

## 3,4-二甲氧基查尔酮荧光探针用于人血清白蛋白的检测

王超, 贾爱萍, 张亚雯, 陈光

(陕西科技大学化学与化工学院, 西安 710021)

**摘要** 人血清白蛋白(HSA)是人血清中含量最丰富的蛋白质,它参与许多重要的生理过程,也与某些疾病息息相关,是临床诊断的重要生物标志物.本文以结构简单、合成简便且荧光性质易调控的查尔酮化合物为荧光探针母体,通过在查尔酮的A环引入2个甲氧基获得一种用于HSA检测的D- $\pi$ -A型荧光探针3,4-二甲氧基查尔酮(DDP);经 $^1\text{H}$  NMR和 $^{13}\text{C}$  NMR及MS表征确证了其结构.查尔酮A环甲氧基的引入可以调控探针的推拉电子效应及其对HSA的荧光响应性能.进一步利用紫外-可见吸收光谱和荧光光谱等方法研究了DDP的光谱性质及其与HSA的相互作用.DDP的荧光光谱分析结果表明,其荧光对溶剂的极性非常敏感,其荧光发射波长随溶剂极性增大而发生红移.DDP与HSA响应后荧光增强73倍,响应前后的荧光量子产率分别为0.2%和4.0%.DDP对HSA的响应有优异的选择性,响应速度快且响应后荧光稳定.经Job's plot和荧光滴定实验确定了DDP与HSA结合的化学计量比为1:1,检出限(LOD)为40.32 nmol/L,结合常数为 $3.95\times 10^5$  L/mol;并通过置换实验证明了DDP的结合位点是HSA的DS2区.该探针可实现对HSA的高灵敏度、高选择性检测.

**关键词** 荧光探针; 荧光光谱; 查尔酮; 人血清白蛋白

中图分类号 O657.3; TQ617.3

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240273

## 3,4-Dimethoxychalcone Fluorescent Probe for the Detection of Human Serum Albumin

WANG Chao\*, JIA Aiping, ZHANG Yawen, CHEN Guang

(College of Chemistry and Chemical Engineering,

Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract** Human serum albumin(HSA) is the most abundant protein in human serum, involved in many important physiological processes and closely related to many diseases. It is an important biomarker for clinical diagnosis. In this paper, the chalcone compounds with simple structure, easy synthesis, and easily regulated fluorescence properties were used as the fluorescent skeleton. A D- $\pi$ -A fluorescent probe, 3,4-dimethoxychalcone(DDP), was designed for the detection of HSA by introducing two methoxy groups to the A ring of chalcone. The structure of the probe was confirmed by  $^1\text{H}$  NMR and  $^{13}\text{C}$  NMR as well as MS. The push-pull electronic effect of the probe and its fluorescence response to HSA were modulated by the introduction of the two methoxy groups. UV-visible absorption spectroscopy and fluorescence spectroscopy were further used to investigate the spectral properties of DDP and its interaction with HSA. The fluorescence spectra of DDP showed that its fluorescence is highly sensitive to the polarity of the solvent, and its fluorescence emission wavelength undergoes a red-shift with the increase of solvent polarity. The fluorescence enhancement of DDP in response to HSA was 73-fold, and the fluorescence quantum yields before

收稿日期: 2024-06-04. 网络首发日期: 2024-07-28.

联系人简介: 王超, 男, 博士, 副教授, 主要从事荧光标记与检测方面的研究. E-mail: wangchao@sust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22174090)和陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目(批准号: 2023-JC-YB-110)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.22174090) and the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province, China(No.2023-JC-YB-110).

and after response to HSA were 0.2% and 4.0%, respectively. DDP has excellent selectivity in response to HSA with fast response and stable fluorescence. The binding stoichiometry ratio of DDP to HSA was determined to be 1:1 by Job's plot and fluorescence titration. The limit of detection (LOD) was 40.32 nmol/L, and the binding constant was  $3.95 \times 10^5$  L/mol. The binding site of DDP with HSA was verified to be DS2 region with the displacement test. This probe enables highly sensitive and selective detection of HSA.

