

文章编号: 1000-7032(2021)12-1944-07

# CdTe 和 CdTe/CdS 量子点与叶酸分子荧光相互作用

李光旻<sup>1†\*</sup>, 刘淩洋<sup>1†</sup>, 杨 洋<sup>1</sup>, 刘洪飞<sup>1\*</sup>, 费学宁<sup>1</sup>, 刘 伟<sup>2</sup>

(1. 天津城建大学 理学院, 天津 300384; 2. 中企众鑫(天津)工业设计有限公司, 天津 300384)

**摘要:** 制备了水溶性半胱氨酸修饰的 CdTe 和 CdTe/CdS 核壳结构量子点, 实现了对叶酸分子的特异性荧光标记, 可作为具有应用潜力的叶酸浓度快速测定荧光探针。实验结果表明, 叶酸分子可以使 CdTe 量子点发生明显的荧光猝灭, 而在 CdTe/CdS 核壳结构量子点中, 没有观察到这种猝灭行为。本文采用 Stern-Volmer 方程对荧光猝灭机制进行了分析, 研究表明该猝灭机制是静态荧光猝灭。CdTe 量子点在与叶酸分子作用过程中, 荧光光谱发射峰发生了约 35 nm 的蓝移, 热力学计算表明, 量子点可能与叶酸分子通过静电作用形成了络合结构。

**关键词:** 荧光; 量子点; 叶酸; 猝灭; CdTe; CdTe/CdS 核壳结构

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20210257

## Fluorescence Interaction Between Folate Molecules and CdTe and CdTe/CdS Quantum Dots

LI Guang-min<sup>1†\*</sup>, LIU Hao-yang<sup>1†</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>,LIU Hong-fei<sup>1\*</sup>, FEI Xue-ning<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>

(1. School of Science, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Zhongqi Zhongxin(Tianjin) Industrial Design Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: 504753199@qq.com; liuhongfei001@163.com

**Abstract:** Water soluble cysteine modified CdTe and CdTe/CdS core-shell quantum dots were prepared, which can realize the specific fluorescent labeling of folate molecules, and function as a fluorescent probe for detecting the concentration of folate. The experimental results showed that folate can cause obvious fluorescence quenching of CdTe quantum dots, but this quenching behavior was not observed in CdTe/CdS core-shell system. The fluorescence quenching mechanism was analyzed by Stern-Volmer equation, and the research showed that it was a static fluorescence quenching mechanism. The fluorescence emission spectrum had a blue shift of about 35 nm in the interaction between CdTe quantum dots and folate molecules. Thermodynamic calculation showed that a complex structure may be formed through electrostatic interaction between the quantum dots and folate molecules.

**Key words:** fluorescence; quantum dots; folate; quenching; CdTe; CdTe/CdS core-shell structure

收稿日期: 2021-08-08; 修订日期: 2021-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(51578360, 51778398); 天津市高等学校基本科研业务资助项目(170401017); 天津市技术创新引导专项(基金)(21YDTPJC00970)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(51578360, 51778398); Tianjin Mscientific Research Project(170401017); Tianjin Special Fund for Technological Innovation Guidance(21YDTPJC00970)

†: 共同贡献作者

## 1 引 言

II-IV 主族核壳结构无机量子点 (QDs) 由于其高量子产率、优异的光稳定性等特点, 已广泛应用于生物标志物、荧光成像等领域<sup>[1]</sup>。Finn 等发现 CdSe 量子点通过包覆 CdS 壳层结构可以有效地提高发光强度, 同时量子点的光致发光量子产率随 CdS 壳层厚度的增加而增大<sup>[2]</sup>。Cheng 等<sup>[3]</sup>通过 ZnS 壳层的覆盖, 提高了 CuInS<sub>2</sub> 量子点的发光效率。Zhang 等发现水溶性 CdTe/CdSe/ZnS 量子点的光致发光量子产率高达 84%, 是制备的发光半导体纳米晶的最佳结果之一<sup>[4]</sup>。Fadi 等发现具有核/壳/壳结构的 CdTe/CdS/ZnO 的光致发光产率是 ZnO 量子点的 3 倍<sup>[5]</sup>。

