

分析测试

基于桥联双四苯乙烯的
姜黄素荧光传感器的构建与应用

江晟杰*

(漳州职业技术学院石油化工学院, 福建 漳州 363000)

摘要:研究建立了一种基于乙二胺桥联双四苯乙烯(bis-tetraphenylethylene, Bis-TPE)的姜黄素荧光传感器,可快速、灵敏、准确地测定食物中姜黄素。该传感器通过单羟基四苯乙烯衍生物与双硫代氨基甲酸酯衍生物的缩合反应,设计并合成新型 AIE 荧光传感器(Bis-TPE)。采用核磁和质谱确证其化学结构,运用荧光光谱仪考察 AIE 性质和对姜黄素的检测效果。结果表明,Bis-TPE 具有典型的 AIE 性质,在水介质中对姜黄素表现出高选择性的感应能力,可用于检测水中的姜黄素,检出限为 6.78×10^{-8} mol/L,且具备良好的抗干扰能力,不受其余 19 种物质的影响。荧光检测的相对标准偏差小于 2%,表明 Bis-TPE 对姜黄素具有高选择性、高灵敏度,并成功应用于传感试纸的检测和真实生姜样品中姜黄素的检测,表明该方法可实现对姜黄素的快速、灵敏检测,具有较强的实用价值,为姜黄素的检测提供了一种新的策略。

关键词:四苯乙烯;姜黄素;荧光传感器;聚集诱导发光

中图分类号: O65

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0232-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.039

Construction and application of curcumin fluorescence sensor based on
bridged bis-tetraphenylethylene

JIANG Sheng-jie*

(College of Petrochemical Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: A curcumin fluorescence sensor based on ethylenediamine-bridged bis-tetraphenylethylene (Bis-TPE) was investigated for the rapid, sensitive, and accurate determination of curcumin in food. A novel aggregation-induced emission (AIE) fluorescent sensor (Bis-TPE) was designed and synthesized via the condensation reaction of a monohydroxytetraphenylene derivative with a bis-thiocarbamate derivative. Nuclear magnetic resonance spectroscopy and mass spectrometry were used to confirm the chemical structure, and fluorescence spectrometry was employed to investigate the AIE properties and detection performance for curcumin. The results indicated that Bis-TPE has typical AIE properties, exhibits a high selectivity for curcumin in aqueous media, and can be used to detect curcumin in water with a detection limit of 6.78×10^{-8} mol/L and good anti-interference ability, unaffected by the remaining 19 substances. The relative standard deviation of the fluorescence assay was less than 2%. Bis-TPE demonstrated high selectivity and sensitivity toward curcumin, and was successfully applied to sensing test paper and the detection of curcumin in real ginger samples, indicating that this method can achieve rapid and sensitive detection of curcumin in practical applications and provides a new strategy for the detection of curcumin.

Key words: tetraphenylethylene; curcumin; sensor; aggregation-induced emission

近年来,食品安全问题已成为社会关注的焦点。姜黄素是从多年生草本植物姜黄的根茎中提取的一种重要的类黄酮色素,存在于各种食品中。姜黄素作为香料和食用色素广泛应用于食品工业,如罐头食品、蛋糕和饮料等^[1-2]。此外,姜黄素还具有优异的生理和药用作用,包括抗肿瘤、抗炎、抗真菌、抗氧化、抗癌和抗人体免疫缺陷病毒(human immunodeficiency, HIV)等多种生物和药理活性^[3-4]。然而,有研究表明过量摄入姜黄素会对 DNA 产生促氧化作用,降低细胞中的三磷酸腺苷含量,最终导致细胞坏死,损害

人体健康^[5]。鉴于姜黄素在各个领域的广泛应用,准确定量测定食品及相关产品中姜黄素的含量,确保人体每日对姜黄素的摄入量在合理范围内,具有重要意义。

到目前为止,姜黄素的分析方法有多种,如高效液相色谱法、液相色谱-质谱法、紫外-可见光谱法、毛细管电泳法和碳电极法等经典方法^[6-7]。这些方法具有较高的准确度和灵敏度,但也不可避免地存在设备昂贵、样品前处理复杂、操作程序烦琐、分析时间长等缺点,不利于经济、快速、准确地测定姜黄

