

# Si NPs-FITC 比率荧光探针灵敏检测食品中环丙沙星的残留

贺莉, 马素黛\*, 年芳  
(甘肃农业大学理学院, 甘肃兰州 730070)

**摘要:**为解决牛奶和肉制品中环丙沙星(ciprofloxacin, CIP)药物的残留问题,构建了一种新型探针,基于比率荧光传感技术实现 CIP 残留的检测。以 3-氨丙基三甲氧基硅烷(APTMS)和单宁酸为原料,通过一步水热法快速制备了发射蓝色荧光的 Si NPs,并与异硫氰酸荧光素(FITC)混合制备双信号发射的荧光探针 Si NPs-FITC。通过 TEM、XRD、FT-IR 对 Si NPs 进行表征。基于 CIP 可以有效猝灭 Si NPs-FITC 探针荧光强度的现象,建立了快速、准确的检测环丙沙星的荧光新方法。在最优检测条件下,该方法的线性范围为 8.54~400  $\mu\text{mol/L}$ ,检出限 8.54  $\mu\text{mol/L}$ 。将该方法用于牛奶和肉制品中 CIP 的检测,表现出较高的稳定性和回收率,加标回收率为 98.9%~106.6%。

**关键词:** 荧光纳米材料;比率荧光;环丙沙星检测

中图分类号:O657

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)01-0250-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.041

## Si NPs-FITC ratiometric fluorescent probe for sensitive detection of ciprofloxacin residues in food

HE Li, MA Su-dai\*, NIAN Fang

(College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To solve the problem of ciprofloxacin (CIP) drug residues in milk and meat products, a novel probe was constructed in this study to realize the detection of CIP residues based on ratio fluorescence sensing technology. Blue-emitting Si NPs were rapidly prepared by a one-step hydrothermal method using 3-aminopropyltrimethoxysilane (APTMS) and tannic acid as raw materials, and then mixed with fluorescein isothiocyanate (FITC) to prepare a dual-signal-emitting fluorescent probe, Si NPs-FITC. Si NPs were characterized by TEM, XRD, and FT-IR. Based on the phenomenon that CIP can effectively quench the fluorescence intensity of the Si NPs-FITC probe, a rapid and accurate fluorescence method for the detection of ciprofloxacin was established. Under the optimal detection conditions, the linear range of this method was 8.54 to 400  $\mu\text{mol/L}$ , and the detection limit was 8.54  $\mu\text{mol/L}$ . When this method was applied to the detection of CIP in milk and meat products, it exhibited high stability and recovery rates, with the spiked recovery ranging from 98.9% to 106.6%.

**Key words:** fluorescent nanomaterials; ratiometric fluorescence; ciprofloxacin detection

食品安全问题深受国家和人民重点关注,且与每个公民的切身利益长期相关。在现代畜牧业和水产养殖业中,抗生素的普遍使用导致食品中抗生素残留问题日益严重。食品中抗生素残留会对人体健康构成多重威胁,如细菌耐药性、肠道菌群失衡、过敏反应、肝肾负担加重、儿童发育受阻以及潜在致癌风险。食品中抗生素检测作为食品安全监管的重要环节,对保障公众健康、维护食品贸易公平具有不可替代的作用。为了更好地监测动物性食品中抗生素的残留情况,建立高效便捷的检测方法十分必要。

环丙沙星(ciprofloxacin, CIP)为合成的第三代喹诺酮类抗菌药物,用于治疗全身感染,包括尿路、呼吸道、胃肠道和皮肤感染,它是通过抑制细菌

DNA 螺旋酶的一个亚蛋白来影响细菌的生长和繁殖<sup>[1]</sup>。因其作用效果快,价格低廉而被广泛运用于家禽养殖业,CIP 的滥用导致其极易残留在可食用动物体内并通过多种途径进入人体。人体中 CIP 过量会引发一系列的健康问题,如肌腱组织损伤、肝脏功能损害、神经系统异常反应以及耐药菌株的出现或可诱发癌症<sup>[2]</sup>。为保障食品质量安全,中国农业农村部制定了环丙沙星的残留限量标准并明确规定家禽产蛋期禁止使用<sup>[3]</sup>。目前我国对 CIP 的检测方法主要有表面增强拉曼光谱法<sup>[4]</sup>、毛细管电泳法<sup>[5]</sup>、酶联免疫分析法<sup>[6]</sup>、紫外分光光度法<sup>[7]</sup>等,这些方法能灵敏、准确检测 CIP。但是存在样品前处理步骤繁琐、仪器昂贵,或者对抗体高度依赖、检测

