

文章编号 2095-1531(2018)01-0074-09

基于近红外量子点的荧光共振能量转移 生物探针构建及应用

修景锐¹, 胡思怡¹, 李金华^{1*}, 任升¹, 刘丽炜^{2*}

(1. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

2. 深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 本论文构建了基于近红外量子点 InP/ZnS 和 Cy7 ($C_{45}H_{44}K_3N_3O_{16}S_4$) 的荧光共振能量转移 (FRET) 体系, 完成了不同 pH 值和不同浓度下的 FRET 体系转换效率的检测。检测结果显示: 当量子点浓度保持不变时, 随着染料浓度的增加, 体系转换效率也随之增加, 当 InP/ZnS 量子点与 Cy7 浓度比为 1:250 时, 转换效率高达 68%。细胞测试结果表明, FRET 体系对 pH 值有较高敏感度, 对细胞微环境 pH 值的检测精度可达 0.1, 该体系可以作为敏感型 FRET 探针用于生物微环境检测。

关键词: 量子点; 荧光共振能量转移; 近红外; pH 敏感

中图分类号: O644.17 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20181101.0074

Construction and application of FRET biological probe based on near infrared InP/ZnS quantum dots

XIU Jing-rui¹, HU Si-yi¹, LI Jin-hua^{1*}, REN Sheng¹, LIU Li-wei^{2*}

(1. College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding author, E-mail: lijin-hua2000@yahoo.com

Abstract: In this paper, a kind of fluorescence resonance energy transfer (FRET) system based on near infrared InP/ZnS Quantum Dots and fluorescence dye Cy7 was constructed, and the conversion efficiencies of FRET system at different pH values and different concentrations were measured. Experimental results indicated

收稿日期: 2017-10-11; 修订日期: 2017-11-27

基金项目: 深圳大学新入职教师启动项目 (No. 2017027); 国家自然科学基金科学基金 (No. 61722508) 长春理工大学科技创新基金 (No. XJLLG-2015-01); 长春理工大学青年基金 (No. XQNJJ-2016-10)

Natural Science Foundation of SZU (No. 2017027); National Natural Science Foundation of China (No. 61722508); Changchun University of Science and Technology Innovation Fund (No. XJLLG-2015-01); Changchun University of Science and Technology Youth Fund (No. XQNJJ-2016-10)

that when the concentration of quantum dots remained constant, the conversion efficiency of the system increased with the increasing of the concentration of dye. When the concentration ratio of InP/ZnS and Cy7 was 1:250, the conversion efficiency was 68%. The results of cell test showed that the FRET system had a high sensitivity to pH value, and the detection accuracy of pH value for cell microenvironment was 0.1, which could be used as a sensitive FRET probe for biological microenvironment detection.

Key words: quantum dots; FRET; near infrared; pH sensitive

1 引言

荧光共振能量转移(FRET)是一种通过荧光物质间发生非辐射能量转移进行分析的光谱分析法^[1-2]。自该理论提出以来,FRET已被广泛应用于农业、医药、司法鉴定和科学研究的各个领域^[3-8]。

近年来,FRET技术在空间分辨率、敏感性方面有很大的提高,根据FRET设计的传感器在生物学研究领域得到广泛应用,如检测生物大分子的构象变化、生物大分子之间的相互作用、生物分子间纳米尺度的距离等^[9-12]。研究表明能量供受体的光学性质及传感器的组装方法对FRET传感器的检测性能有至关重要的影响^[13],然而传统的能量供受体(如有机荧光染料、生物材料、镧系元素等)由于荧光强度低、光稳定性弱、对环境敏感、生物相容性较差,并且毒性较大,容易受到生物体内自发荧光和杂散光干扰,导致出现荧光强度下降、生物检测达不到预期目标等缺点,从而限制了FRET传感器的发展与应用^[14-19]。

目前,南京工业大学课题组^[20]将近红外FRET体系应用于光动力治疗方面进行研究,一定程度上改善了可见FRET体系的缺点,达到了更好的治疗效果,但目前近红外FRET体系作为敏感型探针的研究依然比较缺乏。

本文构建了近红外区域的FRET体系,供体为荧光发射峰在近红外的InP/ZnS量子点,受体为吸收在近红外的荧光染料Cy7(C₄₅H₄₄K₃N₃O₁₆S₄)。弥补了传统可见光量子点在生物应用中的缺陷。同时对该体系进行浓度和细胞微环境pH敏感性检测,结果表明FRET体系的荧光强度可直接反映细胞微环境的酸碱度变