收稿日期:2026-04-28;修回日期:2026-06-25

基金项目:福建省自然科学基金项目(2024J08128);漳州职业技术学院博士启动课题项目(ZZYB2205);漳州职业技术学院科教融汇项目(zzyxs25019)

作者简介:江晟杰(1993-),男,博士,副教授,研究方向为有机功能材料的制备及其性能研究,通讯联系人,jiangshengjie@fjzhit.edu.cn。

素。另一种方法是荧光法,因简单、即时、灵敏和经济高效的特点而受到赞赏^[8-9]。尤其是近些年聚集诱导发光(aggregation induced emission, AIE)材料的快速发展,具有 AIE 性质的有机荧光传感器引起了研究者的广泛兴趣^[10-11]。四苯乙烯作为典型的 AIE 分子,因结构简单、易于修饰、聚集诱导荧光性能好、Stokes 位移大等优势,引起人们广泛关注^[12-13],然而,准确设计和合成对复杂客体(如姜黄素)具有优异传感能力的 AIE 分子仍然是一项具有挑战性的工作。

本研究基于姜黄素的 2 个 C=O 基团、2 个 MeO 基团和 2 个 OH 基团的对称结构,制备了一种基于乙二胺桥联双四苯乙烯(bis-tetraphenylethylene, Bis-TPE)的有机荧光传感器,该传感器具有对称结构,与姜黄素的对称结构相匹配。采用荧光光谱仪研究了该传感器的 AIE 性能,及其对姜黄素的选择性、抗干扰性、重现性、检出限等识别参数,并应用于传感试纸和生姜中检测姜黄素,为高效检测姜黄素提供了一种可行的分析方法。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

对苯二异硫氰酸酯、单羟基四苯乙烯、乙二胺、溴乙酸乙酯、水合肼、四氢呋喃(tetrahydrofuran, THF)、无水乙醇、乙腈、甲醇、石油醚、二氯甲烷、盐酸、溴化钾、硝酸钠、硝酸钾、硝酸镁、硝酸钙、鸟嘌呤、色氨酸、果糖、胞嘧啶、腺嘌呤、胸腺嘧啶、维生素 B₁、维生素 B₂、淀粉、蔗糖、葡萄糖、咖啡因、脯氨酸、叶酸、土霉素、姜黄素(分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司),生姜购自周边超市。溶剂不做进一步纯化直接使用。光谱表征中所用水均为去离子水,实验室纯化制备。

Bruker MICROQTOF II, Bruker MICROFLEXLRF (MADIL-TOF) 质谱仪、Bruker-ARX 400 型核磁共振仪(德国布鲁克公司);Hitachi F-4600 荧光光谱仪(日本日立公司);ME204 分析天平(精度 0.1 mg, 梅特勒托利多科技(中国)有限公司);Thermo Scientific Nicolet 6700 红外光谱(美国赛默飞公司);Alliance 3695 高效液相色谱仪(美国 Waters 仪器公司)。

1.2 实验过程

氮气保护下,在干燥的乙腈(40 mL)中加入单羟基四苯乙烯(0.35 g, 1 mmol)和溴乙酸乙酯

(0.2 g, 1.2 mmol),搅拌混合物并回流过夜。使用薄层色谱法检测反应过程。反应完成后,将 50 mL 1 mol/L HCl 溶液倒入反应混合物中,用二氯甲烷(3×20 mL)萃取。然后分离有机相,减压浓缩。残留物经硅胶色谱柱进行纯化(洗脱液:二氯甲烷/石油醚=1/2),得到化合物 2 的白色粉末,产率为(62±0.1)%。

氮气保护下,化合物 2(0.43 g, 1 mmol)和水合肼(0.05 g, 1.2 mmol)在二氯甲烷/无水乙醇[V/V=1:1(20 mL)]中回流 10 h。溶剂在减压下蒸发。残留物在二氯甲烷/无水乙醇(V/V=1:3)中重结晶,得到白色粉末状的四苯乙烯衍生物 3,产率为(86±0.2)%。反应流程如图 1 所示。