收稿日期:2025-02-28;修回日期:2025-10-23

基金项目:甘肃农业大学招博士科研启动基金项目(GAU-KYQD-2018-13)

作者简介:贺莉(1999-),女,硕士,助理工程师,研究方向为荧光纳米材料的制备及应用,1603912153@qq.com;马素黛(1989-),女,博士,讲师,研究方向为荧光纳米材料的制备及其在生命分析化学和食品化学中的应用,通讯联系人,masudai09@163.com。

成本较高等问题。因此,建立灵敏、简单、成本低的检测方法至关重要。

荧光检测方法因检测速度快、灵敏度高、选择性好等优点被广泛用于食品安全检测。近年来,国内外在 CIP 荧光检测的领域取得可观的成果。然而,目前大多数荧光检测 CIP 的方法依赖于单一信号检测模式。这种检测方式容易受到探针浓度、激发波长以及环境因素等多重干扰,从而导致检测结果的准确性下降,影响对目标物质的定量分析。比率型荧光检测在提高方法准确性和稳定性方面具有显著优势,通过两个荧光信号的强度比值进行自校准<sup>[8]</sup>,可以有效避免外界因素的干扰,从而提高检测的准确度和灵敏度。牛奶和肉制品的实际样品基质复杂,如牛奶中的蛋白质和脂肪,肉制品中的肌红蛋白和胶原蛋白等都会对 CIP 的检测造成显著干扰,使用比率型荧光检测能够提高准确度和选择性。

荧光硅纳米颗粒(Si NPs)是一种基于硅材料的纳米级荧光颗粒。Si NPs 具有许多优异的性能,如出色的光学和电学性能,表面易于修饰,稳定性良好,且制备简单等。与传统荧光材料相比,Si NPs 具有低毒性、优异的生物可降解性和生物相容性等优势。目前,Si NPs 在化学和生物领域的研究中备受关注<sup>[9-13]</sup>,被认为是一种有望替代有机染料和有毒重金属量子点的理想荧光探针<sup>[14-16]</sup>。例如,Zhang 等<sup>[17]</sup>通过水热法制备了发射蓝色荧光的 Si NPs,并应用于  $\text{Hg}^{2+}$  的检测,该传感器具有较高的灵敏度和选择性;漆樟玉<sup>[18]</sup>则用一步合成法制备了荧光 Si NPs,并将其用于细胞成像研究,该方法具有快速、灵敏、选择性好等优点。

本文中通过一步水热法高效制备了具有蓝色荧光特性的 Si NPs,并将其与异硫氰酸荧光素(FITC)进行简易混合,成功构建了一种双发射荧光比率探针。对 Si NPs 的形貌和性质进行研究,Si NPs 具有优异的稳定性。在最佳检测条件下,Si NPs-FITC 比率探针实现了 CIP 的灵敏检测。该方法制备过程简单、检测范围宽、选择性好、抗干扰性强,并在实际样品中有较高的稳定性和回收率。Si NPs-FITC 比率荧光探针为荧光检测 CIP 提供了新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要仪器与试剂

真空冷冻干燥机(FD-1-50,北京博医康实);XD3 X 射线多晶衍射仪(北京普析通用仪器有限责任公司);WQF-510A/520A 傅里叶变换红外光谱仪

(天恒科学仪器设备有限公司);荧光分光光度计(RF-5301PC,日本岛津公司);双光束紫外-可见分光光度计(TU-19,北京普析通用仪器有限责任公司)。

APTMS(上海阿拉丁生化科技股份有限公司);异硫氰酸荧光素(FITC)、林可霉素(LIN)、链霉素(STR)、庆大霉素(GEN)、红霉素(EM)、甘氨酸(Gly)、卡那霉素(KANA)、葡萄糖(Glu)、单宁酸、盐酸环丙沙星(CIP)(上海源叶生物科技有限公司);其余试剂来源于天津市百世化工有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 Si NPs 的制备