化,对体系pH值有较高的检测精度,本研究为FRET体系作为敏感型探针应用于癌症早期诊断提供了理论和实验依据。

2 材料与amp;方法

2.1 实验试剂与amp;仪器

实验试剂:醋酸铟(In(Ac)₃),硬脂酸锌(Zn(St)₂),十二烷基硫醇(DDT),购于Alfa公司;肉豆蔻酸(MA),购于TCI公司;1-十八烯(ODE),购自Sigma公司;二硫代苏糖醇(DTT),磷化锌(Zn₃P₂)购买于国药上海试剂公司。氢氧化钠,盐酸以上药品均购于国药试剂。荧光染料Cy7(C₄₅H₄₄K₃N₃O₁₆S₄),购于武汉斯奈德生命科技有限责任公司。实验所用溶剂如不作特殊说明均用超纯水(HPLC),购于Alfa公司。DMEM高糖培养液,其中含有10%的胎牛血清(FBS,HyClone公司),100 μg/mL的盘尼西林和100 μg/mL的链霉素,均购于Gibco公司。

实验仪器:高精度电子天平(Sartorius, Quintix224-1cn),磁力搅拌器加热台(Thermo Scientific, Cimarec),超声清洗器,恒温水浴箱,移液器,紫外-可见-近红外分光光度计(Agilent, Cary 5000 UV-Vis-NIR),荧光分光光度计(Agilent, Cary Eclipse),透射电子显微镜,FLS980超快荧光寿命光谱仪,荧光倒置显微镜(DMI3000, Leica, 德国)。

2.2 实验方法

量子点的制备:将0.2 mmol的醋酸铟,0.6 mmol的肉豆蔻酸和15 mL 1-十八烯在氮气保护下保持110 °C加热1 h,获得In前驱液。将3 mL盐酸(4 M)注入磷化锌,生成的磷化氢气体通入到加热至240 °C的In前驱液中,获得InP量

子点。将 0.6 mmol 硬脂酸锌溶解于 2 mL 1-十八烯中并加热至 120 °C 后,将其注入 InP 量子点溶液中,形成 InP/ZnS 复合物,最后,将加热至 260 °C 的十二烷基硫醇(0.6 mmol)加入 InP/ZnS 复合物,反应 1 h 后获得 InP/ZnS 量子点。

上一步骤中制备了油性的 InP/ZnS 量子点,我们接下来对油性量子点进行了表面修饰,以便其更好的生物应用,具体修饰方法如下:将 1 mL 甲醇,1 mL 氯仿,4 mL MPA 和油性量子点混合搅拌 5 min,向搅拌后的混合溶液中加入 3% 的 NH_4OH ,继续搅拌 5 h,获得水溶性 InP/ZnS 量子点。

FRET 体系的构建:将 InP/ZnS 量子点溶液和 Cy7 荧光染料摩尔比例 1:0、1:0.01、1:0.02、1:0.03、1:0.04 和 1:0.05 混合加入反应样品瓶中,在常温、常压条件下搅拌 5 min,对混合溶液进行测定。

荧光光谱测定:在室温条件下,依次取 1 mL 的量子点与染料构建 FRET 体系溶液,以 600 nm 为激发波长,激发和发射狭缝为 5 nm,记录 620 nm 到 850 nm 波长范围内的发射光谱变化。

傅里叶红外光谱测定:50 °C 下将 InP/ZnS 量子点,Cy7 荧光染料和 FRET 体系烘干成粉末状备用。分别将 3 种待测样品与溴化钾粉末以 1:10 的比例混合后充分研磨,将混合后的粉末进行压片处理,获得待测样品。

MCF-7 乳腺癌细胞荧光成像:用于荧光成像的 MCF-7 乳腺癌细胞在使用前要分种在 6 孔培养板中。实验前的细胞需培养 24 h,密度在 60% ~ 70% 即可。用于荧光成像的 FRET 体系样品按照 10 ~ 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的浓度溶于 PBS 中($\text{pH} = 7.2$)。向六孔板的每个孔中加入 20 ~ 40 μL 的样品,轻轻摇匀后,在 37 °C、5% CO_2 环境下培养 4 h 后,移去培养液,用 PBS 清洗 3 遍,在荧光倒置显微镜下观察细胞形态并进行荧光成像研究。

