一种 ESIPT“关-开”型 Cys 荧光探针的合成及应用

韩秋敏[1],李登超[2*]
(1.江苏食品药品职业技术学院药学院,江苏 淮安 223303;
2.淮阴师范学院生命科学学院,江苏 淮安 223300)

摘要:以2-氨基苯硫酚和4-羟基苯甲醛为原料合成的2-(4-羟基苯基)苯并噻唑(4HBT)为荧光团,以丙烯酰氯为识别单元,设计并合成了一种ESIPT“关-开”型半胱氨酸(Cys)荧光探针4HBT-AC。通过 ^{1}H-NMR 和 ^{13}C-NMR 波谱对4HBT-AC进行了结构表征。吸收光谱实验结果表明,探针4HBT-AC溶液的最大吸收峰为302 nm,而加入Cys后,最大吸收峰变为318 nm;荧光光谱系列实验结果显示,在302 nm激发波长下,最大发射波长为380 nm,荧光强度增强约107倍;最适pH在7.0左右;响应时间为16 min;在0~60 μmol/L范围内,荧光强度与Cys浓度之间呈良好的线性关系,相关系数 R^2 = 0.991 1,检测限为0.12 μmol/L;该探针对Cys的选择性和抗干扰能力强。通过HPLC分析检测反应过程确定了4HBT-AC与Cys的响应机理。用测试纸和薄层硅胶板对探针响应Cys的荧光分析进行了初步应用。

关键词:ESIPT;荧光探针;半胱氨酸;2-(4-羟基苯基)苯并噻唑;丙烯酰氯
中图分类号:O657.3 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2025)06-0264-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.06.045

Synthesis and application of an ESIPT “off-on” cysteine fluorescent probe

HAN Qiu-min[1], *LI Deng-chao*[2*]
(1.School of Pharmacy, Jiangsu Food and Pharmaceutical Science College, Huai'an 223303, China;
2.School of Life Science, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China)

Abstract: A novel ESIPT “off-on” cysteine fluorescent probe, 4HBT-AC, is designed and synthesized through using 2-(4-hydroxyphenyl) benzothiazole (4HBT), which is synthesized through using 2-aminothiophenol and 4-hydroxybenzaldehyde as the fluorescent group, and acryloyl chloride as the recognition unit. Moreover, the structure of 4HBT-AC is characterized by means of ^{1}H-NMR and ^{13}C-NMR spectroscopy. The absorption spectrum experiment results indicate that the maximum absorption peak of 4HBT-AC solution is 302 nm, while it becomes 318 nm after cysteine is added into the solution. The results from fluorescence spectrum series experiments show that under an excitation wavelength of 302 nm, the maximum emission wavelength of 4HBT-AC is 380 nm, and its fluorescence intensity is enhanced by about 107 times. The optimal pH is around 7.0 and the response time is around 16 minutes. There exists a good linear relationship between fluorescence intensity and cysteine concentration within the range of 0-60 μmol/L, showing a correlation coefficient R^2 of 0.991 1 and a detection limit of 0.12 μmol/L. This probe has a high selectivity for cysteine and a strong anti-interference ability. Furthermore, the response mechanism of 4HBT-AC to cysteine is clarified through analyzing the reaction process by HPLC. In addition, the fluorescence analysis on probe's response to cysteine is preliminarily applied on test paper and thin-layer silica gel plate.

Key words: ESIPT; fluorescent probe; cysteine; 2-(4-hydroxyphenyl) benzothiazole; acryloyl chloride

激发态分子内质子转移(excited state intramolecular proton transfer, ESIPT)是荧光分子的一种新型传感机制。由于特殊的激发态光物理过程,具有ESIPT的化合物,基于“酮式-烯醇式”的异构互变,可实现分子内电子重新排布,从而具有大斯托克斯位移、灵敏度高等特点[1],因此具有ESIPT性质的化合物在光学材料、能源燃料、激光染料、生物探针、分子逻辑门、化学传感器等领域具有广泛的应用[2]。典型的ESIPT化合物有苯并咪唑、苯并恶唑、苯并噻唑衍生物,黄酮、喹啉、萘亚胺衍生物等[3]。其中基于2-(2′-羟基苯基)苯并噻唑(HBT)及其衍生物合成的荧光探针在分析检测金属离子(如 Al^{3+}、Zn^{2+}、Hg^{2+}、Ag^{2+}、Pb^{2+} 等[4-8])、阴离子(如 ClO^-、CN^-、$ONOO^-$ 等[9-11])以及生物硫醇[12-13]中均显示了潜在的应用价值。