向烧杯中依次加入 2.2 mL 超纯水、2 mL 0.2 g/L 单宁酸溶液和 0.8 mL APTMS,混合均匀后在常压条件下,于 70℃ 水浴锅中静置 30 min。将制备好的 Si NPs 冷却至室温后放入 4℃ 的冰箱中备用。

#### 1.2.2 CIP 的检测

在磷酸盐缓冲溶液(PBS, 10 mmol/L, pH 6.0)中,将 200  $\mu\text{L}$  的 Si NPs 溶液与 80  $\mu\text{L}$  0.167 mmol/L 的 FITC 溶液混合,并向其中加入不同浓度的 CIP 溶液,使其总体积为 3 mL。室温反应 7 min 后,在 315 nm 的激发波长下,读取 424、512 nm 处的荧光强度。基于  $F_{424}/F_{512}$  值与 CIP 浓度之间的对应关系,绘制标准曲线。

#### 1.2.3 实际样品的处理和 CIP 含量测定

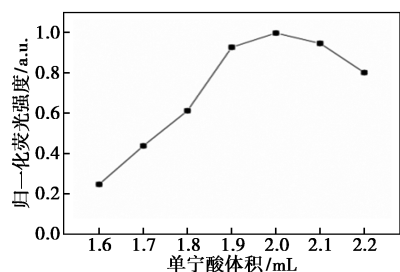
首先量取 5 mL 牛奶,加入 10 mL EDTA-McIlvaine 萃取剂,充分摇匀后超声处理 20 min,随后以 5 000 r/min 离心 15 min。取上清液并通过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤,得到样品提取液。肉制品样品,称取 5 g 搅碎后的新鲜猪肉置于 10 mL 离心管中,加入 EDTA-McIlvaine 萃取剂,以 1 200 r/min 漩涡振荡 20 min 以确保样品充分分散。随后超声处理 20 min,以 5 000 r/min 离心 20 min,取上清液并通过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤,得到样品提取液。将不同浓度的 CIP 标准溶液加入上述提取液中,按上述方法测定  $F_{424}/F_{512}$  值,并结合标准曲线计算样品中 CIP 的浓度。

## 2 结果与分析

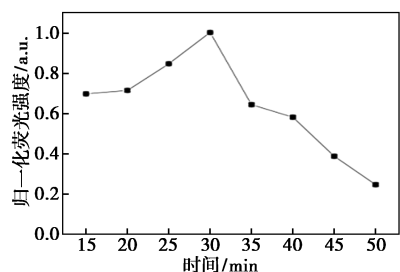
### 2.1 Si NPs 制备条件的优化

为了获得具有最强发射荧光的 Si NPs,首先优化了 Si NPs 的合成条件。考察了反应时间、温度及还原剂单宁酸用量对 Si NPs 荧光强度的影响。如图 1(a)所示,单宁酸(0.2 g/L)的体积在 1.6~2.2 mL 之间时,Si NPs 的荧光强度先增大后减小,体积为 2 mL 时 Si NPs 荧光强度最高;如图 1(b)所示,反应

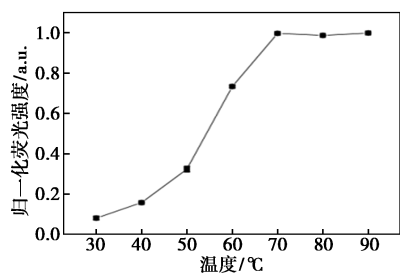
时间在 30 min 时 Si NPs 的荧光值达到最强。图 1 (c) 为不同温度下所制备的 Si NPs 的荧光强度, 当温度达到 70℃ 以上时荧光强度几乎不变, 因此, 选择单宁酸体积为 2 mL、反应 30 min、反应温度 70℃ 为 Si NPs 的最佳制备条件。