3 结果与讨论

3.1 InP/ZnS 量子点-Cy7 荧光染料 FRET 体系的构建

由图 1 可知,InP/ZnS 量子点的发射光谱与

Cy7 染料的吸收光谱有较大的重叠面积,图中的阴影部分为重叠部分。而 InP/ZnS 量子点的发射光谱与染料的发射光谱相距较远,最大发射峰值相差 60 nm,有效避免了供受体之间的荧光干扰。所以 InP/ZnS 量子点和 Cy7 荧光染料符合构建 FRET 体系的基本条件^[21-22],其中 InP/ZnS 量子点和 Cy7 染料分别作为 FRET 体系的供体和受体。

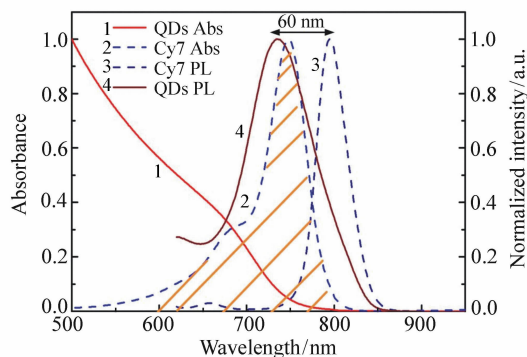


图 1 InP/ZnS 量子点和 Cy7 荧光染料的吸收和发射光谱对比图

Fig. 1 Comparison of absorption and emission spectra of InP/ZnS quantum dots and Cy7 fluorescent dyes

根据实验室经验,供体 InP/ZnS 量子点表面游离的羧基($-\text{COOH}$)能与受体染料 Cy7 表面游离的氨基($-\text{NH}_2$)通过化学键和的方式相连接,以拉近供受体之间的距离。为了验证该结论,我们利用傅里叶红外光谱测试 (FTIR) 对 InP/ZnS 量子点与染料 Cy7 之间化学键合的情况进行验证。在图 2 中,InP/ZnS 量子点溶液在 1650 cm^{-1} ($\text{COO}-$) 处有振动峰的存在, Cy7 染料在 3438 cm^{-1} (NH_2) 处有振动峰存在。供体 InP/ZnS 量子点与受体 Cy7 染料的结合是通过 Cy7 上的一 NH_2 和量子点表面的一 COOH (来自于量子点的表面修饰剂 MPA),脱水缩合形成的肽键 ($-\text{CO}-\text{NH}-$)。图 2 中曲线 1 代表了 InP/ZnS 量子点和 Cy7 染料构建的 FRET 体系,InP/ZnS-Cy7 染料在 1576 cm^{-1} ($-\text{CO}-\text{NH}-$) 处的振动峰存在,确定了两种样品成功结合,这个 1576 cm^{-1} 的振动峰在 InP/ZnS 量子点和 Cy7 单独的红外光谱中均不存在。而且,伴随着

1 576 cm^{-1} (—CO—NH—) 的出现 InP/ZnS 量子点上的 1 650 cm^{-1} (COO—) 振动峰明显减弱,这进一步确认了 InP/ZnS 量子点与 Cy7 染料之间的化学键合过程的成功实现。

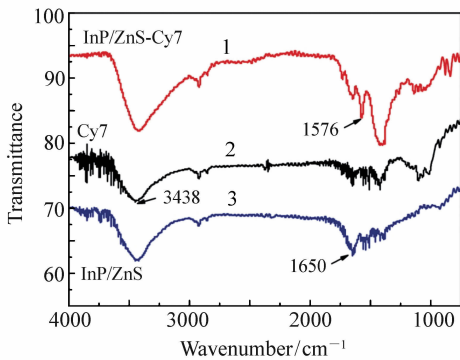
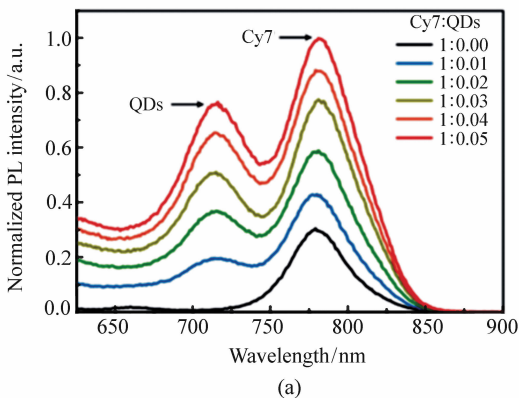


