DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250834

·论　著·

基于核酸适配体和金纳米粒子的比色传感器快速检测石房蛤毒素

简淑华[1]，陆　峰[1,2*]
1. 福建中医药大学药学院，福州 350122
2. 海军军医大学（第二军医大学）药学系，上海 200433

［摘要］ **目的**　建立基于核酸适配体和金纳米粒子的比色传感器，以快速定量检测石房蛤毒素（STX）。**方法**　在金纳米粒子溶液中加入适配体，孵育一段时间，使适配体吸附在金纳米粒子表面；接着加入不同浓度的 STX 溶液竞争结合适配体；最后添加适量 NaCl 溶液诱导金纳米粒子聚集。通过观察溶液颜色的变化及采用紫外可见分光光度计测定 650 nm 和 520 nm 波长处的吸光度比值（A_{650}/A_{520}），建立 STX 的定量检测方法。在最佳实验条件下，向预处理后的海水和贝类样品中分别加入不同浓度的 STX 溶液，计算回收率及 RSD。**结果**　当 NaCl 浓度为 45 mmol/L、适配体浓度为 30 nmol/L、NaCl 和金纳米粒子的反应时间为 12 min、适配体和金纳米粒子的反应时间为 10 min、适配体和 STX 的反应时间为 30 min 时，反应体系的 A_{650}/A_{520} 与 STX 的浓度在 25～1 500 nmol/L 范围内呈现良好的线性关系，线性方程为 $y=0.000\ 7C_{STX}+0.260\ 7$（$R^2=0.995\ 5$），检测限为 8.6 nmol/L。在海水中，本传感器的回收率为 99.6%～111.2%，RSD 为 1.6%～12.1%；在贝类中 STX 的回收率为 103.0%～107.9%，RSD 为 2.6%～7.6%。**结论**　所建立的金纳米粒子－核酸适配体比色传感器可以定量检测 STX，且具有较高的灵敏度和较宽的线性范围。

［关键词］ 石房蛤毒素；金纳米粒子；核酸适配体；比色传感器
［引用本文］ 简淑华，陆峰 . 基于核酸适配体和金纳米粒子的比色传感器快速检测石房蛤毒素［J］. 海军军医大学学报，2026，47（10）：1296-1303. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250834.

A colorimetric sensor based on aptamers and gold nanoparticles for rapid detection of saxitoxin

JIAN Shuhua[1], LU Feng[1,2*]
1. School of Pharmacy, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, Fujian, China
2. School of Pharmacy, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

［**Abstract**］ **Objective**　To develop a colorimetric sensor based on aptamers (APTs) and gold nanoparticles (AuNPs) for the rapid and quantitative detection of saxitoxin (STX). **Methods**　APTs were added to an AuNP solution and incubated for a period of time to allow the APTs to adsorb onto the surface of AuNPs; then different concentrations of STX were added to compete with AuNPs for APT binding; finally, an appropriate amount of sodium chloride (NaCl) was added to induce AuNP aggregation. A quantitative method for STX detection was established by observing the color change and measuring the absorbance ratio at 650 nm and 520 nm (A_{650}/A_{520}) by an ultraviolet-visible spectrophotometer. Under optimal conditions, different concentrations of STX solution were added to the pretreated seawater and shellfish samples, and the recovery rate and relative standard deviation (RSD) were calculated. **Results**　When the concentration of NaCl was 45 mmol/L, the concentration of aptamer was 30 nmol/L, the reaction time of NaCl and AuNPs was 12 min, the reaction time of aptamer and AuNPs was 10 min, and the reaction time of aptamer and STX was 30 min, the A_{650}/A_{520} in the reaction system showed a good linear relationship with the concentration of STX in the range of 25-1500 nmol/L. The linear equation was $y=0.000\ 7C_{STX}+0.260\ 7$ ($R^2=0.995\ 5$), with a detection limit of 8.6 nmol/L. In seawater, the recoveries were 99.6%-111.2%, with RSDs of 1.6%-12.1%. In shellfish, the recoveries were 103.0%-107.9%, with RSDs of 2.6%-7.6%. **Conclusion**　The established AuNP-aptamer colorimetric sensor can quantitatively detect STX with high sensitivity and wide linear range.

［**Key words**］ saxitoxin; gold nanoparticles; aptamers; colorimetric sensor
［**Citation**］ Jian S, Lu F. A colorimetric sensor based on aptamers and gold nanoparticles for rapid detection of saxitoxin[J]. Acad J Naval Med Univ, 2026, 47(10): 1296-1303. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250834.

［收稿日期］ 2025-12-03　　［接受日期］ 2026-03-05
［基金项目］ 国家自然科学基金面上项目（82273894）. Supported by General Program of National Natural Science Foundation of China (82273894).
［作者简介］ 简淑华，硕士 . E-mail: jsh77888@163.com
*通信作者（Corresponding author）. E-mail: fenglu@smmu.edu.cn

石房蛤毒素（saxitoxin，STX）溶液是一种剧毒的海洋神经毒素，主要来源于海洋甲藻和淡水蓝藻，其毒性可以通过食物链在海洋生物体内传递、富集，同时 STX 的理化性质稳定，常规的烹饪手段很难将其毒性降解，给人类食品安全和公共卫生带来了严重的威胁。

适配体是通过指数富集配体系统进化技术筛选的一种具有高亲和力的单链DNA或RNA序列[1]，其能够特异性识别金属离子、蛋白质、有机小分子、病原体等物质。与传统的抗体相比，适配体具有容易合成、稳定性高、耐受高温、易于进行化学修饰与功能化等优势[2]。目前以核酸适配体为识别元件，结合比色法、荧光法、表面增强拉曼散射技术的光学、电化学生物传感器，具有操作简单、灵敏度高、特异性强等优点，已被广泛应用于 STX 的检测[2-4]。

