

基于金属有机框架的荧光适配体传感器检测红酒中黄曲霉毒素 B₁

姚惠文*, 王馨悦, 雷欣莹

(湖北中医药大学药学院, 湖北武汉 430065)

摘要: 该文利用金属有机框架 (Metal-organic Framework, MOF) 材料和荧光标记的核酸适配体构建一种基于光诱导电子转移的荧光适配体传感器用于黄曲霉毒素 B₁ (Aflatoxin B₁, AFB₁) 的检测。MOF 材料为氨基功能化的奥斯陆大学 66 (Amino-functionalized University of Oslo 66, UiO-66-NH₂), 标记有四甲基罗丹明 (Tetramethylrhodamine, TAMRA) 荧光团的核酸适配体 (TAMRA-aptamer) 通过 π - π 堆积作用吸附于 UiO-66-NH₂ 表面, 由于光诱导电子转移使 TAMRA-aptamer 的荧光猝灭。加入目标物 AFB₁ 后, 核酸适配体与 AFB₁ 特异性识别并结合, 使核酸适配体从单链结构转变为稳定的内环结构。由于内环结构与 UiO-66-NH₂ 之间的结合能力较弱, 光诱导电子转移被阻断, TAMRA-aptamer 荧光恢复。该荧光适配体传感器用于 AFB₁ 检测, 在 1.00~100.00 ng/mL 范围内荧光信号强度与 AFB₁ 浓度具有良好的线性相关性, 相关系数的平方 (R^2) 为 0.994, 检测限为 0.50 ng/mL。该方法用于红酒中 AFB₁ 的测定, 样品添加回收率为 90.00%~101.00%。该方法操作简便、成本低、选择性好、灵敏度高, 可用于红酒中 AFB₁ 的快速检测。

关键词: 黄曲霉毒素 B₁; 金属有机框架; 核酸适配体; 荧光传感器

文章编号: 1673-9078(2023)06-306-312

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.6.0743

A Metal-organic Framework-based Fluorescent Aptasensor for Determination of Aflatoxin B₁ in Red Wine

YAO Huiwen*, WANG Xinyue, LEI Xinying

(College of Pharmacy, Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China)

Abstract: A fluorescent aptasensor was constructed based on photoinduced electron transfer using an amino-functionalized metal-organic framework (MOF) from the University of Oslo 66 (UiO-66-NH₂) and fluorescently labeled aptamers for the determination of aflatoxin B₁ (AFB₁). Tetramethylrhodamine-labeled (TAMRA-labeled) aptamers (TAMRA-aptamer) were absorbed onto the surface of the UiO-66-NH₂ via π - π stacking and the fluorescence of the TAMRA-aptamer was quenched due to the photoinduced electron transfer. The conformation of TAMRA-aptamers, which specifically recognize and bind to AFB₁, changed from a single chain to a stable internal loop, and the hindrance of photoinduced electron transfer due to the weak binding ability between the internal loop structure and UiO-66-NH₂ led again to fluorescence of the TAMRA-aptamers. The fluorescent aptasensor is thus considered suitable for AFB₁ detection to as low as 0.50 ng/mL. The intensity was proportional to AFB₁ concentration in the range between 1.00 and 100.00 ng/mL, and the square of the correlation coefficient (R^2) was 0.994. The recovery for the detection of AFB₁ in red wine was 90.00~101.00%. The developed method is simple, inexpensive, reasonably selective, and highly sensitive and can be used for the rapid determination of AFB₁ in red wine.

Key words: aflatoxin B₁; metal-organic framework; aptamer; fluorescent sensor

引文格式:

姚惠文,王馨悦,雷欣莹.基于金属有机框架的荧光适配体传感器检测红酒中黄曲霉毒素 B₁ [J].现代食品科技,2023,39(6):306-312.

YAO Huiwen, WANG Xinyue, LEI Xinying. A metal-organic framework-based fluorescent aptasensor for determination of aflatoxin B₁ in red wine [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 306-312.

