

技术与方法

基于G-四链体构象转换免标记荧光法用于Ag⁺的检测*汪贝贝¹,覃英凤^{1Δ},赖荣基¹,吴柳¹,刘金文^{1,2Δ}

(1.广西医科大学基础医学院生物化学与分子生物学教研室 广西高校生物分子医学研究重点实验室,南宁 530021;2.广西医科大学长寿与老年相关疾病教育部重点实验室,南宁 530021)

摘要 目的:基于银离子(Ag⁺)介导的G-四链体构象转换策略建立免标记的荧光传感法用于Ag⁺定量分析。**方法:**首先,荧光染料吡啶橙嵌入G-四链体后可使其荧光显著增强。其次,当体系加入Ag⁺后,Ag⁺可螯合G-四链体中的鸟嘌呤进而抑制G-四链体空间结构形成使得荧光降低。最后,根据荧光强度的变化进行Ag⁺的定量检测。样品的荧光光谱分析以480 nm为激发波长,检测500~700 nm的荧光发射光谱,并记录最大发射波长525 nm处的荧光强度。**结果:**本研究设计的荧光传感器对Ag⁺的检测呈现出较宽的检测线性范围(0.1~2.0 μmol/L)和较低检测限(43.5 nmol/L)。此外,该方法在复杂的实际环境样品回收率分析中取得了满意的结果。**结论:**本研究构建的Ag⁺检测方法操作简单,无需任何荧光标记,成本低,分析速度快,选择性好,在环境分析中具有广泛的实际应用前景。

关键词 银离子;G-四链体;吡啶橙;荧光分析

中图分类号:O657.3 文献标志码:A 文章编号:1005-930X(2023)06-1048-07

DOI:10.16190/j.cnki.45-1211/r.2023.06.022

A label-free fluorescence method based on G-quadruplex conformation switching for Ag⁺ detectionWang Beibei¹, Qin Yingfeng¹, Lai Rongji¹, Wu Liu¹, Liu Jinwen^{1,2}. (1. Department of Biochemistry and Molecular Biology, School of Basic Medical Sciences, The Key Laboratory of Biological Molecular Medicine Research in Guangxi Universities, Guangxi Medical University, Nanning 530021, China; 2. Key Laboratory of Longevity and Age-Related Diseases, Ministry of Education, Guangxi Medical University, Nanning 530021, China)

Abstract Objective: To develop a label-free fluorescence sensing method for quantitative detection of Ag⁺ based on silver ion (Ag⁺)-mediated G-quadruplex conformation switching strategy. **Methods:** Firstly, the fluorescent dye acridine orange was embedded into the G-quadruplex, resulting in a significantly enhance fluorescent signal. Secondly, when Ag⁺ was added to the system, Ag⁺ could chelate guanine in G-quadruplex, thus inhibiting the formation of G-quadruplex spatial structure to reduce the fluorescence intensity. Finally, the quantitative detection of Ag⁺ was conducted according to the fluorescence intensity change. The fluorescence emission spectra of the samples were analyzed with 480 nm as the excitation wavelength, the fluorescence emission spectra of 500-700 nm were detected, and the fluorescence intensity at the maximum emission wavelength of 525 nm was recorded. **Results:** The fluorescence sensor designed in this study had a wide linear range (0.1 μmol/L-2.0 μmol/L) and a low detection limit (43.5 nmol/L) for the detection of Ag⁺. In addition, this method achieved satisfactory experimental results in the analysis of recovery rates in complex environmental samples. **Conclusion:** The Ag⁺ detection method developed in this study has the advantages of simple operation, no need for any fluorescent labeling, low cost, fast analysis speed and good selectivity, and has broad prospects for practical applications in environmental analysis.

*基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.22266007);

广西高校中青年教师科研基础能力提升项目

(No.2022KY0098)

Δ通信作者,刘金文,E-mail:jinwenliu@hnu.edu.cn;

覃英凤,E-mail:qinyingfeng@sr.gxmu.edu.cn

收稿日期:2023-04-28

environmental analysis.