(a) 单宁酸体积



(b) 反应时间



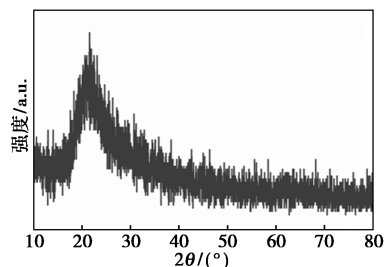
(c) 反应温度

图 1 不同单宁酸用量、反应时间和反应温度制备 Si NPs 的归一化荧光强度

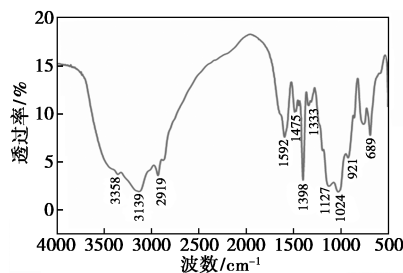
## 2.2 Si NPs 的表征

图 2(a) 是 Si NPs 的 XRD 图, 表明 Si NPs 为非晶形相结构。如图 2(b) 所示, 在 3 358、3 139  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰分别是 O—H 键的伸缩振动峰和 N—H 键的伸缩振动峰; 2 919、1 475  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰分别是 C—H 键的不饱和伸缩振动和 C—H 键的弯曲振动; 1 592、1 398  $\text{cm}^{-1}$  处的峰为 N—H 键的弯曲振动和 C—N 键的伸缩振动; 1 333、1 127~1 024  $\text{cm}^{-1}$  处的峰分别是 Si—C 键的不对称变形以及 Si—O—Si 的伸缩振动; 921  $\text{cm}^{-1}$  处的峰是由 Si—O 键的伸缩振动产生, 689  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰是伯胺的伸缩振动。红外光谱分析结果表明, Si NPs 表面富含羧基和氨基官能团, 这些官能团的存在显著增强了其在水中的分散性能。从图 2(c) 中可以明显观察到所制备

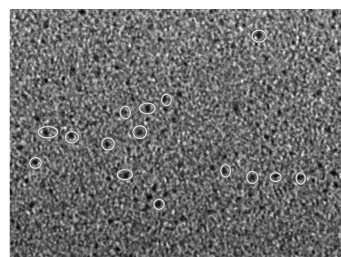
的 Si NPs 分散性好、尺寸均一。从中选择大约 100 个颗粒进行粒径统计, 如图 2(d) 所示, Si NPs 的平均粒径为 3.25 nm, 粒径范围在 1.75 ~ 3.75 nm。



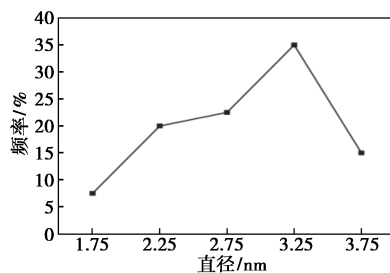
(a) Si NPs 的 XRD 图



(b) Si NPs 的 FT-IR 谱图



(c) Si NPs 的 TEM 图



(d) 粒径分布图

图 2 Si NPs 的形貌和成分结构

## 2.3 Si NPs 的稳定性

为了在复杂的牛奶和肉制品的实际样品中灵敏检测 CIP, 考察了离子强度和光照时间对 Si NPs 荧光强度的影响。如图 3(a) 所示, 在 Si NPs 溶液中加入 1~500 mmol/L NaCl 溶液, 随着溶液中盐浓度的增大, Si NPs 的荧光强度基本保持稳定, 表明 Si NPs 在高盐度环境中可以正常发光。图 3(b) 是 Si NPs 溶液在激发波长 315 nm 下连续照射 60 min 的荧光强度变化, 可以看出 Si NPs 有较好的光稳定性和抗光漂白性。

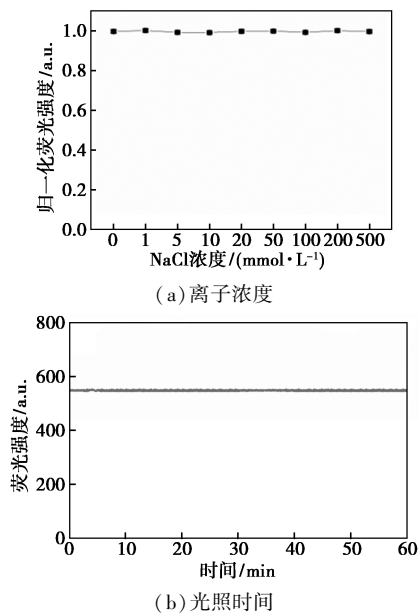
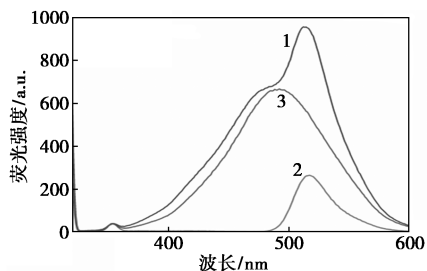