黄曲霉毒素 B₁ (Aflatoxin B₁, AFB₁) 是由黄曲

收稿日期: 2022-06-12

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目 (Q20212003)

作者简介: 姚惠文 (1988-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品质量安全检测技术, E-mail: yhw1024@163.com

霉和寄生曲霉在高温、潮湿和有氧条件下产生的一种有毒次级代谢产物, 能破坏人及动物的肝脏组织, 诱发肝癌, 甚至致死。1993 年 AFB₁ 被世界卫生组织的癌症研究机构 (International Agency for Research on Cancer, IARC) 划定为 I 类致癌物^[1]。奶制品、谷物

豆类、葡萄酒等在生产和储运等各个环节都可能受到 AFB₁ 污染,给食品安全带来隐患,给人们身体健康造成威胁^[2]。目前, AFB₁ 的检测方法主要有高效液相色谱法 (HPLC)^[3,4]、高效液相色谱-串联质谱法 (HPLC-MS/MS)^[5]和表面增强拉曼光谱法^[6]等。虽然上述方法能准确可靠地检测 AFB₁,但存在前处理过程复杂、耗时长、仪器昂贵等缺点。酶联免疫吸附法 (ELISA)、荧光免疫层析法等免疫分析法也可用于 AFB₁ 的测定^[7,8],但所需抗体的制备周期长、成本较高、稳定性较差。因此,亟需开发简单、快速、灵敏度高且成本低的 AFB₁ 检测方法。

核酸适配体 (Aptamer) 是一小段经体外筛选得到的单链寡核苷酸序列 (单链 DNA 或 RNA),与目标物的结合具有高亲和力和强特异性的特点^[9]。与抗体相比,具有化学合成或修饰简单、稳定性高、识别目标物范围广等优点^[10]。Aptamer 已作为一种分子识别元件与荧光、电化学和比色法等检测技术相结合用于生物传感分析^[11-13]。其中,荧光适配体传感器具有灵敏度高、操作简便和原位实时等优点,广泛用于真菌毒素、蛋白质等的分析检测^[14,15]。通过在适配体上同时修饰猝灭基团和荧光基团,利用适配体与目标物结合前后对荧光基团和猝灭基团距离的影响导致荧光强度的改变从而实现目标物的检测,荧光基团和猝灭基团配对的选择是构建这一类型荧光适配体传感器的难点所在。

为了克服这一难点,氧化石墨烯、金纳米粒子和腐殖酸等纳米材料被用于荧光适配体传感器的构建,利用纳米材料对荧光团高效的荧光猝灭作用,提高传感器的分析检测性能^[16-18]。但是,上述纳米材料或多或少具有价格昂贵、制备过程复杂、耗时等缺点。金属有机框架 (Metal-organic Framework, MOF) 材料作为一种新型多孔物质,是一种由金属离子和有机配体通过分子自组装而形成的具有周期性网络构造的晶体材料^[19,20]。由于其孔径可调、比表面积大、良好的化学稳定性,已广泛用于生物传感器的构建^[21,22]。UiO-66-NH₂ 是一类锆金属 MOF,以富电子的 2-氨基对苯二甲酸为配体,可通过 π - π 堆积作用吸附并猝灭荧光标记的单链 DNA^[23]。此外,UiO-66-NH₂ 合成条件温和、制备周期短、操作简便、成本低,且稳定性好,在荧光生物传感器的构建中具有良好的应用前景。基于此,本研究构建了基于 UiO-66-NH₂ 和四甲基罗丹明 (Tetramethylrhodamine, TAMRA) 标记的 aptamer (TAMRA-aptamer) 的荧光适配体传感器用于 AFB₁ 的快速检测,该荧光适配体传感器对 AFB₁ 具有高度选择性,不受其它真菌毒素的干扰,成功用于红酒中

AFB₁ 的测定。

1 材料与方法

1.1 主要仪器及试剂

Miniflex 600 X 射线衍射仪 (X-ray Diffraction, XRD), 日本理学株式会社; Zeiss Merlin Compact 场发射扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM), 德国蔡司公司; IS10 傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR), 美国热电公司 (Thermo); 209F1 Libra 热重分析仪 (Thermal Gravimetric Analyzer, TGA), 德国耐驰公司 (Netzsch); RF-6000 荧光分光光度计, 日本岛津公司。

四氯化锆 (ZrCl₄)、2-氨基对苯二甲酸、N,N-二甲基甲酰胺 (DMF)、无水乙醇、三(羟甲基)氨基甲烷 (Tris) 和盐酸 (HCl), 均购自国药集团化学试剂有限公司; 黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁)、黄曲霉毒素 M₁ (AFM₁)、赭曲霉毒素 A (OTA) 和玉米赤霉烯酮 (ZEN) 标准品, 均购自 Sigma-Aldrich 公司 (中国上海); TAMRA-aptamer (5'-TAMRA-AGT TGG GCA CGT GTT GTC TCT CTG TGT CTC GTG CCC TTC GCT AGG CCC ACA-3') 由生工生物工程 (上海) 股份有限公司合成并纯化。实验所用化学试剂均为分析纯, 实验用水为 Millipore-Q 系统纯化的二次水, 电阻率为 18.25 M Ω ·cm。