叶酸是一种水溶性 B 族维生素, 是机体细胞生长和繁殖所必需的物质。最近研究表明叶酸可以作为一种荧光猝灭剂, 应用在生物传感、生物识别等方面, 具有巨大的潜力和前景。Li 等研究了叶酸对掺杂 Mn<sup>2+</sup> 的 ZnS 量子点磁性纳米复合材料的猝灭效应, 发现纳米复合材料与叶酸之间的电子转移可能是导致这种猝灭的原因<sup>[6]</sup>。Chakravarty 等<sup>[7]</sup>观察到叶酸与 PVA 色氨酸 CdTe 量子点 (PTQ) 之间通过电子或能量转移发生荧光猝灭。用 FA-NHS 进一步处理 GSH 修饰的 ITO, 其荧光强度明显降低, 这与叶酸的猝灭作用相对应, Jiang 等在溶液中观察到叶酸对 CdTe 纳米粒子的荧光猝灭作用<sup>[8]</sup>。

很多研究主要集中在量子点与叶酸分子发生耦合作用引起荧光猝灭方面, 而不同量子点结构对叶酸荧光猝灭的影响研究较少。本文讨论了 CdTe 和 CdTe/CdS 核壳结构量子点与叶酸分子的荧光相互作用, 重点分析了叶酸分子对 CdTe 和 CdTe/CdS 核壳量子点的荧光猝灭作用及其机理。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

#### 2.1.1 CdTe QDs 制备

在氮气环境下, 向三颈烧瓶中加入 0.06 g 碲粉 (Te) 和 0.06 g 硼氢化钠 (NaBH<sub>4</sub>)。然后, 在室温下加热溶液并在 40 °C 下水浴加热并用磁力搅拌 30 min 以形成紫色 NaHTe 前体溶液。然后加入 0.2 g 氯化镉 (CdCl<sub>2</sub>) 和 0.3 g 半胱氨酸 (Cysteine, C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>S), 在磁力搅拌过程中溶解于 45 mL

去离子水中, 之后滴加 NaOH 调节 pH 值至 10, 再加热回流至 100 °C, 将溶液和 NaHTe 前体注入三颈烧瓶中 2 h 后得到酒红色 Cys-CdTe QDs 溶液。

#### 2.1.2 CdTe/CdS QDs 制备

CdTe 回流 2 h 后, 将溶液冷却至 60 °C。同时, 分别称量 0.24 g 的硫化钠 (Na<sub>2</sub>S) 和 0.22 g 的氯化镉 (CdCl<sub>2</sub>), 超声溶解于 5 mL 去离子水中, 将制备好的 Na<sub>2</sub>S 和 CdCl<sub>2</sub> 溶液缓慢加入 CdTe 溶液中, 80 °C 加热回流 1 h, 得到 Cys-CdTe/CdS-QDs 溶液。

### 2.2 实验方法

取数支试管, 将配置好的浓度为 0.05 mol/L 的 Cys-CdTe 量子点溶液在 298, 304, 311 K 的温度下保温, 并在溶液中滴加浓度为 0.98 × 10<sup>-5</sup> ~ 6.89 × 10<sup>-5</sup> mol/L 的叶酸分子溶液, 摇匀混合。所有实验均采用对照实验。

### 2.3 样品表征

采用 RF-5301PC 荧光分光光度计对材料进行荧光光谱分析 (SHIMADZU, Japan), 采用 Nicolet iS5 光谱仪 (Thermo Electron Corporation) 进行 FT-IR 光谱分析, 采用 HITACHI U-3010 分光光度计进行紫外-可见吸收光谱测试。材料晶面结构采用 BDX330X 射线衍射仪测量, 表面结构利用日立 H-600 透射电子显微镜进行成像。

## 3 结果与讨论

### 3.1 Cys-CdTe 和 Cys-CdTe/CdS 量子点材料表征

Cys-CdTe/CdS 量子点的 XRD 如图 1(a) 所示。立方结构 Cys-CdTe 量子点的 XRD 图谱 (JCPDS 15-0770) 中 (111)、(220) 和 (311) 3 个主峰位置, 在图中用红线表示, 分别位于 23.8°、39.6° 和 46.8°。由图中可知, CdTe/CdS 的 XRD 图示中 3 个主峰位置相对于 CdTe 量子点均向高角发生了移动, 表明形成了 CdTe/CdS 核壳结构<sup>[5]</sup>。图 1(b) 比较了半胱氨酸分子和 Cys-CdTe/CdS 量子点的傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)。当半胱氨酸分子与 CdTe/CdS 量子点表面结合时, 在 2500 cm<sup>-1</sup> (ν<sub>S-H</sub>) 的信号消失, 表明半胱氨酸分子的巯基与镉离子发生了键合。Cys-CdTe/CdS 量子点 3400 cm<sup>-1</sup> 处的宽吸收主要来自于 CdTe/CdS 量子点表面半胱氨酸羧基与氨基之间的氢键<sup>[9]</sup>。Cys-CdTe/CdS 量子点的 TEM 图像如