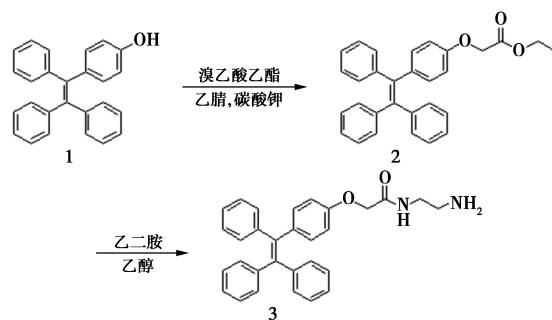


图 1 化合物 3 的合成路线

氮气氛围下,将化合物 3(0.44 g, 1 mmol)和对苯二异硫氰酸酯(0.096 g, 0.5 mmol)加入到含有 30 mL 无水乙醇的三颈烧瓶中搅拌回流过夜。通过薄层色谱(thin layer chromatography, TLC)监测反应的进程。在反应结束时,将 10 mL 蒸馏水倒入反应混合物。将沉淀物过滤,并用 20 mL 无水乙醇洗涤,得到白色固体 Bis-TPE,产率为(81±0.21)%。反应流程如图 2 所示。

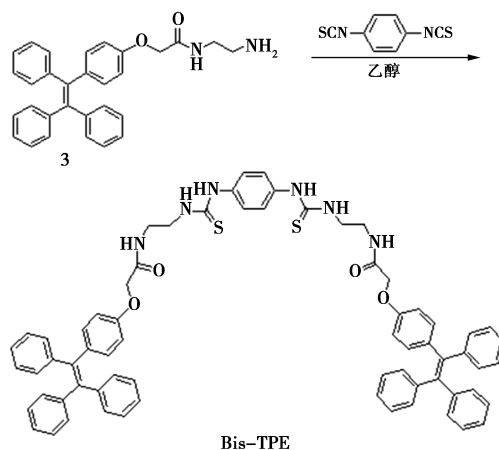


图 2 化合物 Bis-TPE 的合成路线

2 结果与分析

2.1 传感器 Bis-TPE 的合成和表征

基于姜黄素含有 2 个 C=O 基、2 个 MeO 基和 2 个 OH 基的对称结构,设计以乙二胺桥联的双四苯乙烯结构作为目标化合物,具有对称结构,与姜黄素的对称结构相匹配。首先,通过化合物 1 和溴乙酸乙酯在乙腈体系中回流制备化合物 2,产率为 62%。通过在乙醇中回流样品 2 与乙二胺,合成了化合物 3,重结晶后的产率为 86%。最后将化合物 3 和化合物 4 混合后在乙醇中加热回流,制备得到目标化合物 Bis-TPE(产率 81%)。核磁和质谱结果都显示合成目标化合物。

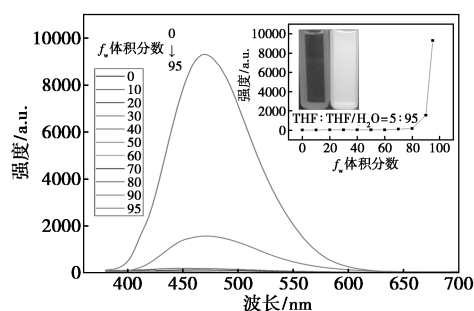
化合物 2: $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3), δ_{ppm} : 7.20~7.25(m, 15H, ArH), 7.03(d, $J=8.0$ Hz, 2H, ArH), 6.82(d, $J=8.0$ Hz, 2H, ArH), 4.58(s, 2H, OCH_2), 4.30(q, 2H, OCH_2), 1.32(t, $J=8.0$ Hz, 3H, CH_3)。

化合物 3: $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3), δ_{ppm} : 7.67(s, 2H, NH), 7.02~7.19(m, 15H, ArH), 6.96(d, $J=8.0$ Hz, 2H, ArH), 6.62(d, $J=8.0$ Hz, 2H, ArH), 4.52(s, 2H, OCH_2), 3.89(s, 2H, NH_2)。