Keywords silver ion; G-quadruplex; acridine orange; fluorescence analysis

银离子(Ag⁺)是人体内重要的微量元素之一,在生命活动过程中发挥着重要的作用^[1-2]。而Ag⁺同时也被认为是广泛的环境污染物之一^[3]。据统计,全国每年向环境排放的银化合物约为2 500吨^[4]。另外,人体内过量Ag⁺的堆积会对健康产生严重危害。因此,建立高灵敏度和高特异性的Ag⁺检测策略对人类健康和环境保护监测具有十分重要的意义。

传统检测Ag⁺的方法主要有原子吸收光谱法、溶出伏安法等^[5-7]。然而,这些分析方法存在仪器操作复杂、灵敏度较低、分析时间长等局限性。近年来,研究者们已开发出多种生物传感技术用于Ag⁺的测定,如比色法、电化学法和荧光法等^[8-10]。其中,荧光法由于测定速度快、便捷、灵敏度高等优点备受关注。G-四链体是由富含鸟嘌呤的DNA或RNA折叠形成的高级结构^[11],其在生物传感技术中的应用主要是通过构象转换实现信号输出^[12]。基于荧光小分子核酸染料吡啶橙(AO)与核酸构建的分析策略无需对核酸进行荧光标记,具有易于制备、低成本等优势^[13]。本研究旨在观察AO嵌入G-四链体后增强荧光的效果,在此基础上,结合Ag⁺介导的G-四链体构象转换策略,开发用于Ag⁺检测的免标记荧光法。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

本研究所用到的G-四链体DNA(G4-DNA)由生工生物科技有限公司合成并纯化,序列:5'-GGG-TAGGGCAGGGTTGGGAAA-3';AO由上海叶源生物科技有限公司提供;Tris试剂购于北京索莱宝科技有限公司;硝酸银(AgNO₃)、硫酸铜(CuSO₄·5H₂O)、硝酸钴(Co(NO₃)₂)、硝酸镍(Ni(NO₃)₂)、硝酸铁(Fe(NO₃)₃)、硝酸锰(Mn(NO₃)₂)、硝酸铬(Cr(NO₃)₃)和氯化铝(AlCl₃)均购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;实验用水由Milli-Q水纯化系统纯化。荧光分析实验使用G9800A型荧光分光光度计(Agilent,美国)进行检测。

1.2 金属离子与G4-DNA构象关系的圆二色光谱分析

实验采用圆二色光谱法对不同金属离子与G4-DNA作用前、后G4-DNA构象的变化进行分析。将1 μmol/L G4-DNA,3 μmol/L的不同金属离子(Ag⁺、Mg²⁺、Cu²⁺、Mn²⁺、Zn²⁺、Fe³⁺)在1×Tris-AC缓冲溶液

(20 mmol/L Tris,5 mmol/L KCl,pH=7.4)条件下37℃孵育30 min后进行圆二色光谱检测。检测池使用光程1 cm石英测量池,扫描范围为220~320 nm,带宽为2 nm,步长为1 nm,扫描速度为100 nm/min。

1.3 Ag⁺抑制G-四链体构象转换的荧光光谱分析

研究利用荧光分析法测定不同条件下荧光强度的变化,进一步考察本方案的可行性。实验设置3组样品。样品a:0.10 μmol/L AO;样品b:0.10 μmol/L+0.30 μmol/L G4-DNA;样品c:0.10 μmol/L+0.30 μmol/L G4-DNA+3.0 μmol/L Ag⁺。将3组样品在37℃下反应30 min后,利用荧光分光光度计测定样品的荧光发射光谱。