生物硫醇包括半胱氨酸(Cys)、同型半胱氨酸(Hcy)、还原型谷胱甘肽(GSH)等,广泛存在于生物体内,在蛋白质合成、细胞代谢、信号传导和氧化胁

收稿日期:2024-10-17;**修回日期**:2025-04-10
作者简介:韩秋敏(1976-),女,硕士,副教授,研究方向为生物化学工程,20041011@jsfpc.edu.cn;李登超(1976-),男,博士,副教授,研究方向为生物化工,通讯联系人,dcli@hytc.edu.cn。

迫等许多生理活动中具有重要作用[14-15]。生物硫醇浓度的异常往往会导致生物体一些疾病的产生[16]。例如,Cys 浓度过高会增加患心血管疾病和阿尔茨海默病的风险,而过低会导致生长迟缓、肝损伤、水肿、肌肉和脂肪流失等不良症状[17-18]。Hcy 在体内一般浓度比较低,Hcy 浓度过高会导致动脉粥样硬化、高血压和冠心病等疾病[19]。由于这些小分子物质的结构和对环境的敏感度相似,因此,建立能够快速、方便、灵敏的分析检测 Cys 或区分生物硫醇的方法,对于相关疾病的早期诊断和治疗至关重要[20]。目前对 Cys 的检测方法主要有电化学分析法[21]、比色法[22]、色谱法[23]、荧光法[24]等,其中荧光法是一种新型的光学分析技术,具有操作方便、选择性强、灵敏度高及可视化等优点而引起研究者的广泛关注[13,25-26]。

本文中基于 ESIPT 原理,以 HBT 的结构类似物 4HBT 为荧光团,以丙烯酰氯为识别基团,设计并合成了一种新型 ESIPT“关-开”型 Cys 荧光探针。系列实验结果表明,该探针 4HBT-AC 对 Cys 具有斯托克斯位移大、响应时间短、选择性强、灵敏度高和容易制备等特点,可为相关领域的研究应用提供重要的数据支持。

1　仪器与试剂

Avance 400 MHz 型核磁共振波谱仪(NMR,瑞士 Bluker 公司);Infinite M200 Pro 多功能酶标仪(瑞士 TECAN 公司);SPD-16 高效液相色谱仪(岛津仪器苏州有限公司);PLUS-E2-20TJ 超纯水机(南京易普易达有限公司);WFH-203B 型三用紫外分析仪(上海精科实业有限公司);PHS-3E 精密 pH 计(上海雷磁仪器厂);DHG-9146A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);RE-52CS 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂);JHX-5PLUS 数字显微熔点测定仪(上海佳航仪器仪表有限公司)。

2-氨基苯硫酚、4-羟基苯甲醛等试剂均为市售分析纯。ZORBAX SB-C18 柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm)购自安捷伦科技有限公司;硅胶粉(200~300 目)和硅胶板 F254 购自山东青岛海阳化工有限公司。

2　实验方法

探针 4HBT-AC 的合成路线如图 1 所示。首先以 2-氨基苯硫酚和 4-羟基苯甲醛通过反应合成 4HBT;然后以 4HBT 和丙烯酰氯通过酰化反应获得探针 4HBT-AC。