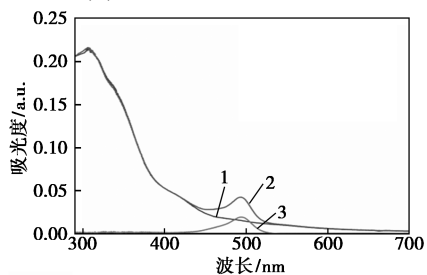
图3 不同 NaCl 浓度下 Si NPs 的归一化荧光强度和 Si NPs 在光源下照射 60 min 的荧光强度

#### 2.4 Si NPs-FITC 双发射荧光探针的构建

基于 Si NPs 良好的稳定性,向 Si NPs 溶液中加入 80  $\mu\text{L}$  0.167 mmol/L 的 FITC 溶液构建比率荧光探针。如图 4(a) 所示,当 Si NPs 单独存在时,荧光发射峰在 490 nm,单独的 FITC 溶液的荧光发射峰在 512 nm。当 FITC 加入到 Si NPs 溶液后在 315 nm 激发下 Si NPs-FITC 混合溶液在 490、512 nm 处出现 2 个发射峰,成功构建了双发射荧光探针。如图 4(b)



1—Si NPs 荧光发射谱图;2—FITC 荧光发射谱图;  
3—Si NPs-FITC 荧光发射谱图  
(a) 各组分的荧光发射光谱图



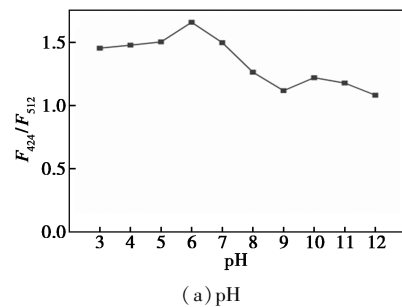
1—Si NPs UV-Vis 光谱图;2—FITC UV-Vis 光谱图;  
3—Si NPs-FITC UV-Vis 光谱图  
(b) 各组分的 UV-Vis 光谱图

图4 Si NPs-FITC 比率荧光探针的构成

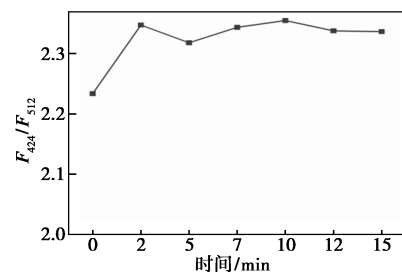
可得,相较于 Si NPs 和 FITC 溶液的紫外-可见吸收光谱,当 FITC 加入后谱图中没有出现新峰,表明 Si NPs 和 FITC 混合后没有生成新物质。综上结果说明 Si NPs 和 FITC 是经过简单的混合得到了 Si NPs-FITC 比率荧光探针。

#### 2.5 检测条件优化

如图 5(a) 所示,当 PBS 缓冲溶液处于酸性条件 ( $\text{pH} < 6.0$ ) 时,荧光强度  $F_{424}/F_{512}$  随  $\text{pH}$  的升高而逐渐增强,并在  $\text{pH} = 6.0$  时达到最大值;然而,当  $\text{pH} > 6.0$  时,其开始逐渐减弱。基于此,本研究选择  $\text{pH} = 6.0$  作为最佳检测  $\text{pH}$ 。此外,如图 5(b) 所示,在室温条件下向 Si NPs-FITC 溶液中加入 CIP 后,荧光强度在 7 min 后达到平衡并保持不变,表明反应在 7 min 内完成。因此,实验确定 7 min 为最佳反应时间。



(a) pH



(b) 时间

图5 不同 pH 条件下 CIP 对 Si NPs-FITC 的  $F_{424}/F_{512}$  的影响和 Si NPs-FITC 中加入 CIP 后  $F_{424}/F_{512}$  随时间的变化

#### 2.6 选择性和抗干扰性分析

实验考察了食品中常见的干扰物,如各种离子 ( $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、)、LIN、STR、GEN、EM、KANA 等对该方法的影响。在最佳检测条件下,向 Si NPs-FITC 中分别添加 10  $\mu\text{L}$  10 mmol/L CIP 溶液和 20  $\mu\text{L}$  10 mmol/L 上述干扰物质,测定溶液的荧光强度。如图 6(a) 所示,尽管干扰物质的浓度是 CIP 2 倍,但是只有 CIP 对 Si NPs-FITC 的荧光有显著的猝灭作用,其他上述干扰物质对其荧光没有明显变化,说明该方法具有较高的选择性。如图 6(b) 所示,当上述物质与 CIP 同时存在时,其对