1.4 Ag⁺检测的反应条件优化

1.4.1 AO浓度的优化 AO作为G4-DNA的嵌入染料,其浓度对荧光增强效果有重要影响。因此,实验在不加入Ag⁺时,将不同浓度的AO(0.02 μmol/L、0.04 μmol/L、0.06 μmol/L、0.08 μmol/L、0.10 μmol/L、0.12 μmol/L和0.14 μmol/L)与0.30 μmol/L G4-DNA在1×Tris缓冲溶液(20 mmol/L Tris,50 mmol/L KCl,pH=7.4)条件下37℃孵育30 min后,对AO与G4-DNA作用后AO的荧光增强效率进行分析并记录525 nm处的荧光强度,使用信背比F/F₀(F为G4-DNA存在时的荧光强度,F₀为没有G4-DNA存在时的荧光强度)对结果进行评价。

1.4.2 G4-DNA浓度的优化 G4-DNA与Ag⁺的螯合会抑制G-四链体的形成,进而影响AO与G4-DNA的相互作用。因此,在2 μmol/L Ag⁺和0.1 μmol/L AO同时存在的情况下,分别检测不同浓度(0 μmol/L、0.05 μmol/L、0.10 μmol/L、0.20 μmol/L、0.30 μmol/L、0.40 μmol/L、0.50 μmol/L)的G4-DNA样品在525 nm处的荧光强度。

1.4.3 反应时间的优化 实验分别测定了在不同的反应时间(0 min、10 min、20 min、30 min、40 min、50 min)下,0.1 μmol/L AO、0.3 μmol/L G4-DNA和2.0 μmol/L Ag⁺的混合溶液在525 nm处的荧光强度,以荧光强度变化指示反应的进行程度。

1.4.4 反应温度的优化 反应温度可能会影响体系的反应速率,因此实验分别对0.1 μmol/L AO、0.3 μmol/L G4-DNA和2.0 μmol/L Ag⁺的混合溶液在25℃、37℃和45℃条件下反应30 min后进行荧光分析并记录525 nm处的荧光强度。

1.5 Ag⁺的定量检测

首先,将4 μL 不同浓度的 AgNO_3 溶液,6 μL G4-DNA (5 $\mu\text{mol/L}$), 10 μL 的10 \times Tris缓冲溶液(0.2 mol/L Tris, 50 mmol/L KCl, pH=7.4)与75 μL 超纯水混合后于37 $^\circ\text{C}$ 孵育30 min;其次,加入5 μL 的荧光染料AO(2 $\mu\text{mol/L}$)37 $^\circ\text{C}$ 继续孵育30 min;最后,利用荧光分光光度计测定样品的荧光强度。样品分析的激发波长为480 nm,发射光谱扫描范围为500~700 nm(最大发射波长为525 nm)。每个样品均平行检测4次。

1.6 Ag^+ 检测的特异性分析

实验选取的潜在干扰物质包括 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Ni^{2+} 、 Al^{3+} 以及 Fe^{3+} ,进行 Ag^+ 检测的特异性分析。按10倍过量干扰物进行考察,即 Ag^+ 浓度为2 $\mu\text{mol/L}$,潜在干扰物质浓度为20 $\mu\text{mol/L}$,在相同实验条件下按照“1.5项”操作过程进行测定,并记录样品在525 nm处的荧光强度。

1.7 实际样品分析

研究采集南宁市邕江水样作为待测标本。实验前先用0.22 μm 的滤膜过滤水样,目的是去除水样中大的颗粒物质及杂质。将不同浓度的 Ag^+ 加入

实际水样品中,按照“1.5项”操作过程进行实际样品加标回收分析。每个样品重复分析4次。

2 结果

2.1 基于G-四链体构象转换免标记荧光传感新方法检测 Ag^+ 的设计原理

实验原理如图1所示,本研究基于 Ag^+ 整合G-DNA中鸟嘌呤并诱导G-四链体发生构象转变,AO结合G-四链体后荧光增强的特性,开发了一种免标记的荧光分析策略用于 Ag^+ 的检测。该体系仅需设计1条G4-DNA序列。在没有 Ag^+ 存在时,G4-DNA可发生构象的变化形成G-四链体。加入AO后,AO可嵌合到G4-DNA并使得AO的荧光显著增强;然而,当 Ag^+ 存在时, Ag^+ 整合G4-DNA中的鸟嘌呤,此时G4-DNA中鸟嘌呤之间的氢键无法形成,因此无法形成正常的G-四链体构象。此时,AO被加入反应体系后,将无法嵌合到G4-DNA中并保持游离状态,使得体系中荧光强度较低。通过不同 Ag^+ 浓度诱导体系中荧光强度的变化,可实现对 Ag^+ 的定量分析。