图 1(c) 所示。Cys-CdTe/CdS 量子点晶格紧密堆积, 其平均尺寸为 3.9 nm; 相邻晶面间的平面间距分别为 0.37 nm 和 0.33 nm, 与 CdTe 和 CdS 的  $d(111)$  值相匹配。Cys-CdTe/CdS 量子点的吸收光谱如图 1(d) 所示, 可以观察到以 600 nm 为中心的激子吸收峰对应于 1.65 eV 的禁带宽度。图

1(d) 中嵌入了 CdTe 量子点的紫外-可见吸收光谱。由图中可见, CdTe 量子点的紫外吸收位置在 590 nm 附近, 相比 CdTe 量子点, CdTe/CdS 量子点的紫外吸收位置发生了一定程度的红移, 也可以作为形成 CdTe/CdS 的证据。合成的 Cys-CdTe/CdS 量子点结构示意图如图 2 所示。

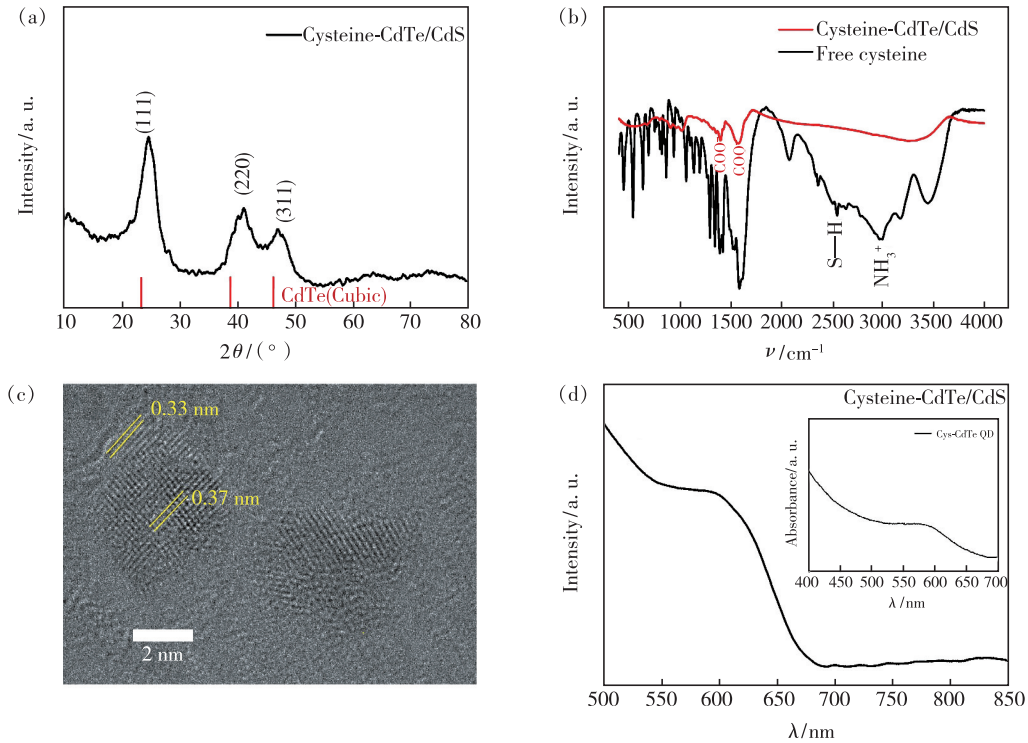


图 1 Cys-CdTe/CdS 量子点的 X 射线衍射图(a)、傅里叶变换红外光谱(b)、TEM 图像(c)、紫外-可见光谱(d)。

Fig. 1 (a) X-ray diffraction pattern. (b) Fourier transform infrared spectra. (c) TEM image. (d) UV-Vis spectrum of Cys-CdTe/CdS QDs.