CIP 的测定无明显影响,说明该方法具备较高的抗干扰能力。以上结果表明,该方法有望在复杂的牛奶和肉制品的实际样品中灵敏检测 CIP。

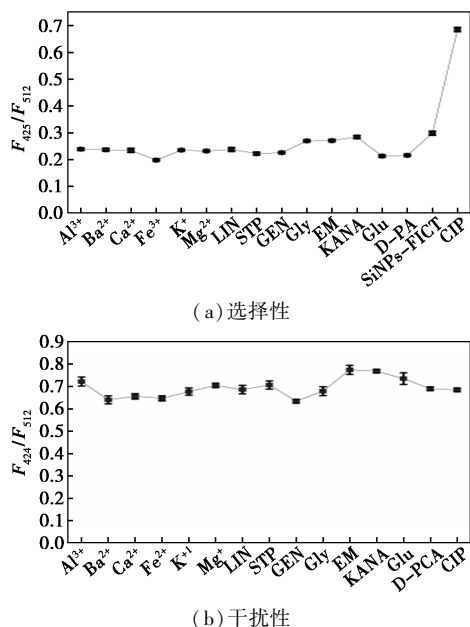
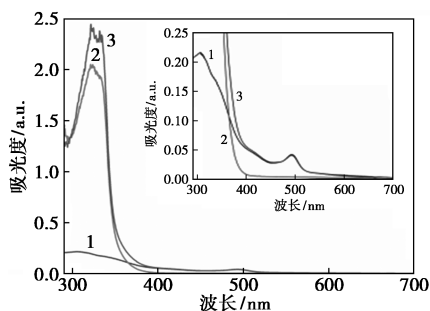


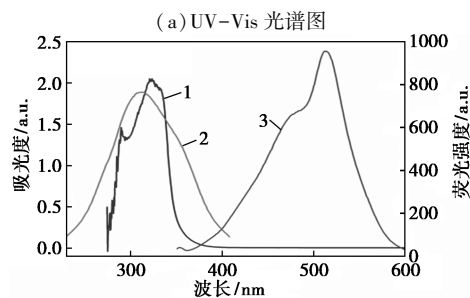
图 6 Si NPs-FITC 溶液中加入不同物质后  $F_{424}/F_{512}$  值和不同物质和 CIP 混合加入 Si NPs-FITC 溶液后的  $F_{424}/F_{512}$  值

### 2.7 Si NPs-FITC 的检测原理

实验进一步探讨了 Si NPs-FITC 探针检测 CIP 的检测原理。由图 7(a)可知,将 Si NPs-FITC 溶液



1—Si NPs-FITC 的 UV-Vis 光谱图; 2—CIP 的 UV-Vis 光谱图; 3—Si NPs-FITC+CIP 的 UV-Vis 光谱图



1—CIP 的 UV-Vis 光谱图; 2—Si NPs-FITC 的激发荧光光谱图; 3—Si NPs-FITC 的发射荧光光谱图

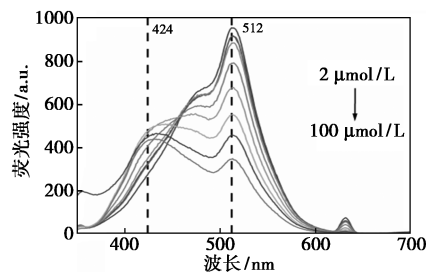
(b) 光谱图

图 7 Si NPs-FITC 对 CIP 的检测机理

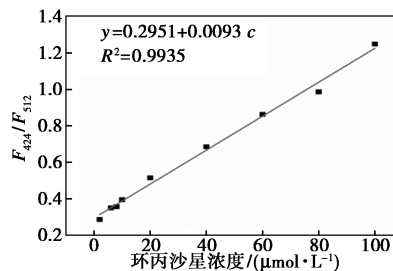
和 CIP 混合后,未观察到新的 UV 吸收峰或 UV 曲线的偏移,表明在荧光探针和猝灭剂(CIP)猝灭过程中未形成新的化合物。由图 7(b)所示, Si NPs-FITC 的激发光谱与 CIP 的 UV-Vis 光谱面积大量重叠, Si NPs-FITC 的发射光谱与 CIP UV-Vis 光谱面积几乎没有重叠。以上结果表明猝灭机理是内过滤效应(IFE)。