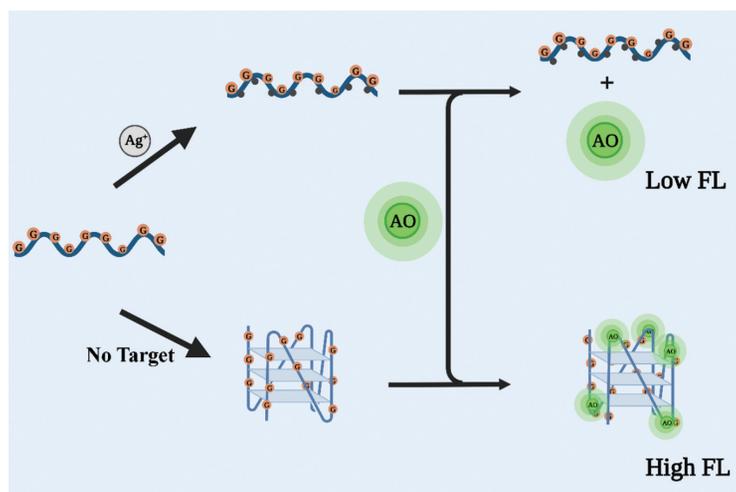


图1 基于G-四链体构象转换免标记荧光传感新方法用于 Ag^+ 的检测原理图

2.2 可行性分析

2.2.1 圆二色光谱分析 圆二色光谱分析是表征G四链体结构和构象的最常用的技术之一。研究利用圆二色光谱对金属离子诱导G4-DNA构象转换的性能进行了考察。先前的研究表明,G-四链体的平行结构的圆二色光谱图会有两个特征峰出现:约240 nm处的负峰和约265 nm处的明显的正峰^[14]。如图2A所示,在 K^+ 的辅助下,无其他金属离子存在

时,G4-DNA的圆二色光谱曲线在243 nm和265 nm出现两个峰,与文献^[14]报道的结果一致,说明此时G4-DNA可形成平行结构的G-四链体。其他的金属离子如 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{3+} 等加入后,圆二色光谱并未发生明显变化,说明G四链体构型保持不变。而当 Ag^+ 存在时,243 nm处的负峰消失,265 nm处的正峰显著降低,表明 Ag^+ 的加入会抑制G4-DNA形成G-四链体。

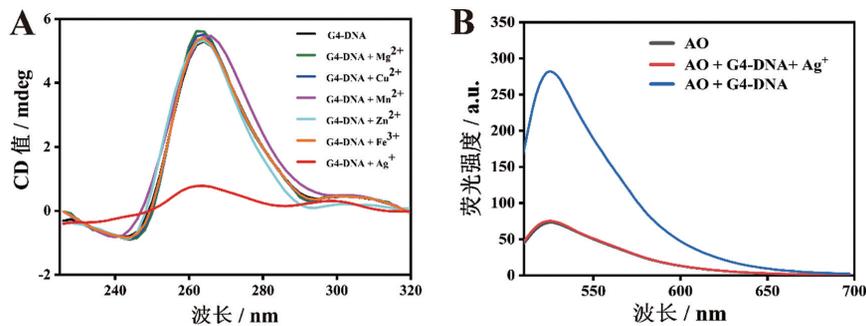
2.2.2 荧光法可行性分析 实验对3组不同的样本进行荧光检测,以进一步验证本方案的可行性。如图2B所示,当反应体系中只有AO时,产生较低的背景荧光信号;当AO和G4-DNA同时存在于反应体系中时,荧光信号显著增强;然而,当Ag⁺与AO、G4-DNA共同孵育后,Ag⁺螯合鸟嘌呤进而阻止了G-四链体的形成,这时AO不能与G4-DNA嵌合,从而导致反应体系的荧光强度降低。