**Keywords** Fluorescent probe; Fluorescence spectroscopy; Chalcone; Human serum albumin

人血清白蛋白(HSA)占人血浆蛋白总量的50%,参与许多生理过程,如血浆渗透压的维持、免疫调节和自由基清除<sup>[1,2]</sup>,是血液循环系统中最丰富的运输蛋白质,可与多种内、外源化合物结合,包括氨基酸、脂肪酸、类固醇激素和小分子化学物质<sup>[3]</sup>. HSA也被广泛应用于与诊疗试剂结合用于肿瘤诊疗<sup>[4]</sup>. HSA的水平通常被认为是一个重要的诊断生物标志物<sup>[5]</sup>. 因此, HSA的准确检测在临床诊断中具有重要意义.

目前,用于HSA的检测技术主要包括免疫分析、表面增强拉曼散射、LC-MS/MS的蛋白质组学、毛细管电泳和比色法<sup>[6-8]</sup>. 然而,这些方法对蛋白质反应的灵敏度和选择性低,或成本高、过程长,而荧光检测法以其简单、灵敏度高、选择性好的优点,在HSA的检测中受到了广泛关注<sup>[9-14]</sup>. Tang等<sup>[15]</sup>设计了一种用于定量检测HSA的四苯乙烯探针BSPOTPE,该探针在PBS缓冲液中无荧光,但在HSA存在下有较强荧光; Li等<sup>[16]</sup>设计了一种基于扭转分子内电荷转移(TICT)机制的探针,它可以通过与HSA疏水域相互作用时抑制其TICT行为来检测HSA. 进一步开发性能优异的HSA荧光探针对HSA的临床检测及疾病诊断具有重要价值.

查尔酮是一类黄酮化合物,具有1,3-二苯基丙烯酮结构<sup>[17]</sup>,因其广泛的药理学作用而备受关注<sup>[18]</sup>,同时,许多黄酮及查尔酮化合物也具有优异的荧光性质,特别是在HSA的荧光检测方面展示了优异的性能. Liu等<sup>[19,20]</sup>发现具有环境敏感特性的供体- $\pi$ -受体(D- $\pi$ -A)结构黄酮荧光团可以用作HSA的荧光探针,由于对位氨基取代苯结构的TICT特征,该探针的荧光可在纯水中猝灭,一旦与HSA结合,其TICT过程会受到低极性蛋白质空腔的严重抑制,导致显著的荧光增强. Luo等<sup>[21]</sup>报道了3种具有D- $\pi$ -A结构的查尔酮荧光染料CD1~CD3. CD1~CD3表现出显著的环境敏感性,其荧光性质可以通过溶剂的极性和黏度来调节. 其中,CD1表现出快速响应、高灵敏度、对HSA的优异选择性以及在复杂生物环境中的高抗干扰性.

受以上工作启发,本文以结构简单、合成简便且荧光性质易调控的查尔酮化合物为荧光探针母体,通过官能团修饰来调控探针的推拉电子效应对HSA的荧光响应性能. 以4-(二甲基氨基)苯甲醛作为电子给体(D),3,4-二甲氧基苯乙酮作为电子受体(A),构建了D- $\pi$ -A型荧光探针DDP,通过在查尔酮的A环引入2个甲氧基来调控探针的推拉电子效应,获得了较强荧光并影响其与HSA的结合位点. 分别通过紫外-可见吸收光谱和荧光光谱研究了DDP的荧光性质,并评价了DDP对HSA荧光响应的性能及选择性,考察了DDP对HSA的响应速度,进一步探究了不同pH值对于HSA荧光响应的影响,通过Job's plot确定了DDP与HSA两者间的结合化学计量比并通过置换实验探究了两者的结合位点,最后通过荧光滴定实验测定了其检出限和结合常数.

## 1 实验部分

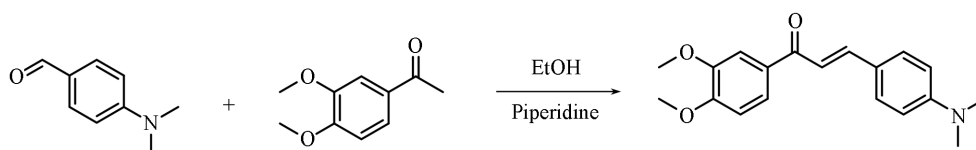
### 1.1 试剂与仪器

4-(二甲基氨基)苯甲醛(纯度98%)、3,4-二甲氧基苯乙酮(纯度98%)、华法林钠(纯度98%),盐酸胍(纯度99.5%),阿达玛斯贝塔(上海)化学试剂有限公司;布洛芬(纯度98%),梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;胰蛋白酶,上海碧云天生物技术有限公司;1,4-二氧六环、二氯甲烷、乙酸乙酯、石油醚、乙腈、乙醇、甲醇、丙酮、四氢呋喃(THF)、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)、二甲基亚砜(DMSO)、哌啶、甘油和氘代氯仿,分析纯,上海泰坦科技有限公司;人血清白蛋白,纯度96%~99%,北京索莱宝科技有限公司.