1.2 MOF 的制备

参照文献^[24,25]的方法制备 UiO-66-NH₂, 具体步骤如下: 称取 0.36 g 2-氨基对苯二甲酸和 0.46 g ZrCl₄ 溶于 25 mL DMF 中, 加入 2 mL 乙酸, 超声待固体完全溶解后, 转移至高压反应釜 (内衬为聚四氟乙烯) 中, 于 120 °C 烘箱中反应 24 h。自然冷却至室温后, 离心, 分别用 DMF 和无水乙醇各洗 3 次 (浅黄色果冻状), 真空干燥箱内 70 °C 干燥过夜, 得到浅黄色 UiO-66-NH₂ 固体。

1.3 AFB₁ 的检测

AFB₁ 的检测在 Tris-HCl 缓冲溶液 (10 mmol/L Tris, 120 mmol/L NaCl, 5 mmol/L KCl, pH 值 7.5) 中进行。首先, 将不同浓度 (0~20.00 μ g/mL) 的 UiO-66-NH₂ 加入 100.00 nmol/L TAMRA-aptamer 溶液中, 室温孵育 30 min, 在 560 nm 激发波长下测定样品的荧光光谱, 记录 583 nm 处的荧光强度, 选定 UiO-66-NH₂ 的最佳浓度。然后, 向上述溶液中分别加

入不同浓度(0、0.001、0.01、0.10、0.50、1.00、2.00、5.00、10.00、20.00、50.00、100.00、120.00、150.00 ng/mL)的 AFB₁ 标准溶液,于 37 °C 孵育 60 min,再次在 560 nm 激发波长下测定样品的荧光光谱,记录 583 nm 处的荧光强度。在选择性实验中,在相同条件下,分别将 50.00 ng/mL AFB₁、100.00 ng/mL 黄曲霉毒素 M₁ (AFM₁)、100.00 ng/mL 赭曲霉毒素 A (OTA) 和 100.00 ng/mL 玉米赤霉烯酮 (ZEN) 加入到上述溶液中,于 37 °C 孵育 60 min,在 560 nm 激发波长下测定样品的荧光光谱,记录 583 nm 处的荧光强度。

1.4 样品检测

红酒购于某连锁超市,将 1 mL 红酒用 Tris-HCl 缓冲溶液(10 mmol/L Tris, 120 mmol/L NaCl, 5 mmol/L KCl, pH 值 7.5) 稀释 50 倍,分别加入 5.00、10.00 和 50.00 ng/mL 的 AFB₁ 标准溶液,然后按照 1.3 的方法,将加标样品与 100.00 nmol/L TAMRA-aptamer 与 10.00 μg/mL UiO-66-NH₂ 的混合溶液于 37 °C 孵育 60 min,在 560 nm 激发波长下测定样品的荧光光谱,记录 583 nm 处的荧光强度,通过线性回归方程计算样品的加标回收率。

1.5 数据分析

每个试验进行 3 次平行处理,试验测定的数据采用 Origin 8 软件进行分析及绘图。

2 结果与讨论

2.1 MOF 的结构表征

利用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 和热重分析 (TGA) 对所制备的 UiO-66-NH₂ 进行表征。图 1a 中 XRD 图说明了 UiO-66-NH₂ 的晶体结构, $2\theta=7.68^\circ$ 、 8.80° 、 12.38° 、 17.42° 、 22.60° 和 26.00° 处的衍射峰分别反映了 UiO-66-NH₂ 的 (111)、(002)、(022)、(004)、(115) 和 (006) 晶面,与文献^[24]报道的 UiO-66-NH₂ 的 XRD 图谱一致。图 1b 是 UiO-66-NH₂ 的 SEM 图,由图中可以看出所制备的 UiO-66-NH₂ 纳米颗粒的粒径范围为 15~30 nm。图 1c 为 UiO-66-NH₂ 的 FT-IR 图,位于 3375 cm^{-1} 与 3460 cm^{-1} 处的峰归属于 N-H 的非对称与对称振动峰,位于 1388 cm^{-1} 和 1257 cm^{-1} 处的峰归属于 C-N 的伸缩振动峰,位于 $500\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 范围内的峰归属于 Zr-O 的振动峰。图 1d 为 UiO-66-NH₂ 的 TGA 图,失重的第一阶段 ($25\sim 250^\circ\text{C}$) 是由溶剂分子的损失引起的,失重的