图2 InP/ZnS量子点,Cy7,FRET体系的FTIR光谱

Fig. 2 FTIR spectra of InP/ZnS quantum dots, Cy7 fluorescent dyes and FRET system



3.2 InP/ZnS量子点和Cy7染料浓度对FRET体系的影响

不同浓度的 InP/ZnS 量子点与 Cy7 染料构建 FRET 体系。如图 3(a) 所示,当 Cy7 染料浓度不变时,随着量子点浓度的增加 (0.1 ~ 0.5 $\mu\text{mol/L}$), Cy7 染料的荧光强度会明显增强,可以看出量子点与染料之间发生了荧光共振能量转移。随着供体 InP/ZnS 量子点浓度的增加, FRET 体系的荧光共振能量转移效率逐渐减小,如图 3(b) 所示,这是因为随着供体分子数量的增多,围绕在单个供体附近的受体分子平均数目减少,体系的荧光共振能量转移效率减少。本论文转移效率是基于荧光强度计算的,Styrer 和 Haugland 给出^[23],

$$E = 1 - \frac{I_{D-A}}{I_D}, \quad (1)$$

式中, I_{D-A} 、 I_D 分别代表有受体和无受体时供体的荧光强度。这样,通过测量供体的荧光强度可以计算出荧光共振能量转移的效率 E 。

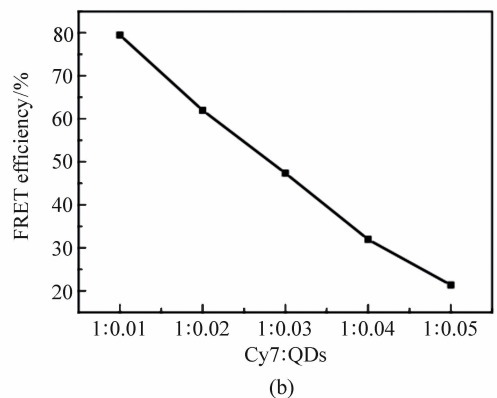


图3 改变 InP/ZnS 量子点浓度时的 FRET 体系(a)荧光光谱图(b)相应的 FRET 转换效率

Fig. 3 FRET system when the InP / ZnS quantum dot concentration is changed. (a) Fluorescence spectra (b) FRET conversion efficiency

同理,保持量子点浓度不变,改变 Cy7 染料的浓度,获得 FRET 体系的变化情况如图 4 所示。从图 4(a) 中可以看出,随着 Cy7 染料浓度的增加,量子点的荧光强度随之减小。通过公式(1),计算得到了改变 Cy7 染料后的荧光共振能量转移效率,如图 4(b) 所示。从图 4(b) 中可以看出,随

着受体浓度的增加,FRET 体系能量转移效率逐渐增大,但当 QDs: Cy7 小于 1:250 后,荧光共振能量转移效率达到最大,因为当 Cy7 染料浓度增加到一定程度时,量子点周围围绕的受体染料分子供数目达到饱和。

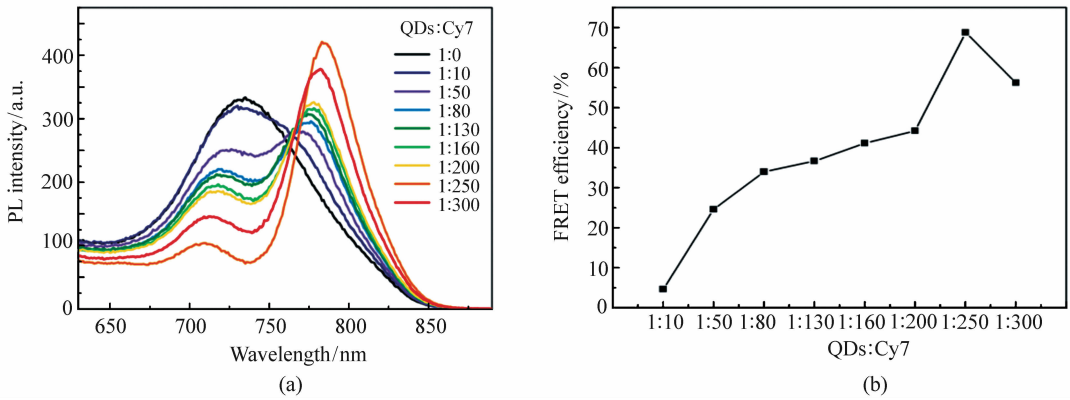


图 4 改变 Cy7 浓度时的 FRET 体系(a)荧光光谱图(b)相应的 FRET 转换效率

Fig. 4 FRET system when the Cy7 concentration is changed. (a) Fluorescence spectra (b) FRET conversion efficiency