在比色传感器中金纳米粒子因其具有独特的光学性质而被广泛应用于生物医药、环境监测、临床诊断、食品安全等领域[5-7]。具体而言，金纳米粒子的光学特性主要是由于局部表面等离子体现象而产生的[7]，当可见光照射到尺寸小于光波长的金纳米粒子时，会激发其自由电子相对于金属晶格产生协同振荡，从而对特定波长的光产生强烈的吸收与散射，这种效应使其溶液呈现出不同的颜色。并且这种颜色的变化与金纳米粒子的尺寸和形状、溶剂、温度等因素密切相关，如粒径 1～100 nm 的金纳米粒子会由棕色变化为橙色、红色，最后变为紫色、蓝色；此外，13～20 nm 的金纳米粒子均匀分散在溶液中时，溶液颜色一般呈酒红色、粉红色，若在外界条件影响下发生聚集，颜色则变为蓝色[8]。在基于核酸适配体和金纳米粒子的比色传感器中，金纳米粒子关键特性是其聚集诱导变色效应，单个分散的金纳米粒子在外部条件下相互靠近发生聚集，等离子体场会发生耦合，导致局部表面等离子体共振（localized surface plasmon resonance，LSPR）吸收峰红移、谱带展宽，宏观上则表现为溶液由原来的红色变为蓝色。这一明显且肉眼可见的颜色变化，为发展无需复杂仪器的可视化比色检测提供了理想的信号输出机制。

本研究基于核酸适配体和金纳米粒子，以 NaCl 为颜色诱导剂构建检测 STX 的比色传感器，实验原理如图 1 所示。通过柠檬酸钠还原法制备得到的金纳米粒子表面带负电荷，由于不同的金纳米粒子之间相互排斥无法靠近，因此在分散状态下能稳定存在，呈现红色。当加入 NaCl 溶液后，高浓度的盐离子屏蔽了金纳米粒子之间的负电荷，诱导金纳米粒子聚集，溶液的颜色由红色变成蓝色。加入核酸适配体后，由于静电作用，适配体会吸附在金纳米粒子表面，形成保护层，从而阻止盐离子进入，避免金纳米粒子聚集变色。加入 STX 之后，适配体优先与 STX 发生特异性结合，形成稳定复合物，此时金纳米粒子失去保护，在盐离子的诱导下聚集变色，并且根据体系中 STX 浓度的不同金纳米粒子会发生不同程度的聚集。基于此构建了金纳米粒子－适配体比色传感器用于 STX 的检测。

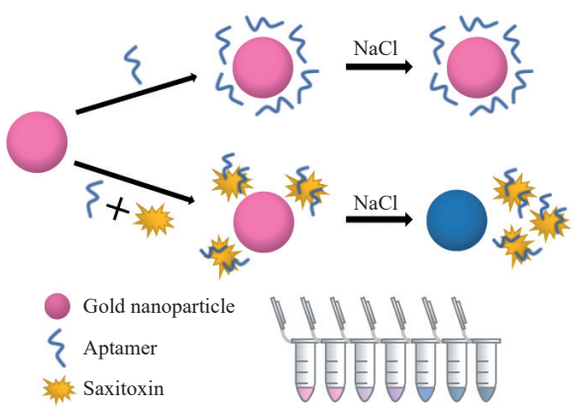

图 1　金纳米粒子－适配体比色传感器原理示意图

Fig 1　Gold nanoparticle-aptamer colorimetric sensor schematic diagram

1　材料和方法

1.1　*主要实验仪器*　NanoDrop One 超微量紫外可见分光光度计（美国赛默飞世尔科技公司），HA-202M 型电子天平（日本爱安德公司），HRC-16K 型台式高速冷冻离心机（上海泰腾科技有限公司），ZNCL-TS500ML 型智能磁力搅拌器（巩义市予华仪器有限责任公司），Vortex-Genie2 型多功能涡旋混匀器（美国科学工业公司），AutoVapS60 型氮吹仪（美国 ATR-Tech 公司），Zetasizer nanoZS 型粒径电位测定仪（英国马尔文仪器有限公司），HT7700 Exalens 型透射电子显微镜（日本日立公司）。

1.2　*实验试剂与耗材*　$Na_3C_6H_5O7.2H_2O$、$HAuCl_4$、NaCl（上海泰坦科技股份有限公司），去离子水、STX、软骨藻酸（domoic acid，DA）、大田软海

绵酸（okadaic acid，OA）（台湾藻研有限公司），河豚毒素（tetrodotoxin，TTX）［中洋生物科技（上海）股份有限公司］。除另有说明，本实验所用的试剂均为分析纯，可以直接使用，无需进一步纯化。

1.3　寡核苷酸序列　本研究所用STX特异性适配体73a序列为5′-TGGGGAGTAGGGACAGGAGGT-GGGCAG-3′，由生工生物工程（上海）股份有限公司合成并纯化。