第二阶段 ($250\sim 600^\circ\text{C}$) 是由有机框架的破坏引起的,最后,在高温区 ($600\sim 800^\circ\text{C}$) 由于产生了金属氧化物而趋于稳定。以上表征结果基本与文献^[24,25]报道一致,表明所制备的 MOF 为 UiO-66-NH₂。

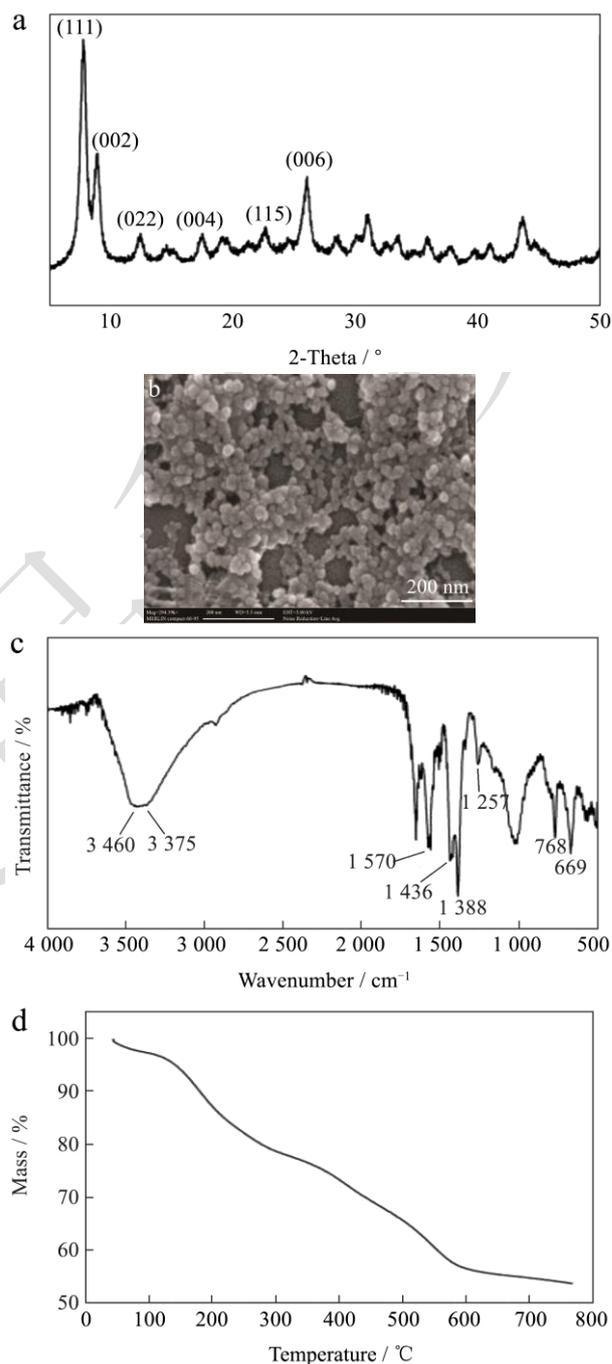


图 1 UiO-66-NH₂ 的 (a) XRD 图、(b) SEM 图、(c) FT-IR 图和 (d) TGA 图

Fig.1 (a) XRD diffraction, (b) SEM images, (c) FTIR spectra and (d) TGA curve of UiO-66-NH₂

2.2 实验原理

本研究构建的基于 MOF 的荧光适配体传感器检测 AFB₁ 的设计策略如图 2 所示。当没有 AFB₁ 存在时,

TAMRA-aptamer 通过 $\pi-\pi$ 堆积吸附到 UiO-66-NH₂ 表面, 由于 TAMRA 与 UiO-66-NH₂ 之间的光诱导电子转移作用^[26,27], TAMRA-aptamer 的荧光猝灭。加入目标物 AFB₁ 后, TAMRA-aptamer 特异性识别并结合 AFB₁, 使 aptamer 从单链状态转变为稳定的内环结构。由于内环结构与 UiO-66-NH₂ 之间的结合能力较弱, 光诱导电子转移作用被阻断, 因此, TAMRA-aptamer 荧光恢复。并且 TAMRA-aptamer 荧光恢复的程度与 AFB₁ 的浓度成正相关。