3.3 pH 值对 FRET 体系的影响

如图 5 所示,将 Cy7 染料和 InP/ZnS 量子点分别溶在 pH 值为 4、7、10、12 的去离子水中进行荧光光谱的测试。从图 5(a)中可以看出,随着溶液 pH 值从 4 升至 12,溶液中染料的荧光强度没有明显的改变,可以说明染料本身对 pH 值不敏感。但从图 5(b)可以明显看出,随着溶液 pH 值

的改变,量子点的荧光强度有明显的变化,强酸性条件下,量子点的荧光强度最弱,这是因为溶液中较为丰富的 H^+ 抑制了量子点表面羧基的解离。相反当溶液偏碱性时,其中会有含有丰富的 OH^- ,能够促进羧基的解离,但过高的 pH 值同样会降低量子点的荧光。

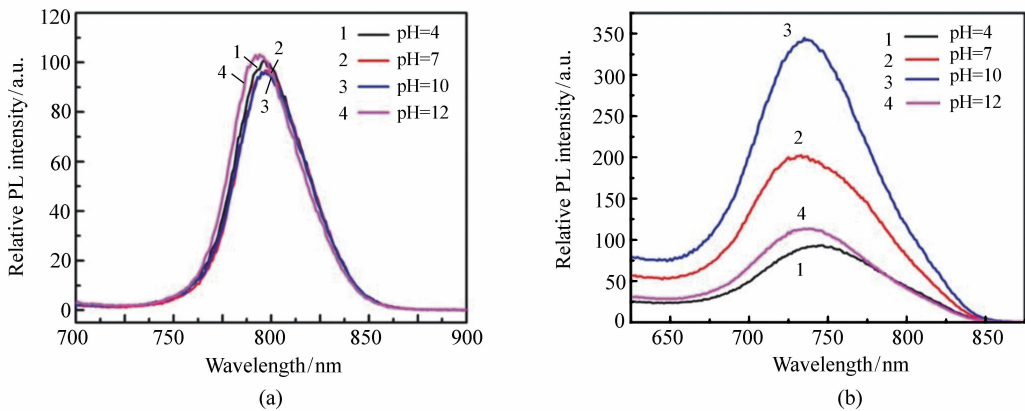


图 5 Cy7 (a) 和 InP/ZnS 量子点(b)在不同 pH 值溶液中的荧光光谱图

Fig. 5 Fluorescence spectra of Cy7 (a) and InP/ZnS quantum dots (b) in different pH solutions

测试了供受体对 pH 值的响应之后,通过调节 FRET 体系 (InP/ZnS-Cy7) 的 pH 值,验证该体系的对 pH 值的敏感性。癌细胞形成初期表现是 pH 值的微弱改变,因此,本文拟利用自行构建的 FRET 体系对 pH 值的敏感性实现对不同 pH 值缓冲液的监测,最终应用于癌细胞微环境检测,实现癌症早期诊断。如图 5 所示,验证了 pH 值的微

弱改变 (pH = 6.7 ~ 9.1) 对体系的荧光强度的影响。在一定范围内, pH 值的降低,体系的荧光强度逐渐减弱,呈现出明显趋势,实验结果表明该体系可以作为 pH 值敏感型生物探针。