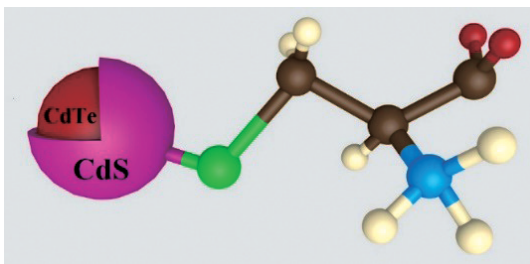


图 2 Cys-CdTe/CdS 量子点结构示意图(其中绿色为 S 元素,褐色为 C 元素,白色为 H 元素,蓝色为 N 元素,红色为 O 元素)

Fig. 2 Structure diagram of Cys-CdTe/CdS QDs (in which green is element S, brown is element C, white is element H, blue is element N and red is element O)

### 3.2 荧光猝灭特性

不同浓度叶酸分子滴定 CdTe 量子点的荧光光谱如图 3 所示,上述测量在 298 K 下进行,激发

波长为 358 nm。由图 3(a) 所示, CdTe 量子点荧光发射光谱峰位在 620 nm, 随着叶酸分子的滴定, CdTe 量子点荧光强度降低。当叶酸分子的浓度达到  $6.89 \times 10^{-5}$  mol/L 时, 荧光强度降低到了初始值的 24%, 表明叶酸分子对 CdTe 量子点有明显的荧光猝灭作用。此外, 叶酸分子滴定会导致 CdTe 量子点荧光发射峰位发生约 35 nm 的蓝移(见图 3(b))。这主要是由于猝灭剂与量子点之间形成的络合结构降低了局域环境的极性所致<sup>[10-12]</sup>, 具体机理解释见文章后续分析。

图 4(a) 为 CdTe/CdS 核壳结构量子点在滴定相同浓度叶酸分子时的荧光光谱。如图所示, CdTe/CdS 核壳结构量子点荧光光谱发射主峰位于 652 nm, 相比 CdTe 量子点荧光光谱主峰红移了 32 nm, 这主要是由于 CdS 包壳结构所带来的

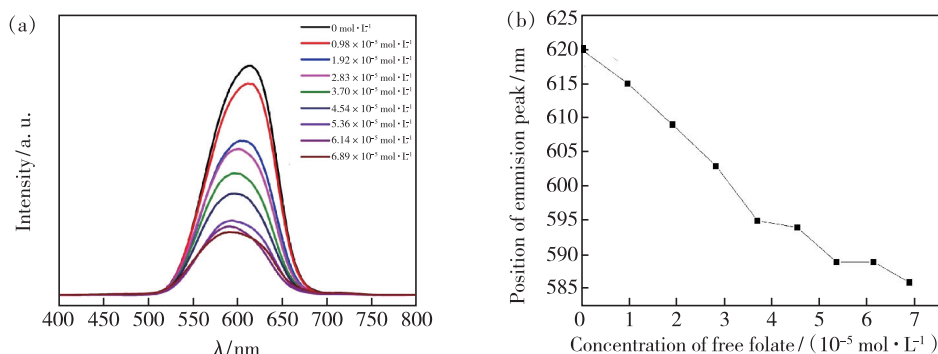


图 3 不同浓度叶酸分子滴定 CdTe 量子点。(a) 荧光光谱; (b) 发射峰位置。

Fig. 3 Titration CdTe QDs with different concentrations of folate molecules. (a) Fluorescence spectra. (b) Emission peak position.

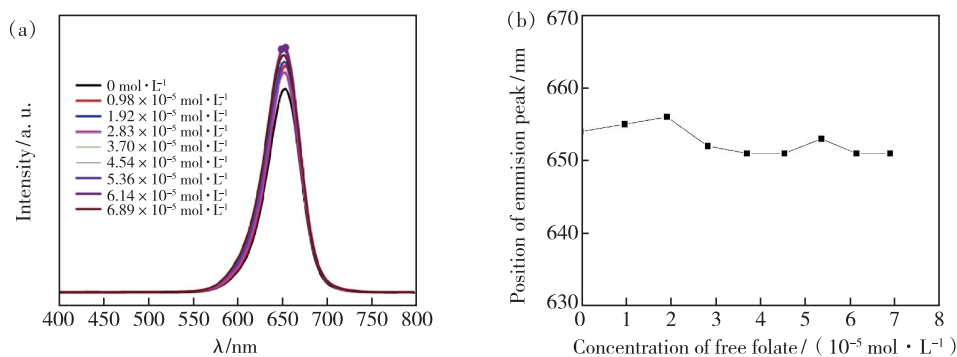


图 4 不同浓度叶酸分子滴定 CdTe/CdS 量子点。(a) 荧光光谱; (b) 发射峰位置。

Fig. 4 Titration CdTe/CdS QDs with different concentrations of folate molecules. (a) Fluorescence spectra. (b) Emission peak position.