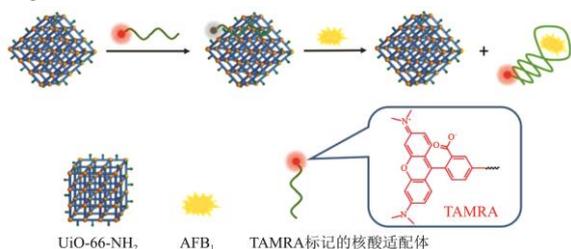


图2 荧光适配体传感器检测 AFB₁ 的设计原理图

Fig.2 Schematic diagram of fluorescent aptasensor for the determination of AFB₁

2.3 实验可行性

将 100.00 nmol/L TAMRA-aptamer 与 10 $\mu\text{g/mL}$ UiO-66-NH₂ 混合后, 分别测定有无 AFB₁ 存在时的荧光强度。如图 3 所示, 当 TAMRA-aptamer 与 UiO-66-NH₂ 混合后, 荧光显著降低, 加入 AFB₁ 后, 荧光明显恢复。

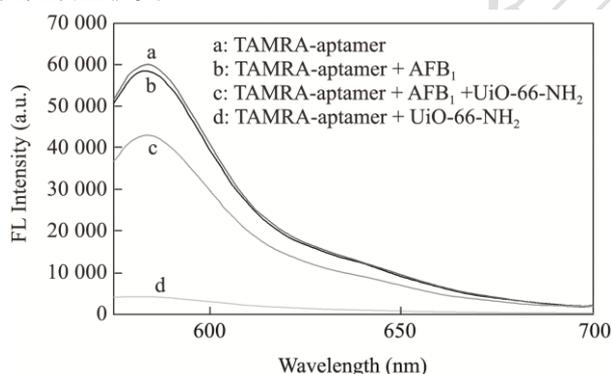


图3 不同条件下荧光适配体传感器的荧光强度

Fig.3 Fluorescence intensity of fluorescent aptasensor under different conditions

2.4 MOF 质量浓度的优化

在本研究所构建的荧光适配体传感器中, UiO-66-NH₂ 被用作荧光猝灭剂, 其浓度的大小将直接影响检测的灵敏度, 因此考察了 100.00 nmol/L TAMRA-aptamer 与不同质量浓度 UiO-66-NH₂ 混合后荧光强度的变化。如图 4 所示, 随着 UiO-66-NH₂ 质

量浓度的增大, TAMRA-aptamer 的荧光逐渐被猝灭, 当 UiO-66-NH₂ 质量浓度达到 10.00 $\mu\text{g/mL}$ 时, 荧光猝灭效率达到 92.40%, UiO-66-NH₂ 质量浓度继续增大至 20.00 $\mu\text{g/mL}$, 荧光猝灭效率没有进一步显著的增大。因此, 选取 10.00 $\mu\text{g/mL}$ 为荧光适配体传感器中 UiO-66-NH₂ 的最佳质量浓度。

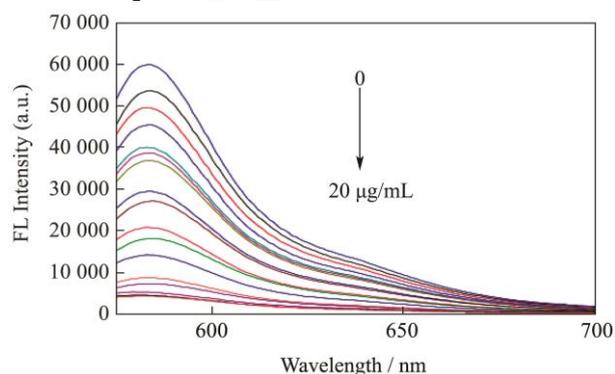


图4 UiO-66-NH₂对 TAMRA-aptamer 的荧光猝灭

Fig.4 Fluorescence quenching of TAMRA-aptamer by UiO-66-NH₂

2.5 AFB₁ 检测条件优化

为实现荧光适配体传感器的最佳检测效果, 考察了缓冲溶液的 pH 以及反应时间和温度对荧光传感性能的影响。将 100.00 ng/mL AFB₁ 加入到 100.00 nmol/L TAMRA-aptamer 与 10.00 $\mu\text{g/mL}$ UiO-66-NH₂ 的混合溶液中, 当缓冲溶液的 pH 值在 6.0~8.5 的范围内变化时, 荧光强度在 pH 值为 7.5 时最强, 可能是 pH 值为 7.5 时目标物与适配体的结合能力最强, 因此, 缓冲溶液的 pH 值固定为 7.5。核酸适配体与目标物的结合过程中, 反应温度是影响结合程度的主要因素。将 100.0 ng/mL AFB₁ 加入到 100.00 nmol/L TAMRA-aptamer 与 10.00 $\mu\text{g/mL}$ UiO-66-NH₂ 的混合溶液中, 分别在 20、25、30、37、40 和 45 $^{\circ}\text{C}$ 反应 60 min。随着温度的升高, 荧光强度逐渐增强, 当温度为 37 $^{\circ}\text{C}$ 时, 荧光强度基本达到最大。温度继续升高, 荧光强度又有所降低。因此, 后续实验将反应温度控制在 37 $^{\circ}\text{C}$ 。核酸适配体与目标物的结合过程同样受反应时间的影响, 将 100 ng/mL AFB₁ 加入到 100.00 nmol/L TAMRA-aptamer 与 10.00 $\mu\text{g/mL}$ UiO-66-NH₂ 的混合溶液中, 于 37 $^{\circ}\text{C}$ 分别反应 10、20、30、40、50、60、70、80 和 90 min。随着反应时间的延长, 荧光强度逐渐增强, 当反应时间为 60 min 时, 荧光强度达到峰值, 继续延长反应时间, 荧光强度没有明显的改变, 后续反应时间控制为 60 min。