1.4　金纳米粒子的制备及表征　本实验通过柠檬酸钠还原法制备金纳米粒子[9]。首先将三颈烧瓶用王水浸泡24 h，去离子水冲洗干净后烘干备用。在三颈烧瓶中分别加入4.2 mL的$HAuCl_4$溶液（1 g/100 mL）和95.8 mL的去离子水，将三颈烧瓶置于搅拌器上，设置搅拌器温度为240 ℃，加热至液体刚冒泡时，打开搅拌器（800 r/min），使转子在液面的正中间，保证溶液的均一性；在高速搅拌下一次性快速加入$Na_3C_6H_5O7.2H_2O$溶液10 mL（3.88×10^{-2} mol/L），约3 min溶液由淡黄色变成酒红色；回流条件下继续加热25 min，接着在室温下继续搅拌使溶液冷至室温，于4 ℃冰箱存放。通过紫外可见分光光度计、透射电子显微镜以及粒径仪对金纳米粒子进行表征。

1.5　可行性实验设计　为验证该比色传感器检测STX的可行性，设计4组实验：（1）金纳米粒子组（空白对照），用于测定分散态金纳米粒子的初始紫外吸收峰位与溶液颜色；（2）金纳米粒子＋NaCl组，用于验证NaCl单独作用是否会诱发金纳米粒子聚集；（3）金纳米粒子＋适配体＋NaCl组，用于考察适配体能否有效保护金纳米粒子，抵御NaCl诱导的颗粒聚集；（4）金纳米粒子＋适配体＋STX＋NaCl组，用于探究靶标STX存在时，适配体是否因与STX特异性结合而脱离金纳米粒子表面，进而引发体系溶液颜色及吸光度比值改变。

1.6　基于核酸适配体和金纳米粒子定量检测STX的方法建立　在一系列1.5 mL离心管中分别加入70 μL金纳米粒子、30 nmol/L适配体、96 μL去离子水，混合均匀后室温条件下反应10 min。然后加入10 μL不同浓度的STX溶液，充分混合均匀后反应30 min，再加入45 mmol/L NaCl溶液静置12 min，观察溶液颜色变化并拍照记录，随后采用紫外可见分光光度计检测，记录650 nm和520 nm波长处的吸光度。

1.7　实验条件优化　为获得最佳传感性能，以金纳米粒子溶液的颜色变化及在650 nm和520 nm波长处的吸光度比值（A_{650}/A_{520}）作为评价指标，主要对能影响本传感器性能的实验条件进行优化，包括NaCl溶液的浓度（0、20、25、30、35、40、45、50 mmol/L）、金纳米粒子和NaCl的反应时间（2、4、6、8、10、12、14、16 min）、适配体的浓度（0、10、20、30、40、50、60 nmol/L）、金纳米粒子和适配体的反应时间（2、4、6、8、10、12、14 min）、适配体和STX的反应时间（5、10、15、20、25、30、35 min）。

1.8　方法学验证　（1）特异性：最佳实验条件下，在离心管中依次加入70 μL金纳米粒子、30 nmol/L适配体和96 μL去离子水，混合均匀后室温反应10 min；然后分别在离心管中加入1 μmol/L STX、OA、TTX、DA以及这4种毒素的混合物，混合均匀后室温反应30 min；最后加入45 mmol/L NaCl溶液静置12 min。观察各溶液颜色变化并拍照记录，随后采用紫外可见分光光度计测定吸光度。（2）线性范围与检测限：在最佳实验条件下检测不同浓度（25、50、250、500、750、1 000、1 500 nmol/L）STX标准溶液，观察溶液颜色变化并拍照记录，随后采用紫外可见分光光度计测定吸光度。以STX浓度为横坐标，A_{650}/A_{520}为纵坐标绘制标准曲线。平行测定10份空白样品的A_{650}/A_{520}，以空白样品标准偏差的3倍与线性方程斜率的比值计算检测限。（3）准确度与精密度：用0.22 μm滤膜将海水过滤后，用去离子水稀释30倍后备用。根据文献[10]方法对贝类样品进行预处理，预处理后的贝类样品用去离子水稀释30倍，存放于4 ℃冰箱备用。在最佳实验条件下，向预处理后的海水和贝类样品中分别加入不同浓度（150、800、1 300 nmol/L）STX溶液，每个浓度分别制备9份样品，根据1.6节的实验步骤测吸光度。

2　结　果

2.1　金纳米粒子的表征　如图2A所示，所合成金纳米粒子的紫外可见光谱在400～750 nm范围内出现单峰，最大吸收峰出现在520 nm左右，峰形对称且峰宽较窄，说明合成的金纳米粒子没有出现聚集

现象，分散性较好，能稳定存在，粒径均一。透射电子显微镜结果（图 2B）显示，金纳米粒子近似球形，大部分分散良好；经粒径统计分析（图 2C），其平均粒径为（12.34±0.80）nm（n=30）。通过动态光散射粒径仪进一步测得金纳米粒子的平均粒径为 17.83 nm，多分散指数为 0.268（图 2D）。