量子点尺寸效应, 同时也是 CdTe/CdS 核壳结构形成的另一个证明。如图 4(b) 所示, 随着叶酸分子的浓度增加, CdTe/CdS 量子点荧光发射峰的位置略有波动。以上结果表明, 叶酸分子不会带来 CdTe/CdS 核壳结构量子点显著的荧光猝灭作用, 同时也不会导致荧光光谱蓝移。

### 3.3 Stern-Volmer 方程

为了进一步研究叶酸分子滴加引起不同结构量子点荧光猝灭特性的差异, 我们采用 Stern-Volmer 方程进行计算, 其形式如下<sup>[13]</sup>:

$$\frac{F_0}{F} = 1 + k_{sv}[C] = 1 + k_q\tau_0[C], \quad (1)$$

其中,  $F$  和  $F_0$  分别是量子点在具有给定叶酸分子滴定浓度的溶液和没有叶酸滴定条件下溶液中的发光强度,  $k_{sv}$  是动态猝灭常数,  $k_q$  是动态猝灭速率常数。动态猝灭的最大值约为  $2 \times 10^{10}$  L/(mol·s)。[ $C$ ] 为叶酸分子浓度;  $\tau_0$  是荧光的平均寿命, 大约为  $1.9 \times 10^{-9}$  s。不同温度下叶酸分子对 CdTe 荧光猝灭的 Stern-Volmer 曲线如图 5 所示。

结果表明, 3 种温度下的 Stern-Volmer 曲线均与叶酸分子滴定浓度和  $F_0/F$  呈线性关系, 且拟合直线的斜率随温度升高而减小, 这正是静态荧光猝灭的特征。相关计算信息及参数见表 1。

由表 1 可知, 当测试温度升高至 311 K 时,  $K_{sv}$  从 58 904 L/mol 减小至 39 505 L/mol, 这表明猝灭过程是以静态猝灭为主。更重要的是, 在 3 种不同温度下  $k_q$  处在  $10^{12}$  L/(mol·s) 数量级, 远大于动态猝灭常数的最大值  $2 \times 10^{10}$  L/(mol·s), 进一步表明叶酸分子对 CdTe 量子点的荧光猝灭作用并非动态猝灭, 而是静态猝灭。为了进一步验证叶酸分子对 CdTe 量子点带来的静态荧光猝灭作用, 我们对加入叶酸分子前后的 CdTe 量子点溶液进行了荧光寿命测试。

图 6 为 CdTe 量子点溶液加入叶酸分子前后的荧光寿命谱, 荧光寿命测试采用 375 nm 激发光。如图所示, 加入叶酸分子前后的 CdTe 量子点荧光寿命几乎保持不变, 这再次表明叶酸分子对量子点的荧光猝灭属于静态猝灭<sup>[14-15]</sup>。为了研

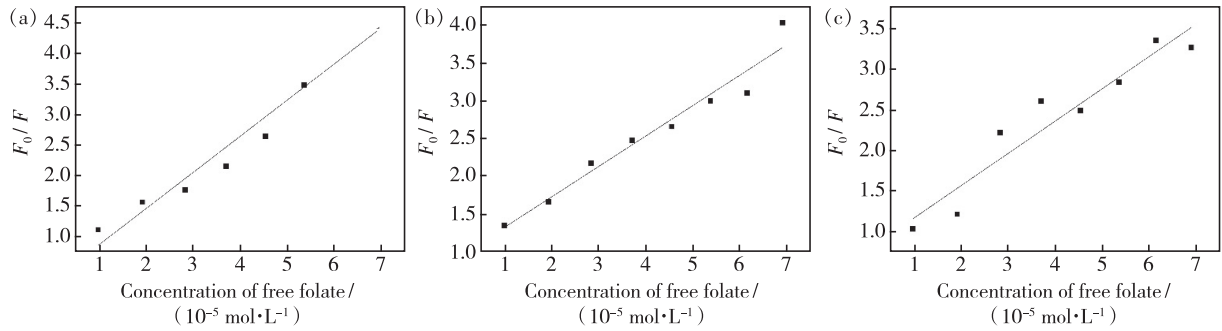


图 5 不同温度下叶酸分子滴定 CdTe 量子点的 Stern-Volmer 曲线。(a)298 K;(b)304K;(c) 311 K。

Fig. 5 Stern-Volmer curve of folate molecular titration CdTe QDs at different temperatures. (a)298 K. (b)304 K. (c)311 K.