ADVANCE III 600 MHz型核磁共振波谱仪(NMR), Bruker公司; Cary 60型紫外-可见(UV-Vis)光谱仪, 安捷伦科技中国有限公司; Lumina型荧光分光光度计, 赛默飞世尔科技中国有限责任公司; RE-52型系列旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂; PHS-3C型pH计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; KQ-100DE型数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司.

## 1.2 实验过程

探针DDP的合成路线如Scheme 1所示.



Scheme 1 Synthesis route of DDP

1.2.1 DDP的制备 将4-(二甲基氨基)苯甲醛(149 mg, 1 mmol)和3,4-二甲氧基苯乙酮(216 mg, 1.2 mmol)加入到50 mL茄型瓶中, 加入15 mL乙醇使其溶解, 向反应瓶中加入哌啶(0.1 mL, 0.15 mmol), 加热至75 °C, 回流12 h. 用薄层色谱监测反应进程[展开剂V(石油醚):V(乙酸乙酯)=3:1]. 反应完全后, 旋转蒸发除去溶剂, 并进一步进行硅胶柱色谱分离[洗脱剂V(石油醚):V(乙酸乙酯)=6:1]. 得到纯净的橙色固体产物(220 mg), 产率71%. <sup>1</sup>H NMR(600 MHz, CDCl<sub>3</sub>), δ: 7.80(d, J=15.4 Hz, 1H), 7.68(dd, J=8.4, 2.0 Hz, 1H), 7.64~7.53(m, 3H), 7.37(d, J=15.4 Hz, 1H), 6.93(d, J=8.3 Hz, 1H), 6.72~6.67(m, 2H), 3.98(s, 3H), 3.97(s, 3H), 3.05(s, 6H). <sup>13</sup>C NMR(151 MHz, CDCl<sub>3</sub>), δ: 188.79, 152.74, 151.94, 149.09, 144.98, 132.14, 130.30, 122.56, 116.52, 111.85, 110.84, 109.95, 56.05. MS, m/z: C<sub>19</sub>H<sub>22</sub>NO<sub>3</sub> [M+H]<sup>+</sup>: 312.3; found: 312.2.

1.2.2 探针母液和工作液的配制 称量一定量的探针DDP并将其溶于DMSO中, 配制成浓度为10 mmol/L的母液, 备用. 将3 μL探针母液加入3 mL不同溶剂及不同pH水溶液中, 配成浓度为10 μmol/L的工作液, 进行吸收光谱与荧光光谱测试(激发波长为420 nm, 激发狭缝宽度为10 nm, 发射狭缝宽度为10 nm).

1.2.3 选择性测试 准确称取一定量的半胱氨酸(Cys)、甘氨酸(Gly)、酪氨酸(Tyr)、亮氨酸(Leu)、谷氨酸(Glu)、精氨酸(Arg)、赖氨酸(Lys)、色氨酸(Trp)、甲硫氨酸(Thr)、ZnCl<sub>2</sub>、FeCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>、KCl、NaCl、Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>和肌红蛋白(MYO), 以水为溶剂配制浓度为10 mmol/L的母液, 并进一步稀释至100 μmol/L进行荧光测试.

1.2.4 荧光量子产率测试 以荧光素在0.1 mol/L NaOH溶液中的荧光量子产率(0.92)作为参比, 用PBS缓冲液溶解探针. 使探针DDP和荧光素在455 nm处吸收值在0.05~0.1范围内, 以455 nm光激发测定两者的荧光光谱, 根据下式计算探针DDP的荧光量子产率:

$$\phi_x = \phi_{FL} \frac{A_s F_x}{A_x F_s} \left( \frac{n_s}{n_x} \right)^2 \quad (1)$$

式中: A为455 nm处的吸收值; F为相应的峰面积; n为对应的折射率; s表示荧光素; x表示探针DDP.

1.2.5 置换实验 准确称取一定量的华法林钠和布洛芬, 分别溶于DMSO中配制成浓度为10 mmol/L的母液, 备用. 将上述溶液按比例加入到DDP-HSA复合物溶液中, 反应2 min后进行荧光测试.