2.3 实验条件的优化

为了获得Ag⁺的最佳分析性能,对AO浓度、G4-DNA浓度、反应孵育时间及温度等影响实验的几个重要因素进行了优化。

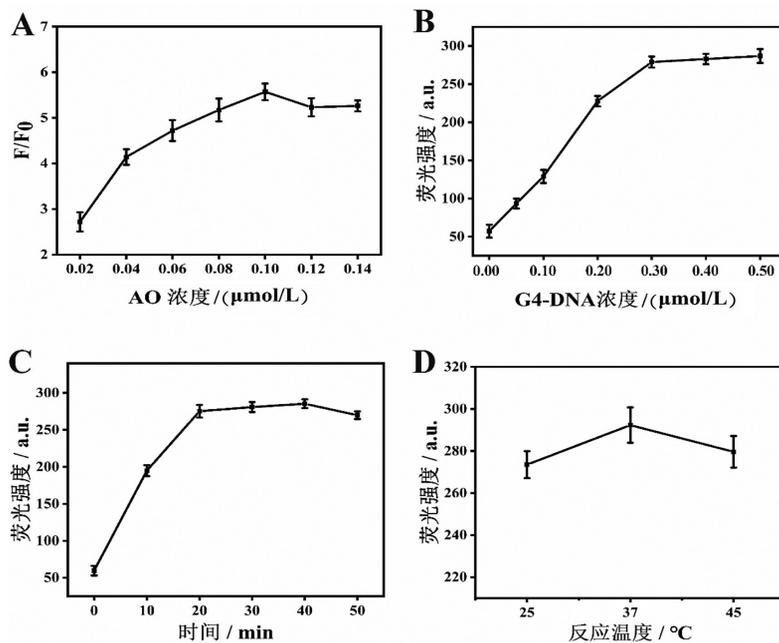
实验首先对AO对G4-DNA的荧光增强性能进行考察。结果如图3A所示,AO浓度在0.02~0.10 μmol/L,随着其浓度的增加,F/F₀值(F为G4-DNA存

在时的荧光强度,F₀为没有G4-DNA存在时的荧光强度)不断增大。在AO浓度为0.10 μmol/L时,F/F₀值达到最大。一方面,G4-DNA与AO嵌合作为荧光信号探针输出信号;另一方面,G4-DNA可通过螯合Ag⁺阻止G-四链体形成实现信号转换。因此,研究优化了G4-DNA的用量。如图3B所示,随着反应体系中G4-DNA的浓度升高,525 nm处的荧光强度逐渐增强,并且在0.30 μmol/L后荧光强度不再发生明显变化。其次,本研究对反应时间也进行了优化。如图3C所示,随着反应时间延长,反应体系荧光强度逐渐增强,最终在30 min左右达到平衡。最后,本研究对不同温度对反应体系的荧光响应进行了考察。结果如图3D所示,在25 °C、37 °C以及45 °C的反应条件下,体系的荧光响应区别不大,在37 °C时体系荧光强度较高。



A: 不同金属离子诱导G4-DNA构象转换的圆二色光谱分析;B: 不同条件下的荧光光谱响应分析。

图2 体系可行性分析



A: AO浓度的优化;B: G4-DNA用量的优化;C: 反应时间的优化;D: 反应温度的优化。

图3 Ag⁺检测实验条件的优化

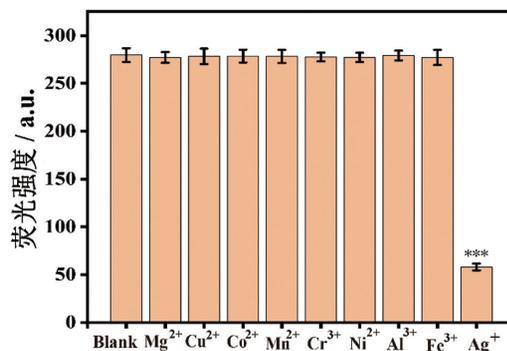
2.4 选择性评价

为了进一步考察该检测方法对 Ag⁺响应的高特异性,实验以一些潜在干扰离子(Mg²⁺、Cu²⁺、Co²⁺、Mn²⁺、Cr³⁺、Ni²⁺、Al³⁺、Fe³⁺)作为对照进行选择分析。结果如图4所示,其他干扰离子加入反应体系后没有引起荧光信号的明显变化;而只有 Ag⁺存在时才会使反应体系的荧光强度明显降低。