表 1 不同温度下叶酸分子滴定 CdTe 量子点的 Stern-Volmer 方程及相关参数

Tab.1 Stern-Volmer equation and related parameters of folate molecular titration of CdTe quantum dots at different temperatures

温度/K	Stern-Volmer 方程	$r^2$	$K_{SV}/(L \cdot mol^{-1})$	$K_q/(L \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1})$
298	$F_0/F = 58904[C] + 0.2945$	0.953 94	58 904	$3.1 \times 10^{12}$
304	$F_0/F = 40277[C] + 0.9209$	0.947 20	40 277	$2.12 \times 10^{12}$
311	$F_0/F = 39505[C] + 0.7787$	0.900 25	39 505	$2.08 \times 10^{12}$

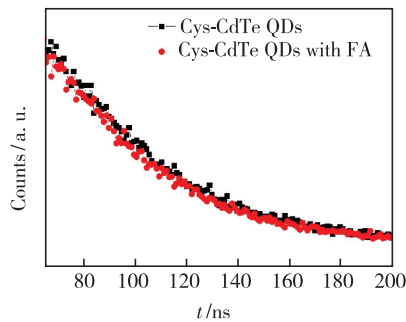


图 6 加入叶酸分子前后 Cys-CdTe 量子点溶液的荧光寿命谱

Fig. 6 Fluorescence life of Cys-CdTe QDs and Cys-CdTe QDs with folate

究静态猝灭下材料的耦合状态,我们对叶酸与 Cys-CdTe 量子点的结合常数和结合位点数目进行了分析,其中结合常数和结合位点数由双对数方程确定:

$$\lg\left[\frac{F_0 - F}{F}\right] = \lg K_b + n \lg[C], \quad (2)$$

其中  $K_b$  表示结合常数,  $n$  表示结合位点数,在 298 K 条件下的拟合曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,在 298 K 下,  $\lg[(F_0 - F)/F]$  与  $\lg[C]$  成线性关系,结合 Stern-Volmer 方程,叶酸分子滴定 CdTe 量子点只会带来静态荧光猝灭,而并非静态猝灭和动态猝灭混合。根据叶酸-

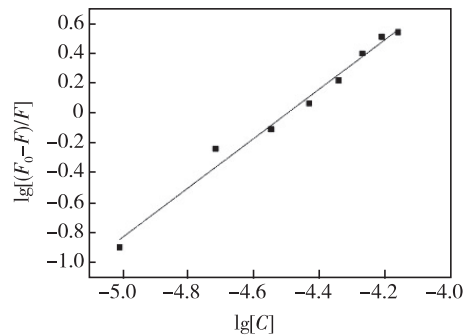


图 7  $\lg[(F_0 - F)/F] - \lg[C]$  FA-CdTe 体系在 298 K 时的曲线

Fig. 7 Curve of  $\lg[(F_0 - F)/F] - \lg[C]$  of folate-CdTe system at 298 K

CdTe 量子点体系在 298 K 时的双对数方程可知,结合位点数( $n$ )约等于 1.65,这表明叶酸分子与 CdTe 量子点的结合比率为 1.65:1,进一步验证了两者之间发生了强烈的耦合作用,进而产生了络合结构。为了验证络合结构的产生,我们对 CdTe 量子点加入叶酸之后的紫外-可见光谱进行了研究。

如图 8 所示,与 CdTe 量子点和叶酸分子紫外-可见光吸收光谱的数学叠加相比,CdTe 量子点在加入叶酸分子之后,吸收光谱发生了变化,在 232 nm 附近紫外吸收增加,这表明在 CdTe 量子点和叶酸分子之间形成了非荧光络合结构<sup>[11]</sup>。

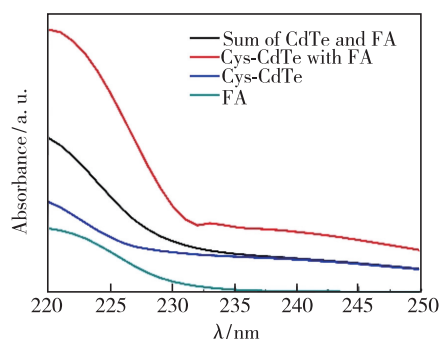


图 8 Cys-CdTe 量子点、叶酸、量子点加入叶酸后的紫外-可见光谱。

Fig. 8 UV-Vis spectra of Cys-CdTe QDs, folate, and Cys-CdTe QDs with folate.