1.2.6 HSA变性与降解实验 将HSA(10 μmol/L)和不同浓度的GndHCl(0~6.0 mol/L)在室温下孵育30 min后加入DDP(10 μmol/L), 在420 nm光激发下测定荧光光谱. 将DDP(10 μmol/L)与HSA(10 μmol/L)在PBS缓冲液中混合10 min, 然后加入不同浓度的胰蛋白酶, 并在37 °C下孵育1 h, 在420 nm光激发下测定荧光光谱.

DDP的<sup>1</sup>H NMR和<sup>13</sup>C NMR谱图以及其它信息见本文支持信息中图S1~图S8.

## 2 结果与讨论

### 2.1 DDP的光物理性质

首先测试了探针DDP在不同溶剂中的紫外-可见吸收光谱和荧光光谱,结果如图1所示.图1(A)所示结果表明,探针DDP在390~440 nm波长范围内有明显的吸收峰.图1(B)为探针DDP在不同溶剂中以420 nm波长光激发的荧光光谱,探针DDP的最大发射波长会随着溶剂极性的增大而红移.这是由于溶剂极性的增大会促进荧光分子内电荷转移效应,使其能量降低、波长变长.在弱极性溶剂(如1,4-二氧六环)中,DDP的荧光发射波长约473 nm,荧光较弱;在中等极性溶剂(如丙酮)中,DDP的荧光发射波长约508 nm,DDP的荧光强度中等;在极性非质子溶剂(如二甲基亚砜)中,DDP的荧光发射波长达527 nm,其荧光最强;而在极性质子性溶剂(如甲醇)中,探针DDP的荧光极弱.

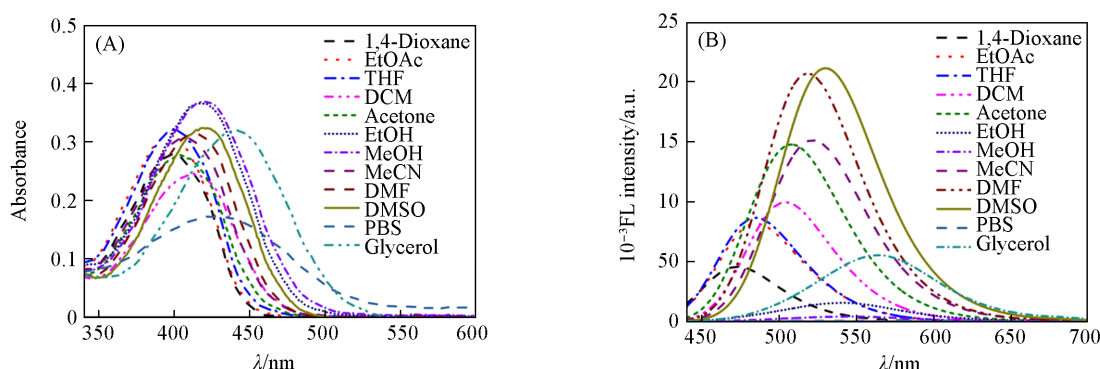


Fig.1 UV-Vis absorption(A) and fluorescence(B) spectra of probe DDP(10  $\mu\text{mol/L}$ ) in different solvents

### 2.2 探针DDP对HSA的荧光响应

考察了探针DDP对HSA的荧光响应与选择性.将DDP(10  $\mu\text{mol/L}$ )分别与各种离子以及氨基酸和肌红蛋白等(100  $\mu\text{mol/L}$ )混合,以420 nm为激发波长,通过测定其荧光强度变化探究了DDP对不同物质的荧光响应和选择性.从图2和图S4(见本文支持信息)可以看出,当DDP与其它离子或分子混合时,荧光强度并没有明显变化,但当加入HSA后,荧光强度提高了73倍.此结果表明,探针DDP对HSA具有优异的选择性.探针DDP对HSA的荧光响应可能是由于其与HSA疏水空腔的结合,从而限制了DDP分子中单键的旋转并阻断TICT效应.另外,进一步将探针DDP的荧光响应性能与一些用于HSA荧光检测的黄酮和查尔酮荧光探针进行了对比,从表S1(见本文支持信息)中可以看出DDP对HSA的荧光响应比其它大多数探针的增强倍数高,表明DDP是一种灵敏的HSA检测荧光探针.