2.6 线性回归分析及检测限

在最佳的实验条件下,使用所构建的荧光适配体传感器检测不同质量浓度的 AFB₁。如图 5 所示,在 0~150.00 ng/mL 的范围内,随着 AFB₁ 质量浓度的增加,荧光强度逐渐增强。当 AFB₁ 的质量浓度在 1.00~100.00 ng/mL 范围内时,荧光强度与 AFB₁ 的质量浓度呈现良好的线性关系 ($R^2=0.994$),线性回归方程为 $y=268.80x+12\ 994.90$ (图 5),当信噪比 (S/N) 为 3 时,AFB₁ 的检测限 (LOD) 为 0.50 ng/mL。本方法与文献中已报道的其他 AFB₁ 荧光适配体传感器具有相当的检测限和线性范围(如表 1 所示),能够满足 AFB₁ 的灵敏检测要求。

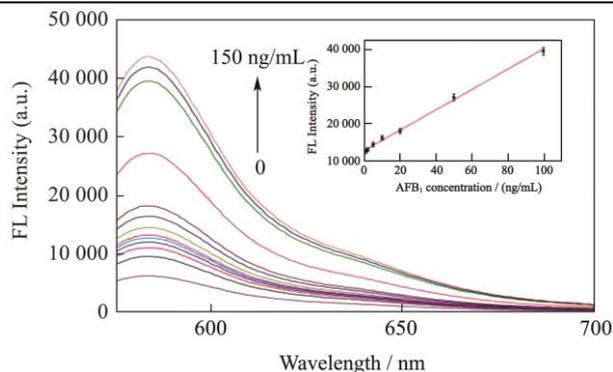


图 5 不同质量浓度 AFB₁ 孵育后荧光适配体传感器的荧光光谱图

Fig.5 Fluorescence spectra of fluorescent aptasensor after incubation with different concentrations of AFB₁

表 1 不同 AFB₁ 荧光适配体传感器的比较

Table 1 Comparison of different fluorescent aptasensors for AFB₁

探针	线性范围/(ng/mL)	检测限/(ng/mL)	文献
GO/Alexa Fluor 488 aptamer	0.1~500	0.15	[28]
TPE-Z/GO/aptamer	0~3.0	0.25	[29]
AuNPs/Aptamer-conjugated QDs	3.1~124.8	1.06	[30]
GO/CdTe aptamer	1.0~100.0	0.31	[31]
MSN-NH ₂ /Rh6G/aptamer	0.5~50	0.13	[32]
UiO-66-NH ₂ /TAMRA-aptamer	1.00~100.00	0.50	本方法

2.7 传感器的特异性分析

本研究考察了所构建的传感器对 50.00 ng/mL AFB₁ 以及 100.00 ng/mL AFM₁、OTA 和 ZEN 的荧光响应。如图 6 所示,当加入 AFB₁ 时,传感体系荧光显著增强,而相同条件下加入其它真菌毒素时,荧光强度没有明显的变化。表明该传感器对 AFB₁ 选择性良好,其它真菌毒素对 AFB₁ 的测定无明显干扰。

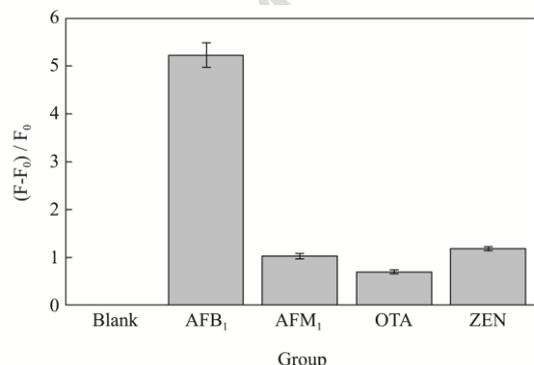


图 6 荧光适配体传感器对不同真菌毒素的荧光响应

Fig.6 Fluorescence response of fluorescent aptasensor with regard to different mycotoxins