3.4 FRET 体系对生物微环境检测的应用

为了验证 InP/ZnS-Cy7 体系生物应用的可行性,首先采用 MTT 比色分析法对体系的细胞毒性

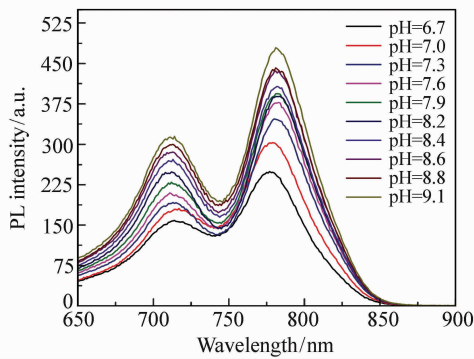


图 6 FRET 体系在不同 pH 值溶液中的荧光光谱图

Fig. 6 Fluorescence spectra of FRET system in different pH solutions

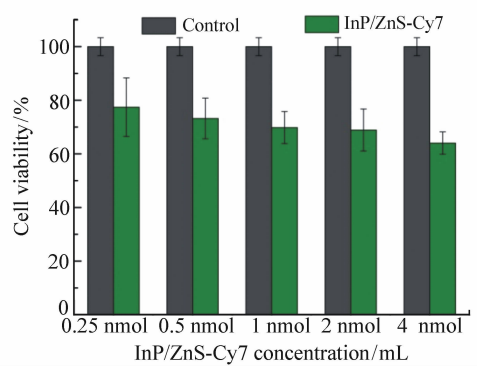


图 7 FRET 体系的细胞毒性测试

Fig. 7 Relative cell viability of MCF-7 breast cancer cell treated with FRET system

进行测试,具体测试过程如下:

利用 96 孔板培养 MCF-7 乳腺癌细胞, FRET 体系按照浓度梯度为 4、2、1、0.5 和 0.25 nmol/mL 溶解,向孔中分别加入不同浓度的待测样品,摇匀后置于 CO₂ 培养箱 (37 °C) 中培养 24 h,确保样品进入细胞并对细胞产生作用。24 h 后,取出含有样品的 96 孔板,向每个孔中加入 5 μg/mL 的 MTT 溶液 20 μL,摇匀后再培养 4 h,活细胞的线粒体中的琥珀酸脱氢酶能使 MTT 还原为水不溶性的蓝紫色结晶甲瓏。抽取孔上层溶液后加入 150 μL 的二甲基亚砷 (DMSO, 购于 Sigma),利用酶标仪在 495 nm 处对其进行扫描,得到细胞活性数据。如图 7 所示,24 h 后,随着 InP/ZnS-Cy7 体系浓度的增加,细胞活性虽然有所降低,但总体细胞活性均保持在 60% 以上,具有良好的生物兼容性,可以进行相关的生物研究和应用。

为了证明该体系可以作为荧光探针对生物微环境进行检测,便于未来应用于癌症的早期诊断研究中。我们应用所构建的近红外荧光探针对不同的细胞微环境进行了检测,分别采用高糖培养基 (DMEM)、50% 密度的巨噬细胞 (RAW 264.7) 培养 48 h 后的含有代谢产物的细胞外液、50% 密度的 MCF-7 乳腺癌细胞培养 48 h 后的含有代谢产物的细胞外液作为检测溶液,测试所获的荧光光谱如图 8 所示。可以明显看到,探针的荧光随着细胞外液酸碱度的变化而产生明显变化,通过与精确 pH 试纸 (MN, MACHEREY-NAGEL, 德国)

比对,该 FRET 体系对细胞微环境 pH 值检测精度可达到 0.1,在乳腺癌细胞外液中的 FRET 体系的荧光强度最弱。

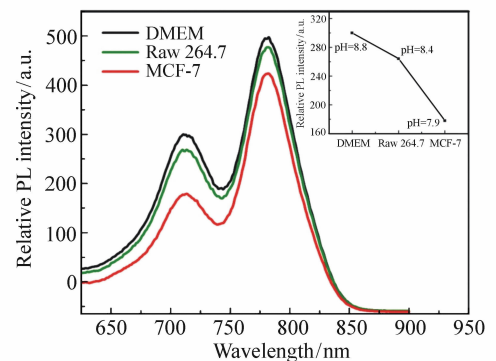


图 8 FRET 体系对不同细胞微环境的检测

Fig. 8 Detection result of different cell microenvironment by FRET system

量子点良好的荧光信号决定了所构建的 FRET 体系除了能够实现癌细胞的 pH 值敏感度检测外,还能够实现癌细胞的荧光标记。图 9 显示了 FRET 体系对 MCF-7 乳腺癌细胞的成像实验。从明场图像可以看出对照组和实验组细胞生长状态良好,细胞形态正常,呈不规则多边形,没有发现细胞形态的变化,或细胞壁破损的情况,说明该 FRET 体系毒性较低。通过暗场荧光图可以看出,相比对照组,实验组的细胞内具有来自于 FRET 体系的明显荧光信号,证明该 FRET 体系可作为荧光探针对乳腺癌进行荧光标记。