2.5 Ag⁺的定量检测

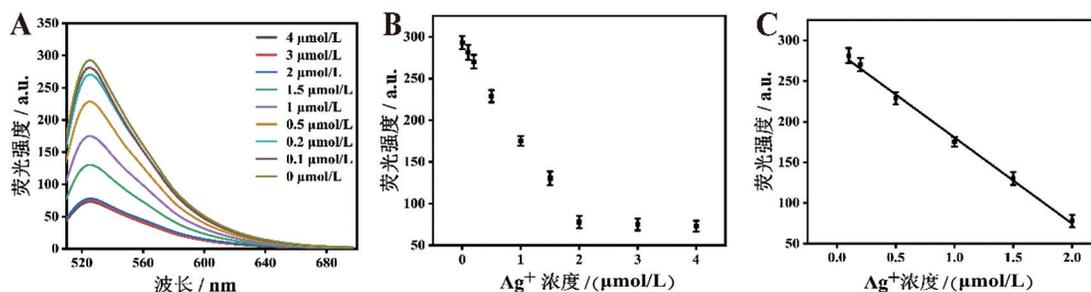
在最优的反应条件下,实验对不同浓度的 Ag⁺进行荧光光谱检测。结果如图5A所示,随着 Ag⁺浓度升高,反应体系的荧光强度逐渐降低。图5B显示的是 525 nm 处不同浓度 Ag⁺与荧光强度之间的散点图,图5C为 Ag⁺浓度在 0.1~2.0 μmol/L 之间与 525 nm 处的荧光强度的线性关系图。线性方程为 $F = -103.53C + 286.24$ (其中 F 表示 525 nm 处的荧光强度, C 表示

Ag⁺浓度,单位为 μmol/L), 相关系数 $R^2 = 0.9923$ 。以 $3\sigma/s$ 进行计算, Ag⁺浓度的检测限为 43.5 nmol/L。此外,将该方法与已报道的方法进行了对比(表1)。



Ag⁺浓度为 2 μmol/L, 其他干扰离子浓度均为 20 μmol/L, 与 Blank 比较, *** $P < 0.001$ 。

图4 Ag⁺检测的选择性考察



A: 不同 Ag⁺浓度对应的荧光光谱响应曲线; B: Ag⁺浓度与 525 nm 处荧光值的散点图; C: Ag⁺浓度与 525 nm 处荧光值的线性关系图。

图5 Ag⁺检测的线性响应分析

表1 各种 Ag⁺分析方法的检测性能对比

方法	检测策略	线性范围/ (μmol/L)	检测限/ (nmol/L)	参考文献
比色法	Gold nanoparticles	2.00~28.00	850.0	[15]
荧光法	Trinuclear zinc coordination cluster	1.33~10.33	172.2	[16]
荧光法	Heptamethine cyanine	0.60~5.00	34.0	[17]
荧光法	Graphite carbon nitride nanosheets	0.02~2.00	27.0	[18]
荧光法	CdTe QDs	0.13~12.50	40.0	[19]
电化学法	Protein	10.00~50.00	500.0	[20]
荧光法	G4-DNA	0.10~2.00	43.5	本研究

2.6 实际样品测定

为了进一步考察该方法在复杂实际样品中的应用潜力,实验以南宁市邕江水样为实际样品进行加标回收实验分析。Ag⁺的回收率为 103.6%~105.0%, RSD 为 1.8%~3.8%, 见表2。