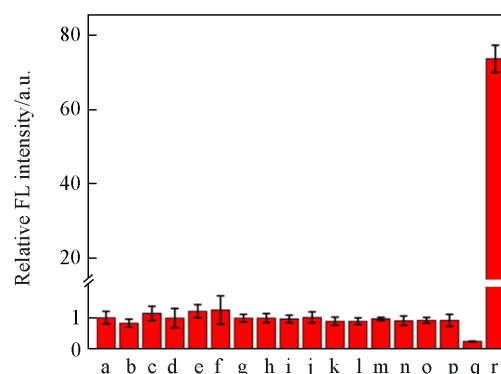


Fig. 2 Fluorescence response and selectivity of probe DDP to HSA

a. DDP; b.  $\text{Zn}^{2+}$ ; c.  $\text{K}^+$ ; d.  $\text{Mg}^{2+}$ ; e.  $\text{Fe}^{2+}$ ; f.  $\text{Na}^+$ ; g.  $\text{Cu}^{2+}$ ; h. Cys; i. Gly; j. Tyr; k. Leu; l. GLU; m. Arg; n. Lys; o. Trp; p. Thr; q. MYO; r. HSA.

进一步通过探针DDP与HSA结合前后的荧光量子产率评价了其荧光响应性能.分别测试了探针DDP和DDP-HSA复合物以及文献[21]报道的探针CD1和CD1-HSA复合物在PBS缓冲液中的荧光量子产率.从表S2(见本文支持信息)可以看出,DDP-HSA复合物的荧光量子产率达到4.0%,与文献[21]报道的探针CD1-HSA复合物荧光量子产率1.6%相比有显著提升,表明DDP有更强的荧光响应信号.

进一步研究了DDP对HSA的荧光响应速度.向DDP溶液中加入HSA时,如图3和图S5所示,其在536 nm处的荧光信号在1 min内出现显著的增强,且随时间变化显示出良好的稳定性,相比之下,DDP本身在没有HSA存在时几乎无变化.这表明DDP能够迅速响应并检测HSA.

此外, pH值的变化会影响蛋白质分子的表面电荷, 从而影响蛋白质与探针结合的能力. 因此, 探究了DDP在不同pH环境下的响应特性. 如图S6(见本文支持信息)所示, 在pH=3~10范围内, 添加HSA后, DDP的荧光显著增强, 并在pH值为3~6和8~10范围内基本稳定, 表明探针DDP具有较好的稳定性, 能够在较宽的pH值范围内检测HSA. 碱性条件下的荧光强度略高于酸性条件, 这可能是由于碱性条件下HSA蛋白表面带有更多的负电荷, 促进了探针DDP与HSA的结合及荧光响应.

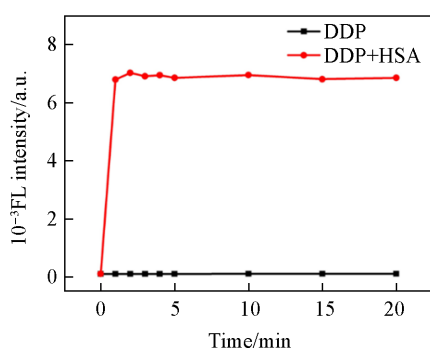


Fig. 3 Fluorescence response time of probe DDP (10  $\mu\text{mol/L}$ ) to HSA(10  $\mu\text{mol/L}$ )

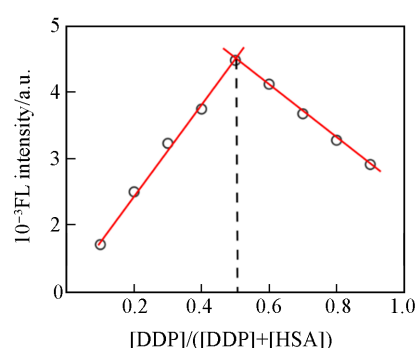


Fig. 4 Job's plot of probe DDP and HSA

## 2.2 探针DDP对HSA的荧光响应

为了验证探针DDP对HSA的荧光响应机制, 采用536 nm处的荧光强度与DDP的摩尔比的函数构建了Job's plot图, 使DDP与HSA的浓度之和始终保持不变, 改变HSA与DDP的浓度比, 测得的荧光强度如图4所示, 当 $[\text{DDP}]/[\text{DDP}+\text{HSA}]$ 的摩尔比达到约0.5时, 荧光强度达到峰值, 表明1个HSA分子约与1个DDP分子结合, 即探针DDP与HSA结合的计量比为1:1.