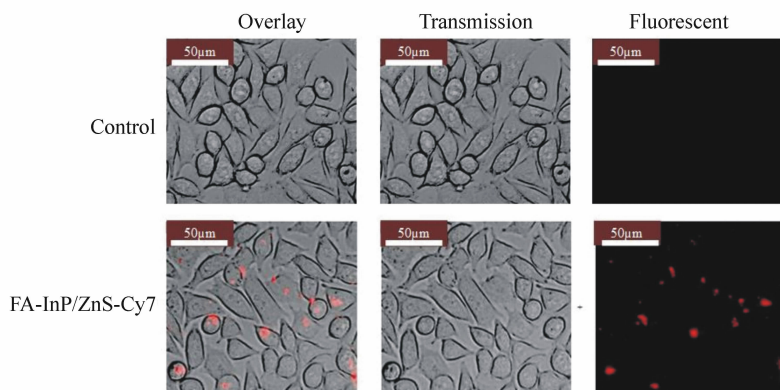


图 9 FRET 体系对 MCF-7 乳腺癌细胞的荧光标记

Fig. 9 Fluorescently label in MCF-7 breast cancer cells by FRET system

4 结 论

本文采用近红外 InP/ZnS 量子点与近红外 Cy7 染料构建 FRET 体系,通过改变体系中量子点和 Cy7 染料的浓度对 FRET 体系转移效率的影响进行了讨论分析。最后,研究了不同 pH 值溶液对 FRET 体系的影响,结果显示 Cy7 染料本身对 pH 值并不敏感,FRET 体系对 pH 值的敏感性

主要源于量子点对 pH 值的敏感性,当溶液 pH 值处在 7 ~ 10 时,FRET 体系具有较高的 FRET 转移效率。细胞测试结果表明,FRET 探针的荧光信号随着细胞外液酸碱度的变化而产生明显变化,可用于生物微环境中对癌细胞的检测。同时,乳腺癌细胞外液中的 FRET 体系的明显荧光信号可以应用于癌细胞成像,实现了 FRET 体系的双重功能。

参考文献:

- [1] 胡珊. 荧光共振能量转移体系的研究及其在均相免疫分析中的应用[D]. 武汉:华中科技大学,2010.
HU SH. Study on fluorescence resonance energy transfer system and its application in homogeneous immunoassay[D]. WuHan:Huazhong University of Science and Technology,2010. (in Chinese)
- [2] FORSTER T. Intermolecular energy migration and fluorescence[J]. *Ann. Physics*,1948,2:55-75.
- [3] 郭尧君. 荧光实验技术及其在分子生物学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1979.
GUO Y J. *Fluorescence Experimental Techniques and Their Applications in Molecular Biology*[M]. Beijing:Science Press, 1979. (in Chinese)
- [4] LAKOWICZ J R. *Energy Transfer:In Principles of Fluorescence Spectroscopy*[M]. New York:Plenum Press,1983.
- [5] CLEGG R. *Fluorescence Imaging Spectroscopy and Microscopy*[M]. New York:Wiley,1996.
- [6] ANGELIS D A D. *Fluorescence Resonance Energy Transfer Fret*[M]. Encyclopedia of Medical Genomics and Proteomics. 2004:1420.
- [7] FENG Y SH,LIU L W,HU S Y,*et al.*. Förster resonance energy transfer properties of a new type of near-infrared excitation PDT photosensitizer: CuInS₂/ZnS quantum dots-5-aminolevulinic acid conjugates[J]. *RSC Adv.*,2016,6:55568-55576.
- [8] FENG Y SH,LIU L W,HU S Y,*et al.*. Four-photon-excited fluorescence resonance energy transfer in an aqueous system from ZnSe:Mn/ZnS quantum dots to hypocrellin A[J]. *Optics Express*,2016,24(17):19627-19637.
- [9] KIKUCHI K,TAKAKUSA H,NAGANO T. Recent advances in the design of small molecule-based FRET sensors for cell biology[J]. *Trends in Analytical Chemistry*,2004,23(6):407-415.
- [10] JANSSEN A,BEERLING E,MEDEMA R,*et al.*. Intravital FRET imaging of tumor cell viability and mitosis during chemotherapy[J]. *PLoS One*,2013,8(5):e64029.