2.8 加标回收实验

为验证本研究构建的荧光适配体传感器在实际样

品中的分析应用能力,采用标准加入法测定了红酒中的 AFB₁。红酒购于某连锁超市,稀释 50 倍后分别加入 5.00、10.00 和 50.00 ng/mL 的 AFB₁ 标准溶液,使用上述荧光传感器进行检测。从表 2 可以看出,AFB₁ 的加标回收率在 90.00%~101.00% 之间,说明该荧光适配体传感器可以用于红酒中 AFB₁ 的检测。

表 2 红酒中不同浓度 AFB₁ 检测

Table 2 Determination results of AFB₁ in red wine (n=3)

样品	加标浓度/(ng/mL)	检测浓度/(ng/mL±SD)	回收率/%
1	5.00	4.60±0.39	92.00
2	10.00	9.00±0.53	90.00
3	50.00	50.50±0.86	101.00

3 结论

本研究利用 UiO-66-NH₂ 和 TAMRA-aptamer 构建了一种荧光适配体传感器用于 AFB₁ 的检测。UiO-66-NH₂ 能猝灭 TAMRA-aptamer 的荧光,当 TAMRA-aptamer 与 AFB₁ 特异性识别并结合后,其荧光恢复。在 1.00~100.00 ng/mL 质量浓度范围内,所构建的荧光适配体传感器的荧光强度与 AFB₁ 的浓度呈现良好的线性关系,检测限为 0.50 ng/mL,样品添加回收率为 90.00%~101.00%。该荧光适配体传感器对 AFB₁ 具有高度选择性,不受其它真菌毒素的干扰,方