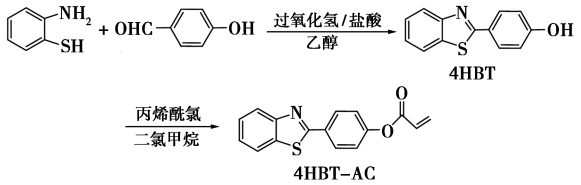


图 1　探针 4HBT-AC 的合成路线

2.1　化合物 4HBT 的合成

准确称取 0.375 g 2-氨基苯硫酚(3 mmol)、0.367 g 4-羟基-苯甲醛(3 mmol)放入 250 mL 单口具塞烧瓶中,加入 12 mL 无水乙醇,磁力搅拌溶解;然后加入 37% HCl(9.0 mmol)和 30% H_2O_2(18 mmol)室温搅拌 1.5 h,反应过程中产生沉淀物,过滤后得固体粗产物;最后用硅胶柱层析将粗产物纯化,洗脱剂为乙酸乙酯/石油醚=3∶1(体积比),得白色固体产物 4HBT 0.593 g(产率 87.0%)。熔点 189 ~ 190℃,(文献值 188 ~ 189.2℃)[27]。^{1}H-NMR(400 MHz, DMSO-d_6),δ: 10.27(s, 1H), 8.06(dd, J=8.1, 1.2 Hz, 1H), 8.01~7.94(m, 1H), 7.97 ~ 7.89 (m, 2H), 7.49 (ddd, J = 8.3, 7.2, 1.3 Hz, 1H), 7.39(ddd, J=8.4, 7.2, 1.2 Hz, 1H), 7.00~6.92(m, 2H)。^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6), δ: 168.09, 161.21, 153.96, 134.49, 129.53, 126.92, 125.38, 124.31, 122.65, 122.59, 116.61。

2.2　探针 4HBT-AC 的合成

准确称取 0.34 g 4HBT(1.5 mmol)放入 100 mL 单口具塞烧瓶中,加入 20 mL 二氯甲烷磁力搅拌溶解,在冰浴条件下,加入 0.75 mL 三乙胺后,30 min 内逐滴加入 0.163 g 丙烯酰氯(1.8 mmol)和 10 mL 二氯甲烷的混合溶液。在 0℃下继续搅拌反应 1 h,然后室温搅拌反应 2 h。反应结束后有机相用去离子水洗涤 3 次,无水 Na_2SO_4 干燥,过滤并减压浓缩得粗产物。最后通过硅胶柱层析将粗产物进行纯化,洗脱剂为二氯甲烷/石油醚=2∶1(体积比),得到淡黄色产物 4HBT-AC 0.32 g,产率 75.8%,熔点 128~129℃。^{1}H-NMR(400 MHz, DMSO-d_6), δ: 8.20~8.12(m, 3H), 8.11 ~ 8.04(m, 1H), 7.56(ddd, J=8.2, 7.2, 1.3 Hz, 1H), 7.47(td, J=7.7, 1.2 Hz, 1H), 7.44 ~ 7.37(m, 2H), 6.59(dd, J = 17.3, 1.4 Hz, 1H), 6.45(dd, J = 17.2, 10.3 Hz, 1H), 6.20(dd, J = 10.3, 1.4 Hz, 1H)。^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6), δ: 166.80, 164.34, 154.06, 152.97, 135.08, 134.54, 131.12, 129.04, 127.93,

127.19,126.08,123.39,123.31,122.86。

2.3　紫外-可见光谱和荧光光谱测量

1.0 mmol/L 的探针 4HBT-AC 储备溶液用 DMSO 配制;10 mmol/L 的 Cys 溶液和分析物溶液用超纯水配置。分析物包括氨基酸(Gly、Ala、Glu、Asp、Lys、Phe、Met、Pro、Tyr、Try)、阴离子(Cl^-、ClO_3^-、NO_3^-、HPO_4^{2-}、SO_4^{2-}、S^{2-})和金属离子(Fe^{2+}、Zn^{2+}、Cu^{2+}、Co^{2+})。一般测试系统为 10 μmol/L 4HBT-AC+100 μmol/L 不同分析物,所有光学实验均在乙腈/磷酸缓冲溶液(10 mmol/L,pH=7.4)中进行,充分振荡并在室温下放置 16 min,记录光谱。吸收光谱扫描范围 280~480 nm;荧光光谱测量:激发波长 302 nm,激发带宽 5 nm;发射波长:扫描范围 350~600 nm 或 380 nm,发射带宽 20 nm。