### 3.4 机理分析

以上结果表明,叶酸分子给 CdTe 量子点带来的荧光猝灭是一种典型的静态荧光猝灭行为,而在 CdTe/CdS 核壳体系中,我们没有观察到叶酸分子对量子点引起的荧光猝灭现象。研究表明 CdTe 量子点中暴露在空气中的不饱和 Te 原子易被氧化<sup>[16]</sup>,从而形成空穴陷阱。而在 CdTe 量子点表面包覆 CdS 壳层可以钝化 CdTe 量子点的表面缺陷,消除量子点表面的阴离子和阴离子悬挂键,抑制 CdTe 量子点的氧化<sup>[17]</sup>,进而减弱叶酸分子与 CdTe 量子点表面的静电相互作用,抑制了荧光猝灭效应。叶酸分子滴定会致 CdTe 量子点荧光光谱有明显的蓝移,说明荧光分子与猝灭剂之间存在静电相互作用,荧光分子与猝灭剂之间可能形成非发光基态络合结构。这种复合物导致局部环境的极性降低,通过减少非辐射跃迁缩短 Stokes 位移。为了验证我们的推测,进行了热力学计算:

$$\ln K = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R}, \quad (3)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (4)$$

其中,  $K$  是猝灭常数,  $H$  是焓变,  $S$  是熵变,  $R$  是普

适气体常数,  $T$  是温度,  $G$  是吉布斯自由能变化。我们拟合了  $\ln K$  与  $1/T$  的关系。最后计算了熵变 ( $\Delta H$ ) 和焓变 ( $\Delta S$ ) 分别为  $-27.75 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $11 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 根据计算结果, 发现吉布斯自由能变化 ( $\Delta G$ ) 为  $-27.1 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。  $\Delta G < 0$  说明叶酸分子带来 CdTe 量子点的荧光猝灭是自发的。同时, 焓变 ( $\Delta H$ )  $< 0$ , 熵变 ( $\Delta S$ )  $> 0$ , 说明叶酸分子与 CdTe 量子点的相互作用主要是静电作用<sup>[18]</sup>。叶酸分子含有两个羧基和一个氨基, 因此叶酸分子与半胱氨酸诱导剂可能通过端层羧基与氨基间的静电作用进行偶联进而形成了络合结构, 引起荧光光谱的蓝移。

## 4 结 论

本文在水相条件下合成了 Cys-CdTe 量子点和 CdTe/CdS 核壳量子点。叶酸分子会引起 CdTe 量子点荧光猝灭现象, 经 Stern-Volmer 方程计算表明该猝灭作用是静态猝灭效应。实验研究表明 CdTe 量子点的荧光强度与叶酸分子的浓度有良好的线性关系, 可用于制备叶酸浓度快速测定的荧光探针。CdS 壳层结构可以有效削弱叶酸分子与 CdTe 量子点之间的静电相互作用, 进而抑制荧光猝灭效应。研究也表明叶酸分子与 CdTe 量子点作用会带来荧光光谱峰位的蓝移, 热力学计算表明叶酸分子与 CdTe 量子点之间通过静电作用形成了络合结构, 导致基团的局部极性降低。本研究为进一步研究生物分子与量子点的相互作用提供了一定的帮助和启示。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210257>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] SCHÖPS O, LE THOMAS N, WOGGON U, *et al.* Recombination dynamics of CdTe/CdS core-shell nanocrystals [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2006, 110(5): 2074-2079.
- [ 2 ] PURCELL-MILTON F, VISHRATINA A K, KUZNETSOVA V A, *et al.* Impact of shell thickness on photoluminescence and optical activity in chiral CdSe/CdS Core/Shell quantum dots [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(9): 9207-9214.
- [ 3 ] CHENG C Y, OU K L, HUANG W T, *et al.* Gadolinium-based CuInS<sub>2</sub>/ZnS nanoprobe for dual-modality magnetic resonance/optical imaging [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, 5(10): 4389-4400.
- [ 4 ] ZHANG W J, CHEN G J, WANG J, *et al.* Design and synthesis of highly luminescent near-infrared-emitting water-soluble