Bis-TPE: $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3), δ_{ppm} : 9.57(s, 2H, NH), 8.19(s, 2H, NH), 7.66(s, 2H, NH), 7.03~7.13(m, 20H, ArH), 6.89~6.94(m, 14H, ArH), 6.83(d, $J=8.0$ Hz, 4H, ArH), 6.69(d, $J=8.0$ Hz, 4H, ArH), 4.35(s, 4H, CH_2), 3.54(s, 4H, CH_2), 3.27(s, 4H, CH_2)。MALDI-TOFMS ($\text{C}_{68}\text{H}_{60}\text{N}_6\text{O}_4\text{S}_2$) 理论计算分子质量为 1 088.412, 测试值为 1 088.41。

2.2 Bis-TPE 的 AIE 性能

在 THF/ H_2O (水含量比例 0%~95%)混合体系中,通过荧光光谱研究了传感器 Bis-TPE(结构如图 1 所示)的 AIE 特性。荧光光谱的相应结果记录在图 3 中。从图 3 中可以看出,当体系的含水量比例小于 80%时,体系几乎没有荧光发射。随着含水量比例从 80%增加到 95%, Bis-TPE 的荧光强度迅速增加,并在 95%时达到最大值,荧光强度增加了约 388 倍。在紫外灯(365 nm)照射下可以清楚地观察到蓝色荧光的变化(图 3 插图)。这些结果表明, Bis-TPE 具有良好的 AIE 效果。因为它在 95%水含量的 THF/ H_2O 混合体系中显示出最强的荧光,该溶液体系被选为传感器传感时的溶液体系。



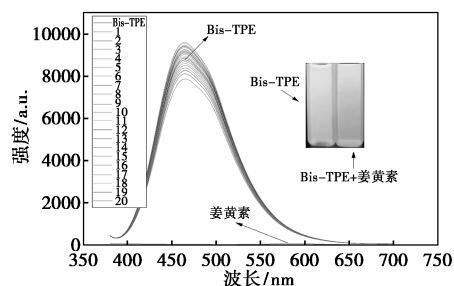
插图为不同 H_2O 含量荧光强度曲线图及

Bis-TPE 在 5% 和 95% 水含量下的荧光照片

图 3 Bis-TPE 在含有不同比例 H_2O 的 THF/ H_2O 混合物中的荧光光谱

2.3 对系列金属离子和生物分子的感应能力

通过测量 Bis-TPE 在 THF/ H_2O (体积比 5:95)溶液中与不同生物分子和金属离子的混合体系的荧光光谱变化,研究了 Bis-TPE 对一系列生物分子和金属离子的感应能力。结果如图 4 所示。可以清楚地看到,当加入除了姜黄素外的其余 19 种待测物质时,体系的荧光强度出现轻微波动。然而,当加入姜黄素时, Bis-TPE 的荧光强度发生了猝灭。这些结果表明, Bis-TPE 对姜黄素具有良好的选择性。



1— Na^+ ; 2— K^+ ; 3— Mg^{2+} ; 4— Ca^{2+} ; 5—鸟嘌呤; 6—色氨酸;
7—果糖; 8—胞嘧啶; 9—腺嘌呤; 10—胸腺嘧啶; 11—维生素 B_1 ;
12—维生素 B_2 ; 13—淀粉; 14—蔗糖; 15—葡萄糖; 16—咖啡因;
17—脯氨酸; 18—叶酸; 19—土霉素; 20—姜黄素

图 4 不同生物分子和金属离子存在时传感器 Bis-TPE(1×10^{-5} mol/L) 的荧光光谱

2.4 荧光滴定法检测姜黄素

图 5 和图 6 分别为 Bis-TPE 在 THF/ H_2O (体积比 5:95)中与不同摩尔比姜黄素作用的荧光光谱及荧光强度随浓度的变化关系。可以看出,姜黄素摩尔比在 0~0.5 时,荧光强度随着姜黄素摩尔比的增加而迅速下降。然而,当摩尔比大于 0.5 时,荧光强度慢慢减弱。此外,最大发射波长从 469 nm 到 547 nm,红移了 79 nm。如图 6 插图所示,荧光强度与 Bis-TPE 和姜黄素的摩尔比 0~0.08 之间具有良

