师范大学, 2022. ［XIE J G. Research on pesticide contamination detection based on aptamer and image analysis［D］. Wuhu: Anhui Normal University, 2022.］