### 2.8 方法性能分析

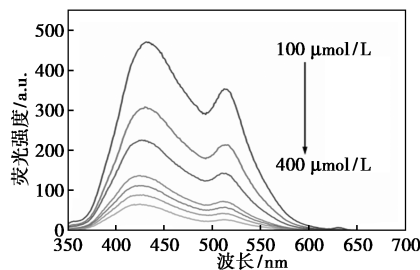
在最优检测条件下,实验考察了不同浓度的 CIP 对 Si NPs-FITC 溶液荧光强度的影响(图 8)。如图 8(a)所示,在 Si NPs-FITC 溶液中加入 2~100  $\mu\text{mol/L}$  CIP 溶液时, Si NPs-FITC 的荧光强度在 512、490 nm 处发生了明显的猝灭,在 490 nm 处的荧



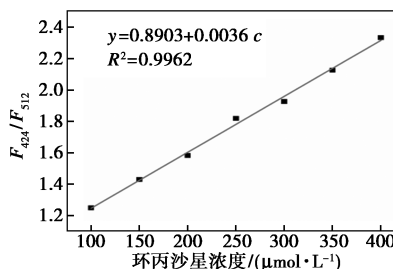
(a) 不同浓度的 CIP 加入 Si NPs-FITC 溶液后的荧光光谱图



(b) CIP 浓度与  $F_{424}/F_{512}$  线性关系图



(c) 不同浓度的 CIP 加入 Si NPs-FITC 溶液后的荧光光谱图



(d) CIP 浓度与  $F_{424}/F_{512}$  线性关系图

图 8 Si NPs-FITC 检测 CIP 浓度的线性关系图

光峰随着 CIP 浓度的增大不断蓝移,当到达 424 nm 处不再偏移,所以用  $F_{424}/F_{512}$  荧光值定量。 $F_{424}/F_{512}$  和 CIP 浓度之间存在较好的线性关系,线性拟合方程为  $F_{424}/F_{512}=0.2951+0.0093c$  ( $\mu\text{mol/L}$ ), 相关系数为  $R^2=0.9935$ , 检出限是  $8.54 \mu\text{mol/L}$ 。如图 8(c) 所示,当加入  $100\sim 400 \mu\text{mol/L}$  CIP 时,512、424 nm 处的荧光强度均不断减小,线性拟合方程为  $F_{424}/F_{512}=0.8903+0.0036c$  ( $\mu\text{mol/L}$ ), 相关系数  $R^2=0.9962$ , 检出限为  $22.47 \mu\text{mol/L}$ 。与其他已经报道的方法相比,该检测方法有较宽的检测范围和较低的检测限。

## 2.9 实际样品中 CIP 的测定

为验证该方法在实际样品中的适用性,选取了日常生活中常见的牛奶和肉制品作为检测对象,具体实验结果如表 1 所示。为进一步评估该方法的准确性,对实际样品进行了加标回收率实验,结果显示回收率范围为  $98.9\% \sim 106.6\%$ , 相对标准偏差 (RSD) 低于  $3\%$ 。结果表明该方法在实际样品检测中表现出较高的准确性和可靠性,具备良好的实际应用潜力。

表 1 实际样品中 CIP 含量的测定

样品名称	加标浓度/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	加标后检测浓度/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	平均回收率/ %	RSD( $n=3$ )/ %
牛奶	50	53.32	106.6	1.17
	70	74.31	106.2	1.11
	250	258.86	103.5	2.09
肉制品	50	50.59	101.2	2.67
	70	70.37	100.5	0.59
	250	247.20	98.9	1.52