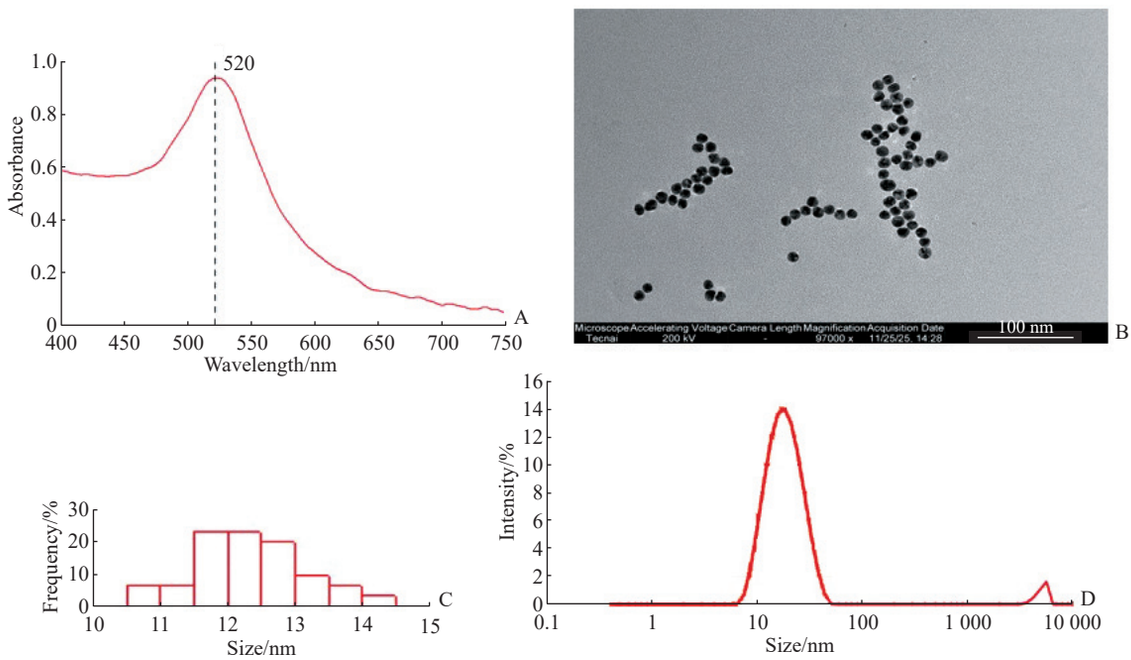

图 2　柠檬酸钠还原法合成金纳米粒子的表征

Fig 2　Characterization of gold nanoparticles synthesized by sodium citrate reduction method

A: Ultraviolet-visible absorption spectra of gold nanoparticles; B: Transmission electron microscopy of gold nanoparticles; C: Transmission electron microscope-based particle size distribution histogram of gold nanoparticles; D: Dynamic light scattering hydrodynamic size distribution of gold nanoparticles.

2.2　可行性实验结果　紫外可见吸收光谱（图 3）显示，金纳米粒子在 520 nm 波长处有唯一的吸收峰（黑色曲线），加入 NaCl 后，在盐离子的诱导下金纳米粒子发生聚集，溶液变成蓝色，与金纳米粒子组相比，520 nm 波长处的吸光度明显降低，同时 650 nm 波长处的吸光度上升（蓝色曲线）。当金纳米粒子、适配体及 NaCl 同时存在时，适配体包裹在金纳米粒子表面，有效避免了因盐离子诱导而引起的聚集，溶液颜色仍为红色，但此时 520 nm 波长处的吸光度（红色曲线）相较于体系中只有金纳米粒子时出现了轻微的下降，可能是有少部分金纳米粒子未被适配体包裹出现了轻微的聚集。当金纳米粒子、适配体、STX 及 NaCl 同时存在时，适配体从金纳米粒子表面脱落，与 STX 发生特异性结合，金纳米粒子失去保护后溶液由红色变为蓝紫色，与金纳米粒子＋适配体＋NaCl 组相比，520 nm 波长处的吸光度下降（绿色曲线），650 nm 波长处的吸光度上升，且 520 nm 波长处的吸收峰发生了轻微的偏移。说明观察通过金纳米粒子是否聚集产生的颜色变化以及 A_{650}/A_{520}，可以实现对 STX 的定量检测。

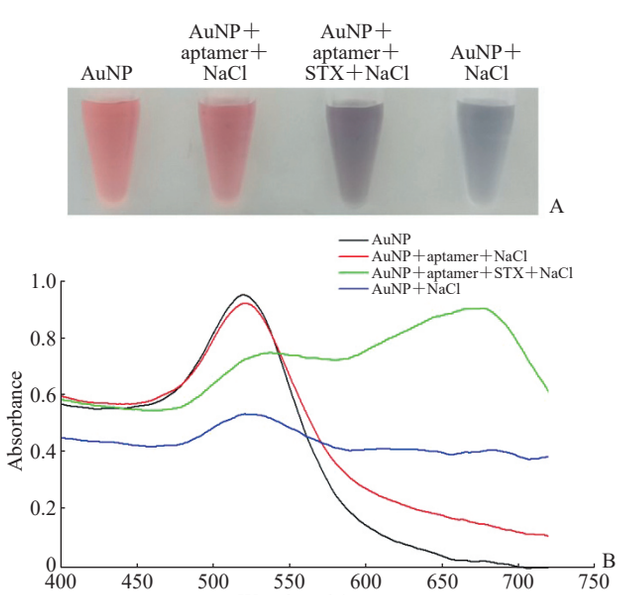

图 3　不同实验组的溶液颜色（A）及紫外可见吸收光谱图（B）

Fig 3　Color of solutions (A) and ultraviolet-visible absorption spectra (B) of different experimental groups

AuNP: Gold nanoparticle; STX: Saxitoxin.