好的线性关系, $R^2=0.999\ 92$, 线性方程 $y=9\ 301.75+80\ 097.93x$ (其中 y 为荧光强度, x 为传感器 Bis-TPE 的浓度)。根据检测限公式 $DL=K\times Sb_1/S$, 计算检出限为 6.78×10^{-8} mol/L。与其他文献报道的传感器进行对比, 结果如表 1 所示, 该传感器具有较宽的线性范围和较低的检测限, 上述结果表明, Bis-TPE 在传感检测姜黄素方面具有良好的应用前景。

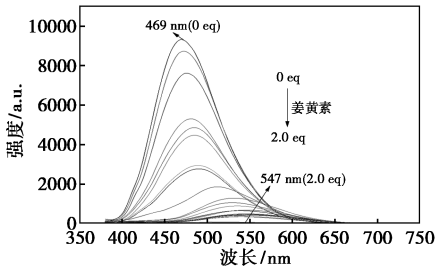


图 5 Bis-TPE 对不同浓度姜黄素的荧光光谱图

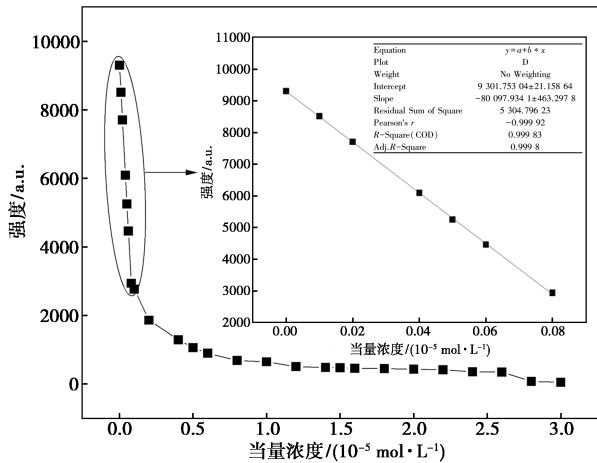


插图 为 Bis-TPE 在不同姜黄素浓度 (0~0.01 mmol/L) 中 荧光强度

图 6 Bis-TPE 与姜黄素浓度的荧光强度 关系 (547 nm)

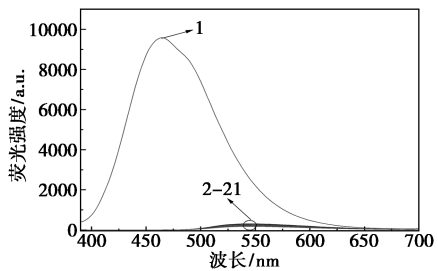
表 1 本研究传感器与其他姜黄素检测方法的比较

检测方法	线性范围	检出限
电化学 ^[14]	0.2~320.0	0.0800
电化学 ^[15]	1~48	0.0840
荧光 ^[16]	1~10	0.3000
荧光 ^[17]	0.4~45	0.1330
荧光 ^[3]	0~0.01	0.1150
荧光 (本研究)	0~0.08	0.0678

2.5 干扰实验与重现性

通过研究 Bis-TPE 与姜黄素或姜黄素与其他

物质 (Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、鸟嘌呤、色氨酸、果糖、胞嘧啶、腺嘌呤、胸腺嘧啶。维生素 B₁、维生素 B₂、淀粉、蔗糖、葡萄糖、咖啡因、脯氨酸、叶酸、土霉素) 的荧光光谱, 进行干扰实验, 考察 Bis-TPE 对姜黄素的选择性。如图 7 所示, Bis-TPE 的荧光光谱显示最大发射波长为 469 nm, 当姜黄素被加入到溶液中时, 其荧光强度迅速下降, 最大发射波长转移到 547 nm。此外, 加入一系列其他物质后, 该系统的荧光强度没有明显变化。这些结果表明, Bis-TPE 对姜黄素具有良好的感应能力, 并且不受其他金属离子和生物分子的干扰, 具有良好的抗干扰能力。