HSA通常包含DS1(IIA子域)和DS2(IIIA子域)两个主要结合位点<sup>[22]</sup>, 它们可以结合脂肪酸、类固醇和药物等, 也是荧光分子常见结合位点. 为了确定DDP与HSA的结合位点, 通过在DDP-HSA复合物中添加华法林(WS1的位点标记物)和布洛芬(WS2的位点标记物)<sup>[23]</sup>进行了置换实验. 如图5和图S7(见本文支持信息)所示, 400  $\mu\text{mol/L}$ 的布洛芬可以显著猝灭复合物DDP-HSA的荧光, 抑制率为41%, 而相同浓度的华法林并不能抑制DDP-HSA的荧光, 这是由于布洛芬取代了DS2结合的DDP, 而华法林则与DS1结合, 对DDP-HSA荧光没有影响, 这证实了DDP主要结合到HSA的DS2位点.

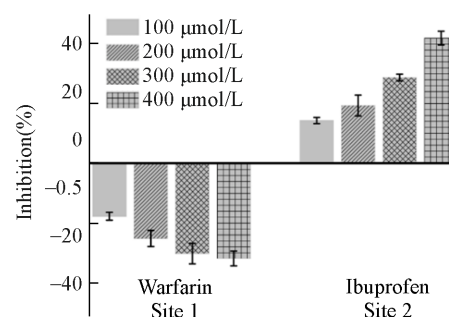


Fig. 5 Substitution experiment of DDP-HSA with site-bound reagents

进一步在HSA变性和蛋白酶裂解条件下研究了探针DDP对HSA的荧光响应. 使用蛋白质变性剂盐酸胍(GndHCl)处理HSA可破坏其高级结构, 如图6(A)和图S8(见本文支持信息)所示, 随GndHCl浓

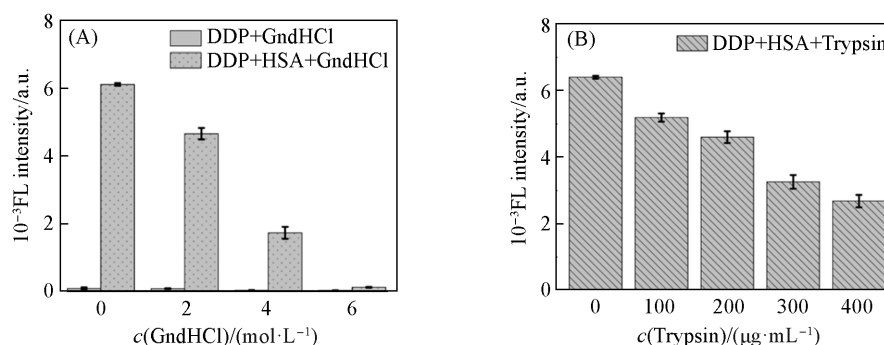


Fig. 6 Fluorescence intensity of DDP-HSA in the presence of 0–6.0 mol/L GndHCl(A) and 0–400  $\mu\text{g/mL}$  Trypsin(B)

度的不断升高, DDP-HSA 复合物的荧光强度逐渐降低, 表明 HSA 高级结构的破坏会影响探针 DDP 与 HSA 的结合及荧光响应. 胰蛋白酶(Trypsin)是一种丝氨酸蛋白酶, 通过水解赖氨酸和精氨酸残基的羧基来切割多肽链, 它可以裂解 HSA 蛋白, 破坏其一级结构. 如图 6(B)和图 S8(见本文支持信息)所示, 随着胰蛋白酶浓度的增加, DDP-HSA 复合物荧光强度逐渐降低, 表明 HSA 的裂解也会影响探针 DDP 与 HSA 的结合及荧光响应.

另外, 通过荧光滴定实验探讨了 DDP(10  $\mu\text{mol/L}$ )与 HSA 之间的荧光响应性能. 以 PBS 缓冲液作为溶剂, 向 DDP 溶液中加入不同浓度的 HSA, 通过测定各溶液的荧光发射光谱, 评估了两者之间的荧光响应性能. 结果如图 7 所示, 随着 HSA 浓度的升高, 536 nm 处的荧光强度逐渐增强, 在加入 14  $\mu\text{mol/L}$  HSA 后, 荧光强度基本达到最大值并趋于稳定.