法操作简便、灵敏度高,成功用于红酒中 AFB₁ 的检测。与其它检测方法相比,该荧光适配体传感器方法操作简便、成本低,具有良好的选择性和检测灵敏度。

参考文献

- [1] Hussein H S, Brasel J M. Toxicity, metabolism, and impact of mycotoxins on humans and animals [J]. *Toxicology*, 2001, 167(2): 101-134.
- [2] Ismail A, Gonçalves B L, De Neeff D V, et al. Aflatoxin in foodstuffs: Occurrence and recent advances in decontamination [J]. *Food Research International*, 2018, 113: 74-85.
- [3] Chauhan R, Singh J, Sachdev T, et al. Recent advances in mycotoxins detection [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 81: 532-545.
- [4] 徐艳群,罗自生,徐庭巧,等.免疫亲和柱净化-大体积流通池高效液相色谱法同时检测食品中 6 种黄曲霉毒素[J].*现代食品科技*,2015,31(10):301-306.
- [5] Guo W, Yang M, Kong W, et al. Multi-class mycotoxins analysis in *Angelica sinensis* by ultra fast liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography B Analytical Technologies in the Biomedical & Life Sciences*, 2015, 988(15): 175-181.
- [6] 能静,王玉洁,郝侃,等.金磁纳米颗粒的制备及其在表面增强拉曼光谱快速检测黄曲霉毒素 B₁ 中的应用[J].*现代食品科技*,2017,33(1):145-151.
- [7] 王序,卢迪莎,曾道平,等.时间分辨荧光免疫层析法定量检测谷物中黄曲霉毒素 B₁ 和玉米赤霉烯酮残留[J].*现代食品科技*,2021,37(4):252-261.
- [8] 黄周梅,武旭悦,黄金发,等.基于金属有机骨架(ZIF-8)的酶联免疫法灵敏检测米粉中的黄曲霉毒素 B₁[J].*现代食品科技*,2022,38(3):299-306.
- [9] Du Y, Li B, Wang E. "Fitting" makes "sensing" simple: label-free detection strategies based on nucleic acid aptamers [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2013, 46(2): 203-213.
- [10] Yang M, Liu G, Mehedi H M, et al. A universal SERS aptasensor based on DTNB labeled GNTs/Ag core-shell nanotriangle and CS-Fe₃O₄ magnetic-bead trace detection of Aflatoxin B₁ [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2017, 986: 122-130.
- [11] Li Y, Zhao Q. Aptamer structure switch fluorescence anisotropy assay for small molecules using streptavidin as an effective signal amplifier based on proximity effect [J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(11): 7379-7384.
- [12] Wu J, Zeng L, Li N, et al. A wash-free and label-free colorimetric biosensor for naked-eye detection of aflatoxin B₁ using G-quadruplex as the signal reporter [J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 125034.
- [13] Ge J, Zhao Y, Li C, et al. Versatile electrochemiluminescence and electrochemical "on-off" assays of methyltransferases and aflatoxin B₁ based on a novel multifunctional DNA nanotube [J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(5): 3546-3554.
- [14] Li Y, Wang J, Zhang B, et al. A rapid fluorometric method for determination of aflatoxin B₁ in plant-derived food by using a thioflavin T-based aptasensor [J]. *Microchimica Acta*, 2019, 186(4): 214.
- [15] Zhang C, Dou X, Zhang L, et al. A rapid label-free fluorescent aptasensor picogreen-based strategy for aflatoxin B₁ detection in traditional Chinese medicines [J]. *Toxins*, 2018, 10(3): 101.
- [16] Li Z, Xue N, Ma H, et al. An ultrasensitive and switch-on platform for aflatoxin B₁ detection in peanut based on the fluorescence quenching of graphene oxide-gold nanocomposites [J]. *Talanta*, 2018, 181: 346-351.
- [17] Guo M, Hou Q, Waterhouse G I N, et al. A simple aptamer-based fluorescent aflatoxin B₁ sensor using humic acid as quencher [J]. *Talanta*, 2019, 205: 120131.
- [18] Wang B, Chen Y, Wu Y, et al. Aptamer induced assembly of fluorescent nitrogen-doped carbon dots on gold nanoparticles for sensitive detection of AFB₁ [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 78: 23-30.
- [19] Furukawa H, Cordova K E, O'keeffe M, et al. The chemistry and applications of metal-organic frameworks [J]. *Science*, 2013, 341(6149): 1230444.
- [20] Cui Y, Li B, He H, et al. Metal-organic frameworks as platforms for functional materials [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2016, 49(3): 483-493.
- [21] 林京宇,姜信欣,余嘉睿,等.金属有机框架固定化乙酰胆碱酯酶传感器用于检测草甘膦[J].*分析化学*,2021,49(11): 1834-1844.
- [22] 倪美君,赵鹏程,谢轶羲,等.基于 MOF-199/多壁碳纳米管纳米复合材料的对乙酰氨基苯酚电化学传感器[J].*分析科学学报*,2021,37(4):515-521.
- [23] He C, Lu K, Liu D, et al. Nanoscale metal-organic frameworks for the co-delivery of cisplatin and pooled siRNAs to enhance therapeutic efficacy in drug-resistant ovarian cancer cells [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(14): 5181-5184.
- [24] Luu C L, Nguyen T, Nguyen T, et al. Synthesis, characterization and adsorption ability of UiO-66-NH₂ [J].

- Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 2015, 6(2): 025004.
- [25] Zhao Y, Wang D, Wei W, et al. Effective adsorption of mercury by Zr(IV)-based metal-organic frameworks of UiO-66-NH₂ from aqueous solution [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(6): 7068-7075.
- [26] Zhang H T, Zhang J W, Huang G, et al. An amine-functionalized metal-organic framework as a sensing platform for DNA detection [J]. Chemical Communications, 2014, 50(81): 12069-12072.
- [27] Wang H S, Liu H L, Wang K, et al. Insight into the unique fluorescence quenching property of metal-organic frameworks upon DNA binding [J]. Analytical Chemistry, 2017, 89(21): 11366-11371.
- [28] 王琦,杨庆利,吴薇.基于氧化石墨烯的荧光适配体传感器检测食品中真菌毒素[J].食品科学,2021,42(24):318-322.
- [29] Jia Y, Wu F, Liu P, et al. A label-free fluorescent aptasensor for the detection of aflatoxin B₁ in food samples using AIEgens and graphene oxide [J]. Talanta, 2019, 198: 71-77.
- [30] Sabet F S, Hosseini M, Khabbaz H, et al. FRET-based aptamer biosensor for selective and sensitive detection of aflatoxin B₁ in peanut and rice [J]. Food Chemistry, 2017, 220: 527-532.
- [31] Lu Z, Chen X, Wang Y, et al. Aptamer based fluorescence recovery assay for aflatoxin B₁ using a quencher system composed of quantum dots and graphene oxide [J]. Microchimica Acta, 2015, 182(3): 571-578.
- [32] Tan H, Ma L, Guo T, et al. A novel fluorescence aptasensor based on mesoporous silica nanoparticles for selective and sensitive detection of aflatoxin B₁ [J]. Analytica Chimica Acta, 2019, 1068: 87-95.