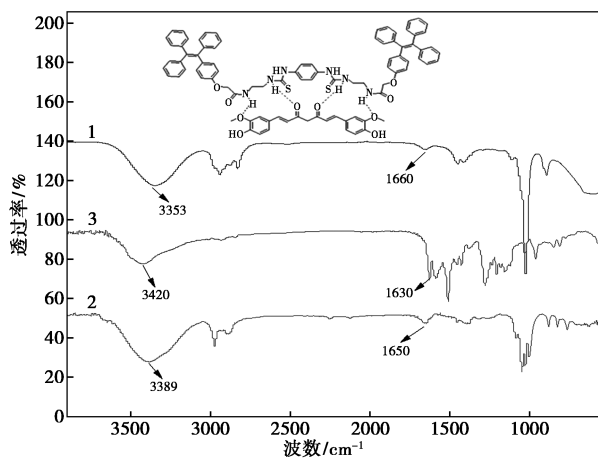
1—Bis-TPE; 2—姜黄素; 3—Na⁺; 4—K⁺; 5—Mg²⁺; 6—Ca²⁺; 7—鸟嘌呤; 8—色氨酸; 9—果糖; 10—胞嘧啶; 11—腺嘌呤; 12—胸腺嘧啶; 13—维生素 B₁; 14—维生素 B₂; 15—淀粉; 16—蔗糖; 17—葡萄糖; 18—咖啡因; 19—脯氨酸; 20—叶酸; 21—土霉素

图 7 Bis-TPE 在不同干扰物共存下对姜黄素的 荧光响应光谱及强度变化

2.6 传感机制研究

为了更好地了解 Bis-TPE 对姜黄素的感应机制, 通过红外光谱、质谱和荧光 Job's 研究了化学计量和机理传感姜黄素。如图 8 所示, 通过 Bis-TPE、姜黄素和 Bis-TPE+姜黄素的 FT-IR 比较, Bis-TPE+姜黄素的 FT-IR 显示出 OH、C=O、—NH、Ar—H 的明显变化。OH 和 NH 基团分别从 3 353、34 20 cm⁻¹ 移动到 3 389 cm⁻¹, C=O 基团从 1 660、1 630 cm⁻¹ 向 1 650 cm⁻¹ 迁移。这些现象符合从检测前的分子内氢键到检测后的分子间氢键的变化。此外, 在图 9 中, 具有 5 倍姜黄素浓度和 Bis-TPE 的质谱表明在 1 459.71 处的结合峰 (通过 Chemdraw 模拟结合模型的理论值为 1 459.725), 符合 Bis-TPE 与姜黄素的 1:1 结合比例。图 10 中显示了传感器和姜黄素的荧光 Job's 曲线图, 可以清晰地发现在 $f_{\text{姜黄素}}=0.5$ 时出现一个拐点, 并且在 0.5 后荧光发射减弱开始变缓, 这表明 Bis-TPE 与姜黄素的化学计量比为 1:1。基于上述分析, 提出了 Bis-TPE 与姜黄素的结合模型, 如图 8 插图所示, 其中 Bis-TPE 与姜黄

素之间形成四重氢键。



1—Bis-TPE; 2—Bis-TPE+姜黄素; 3—姜黄素

图 8 Bis-TPE、姜黄素和 Bis-TPE 与姜黄素(1:1)的傅里叶变换红外光谱

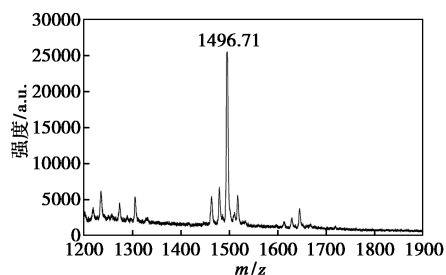


图 9 Bis-TPE+姜黄素识别后的质谱图

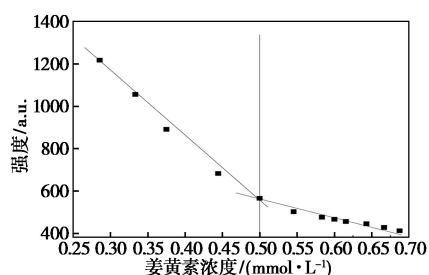
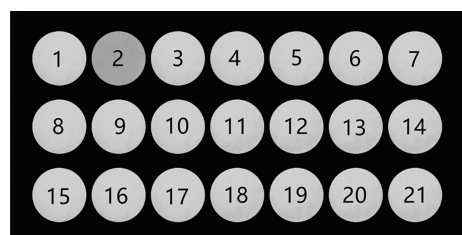