进一步评价了低浓度下探针 DDP 与 HSA 荧光响应的线性关系, 如图 8(A)所示, 在 536 nm 处的荧光强度与 HSA 浓度变化呈现良好的线性关系. 通过公式  $\text{LOD}=3\sigma/k$  ( $\sigma$  为测定 10 次空白溶液在 536 nm 处荧光强度的标准偏差)计算得到 DDP 对 HSA 的检出限(LOD)达到 40.32 nmol/L. 图 8(B)示出了  $(F_{\text{max}} - F_0)/(F - F_0)=1/(K_a \times [\text{HSA}]) + 1$  与  $1/[\text{HSA}]$  的线性关系曲线<sup>[24]</sup>, 其中  $F$  为探针 DDP 溶液中加入任意浓度 HSA 后在 536 nm 处的荧光强度;  $F_{\text{max}}$  为在 DDP 溶液中加入 HSA 后 536 nm 处的荧光强度最大值;  $F_0$  为未在 DDP 溶液中加入 HSA 时 536 nm 处的荧光强度. 经计算得到探针 DDP 与 HSA 的结合常数  $K_a=3.95 \times 10^5 \text{ L/mol}$ .

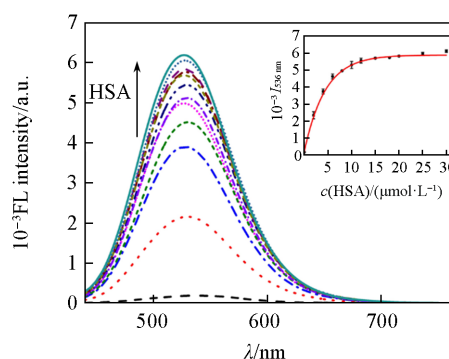


Fig. 7 Fluorescence spectra of probe DDP (10  $\mu\text{mol/L}$ ) in response to different concentrations of HSA

Inset shows the fluorescence intensity vs. [HSA] curve at 536 nm.

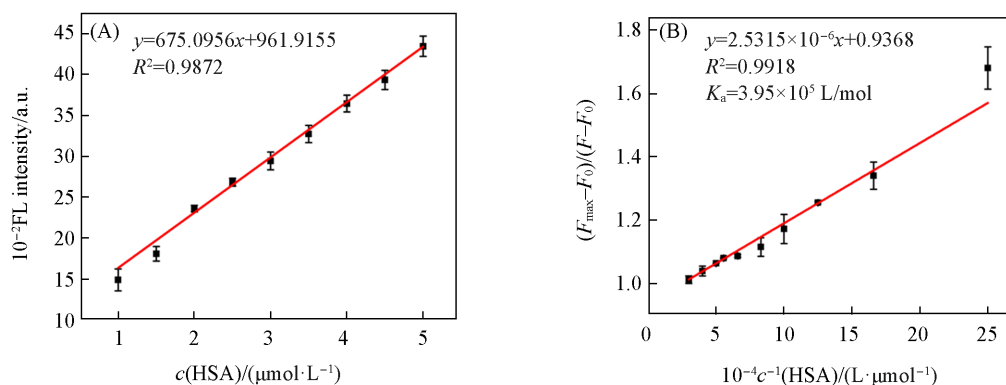


Fig. 8 Variation curve of fluorescence intensity at 536 nm with HSA concentration(A) and linearity of  $(F_{\text{max}} - F_0)/(F - F_0)$  versus  $1/[\text{HSA}]$ (B)