2.3　最佳实验条件

2.3.1　NaCl 浓度及其反应时间　如图 4 所示，随着 NaCl 溶液浓度（0、20、25、30、35、40、45、50 mmol/L）升高，金纳米粒子溶液由红色逐渐向蓝紫色转变（图 4A）；当 NaCl 浓度达到 45 mmol/L 时，A_{650}/A_{520} 接近最大值，继续增加 NaCl 浓度，该比值基本保持稳定（图 4B）。并且，在金纳米粒子溶液中加入 NaCl 后，随着反应时间的增加，A_{650}/A_{520} 先是逐渐增加，在 12～16 min 时 A_{650}/A_{520} 保持稳定（图 4C）。

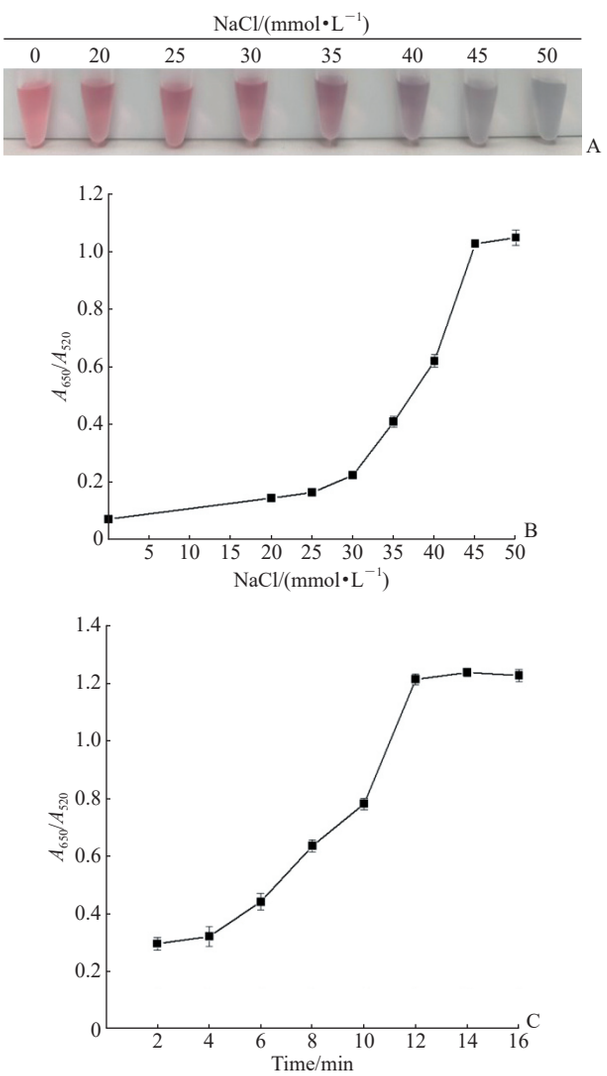

图 4　NaCl 溶液浓度及其与金纳米粒子反应时间的优化

Fig 4　Optimization of NaCl concentration and reaction time between NaCl and gold nanoparticles

A: Photographs of gold nanoparticles at different NaCl concentrations; B: Plot of absorbance ratio (A_{650}/A_{520}) as a function of NaCl concentration; C: Plot of absorbance ratio (A_{650}/A_{520}) as a function of reaction time during NaCl-induced gold nanoparticle aggregation. $n=3$, $\bar{x}\pm s$.

2.3.2　适配体浓度及其反应时间　当适配体浓度在 0～30 nmol/L 区间时，金纳米粒子＋适配体＋NaCl 溶液颜色从蓝色逐渐变为红色，A_{650}/A_{520} 逐渐降低，当适配体浓度大于 30 nmol/L 后该溶液颜色均为红色，且 A_{650}/A_{520} 基本保持不变（图 5A、5B）。由图 5C 可见，适配体与金纳米粒子反应时间在 2～10 min 区间时，A_{650}/A_{520} 随时间延长逐渐下降，反应时间达到 10 min 后，A_{650}/A_{520} 趋于平稳，基本保持稳定。

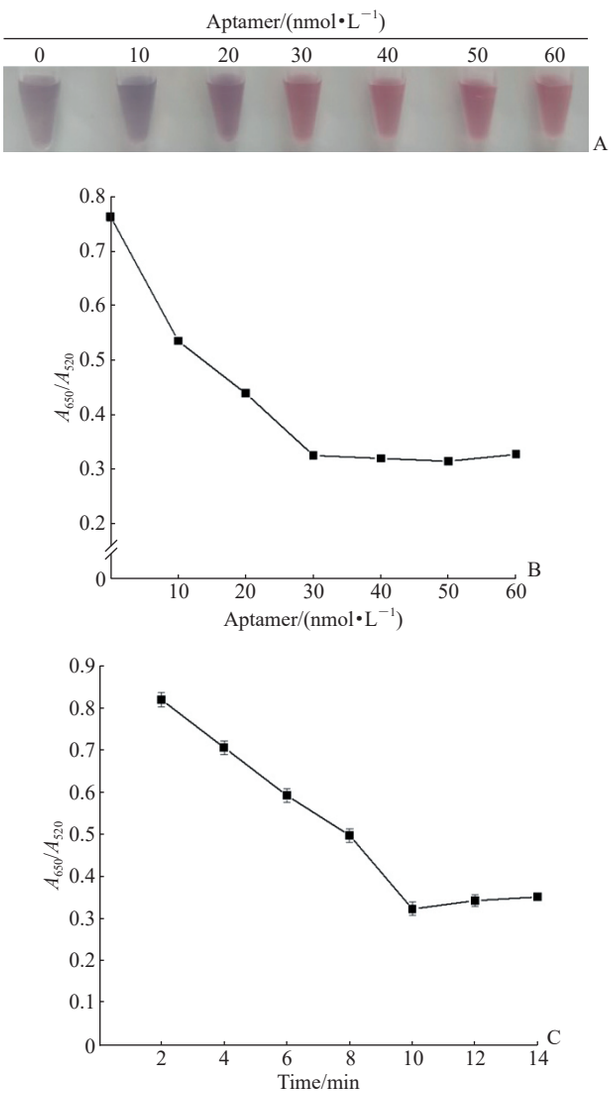

图 5　适配体浓度及适配体与金纳米粒子反应时间的优化

Fig 5　Optimization of aptamer concentration and reaction time between aptamer and gold nanoparticles

A: Photographs of gold nanoparticles at different aptamer concentrations; B: Plot of absorbance ratio (A_{650}/A_{520}) as a function of aptamer concentration; C: Plot of absorbance ratio (A_{650}/A_{520}) as a function of reaction time during aptamer-gold nanoparticle interaction. $n=3$, $\bar{x}\pm s$.