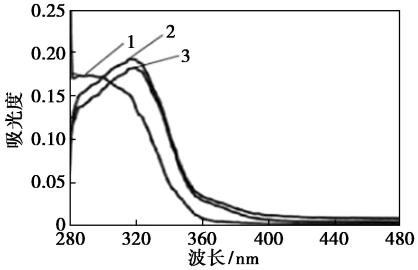
2.4　HPLC 分析条件

样品浓度为 0.1 mmol/L 4HBT-AC 和 0.1 mmol/L 4HBT;反应体系为 0.1 mmol/L 4HBT-AC 和 1 mmol/L Cys。色谱柱为安捷伦 Zorbax SB-C18(250 mm×4.6 mm,5 μm);流动相为甲醇:水=4:1(体积比);1 mL/min 流速;30℃柱温;254 nm 检测波长;10 μL 进样量。

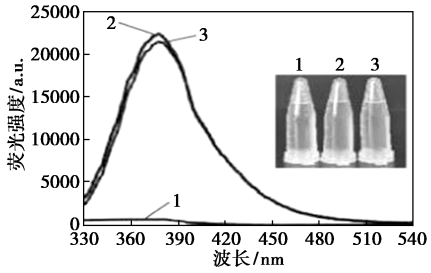
3　结果与讨论

3.1　4HBT-AC 探针对 Cys 的光谱分析

图 2 显示了探针 4HTB-AC、4HBT-AC+Cys 和 4HBT 的紫外-可见吸收光谱和荧光光谱。图 2(a)显示,4HTB 是合成 4HBT-AC 的底物,最大吸收峰为 318 nm;探针 4HBT-AC 溶液在 302 nm 处有最大吸收峰,而加入 Cys 后,最大吸收峰发生 16 nm 的位移,转移到 318 nm,恰好与底物 4HBT 的最大吸收峰 318 nm 一致。图 2(b)显示,在激发波长 302 nm 下,探针 4HBT-AC 溶液几乎没有荧光,而在 4HBT-AC+Cys 和 4HBT 溶液中,发射波长均在 380 nm 出现最大值的单个荧光带,发生了比较大的斯托克斯位移(78 nm),且荧光强度增加了约 107 倍;另外在 365 nm 光照射下显示肉眼可见的蓝色荧光[见图 2(b)插图]。由吸收光谱和荧光光谱的实验结果,推



(a)吸收光谱



(b)荧光光谱

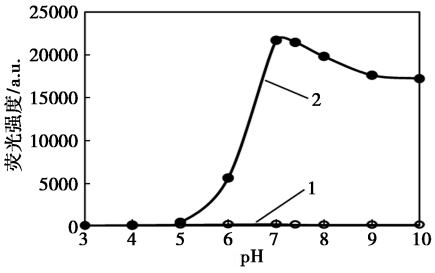
1—4HBT-AC;2—4HBT-AC+Cys;3—4HBT

图 2　探针 4HBT-AC 对 Cys 的吸收光谱和荧光光谱

测 4HBT-AC 在加入 Cys 后,4HBT-AC 与 Cys 发生反应并产生了具有荧光的 4HBT。

3.2　不同 pH 探针 4HBT-AC 对 Cys 响应影响

为了确定探针 4HBT-AC 对 Cys 的响应条件,首先测定了不同 pH(3~10)对探针 4HBT-AC 响应 Cys 的影响(图 3)。实验结果表明,pH<5 时,几乎没有荧光;pH 在 5~7 之间,荧光强度迅速增加,至 pH=7 时最强;pH 在 7~10 之间,荧光强度逐渐下降;在生理 pH 7.4 条件下,荧光强度比 pH 7.0 略有降低,但仍有很高的荧光强度,因此可以用生理 pH 7.4 进行后续 4HBT-AC 对 Cys 的响应实验研究。



1—4HBT-AC;2—4HBT-AC+Cys

图 3　不同 pH 对探针 4HBT-AC 响应 Cys 的影响

3.3　不同浓度 Cys 对探针 4HBT-AC 响应影响

以 380 nm 处的荧光强度为纵坐标,以不同浓度的 Cys 为横坐标,获得了探针 4HBT-AC 溶液对不同浓度 Cys 荧光响应曲线(图 4)。在 0~60 μmol/L