- CdTe/CdSe/ZnS core/shell/shell quantum dots [J]. *Inorg. Chem.*, 2009,40(20):9723-9731.
- [ 5 ] ALDEEK F, BALAN L, MEDJAHDI G, *et al.* Enhanced optical properties of core/shell/shell CdTe/CdS/ZnO quantum dots prepared in aqueous solution [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2009,113(45):19458-19467.
- [ 6 ] LI X W, CHEN L G. Fluorescence probe based on an amino-functionalized fluorescent magnetic nanocomposite for detection of folic acid in serum [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016,8(46):31832-31840.
- [ 7 ] CHAKRAVARTY S, DUTTA P, KALITA S, *et al.* PVA-based nanobiosensor for ultrasensitive detection of folic acid by fluorescence quenching [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2016,232:243-250.
- [ 8 ] JIANG H, WANG X M. Label-free detection of folate receptor ( + ) cells by molecular recognition mediated electrochemiluminescence of CdTe nanoparticles [J]. *Anal. Chem.*, 2014,86(14):6872-6878.
- [ 9 ] VISHERATINA A K, ORLOVA A O, PURCELL-MILTON F, *et al.* Influence of CdSe and CdSe/CdS nanocrystals on the optical activity of chiral organic molecules [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018,6(7):1759-1766.
- [ 10 ] SHANG L, BRANDHOLT S, STOCKMAR F, *et al.* Effect of protein adsorption on the fluorescence of ultrasmall gold nanoclusters [J]. *Small*, 2012,8(5):661-665.
- [ 11 ] WANG H P, ZHENG C Z, DONG T J, *et al.* Wavelength dependence of fluorescence quenching of CdTe quantum dots by gold nanoclusters [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2013,117(6):3011-3018.
- [ 12 ] DE PAOLI LACERDA S H, PARK J J, MEUSE C, *et al.* Interaction of gold nanoparticles with common human blood proteins [J]. *ACS Nano*, 2010,4(1):365-379.
- [ 13 ] GUILBAULT G G. *Practical Fluorescence* [M]. 2nd ed. New York:Marcel Dekker Inc, 1990.
- [ 14 ] JAGADEESWARI S, JHONSI M A, KATHIRAVAN A, *et al.* Photoinduced interaction between MPA capped CdTe QDs and certain anthraquinone dyes [J]. *J. Lumin.*, 2011,131(4):597-602.
- [ 15 ] JHONSI M A, RENGANATHAN R. Investigations on the photoinduced interaction of water soluble thioglycolic acid (TGA) capped CdTe quantum dots with certain porphyrins [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2010,344(2):596-602.
- [ 16 ] GAPONIK N, TALAPIN D V, ROGACH A L, *et al.* Thiol-capping of CdTe nanocrystals: an alternative to organometallic synthetic routes [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2002,106(29):7177-7185.
- [ 17 ] PENG H, ZHANG L J, SOELLER C, *et al.* Preparation of water-soluble CdTe/CdS core/shell quantum dots with enhanced photostability [J]. *J. Lumin.*, 2007,127(2):721-726.
- [ 18 ] 董飞, 刘江国, 杨逸仙, 等. 一维 CdTe 纳米线与牛血清白蛋白的相互作用研究 [J]. *光散射学报*, 2010,22(1):65-71.
- DONG F, LIU J G, YANG Y X, *et al.* Study on the Interaction between CdTe nanowire and bovine serum album [J]. *J. Light Scattering*, 2010,22(1):65-71. (in Chinese)



李光旻 (1979 - ), 男, 天津人, 博士, 副教授, 2015 年于南开大学获得博士学位, 主要从事无机手性量子点及荧光探针的研究。  
E-mail: 504753199@qq.com



刘洪飞 (1985 - ), 男, 河北任丘人, 博士, 讲师, 2013 年于中国科学院半导体研究所获得博士学位, 主要从事半导体材料掺杂改性方面的计算研究。  
E-mail: liuhongfei001@163.com



刘湔洋 (2000 - ), 男, 四川攀枝花人, 在读本科生, 主要从事量子点荧光相互作用的研究。  
E-mail: tauceti@foxmail.com