2.3.3　适配体与 STX 的反应时间　当适配体与 STX 反应时间为 30 min 时，A_{650}/A_{520} 达最大值（图 6）。

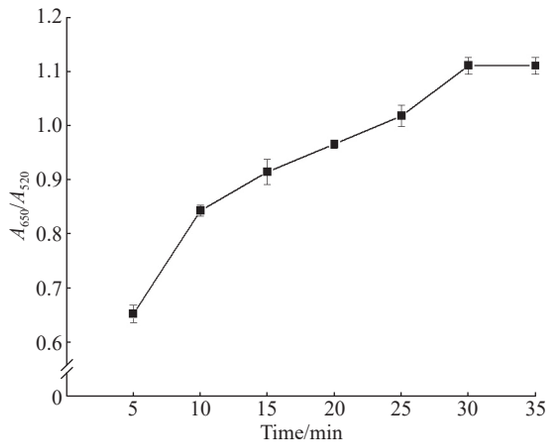

图 6　适配体与 STX 反应时间的优化

Fig 6　Optimization of reaction time between aptamer and STX

n=3, $\bar{x}\pm s$. STX: Saxitoxin.

2.4　方法学验证结果

2.4.1　特异性　加入 STX 的体系溶液由红色变为蓝色，分别加入干扰毒素 OA、TTX、DA 时溶液均维持红色，且各组 A_{650}/A_{520} 也均低于 STX 组。在混合体系（STX＋OA＋TTX＋DA）中，溶液颜色及 A_{650}/A_{520} 与 STX 组相比均未发生明显变化。见图 7。

2.4.2　线性范围与检测限　在最佳实验条件下对不同浓度 STX 进行检测，随着 STX 浓度的增加，520 nm 波长处的吸光度逐渐下降，同时 650 nm 波长处的吸光度逐渐增加，溶液的颜色也由红色逐渐变为蓝色，A_{650}/A_{520} 在 25～1 500 nmol/L 范围内呈线性关系，线性方程为 y=0.000 7C_{STX}＋0.260 7（R^2=0.995 5），最低检出限为 8.6 nmol/L（图 8）。本传感器与其他检测方法[11-17]的对比信息见表 1。

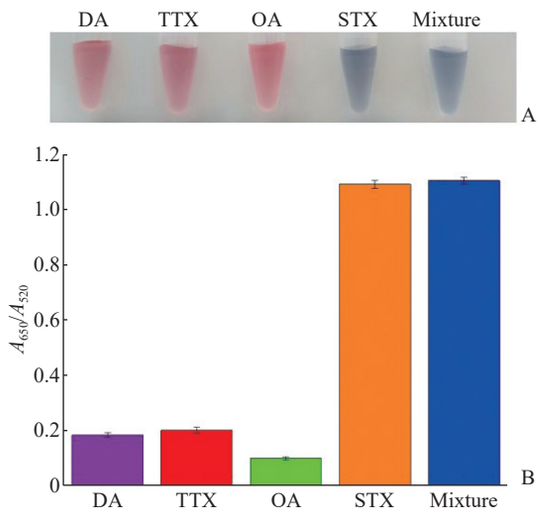

图 7　金纳米粒子－适配体比色传感器检测 STX 的特异性

Fig 7　Specificity of gold nanoparticle-aptamer colorimetric sensor toward STX

A: Photographs of gold nanoparticle solutions in the presence of different marine biotoxins; B: Bar chart of absorbance ratio (A_{650}/A_{520}) for gold nanoparticles in the presence of different marine biotoxins. n=3, $\bar{x}\pm s$. STX: Saxitoxin; DA: Domoic acid; TTX: Tetrodotoxin; OA: Okadaic acid.