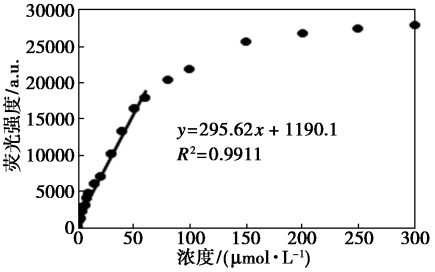
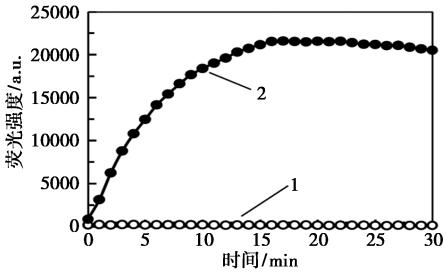


图 4　不同浓度对探针 4HBT-AC 响应 Cys 的影响

范围内,荧光强度与 Cys 浓度之间呈现良好的线性关系,线性方程为 $y = 295.62x + 1\ 190.1$,相关系数 $R^2 = 0.991\ 1$,检测限(LOD)为 0.12 μmol/L。

3.4　探针 4HBT-AC 对 Cys 响应的时间依赖性

探针 4HBT-AC 对 Cys 荧光响应的时间依赖性见图 5,在探针 4HBT-AC 加入 Cys 反应起始阶段,荧光强度随时间延长而逐渐增强,在 16 min 左右达到最强,显示了探针对 Cys 具有快速响应的特点。

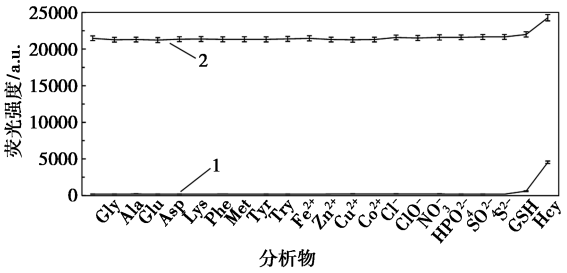


1—4HBT-AC;2—4HBT-AC+Cys

图 5　探针 4HBT-AC 对 Cys 的响应时间

3.5　探针 4HBT-AC 对 Cys 的选择性和抗干扰能力

为了研究探针 4HBT-AC 对 Cys 的选择性和抗干扰能力,在相同条件下检测了探针溶液对常见分析物的荧光响应。如图 6 所示,当探针溶液中加入 Gly、Ala、Glu、Asp、Lys、Phe、Met、Pro、Tyr、Try、Fe^{2+}、Zn^{2+}、Cu^{2+}、Co^{2+}、Cl^-、ClO^-、NO_3^-、HPO_4^{2-}、SO_4^{2-}、S^{2-} 等分析物时,反应体系没有显示出明显的荧光增强;当加入 GSH 或 Hcy,反应体系的荧光强度略有增强,可能与 GSH 和 Hcy 都具有-SH 有关。当在探针溶液 4HBT-AC 中加入分析物的同时也加入 Cys 后,体系的荧光强度再度增强。结果充分表明了探针 4HBT-AC 对 Cys 具有高度选择性和优异的抗干扰能力,从而保证了 4HBT-AC 在复杂系统中对 Cys 检测的准确性。



1—4HBT-AC+分析物;2—4HBT-AC+分析物+Cys

图 6　探针 4HBT-AC 对不同分析物的响应

3.6　探针 4HBT-AC 对 Cys 响应机理的探究及 HPLC 分析验证

由于丙烯酰氯和 4HBT 的酰化反应产生的酯键阻断了 4HBT 的 ESIPT 过程,从而使探针 4HBT-AC 没有荧光。加入 Cys 后,丙烯酰基和 Cys 偶联产生硫醚键,接着分子间环化产生化合物 R,同时产生具有蓝色荧光的 4HBT,推测此反应的响应机理如图 7 所示。

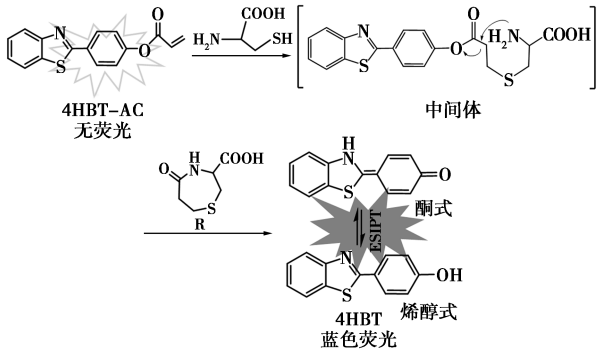
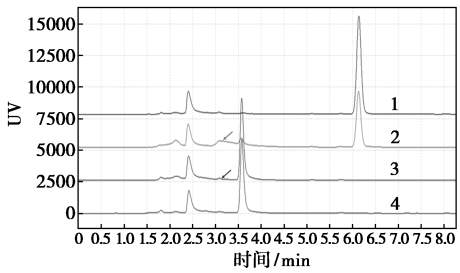