- [11] YUAN L, LIN W, ZHENG K, *et al.*. FRET-based small-molecule fluorescent probes: rational design and bioimaging applications[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2013, 46(7): 1462-1473.
- [12] TAO H L, LIAO X F, *et al.*. Determination of trace Hg^{2+} ions based on the fluorescence resonance energy transfer between fluorescent brightener and CdTe quantum dots[J]. *Journal of Luminescence*, 2014, 146: 376-381.
- [13] JIANG G F, TANG Y. A novel two-photon fluorescent probe for hydrogen sulfide in living cells using an acedan-NBD amine dyad based on FRET process with high selectivity and sensitivity[J]. *New Journal of Chemistry*, 2017, 41(14): 6769-6774.
- [14] WANG Y, SI B, LU S, *et al.*. Near-infrared excitation of CdTe quantum dots based on fluorescence resonance energy transfer and their use as fluorescent sensors[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2017, 246: 127-135.
- [15] 张旭霞, 李斌, 张黎明, 等. 有机-无机复合纳米材料的传感应用及机理[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 651-666.
ZHANG X X, LI B, ZHANG L M, *et al.*. Sensing application and mechanism of organic-inorganic nanocomposites[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 651-666. (in Chinese)
- [16] 翟英歌, 楚学影, 徐铭泽, 等. ZnS:Cu-罗丹明 B 的荧光共振能量转移性质[J]. *发光学报*, 2017, 38(8): 1028-1032.
ZHAI Y G, CHU X Y, XU M Z, *et al.*. Properties of fluorescence resonance energy transfer of ZnS:Cu-rhodamine B[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(8): 1028-1032. (in Chinese)
- [17] 袁曦, 郑金桔, 李海波, 等. Mn 掺杂 ZnSe 量子点变温发光性质研究[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 806-813.
YUAN X, ZHENG J J, LI H B, *et al.*. Temperature-dependent photoluminescence properties of Mn-doped ZnSe quantum dots[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 806-813. (in Chinese)
- [18] 王英帅, 周颖, 王璐楠, 等. 金纳米棒核/二氧化硅壳纳米复合结构的可控制备及细胞成像[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 743-749.
WANG Y SH, ZHOU Y, WANG J N, *et al.*. Controlled synthesis and cell imaging of gold nanorod-silica core-shell nanoparticles[J]. *Chinese Optics*, 2013 6(5): 743-749. (in Chinese)
- [19] 刘姝妤, 钟绵增, 孟秀清, 等. ZnO/ZnS 核-壳量子点的双光子吸收效应[J]. *发光学报*, 2015, 36(2): 249-255.
LIU SH Y, ZHONG J Z, MENG X Q, *et al.*. Two-photon absorption in ZnO/ZnS core-shell quantum dots[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(2): 249-255.
- [20] 刘惠玲. 纳米材料内部 FRET 体系的设计及在单/双光子光动力治疗中的潜在应用[D]. 南京: 南京工业大学, 2016.
LIU H L. Design of FRET system in nanomaterials and its potential application in single/two photon photodynamic therapy[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] REMEDIOS C G, MOENS P D. Fluorescence resonance energy transfer spectroscopy is a reliable “ruler” for measuring structural changes in proteins—dispelling the problem of the unknown orientation factor[J]. *Journal of Structural Biology*, 1995, 115(2): 175-185.
- [22] LIU L. Quantum dots: the new development of FRET[J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(2): 337-343.
- [23] STEYER L, HAUGLANG R P. Energy transfer: a spectroscopic ruler[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1967, 58(2): 719.

作者简介:



修景锐(1993—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事纳米光子学与生物光子学方面的研究。E-mail: jiu-jingrui_xiu@outlook.com



李金华(1977—),女,吉林长春人,教授,博士生导师,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获理学博士学位,主要从事纳米光电功能材料及二维导电材料的制备、物性和应用、半导体光电子器件,以及纳米生物成像及传感方面的研究。E-mail: jh-li_cust@163.com



刘丽炜(1980—),女,广东深圳人,博士,教授,博士生导师,2009年、2013年于长春理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事纳米材料制备、光学、非线性光学特性、纳米生物成像及传感方面的研究。E-mail:llw_cust@163.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04;国内外公开发行,邮发代号:国内 12-140,国外 BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 美国工程索引(Ei)数据库 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 美国 ESCI 数据库 | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址:<http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址:chineseoptics@ciomp.ac.cn; zggxcn@126.com

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061 传 真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路 3888 号(130033)