### 3 结 论

以 4-(二甲基氨基)苯甲醛为电子给体(D), 3,4-二甲氧基苯乙酮为电子受体(A), 设计合成了一种用于检测 HSA 的 D- $\pi$ -A 型查尔酮荧光探针 DDP. 该探针与 HSA 响应后荧光显著增强 73 倍, 荧光量子产率由响应前的 0.2% 增大为 4.0%, 与文献[21]报道的 CD1 探针的荧光量子产率(1.6%)相比有显著提升. 该探针对 HSA 的响应速度快( $<1 \text{ min}$ )、选择性好、灵敏度高, 检出限低至 40.32 nmol/L. 该探针与 HSA 的结合位点是 DS2 区, 结合化学计量比为 1:1, 结合常数  $K_a=3.95 \times 10^5 \text{ L/mol}$ . 综上, 探针 DDP 可实现对 HSA 的高灵敏度、高选择性检测, 为 HSA 的荧光检测提供了性能优异的工具.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/20240273>.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Nicholson J. P., Wolmarans M. R., Park G. R., *Brit. J. Anaesth.*, **2000**, 85(4), 599—610
- [ 2 ] Quinlan G. J., Martin G. S., Evans T. W., *J. Hepatol.*, **2005**, 41(6), 1211—1219
- [ 3 ] Zhang A., Hao J., Huang Q., Gao X., Wen W., *J. Anal. Sci.*, **2013**, 29(1), 73—77(张爱平, 郝娟, 黄茜, 高晓亚, 文雯. 分析科学学报, **2013**, 29(1), 73—77)
- [ 4 ] Shi D., He X., *Chem. Bull.*, **2020**, 83(3), 195—208(施德太, 贺晓鹏. 化学通报, **2020**, 83(3), 195—208)
- [ 5 ] Rabbani G., Ahn S. N., *Int. J. Biol. Macromol.*, **2021**, 193(15), 948—955
- [ 6 ] Sudlow G., Birkett D. J., Wade D. N., *Mol. Pharmacol.*, **1975**, 11(6), 824—832
- [ 7 ] Liu H., Chen L., Xu C., Li Z., Zhang H., Zhang X., Tan W., *Chem. Soc. Rev.*, **2018**, 47(18), 7140—7180
- [ 8 ] Xue T., Murfin L. C., Wu L., Lewis S. E., James T. D., *Chem. Sci.*, **2021**, 12(10), 3406—3426
- [ 9 ] Huyan Y., Nan X., Li H., Sun S., Xu Y., *Chem. Commun.*, **2024**, 60(28), 3810—3813
- [ 10 ] Sasmal M., Islam A. S. M., Moni D., Katarkar A., Ali M., *J. Mater. Chem. B*, **2024**, 12(18), 4478—4488
- [ 11 ] Wang Y., Huo F., Yin C., *J. Phys. Chem. B*, **2024**, 128(5), 1121—1138
- [ 12 ] Zhu Z., Chen X., Liao H., Li L., Yang H., Wang Q., Zhu W., *Aggregate*, **2024**, e526
- [ 13 ] Liu X., Qi S., Mao J., Zhang Y., Dong B., Song B., Ji L., *Dyes Pigments*, **2024**, 224, 112054
- [ 14 ] Xu Z., Zhang M., Chen Z., Zhao Y., Wang L., Chen X., Liu B., Peng X., *Chem. Commun.*, **2023**, 59(38), 5775—5778
- [ 15 ] Hong Y., Feng C., Yu Y., Liu J., Lam J., Luo K., Tang B., *Anal. Chem.*, **2010**, 82(16), 7035—7043
- [ 16 ] Li P., Wang Y., Zhang S., Xu L., Wang G., Cui J., *Tetrahedron Lett.*, **2018**, 59(14), 1390—1393
- [ 17 ] Sharma R., Kumar R., Kodwani R., Kapoor S., Khare A., Bansal R., Khurana S., Singh S., Thomas J., Roy B., Phartyal R., Saluja S., Kumar S., *Anticancer Agents Med. Chem.*, **2015**, 16(2), 200—211
- [ 18 ] Niu C., Li G., Mai D., Aisa H. A., *Chem. J. Chinese Universities.*, **2014**, 35(6), 1204—1211(牛超, 李根, 买迪娜, 阿吉艾克拜尔·艾萨. 高等学校化学学报, **2014**, 35(6), 1204—1211)
- [ 19 ] Liu B., Pang Y., Bouhenni R., Duah E., Paruchuri S., McDonald L., *Chem. Commun.*, **2015**, 51(55), 11060—11063
- [ 20 ] Liu B., Bi X., McDonald L., Pang Y., Liu D. Q., Pan C., Wang L., *Sensor. Actuat. B: Chem.*, **2016**, 236(29), 668—674
- [ 21 ] Luo Z. J., Liu B., Zhu K., Huang Y., Pan C., Wang B., Wang L., *Dyes Pigments*, **2018**, 152(5), 60—66
- [ 22 ] Ghuman J., Zunszain P. A., Petitpas I., Petitpas I., Bhattacharya A. A., Otagiri M., Curry S., *J. Mol. Biol.*, **2005**, 353(1), 38—52
- [ 23 ] Nicoletti F. P., Howes B. D., Fittipaldi M., Fanali G., Fasano M., Ascenzi P., Smulevich G., *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, 130(35), 11677—11688
- [ 24 ] Xu H., Shen G., Peng C., Han X., Duan L., Cheng T., *Dyes Pigments*, **2022**, 197, 109915

(Ed.: N, K)