图 7　探针 4HBT-AC 对 Cys 的响应机理

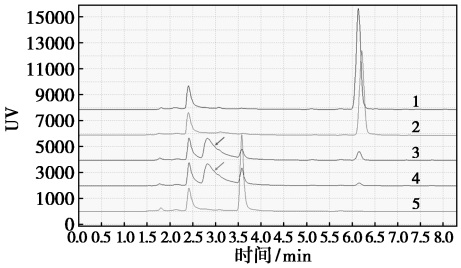
为了验证此机理的正确性,采用 HPLC 分析了 4HBT-AC 和 Cys 的反应过程,并与 4HBT-AC 和 4HBT 标准品的色谱图进行对照分析[图 8(a)]。其中 1 是探针 4HTB-AC 的色谱图,出峰时间为 6.127 min;2 和 3 分别是探针 4HBT-AC 溶液在加入 Cys 后的反应开始和反应结束的样品色谱图;4 是4HBT 的色谱图,出峰时间为 3.576 min。通过比较可以发现,探针溶液加入 Cys 后,由于响应时间较快,色谱图 2 中,在 6.127 min 对应 4HBT-AC 的峰值降低,而在 3.576 min 时出现了对应 4HBT 的峰;色谱图 3 中,当反应结束(16 min)后,6.127 min 处对应 4HBT-AC 的峰消失,而在 3.576 min 对应 4HBT 的峰进一步增大。实验结果证明了推测机理是合理的,探针溶液和 Cys 反应确实产生了 4HBT。

为探究探针 4HBT-AC 溶液加入 Hcy 后也能产生荧光,但荧光强度不高的问题,用 HPLC 对 4HBT-AC+Hcy 反应的进程进行了分析,结果如图 8(b)所示。其中 1 是 4HBT-AC 的色谱图,出峰时间为 6.127 min;2、3、4 分别是 4HBT-AC+Hcy 反应开始、16 min、30 min 的色谱图;5 是 4HBT 的色谱图,出峰时间为 3.576 min。通过对比可以发现,色谱图 2 中,反应开始后,体系中的 4HBT-AC 峰值很高,说明 Hcy 反应比较慢;反应 16 min 后,4HBT-AC 峰值较低,说明大部分 4HBT-AC 与 Hcy 反应,但对应的 4HBT 的峰并没有明显增加;反应 30 min 后探针基本反应完全,但 4HBT 增加量仍然不多。发现同时色谱图 2、色谱图 3 中,在 2.8 min 处均出现一个较大新峰(箭头处);对比 4HBT-AC+Cys 色谱图,在反

应过程中该时间也有一个新的峰(箭头处),但反应结束后该峰消失,而 4HBT 峰值明显增加。由此可以推断 2.8 min 处的新峰可能是中间体,还没有环化成化合物 R,因此不能产生较多的 4HBT,从而导致有荧光但荧光强度不高。因此,通过 HPLC 间接证明了探针 4HBT-AC 对 Hcy 荧光强度不高,可能是由于探针与 Hcy 反应过程中分子间环化的动力学速率比与 Cys 环化速率更慢的缘故[27]。



1—4HBT-AC;2—4HBT-AC+Cys-开始;
3—4HBT-AC+Cys-结束;4—4HBT
(a)4HBT-AC+Cys

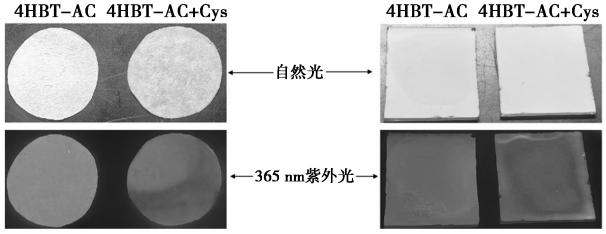


1—4HBT-AC;2—4HBT-AC+Hcy 开始;
3—4HBT-AC+Hcy 16 min;4—4HBT+Hcy 30 min;5—4HBT
(b)4HBT-AC+Hcy