图 10 Bis-TPE 和姜黄素在 THF/H₂O(5/95) 中的荧光 Job's 图

2.7 在传感试纸中的应用

通过将中性滤纸浸入 0.1 mmol/L Bis-TPE 溶液中 5 min 来制备 Bis-TPE 传感试纸条。然后将滤纸在室温下蒸发和干燥,并剪切成圆形片状。随后,分别滴入 5 滴(0.1 mmol/L)含有不同离子和生物分子的溶液。图 11 显示了这些试纸在 365 nm 紫外光照射下的照片,从图 11 中可以看出,除了姜黄素之外,其他物质的加入都没有发生明显的荧光颜色变化,表明 Bis-TPE 在检测姜黄素方面的实际应用潜力。

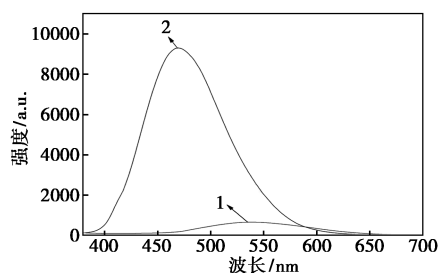


1—Bis-TPE; 2—姜黄素; 3—Na⁺; 4—K⁺; 5—Mg²⁺; 6—Ca²⁺; 7—鸟嘌呤; 8—色氨酸; 9—果糖; 10—胞嘧啶; 11—腺嘌呤; 12—胸腺嘧啶; 13—维生素 B₁; 14—维生素 B₂; 15—淀粉; 16—蔗糖; 17—葡萄糖; 18—咖啡因; 19—脯氨酸; 20—叶酸; 21—土霉素

图 11 含有不同生物大分子或离子的试纸在紫外光(365 nm)下的荧光照片

2.8 实际样品检测

选取生姜作为实际样品,用 Bis-TPE 检测其中姜黄素的含量。将样品风干后进行粉碎,用四氢呋喃浸提。随后,将所得溶液过滤,用 Bis-TPE 传感器检测其中姜黄素含量。图 12 为相应的荧光光谱。Bis-TPE 显示出明显的荧光衰弱,以及从 469 nm 到 547 nm 的明显红移,这与先前的荧光研究一致。此外,根据标准工作曲线,计算出姜黄素含量为 96 μg/100 g,并与高效液相色谱法测定的结果 98 μg/100 g 进行比较。2 种方法的结果非常接近,偏差小于 3%。表明 Bis-TPE 具有检测真实样品中姜黄素含量的潜力。



1—Bis-TPE; 2—Bis-TPE+姜黄素提取液

图 12 检测实际样品(生姜)中姜黄素的化合物的发射光谱

3 结论

本研究基于姜黄素的 2 个 C=O 基团、2 个 MeO 基团和 2 个 OH 基团的对称结构,设计并合成了一种基于乙二胺桥联双四苯乙烯(Bis-TPE)的有机荧光传感器,该传感器具有对称结构,与姜黄素的对称结构相匹配。该传感器可以在温和条件下检测水介质中的姜黄素。并且对姜黄素表现出高选择性检测。在 THF/H₂O(5/95)中随着姜黄素当量的增

加荧光逐渐猝灭,伴随着的荧光颜色从蓝色变为橙色。检出限低至 6.78×10^{-8} mol/L,通过质谱、荧光 Job's 图和红外光谱证实了其传感机制,表明基于四氢键的 1:1 化学计量比。对试纸和模拟真实样品的应用表明其在真实环境中检测姜黄素的良好应用前景。本研究所制备的荧光传感器具有成本低、操作简便、灵敏度高、选择性好等优点,为姜黄素在真实样品和生活环境中的检测提供了新的策略。