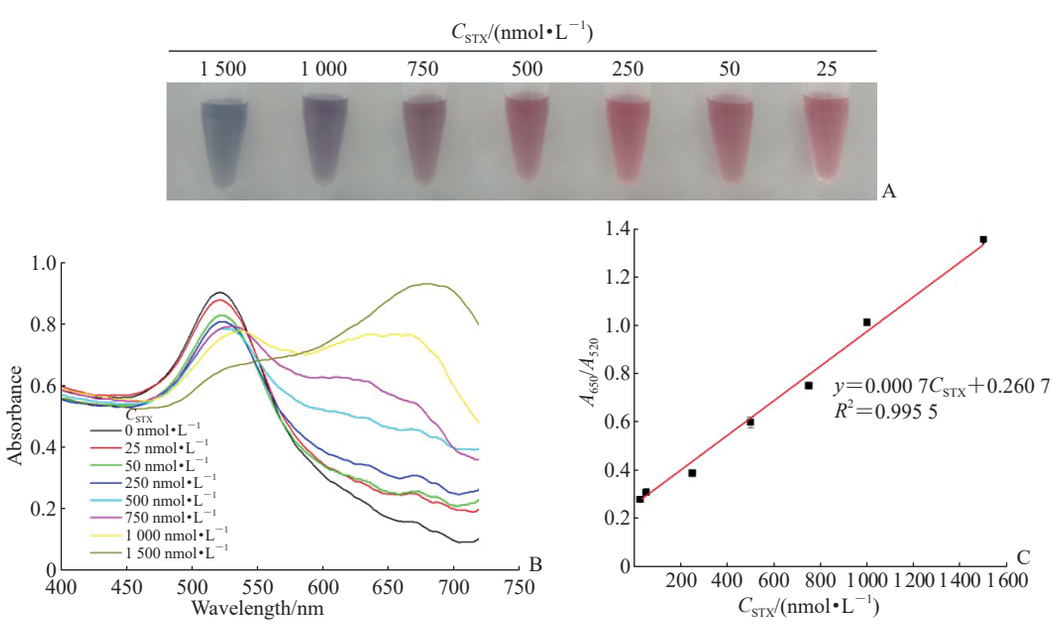

图 8　金纳米粒子－适配体比色传感体系对不同浓度 STX 的响应

Fig 8　Response of gold nanoparticle-aptamer colorimetric sensing system to different concentrations of STX

A: Photographs of gold nanoparticle solutions at different STX concentrations (C_{STX}); B: Ultraviolet-visible absorption spectra of gold nanoparticles at different C_{STX}; C: Plot of absorbance ratio (A_{650}/A_{520}) as a function of C_{STX}. STX: Saxitoxin.

表 1　本传感器与其他检测方法比较

Tab 1　Comparison of our sensor with other methods

Method	Aptamer	Linear range/(nmol•L^{-1})	Limit of detection/(nmol•L^{-1})	Reference
Colorimetric aptasensor	73a	25-1 500	8.6	This work
Colorimetric aptasensor	M-30f	522.6-66 889.6	1 052.2	［11］
Electrochemical aptasensor	APTSTX1	0.90-30	0.38	［12］
Electrochemical aptasensor	M-30f	1.0-10.0	1.0	［13］
Electrochemical aptasensor	78-mer	0.50-100	0.09	［14］
Fluorescent aptasensor	M-30f	0-80.3	6.0	［15］
Fluorescent aptasensor	STX-41	3.3-334.5	1.3	［16］
BLI-based aptasensor	45e-1	167.2-2 675.6	1.7	［17］

BLI: Biolayer interferometry.

2.4.3　*准确度与精密度*　在海水中STX的回收率为99.6%～111.2%，RSD为1.6%～12.1%；在贝类中STX的回收率为103.0%～107.9%，RSD为2.6%～7.6%。见表2。

表 2　海水和贝类样品中石房蛤毒素的回收率

Tab 2　Recovery rates of saxitoxin in seawater and shellfish samples

n=9

Sample	Spiked concentration/(nmol•L^{-1})	Recovered amount/(nmol•L^{-1}), $\bar{x}\pm s$	Recovery rate/%	RSD/%
Seawater	150	150.4±18.1	100.3	12.1
	800	796.7±69.3	99.6	8.7
	1 300	1 445.4±23.6	111.2	1.6
Shellfish	150	154.6±11.7	103.0	7.6
	800	839.1±21.6	104.9	2.6
	1 300	1 402.9±56.7	107.9	4.0

RSD: Relative standard deviation.

3　讨　论

3.1　*实验条件优化*　金纳米粒子在水溶液中一般处于分散状态，溶液呈红色，但在盐的诱导下则容易发生聚集而变色。低浓度的NaCl溶液只能引起少量的金纳米粒子聚集，颜色变化不明显，高浓度的NaCl会使金纳米粒子严重聚集导致溶液直接由红色变为蓝色，合适浓度的NaCl不仅能降低检测时的背景干扰还能使灵敏度提高。而适配体的浓度在一定程度上可以避免高盐状态下金纳米粒子聚集，但浓度过低起不到保护作用，浓度过高时过量的适配体会游离在溶液中与STX结合，造成一定的背景干扰，影响实验结果的准确性。经过优化，选择NaCl浓度为45 mmol/L，适配体浓度为30 nmol/L，此时的金纳米粒子在NaCl的诱导下可以发生聚集变色但适配体存在时又能处于相对稳定的状态，使整个体系处于稳定与聚集的临界点，保证了较低的信号背景和较高的灵敏度。在此基础上，对反应时间进行考察，NaCl和金纳米粒子的反应时间达到12 min时，A_{650}/A_{520}基本不再发生变化；适配体和金纳米粒子只有充分反应才能保证适配体在金纳米粒子表面形成稳定的“保护层”，当反应时间为10 min时A_{650}/A_{520}基本不再发生变化，趋于稳定，说明此时适配体已经将金纳米粒子完全包裹，金纳米粒子已经处于分散状态，确定10 min为最佳反应时间；适配体与STX的反应时间为30 min时，A_{650}/A_{520}基本稳定，说明最佳反应时间为30 min。

3.2　*方法学验证*　为了验证该方法是否能特异性检测STX，选择了几种常见的海洋生物毒素进行检测，包括OA、TTX、DA以及这4种毒素的混合物（STX＋OA＋TTX＋DA）。结果表明本传感器能特异性识别STX，即使STX与多种毒素同时存在，适配体依然能与STX结合，充分证明了该方法具有很好的特异性，其他毒素的存在基本不会对STX的检测造成干扰。

在最佳实验条件下，本传感器的线性范围为25～1 500 nmol/L，线性方程为y=0.000 7C_{STX}＋0.260 7（R^2=0.995 5），最低检出限为8.6 nmol/L。据有关规定，STX在饮用水中最大的允许量为10 nmol/L[18]，