图 8　探针 4HBT-AC 对 Cys/Hcy 的响应机理及 HPLC 分析验证

3.7　探针 4HBT-AC 对 Cys 响应的应用

为了探索探针 4HBT-AC 分析检测 Cys 的实际应用,采用测试纸和 TLC 板作为测试工具。先将测试纸和 TLC 板浸入探针溶液 5 min,取出自然风干,然后浸入到 Cys 溶液 16 min 取出,自然风干后在不同光源下观察(图 9)。自然光照射下,测试纸和



(a)测试纸　　(b)TLC 板

图 9　探针 4HBT-AC 对 Cys 的应用测试

TLC 板均没有颜色变化;但在紫外光照射下,4HBT-AC 对应的测试纸盒 TLC 板都没有荧光,而 4HBT-AC+Cys 对应的测试纸和 TLC 板均产生蓝色荧光,这种颜色变化可为该探针分析检测 Cys 提供潜在的应用价值。

4　结论

本研究以 4HBT 为荧光团,以丙烯酰氯为识别基团,设计并合成了一种新型 Cys 荧光探针 4HBT-AC。光谱学系列研究结果显示,该探针对 Cys 具有大的斯托克斯位移,响应时间短、灵敏度高、选择性和抗干扰能力强的特点,同时通过 HPLC 分析检测反应过程确定了 4HBT-AC 与 Cys 的响应机理。此外,采用测试纸和薄层硅胶板对 Cys 的荧光分析检测进行了实际应用。

参考文献

[1] 王瑞祥,赖晓静,邱观音,等.基于激发态分子内质子转移(ESIPT)原理的反应型荧光探针研究进展[J].有机化学,2019,39(4):952-960.

[2] 王德佳,徐勇前,孙世国,等.激发态分子内质子转移荧光探针的研究进展[J].应用化学,2018,35(1):1-20.

[3] Duraisamy U,Peter J,Natarajan V,*et al*.ESIPT:An approach and future perspective for the detection of biologically important analytes[J].Journal of Luminescence,2024,267:120350.

[4] Zeng S,Li S J,Liu T T,*et al*.A significant fluorescent "turn-on" chemosensor for Al^{3+} detection and application in real sample,logic gate and bioimaging[J].Inorganica Chimica Acta,2019,495:118962.

[5] 刘其业,杨津涛,于思源,等.苯并噻唑酰腙类荧光探针合成及对锌离子检测[J].化学研究与应用,2024,36(3):565-571.

[6] 李彩芳,陈宇,王应蝶.基于苯并噻唑的汞离子荧光探针的合成与应用研究[J].现代化工,2023,43(12):237-241.

[7] 伊怀诗,赵予心,王慧双,等.含苯并噻唑单元的荧光探针合成及其对银离子检测[J].化工新型材料,2024,52(1):418-422.

[8] Chen T,Wei T,Zhang Z,*et al*.Highly sensitive and selective ESIPT-based florescent probes for detection of Pd^{2+} with large Stocks shifts[J].Dyes and Pigments,2017,140:392-398.

[9] 王丹,高云玲.基于苯并噻唑的次氯酸荧光探针的合成及应用[J].分析科学学报,2024,40(2):159-164.

[10] Erdemir S,Malkondu S.Visual and quantitative detection of CN-ion in aqueous media by an HBT-Br and thiazollum conjugated fluoreometric and colorimetric probe:Real samples and useful application[J].Talanta,2021,221:121639.

[11] Dhaka G,Kaur N,Singh J.Exploiting the INHIBIT-ESIPT mechanism for the design of fluorescent chemosensor with a large blue-

shift in emission[J].Photochemistry and Photobiology,2017,333:174-181.

[12] 申有名,谷标,刘歆,等.一种基于苯并噻唑衍生物的高选择性比率型高半胱氨酸荧光探针及生物成像[J].有机化学,2020,40(8):2442-2449.