表2 实际样品中 Ag⁺的加标回收实验结果

样品	加入量/ (μmol/L)	检测量/ (μmol/L)	回收率/%	RSD (n=4)
1	0.200	0.210	105.0	3.8
2	0.500	0.518	103.6	1.8
3	1.500	1.570	104.7	3.1

3 讨论

环境中的Ag⁺会通过食物链在人体内积累,而人体内高浓度的Ag⁺会抑制细胞内生物分子的相互作用,进而使得大脑和神经受损。此外,Ag⁺过量积累会使线粒体功能障碍,引发急性细胞毒性升高,器官衰竭等问题,危害人体健康^[21-22]。因此,Ag⁺检测十分重要。荧光生物传感技术已成为Ag⁺检测的有力工具之一。但是,目前大部分用于Ag⁺的荧光传感分析法需要进行材料或分子探针的合成与表征以及对DNA进行荧光标记等操作,使得分析过程繁琐和成本较高等。研究基于G-四链体构象转换建立了免标记检测Ag⁺的荧光新方法。

本研究先通过圆二色光谱法和荧光分析法对所建立的方法进行了可行性分析,实验结果均表明该方法用于Ag⁺的检测可行。接着,通过优化与综合考虑反应速率以及实际应用等,得到了最佳的实验条件(0.10 μmol/L AO, 0.30 μmol/L G4-DNA, 30 min反应时间与37 °C反应温度)。最后,Ag⁺分析性能研究结果表明该方法对Ag⁺检测具有较好的选择性,与其他方法相比更简单、成本更低以及具有相当甚至更优的线性范围和灵敏度,并且可用于复杂实际样品的分析。

综上所述,本研究基于Ag⁺介导G-四链体构象转换的策略以及AO嵌合G-四链体并诱导其荧光增强的性质,成功构建了一种Ag⁺定量检测的荧光传感新技术。研究所用的G-四链体无需荧光基团与猝灭基团的标记与修饰,具有成本低、操作简单、灵敏度高和特异性好等优势。该方法有望成为Ag⁺检测的有效手段,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] WU W, ZHANG R, MCCLEMENTS D J, et al. Transformation and speciation analysis of silver nanoparticles of dietary supplement in simulated human gastrointestinal tract[J]. *Environmental science & technology*, 2018, 52(15): 8792-8800.
- [2] GUO D W, ZHU L Y, HUANG Z H, et al. Anti-leukemia activity of PVP-coated silver nanoparticles via generation of reactive oxygen species and release of silver ions[J]. *Biomaterials*, 2013, 34(32):7884-7894.
- [3] LU Y, SONG S, WANG R, et al. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China[J]. *Environment international*, 2015, 77:5-15.
- [4] NGAMCHUEA K, CLARK R D, SOKOLOV S V, et al. Single oxidative collision events of silver nanoparticles: understanding the rate-determining chemistry[J]. *Chemistry: a European journal*, 2017, 23(63):16085-16096.
- [5] CHOLEVA T G, TSOGAS G Z, GIOKAS D L. Determination of silver nanoparticles by atomic absorption spectrometry after dispersive suspended microextraction followed by oxidative dissolution back-extraction[J]. *Talanta*, 2019, 196:255-261.
- [6] MUDALIGE T K, QU H, LINDER S W. Asymmetric flow-field flow fractionation hyphenated ICP-MS as an alternative to cloud point extraction for quantification of silver nanoparticles and silver speciation: application for nanoparticles with a protein corona[J]. *Analytical chemistry*, 2015, 87(14):7395-7401.
- [7] ZHANG X B, HAN Z X, FANG Z H, et al. 5, 10, 15-Tris(pentafluorophenyl)corrole as highly selective neutral carrier for a silver ion-sensitive electrode[J]. *Analytica chimica acta*, 2006, 562:210-215.
- [8] LI P, LIANG N, LIU C, et al. Silver ion-regulated ratiometric fluorescence assay for alkaline phosphatase detection based on carbon dots and o-phenylenediamine[J]. *Spectrochimica acta. Part A, molecular and biomolecular spectroscopy*, 2022, 282:121682.
- [9] FU L, WANG A, XIE K, et al. Electrochemical detection of silver ions by using sulfur quantum dots modified gold electrode[J]. *Sensors and actuators B- chemical*, 2020, 304: 127390.
- [10] ZHAO L, BAI Y, WEN Y, et al. Orange-fluorescence carbon dots employed for the quantitative analysis of silver ions and glyphosine through the off-on mode[J]. *Analytical methods: advancing methods and applications*, 2022, 14(42):4230-4235.
- [11] KOLISOL N, JURANEK S, BROSSART P, et al. G-quadruplexes: a promising target for cancer therapy[J]. *Molecular cancer*, 2021, 20(1): 40.
- [12] GUO Y, YAO W, XIE Y, et al. Logic gates based on G-quadruplexes: principles and sensor applications[J]. *Mikrochimica acta*, 2016, 183:21-34.
- [13] ZHOU H, BI S, WANG Y, et al. Characterization of the binding of neomycin/ paromomycin sulfate with DNA using acridine orange as fluorescence probe and molecular