故本传感器已经能满足 STX 检测的要求。值得一提的是钟隆洁[11]也用比色法对 STX 进行检测，但其测得的 STX 线性范围为 156.25～20 000 ng/mL，检出限为 314.6 ng/mL，而本传感器虽然线性范围较窄，但检出限显著降低，灵敏度更优。为了进一步验证本传感器的可靠性，分别在海水和贝类样品中添加不同浓度的 STX 进行检测，回收率和精密度结果表明本方法能够有效克服复杂基质的干扰，适用于真实样品中 STX 的可靠检测。

综上所述，与其他传感器相比[11-17]，本研究建立的方法灵敏度虽然不是最好的，但操作方法更简单，不需要对适配体、金纳米粒子进行标记或者复杂的修饰，只需对样品进行简单处理，在短时间内就能通过颜色变化对结果进行初步判断，同时借助紫外可见分光光度计检测实现对 STX 的定量分析，为现场快速筛查以及实验室精确检测提供了一条新的路径，具有较好的应用前景。

［参 考 文 献］

［1］ Liu R, Zhang F, Sang Y, et al. Selection and characterization of DNA aptamers for constructing aptamer-AuNPs colorimetric method for detection of AFM1[J]. Foods, 2022, 11(12): 1802. DOI: 10.3390/foods11121802.

［2］ Ali M H, Elsherbiny M E, Emara M. Updates on aptamer research[J]. IJMS, 2019, 20(10): 2511. DOI: 10.3390/ijms20102511.

［3］ Jian S, Deng B, Xi X, et al. Heterotrimeric fluorescence aptasensing of saxitoxin[J]. Sens Actuat B Chem, 2026, 446: 138653. DOI: 10.1016/j.snb.2025.138653.

［4］ Guo W, Hu C, Li S, et al. Selection and electrochemical-sensor application of an DNA-aptamer for methyl parathion detection[J]. Anal Chim Acta, 2023, 1241: 340780. DOI: 10.1016/j.aca.2023.340780.

［5］ Ma C, Zhang Y, Zhang Y. Aptamer-controlled gold nanozyme sensor for fluorescent and colorimetric dual-channel detection of methamphetamine[J]. Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc, 2024, 323: 124883. DOI: 10.1016/j.saa.2024.124883.

［6］ Esmaelpourfarkhani M, Ramezani M, Alibolandi M, et al. Label-free colorimetric sensor for Pb^{2+} determination using catalytic activity of MnO_2 nanoflowers and elongated aptamer[J]. Anal Biochem, 2023, 678: 115286. DOI: 10.1016/j.ab.2023.115286.

［7］ Yue Y, Zhang D, Tian K, et al. Screening and evaluation of thiamethoxam aptamer based on pressurized GO-SELEX and its sensor application[J]. Biosensors (Basel), 2023, 13(2): 155. DOI: 10.3390/bios13020155.

［8］ Liu D M, Dong C. Gold nanoparticles as colorimetric probes in food analysis: progress and challenges[J]. Food Chem, 2023, 429: 136887. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136887.

［9］ 刘英，奚潇雨，封加栋，等. 金纳米颗粒表面催化发夹组装无酶信号放大快速荧光法检测微RNA-721[J]. 海军军医大学学报，2024，45(6)：717-724. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230751.

［10］ Zhao Y, Li L, Ma R, et al. A competitive colorimetric aptasensor transduced by hybridization chain reaction-facilitated catalysis of AuNPs nanozyme for highly sensitive detection of saxitoxin[J]. Anal Chim Acta, 2021, 1173: 338710. DOI: 10.1016/j.aca.2021.338710.

［11］ 钟隆洁. 基于智能手机的海洋毒素快速检测系统设计及其应用研究[D]. 杭州：浙江大学，2019.

［12］ Hou L, Jiang L, Song Y, et al. Amperometric aptasensor for saxitoxin using a gold electrode modified with carbon nanotubes on a self-assembled monolayer, and methylene blue as an electrochemical indicator probe[J]. Microchim Acta, 2016, 183(6): 1971-1980. DOI: 10.1007/s00604-016-1836-1.

［13］ Serrano P C, Nunes G E, Avila L B Jr, et al. Electrochemical impedance biosensor for detection of saxitoxin in aqueous solution[J]. Anal Bioanal Chem, 2021, 413(25): 6393-6399. DOI: 10.1007/s00216-021-03603-1.

［14］ Ullah N, Noureen B, Tian Y, et al. Label-free detection of saxitoxin with field-effect device-based biosensor[J]. Nanomaterials (Basel), 2022, 12(9): 1505. DOI: 10.3390/nano12091505.

［15］ Cheng S, Zheng B, Yao D, et al. Study of the binding way between saxitoxin and its aptamer and a fluorescent aptasensor for detection of saxitoxin[J]. Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc, 2018, 204: 180-187. DOI: 10.1016/j.saa.2018.06.036.

［16］ Gu H, Duan N, Xia Y, et al. Magnetic separation-based multiple SELEX for effectively selecting aptamers against saxitoxin, domoic acid, and tetrodotoxin[J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(37): 9801-9809. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b02771.

［17］ Zhou R, Gao Y, Yang C, et al. A novel SELEX based on immobilizing libraries enables screening of saxitoxin aptamers for BLI aptasensor applications[J]. Toxins, 2022, 14(3): 228. DOI: 10.3390/toxins14030228.

［18］ Li J, Persson K M. Quick detection method for paralytic shellfish toxins (PSTs) monitoring in freshwater-A review[J]. Chemosphere, 2021, 265: 128591. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128591.

［本文编辑］　魏学丽