[13] Liu Y,Ding Y,Huang J,*et al*.A benzothiazole-based fluorescent probe for selective detection of H_2S in living cells and mouse hippocampal tissues[J].Dyes and Pigments,2017,138:112-118.

[14] Ma J Y,Zhang Z X,Zhao M T,*et al*.A dual-emission turn-on fluorescent probe for specific detecting Cys/Hcy from GSH through thiol-chromene click reaction[J].Dyes and Pigments,2024,222:111892.

[15] An S X,Lin Y F,Ye T Q,*et al*.An extra-large Stokes shift near-infrared fluorescent probe for specific detection and imaging of cysteine[J].Talanta,2024,267:125247.

[16] Dai J A,Ma C G,Zhang P,*et al*.Recent progress in the development of fluorescent probes for detection of biothiols[J].Dyes and Pigments,2020,177:108321.

[17] Liu L X,Liu B Q,Hao Y B,*et al*.Theory and experiment:The synthesis and drug application of “ON-OFF-ON” fluorescent probes for copper and biothiols detection[J].Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis,2024,239:115876.

[18] Wang X B,Li H J,Liu C,*et al*.Simple turn-on fluorescent sensor for discriminating Cys/Hcy and GSH from different fluorescent signals[J].Analytical Chemistry,2021,93(4):2244-2253.

[19] Luo W F,Zhang S,Meng Q H,*et al*.A two photon multi-emissive fluorescent probe for discrimination of Cys and hcy/GSH via an aromatic substitution-rearrangement[J].Talanta,2020,224:121833.

[20] Lee P T,Thomson J E,Karina A,*et al*.Selective electrochemical determination of cysteine with a cyclotricatechylene modified carbon electrode[J].Analyst,2014,140:236-242.

[21] Liu J X,Wang Y F,Ma W Y,*et al*.Biomass-based carbon dots as peroxidase mimics for colorimetric detection of glutathione and L-cysteine[J].Chemical Research in Chinese University,2022,38(6):1446-1452.

[22] Tang L J,Zhou L,Yan X M,*et al*.A simple benzothiazole-based mitochondrial-targeting fluorescent probe for visualizing and monitoring viscosity in living cell,lung organ tissue,and living mice[J].Dyes and Pigments,2020,182:108644.

[23] Kaminska A,Olejarz P,Borowczyk K,*et al*.Simultaneous determination of total homocysteine,cysteine,glutathione,and N-acetylcysteine in brain homogenates by HPLC[J].Journal of Separation Science,2018,41(6):3241-3249.

[24] 曹小燕,路宏朝,任传清,等.一种“关-开”型半胱氨酸荧光探针的合成、光谱性能及细胞成像研究[J].化学研究与应用,2022,34(7):1493-1510.

[25] Zhou H,Li Y,Fang R,*et al*.A dicyanoisophorone-based long-wavelength fluorescent probe for detection of cysteine in vitro and in vivo[J].Spectrochimica Acta Part A:Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2024,304:123403.

[26] Chen X D,He D,Yang X R,*et al*.Construction of bifunctional fluorescent probe for two-step cascade recognition of hydrogen sulfide and biothiols in biological system[J].Sensors and Actuators B:Chemical,2023,381:133440.

[27] Zhang H R,Qin N,Fang Z J.A novel dicyanoisophorone-based ratiometric fluorescent probe for selective detection of cysteine and its bioimaging application in living cells[J].Molecules,2018,23(2):475.■

巴斯夫 OASE® blue 支持 CCAT 在台电的碳捕集与封存项目

近日,巴斯夫与碳集应用科技股份有限公司(CCAT)签署许可协议,向其提供 OASE® blue 气体处理技术,用于台湾最大电力供应商——台湾电力公司(台电)运营的台中发电厂减碳技术园区内的碳捕集与封存(CCS)项目。

此次合作结合 CCAT 的先进技术和工程解决方案,以及巴斯夫备受肯定的 OASE® blue 碳捕集技术。该计划于 2023 年底决标启动。

OASE® blue 是巴斯夫气体处理技术,专为来自化石燃料发电厂、蒸汽重整器、废弃物焚化炉、水泥行业和海事领域等的烟气碳捕集而设计。该技术展示了 90%以上的高捕集率,并且在测试中显示出低能耗和低胺耗的成本效益。

(巴斯夫)