## 3 结论

以 APTMS 和单宁酸为原料,在常压下静置 30 min 制备 Si NPs,并加入 FITC 溶液成功制备发射双信号的荧光探针 Si NPs-FITC。基于 IFE 效应,CIP 能够有效猝灭 Si NPs-FITC 的荧光信号,从而构建了一种新型的 CIP 比率荧光检测方法。该方法具有操作简便、成本低等特点,同时避免了传统合成过程中烦琐的多步操作以及对复杂仪器的依赖。实验结果表明,所制备的 Si NPs 具有优异的盐稳定性和光稳定性。与 FITC 混合后形成了灵敏度高、选择性好的比率荧光探针,实现了 CIP 的灵敏检测。该方法不仅有较低的检出限和较宽的线性范围,还表现出优异的选择性。此外,实际样品分析结果进一步验证了该方法在实际应用中的可行性和可靠性。

## 参考文献

- [1] 郑宗林,唐俊,喻文娟,等.RP-HPLC 法测定中华绒螯蟹主要组织中的恩诺沙星及其代谢产物[J].上海水产大学学报,2006,15(2):156-162.
- [2] Hani M, Khaled M, Hanan M F, et al. Antibiotic use and risk of gynecological cancer[J]. European Journal of Obstetrics Gynecology and Reproductive Biology, 2011, 159(2): 388-393.
- [3] 中华人民共和国农业农村部.GB 31650—2019 食品安全国家标准 食品中兽药最大残留限量[S].北京:中国农业出版社,2020:16.
- [4] 刘文静,潘葳,林惠真,等.表面增强拉曼光谱法快速检测水产品中恩诺沙星和环丙沙星残留[J].福建农业学报,2024,39(3):362-368.
- [5] 田慧勇,李晓娜,杨宇燕,等.毛细管电泳法测定鱼肉组织中的诺氟沙星和环丙沙星[J].江西水产科技,2022,43(4):3-6.
- [6] 孙晓峰,任柯潼,胡叶军,等.肉鸡组织中氟喹诺酮类抗生素快速检测的胶体金技术研究[J].黑龙江畜牧兽医,2018,49(19):208-213.
- [7] 苏晓晴,张李琦,郑明学,等.紫外分光光度法测定恩诺沙星微囊含量方法的建立[J].山西农业大学学报:自然科学版,2017,37(4):258-262.
- [8] 张越诚,王清清,马静,等.环境水样中  $\text{S}^{2-}$  的 CQDs 双发射比率荧光测定[J].发光学报,2023,44(4):729-737.
- [9] Li Q, He Y, Chang J, et al. Surface-modified silicon nanoparticles with ultrabright photoluminescence and single-exponential decay for nanoscale fluorescence lifetime imaging of temperature[J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135(13): 4924-4927.
- [10] Soenen S J, Manshian B, Doak S H, et al. Fluorescent non-porous silica nanoparticles for long-term cell monitoring: Cytotoxicity and particle functionality[J]. Acta Biomaterialia, 2013, 9(11): 9183-9193.
- [11] Ahire J H, Chambrier I, Mueller A, et al. Synthesis of D-mannose capped silicon nanoparticles and their interactions with MCF-7 human breast cancerous cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(15): 7384-7391.
- [12] Wu S C, Zhong Y L, Zhou Y F, et al. Biomimetic preparation and dual-color bioimaging of fluorescent silicon nanoparticles[J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137(47): 14726-14732.
- [13] Mahtab F, Lam J W, Yu Y, et al. Covalent immobilization of aggregation-induced emission luminogens in silicon nanoparticles through click reaction[J]. Small, 2011, 7(10): 1448-1455.
- [14] Zhang X, Liu W, Yang M, et al. The fabrication and mechanism of a crystalline organic fluorescent probe based on photoinduced electron transfer[J]. Molecules, 2023, 28(19): 6774.
- [15] Ma Y X, Chen Y L, Na M, et al. Preparation of zinc and boron doped carbon dots and their application in the detection of sulfites[J]. Journal of Wuhan University, 2021, 67(1): 33-40.
- [16] Zhang D, Jia D, Fang Z, et al. The detection of anthrax biomarker DPA by ratiometric fluorescence probe of carbon quantum dots and europium hybrid material based on poly(ionic)-liquid[J]. Molecules, 2023, 28(18): 6557.
- [17] Zhang J, Yu S H, et al. Highly photoluminescent silicon nanocrystals for rapid, label-free and recyclable detection of mercuric ions[J]. Nanoscale, 2014, 6(8): 4096-4101.
- [18] 漆樟玉.基于硅纳米粒子新型荧光探针的制备及在生化分析中的应用[D].桂林:广西师范大学,2022.■