参考文献

- [1] Lavanya R, Srinivasadesikan V, Lin M C, *et al.* Highly selective detection of citrulline using curcumin analogue and its application in food samples with logic gate behaviour [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2023, 1288: 135771–1355775.
- [2] Wei J X, Zhang X M, Zhang Z. Switch-on mode of bioenergetic channels regulated by curcumin-loaded 3D composite scaffold to steer bone regeneration [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 2–20.
- [3] Jiang S J, Qiu J B, Lin B N, *et al.* First fluorescent sensor for curcumin in aqueous media based on acylhydrazone-bridged bis-tetraphenylethylene [J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 229: 117916–117924.
- [4] Patra D, Barakat C. Synchronous fluorescence spectroscopic study of solvatochromic curcumin dye [J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2011, 79(5): 1034–1425.
- [5] Pan C J, Wen Q Q, Mal F, *et al.* Green-emissive water-dispersible silicon quantum dots for the fluorescent and colorimetric dual mode sensing of curcumin [J]. *Analytical Methods*, 2021, 13(42): 5025–5034.
- [6] Gou M L, Men K S, Huashan, *et al.* Curcumin-loaded biodegradable polymeric micelles for colon cancer therapy in vitro and in vivo [J]. *Nanoscale*, 2011, 3(4): 1558–1567.
- [7] Khanji A N, Michaux F S, Dominique S, *et al.* The study of curcumin interaction with micellar casein and lactic acid bacteria cell envelope [J]. *Food Science and Technology*, 2018, 91: 293–302.
- [8] Guo Y M, Yang C, Zhang Y J, *et al.* Nanomaterials for fluorescent detection of curcumin [J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 265: 120359.
- [9] Hosseini-zare M S, Sarhadi M, Zarei M, *et al.* Synergistic effects of curcumin and its analogs with other bioactive compounds; A comprehensive review [J]. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2021, 210: 113072–113081.
- [10] Jiang S J, Chen S B, Guo H Y, *et al.* “Turn-on” far-red fluorescence sensor for Y^{3+} based on Schiff-based tetraphenylethylene [J]. *Dyes And Pigments*, 2020, 183: 108717–108724.
- [11] Jiang S J, Chen S B, Wan Z C, *et al.* First fluorescence sensor for simultaneously detecting three kinds of II B elements (Zn^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+}) based on aggregation-induced emission [J]. *Sensors And Actuators B-Chemical*, 2020, 308: 127734–127743.
- [12] He L Y, Li Q, Huang K, *et al.* A naphthalimide functionalized fluoran with AIE effect for ratiometric sensing Hg^{2+} and cell imaging application [J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 296: 122672–122676.
- [13] Liu Z C, Wang L, Zhu W P, *et al.* A versatile color and fluorescence pH sensor based on AIE and open-loop synergy effect; Crystal structure and its application in cell imaging [J]. *Dyes And Pigments*, 2021, 190: 109311–109318.
- [14] Somaye C, Mohammad A T, Hassan K M, *et al.* Fabrication of fast and sensitive nanostructure voltammetric sensor for determination of curcumin in the presence of vitamin B₉ in food samples [J]. *Electroanalysis*, 2016, 10(28): 2590–2597.
- [15] Ryotaro W, Shota T, Hitoshi M, *et al.* Electrochemical detection of curcumin in food with a carbon Nanotube-Carboxymethylcellulose electrode [J]. *Analytical Sciences*, 2020, 9(36): 1113–1118.
- [16] Anastasiia P, Dmitriy D, Alexander L, *et al.* Determination of curcumin in biologically active supplements and food spices using a mesofluidic platform with fluorescence detection [J]. *Talanta*, 2016, 159: 300–306.
- [17] Yu C H, Zhuang Q, Cui H Y, *et al.* A fluorescent “Turn-off” probe for the determination of curcumin using upconvert luminescent carbon dots [J]. *Journal of Fluorescence*, 2020, 6(30): 1469–1476. ■

扬农集团与江苏核电签署海水资源化合作研究协议

近日,扬农集团与江苏核电有限公司在田湾核电基地签署海水资源化合作研究协议。双方就核能与石化产业耦合、海水淡化资源综合利用及基础原料互供等展开深入交流,并达成合作共识。

根据协议,双方将加速推动核电海水淡化与化工生产的耦合,成立联合工作组细化研究节点,系统推进产品链耦合路径研究,创新清洁能源与化工合作模式,共同打造核能综合利用的绿色循环经济发展新样板。(扬农集团)