- docking technique[J]. *Journal of biomolecular structure & dynamics*, 2017, 35(10): 2077-2089.
- [14] DENG M G, ZHANG D, ZHOU Y Y, et al. Highly effective colorimetric and visual detection of nucleic acids using an asymmetrically split peroxidase DNAzyme[J]. *Journal of the American chemical society*, 2008, 130(39): 13095-13102.
- [15] SELVA SHARMA A, SASI KUMAR T, ILANCHELIAN M. A rapid and sensitive colorimetric sensor for detection of silver ions based on the non-aggregation of gold nanoparticles in the presence of ascorbic acid[J]. *Journal of cluster science*, 2018, 29: 655-662.
- [16] KE H, WEI W, YANG Y, et al. A trinuclear zinc coordination cluster exhibiting fluorescence, colorimetric sensitivity, and recycling of silver ion and detection of cupric ion [J]. *Inorganic chemistry*, 2020, 59(5):2833-2842.
- [17] ZHENG H, YAN M, FAN X X, et al. A heptamethine cyanine-based colorimetric and ratiometric fluorescent chemosensor for the selective detection of Ag⁺ in an aqueous medium[J]. *Chemical communications*, 2012, 48(16): 2243-2245.
- [18] BIAN W, ZHANG H, YU Q, et al. Detection of Ag (+) using graphite carbon nitride nanosheets based on fluorescence quenching[J]. *Spectrochimica acta. Part A, molecular and biomolecular spectroscopy*, 2016, 169:122-127.
- [19] LIU T, FU L X, YIN C H, et al. Design of smartphone platform by ratiometric fluorescent for visual detection of silver ions[J]. *Microchemical journal : devoted to the application of microtechniques in all branches of science*, 2022, 174:107016.
- [20] KRIZKOVA S, HUSKA D, BEKLOVA M, et al. Protein-based electrochemical biosensor for detection of silver (I) ions[J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2010, 29(3):492-496.
- [21] XIANG Q Q, KANG Y H, LIAN L H, et al. Proteomic profiling reveals mitochondrial toxicity of nanosilver and silver nitrate in the gill of common carp[J]. *Aquatic toxicology*, 2022, 252:106318.
- [22] LI J, HUANG H, ZHANG C, et al. Dual-key-and-lock AIE probe for thiosulfate and Ag⁺ detection in mitochondria[J]. *Talanta*, 2023, 255:124222.

本文引用格式:

汪贝贝,覃英凤,赖荣基,等. 基于G-四链体构象转换免标记荧光法用于Ag⁺的检测[J]. *广西医科大学学报*, 2023, 40(6): 1048-1054. DOI: 10.16190/j.cnki.45-1211/r.2023.06.022

WANG B B, QIN F Y, LAI R J, et al. A label-free fluorescence method based on G-quadruplex conformation transformation for Ag⁺ detection [J]. *Journal of Guangxi medical university*, 2023, 40(6): 1048-1054. DOI: 10.16190/j.cnki.45-1211/r.2023.06.022