

水介质中二甲基姜黄素脂质体对金属离子的荧光识别

李正义, 邵丹迪, 殷乐, 肖唐鑫, 孙小强*

(常州大学 石油化工学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 通过薄膜分散法制备二甲基姜黄素(ASC-J9)脂质体, 其粒径分布均匀且在水中的分散效果好, 平均粒径为145.7 nm, 分散系数为0.361。将ASC-J9脂质体作为水溶性的荧光探针, 通过荧光猝灭法可选择性识别 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 及 Cu^{2+} 。经过条件筛选得到最佳荧光测试条件为: ASC-J9脂质体浓度为 5.0×10^{-5} mol/L, 平衡时间5 min, 测试温度25 °C。由Job's曲线和荧光滴定结果判断该探针与 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 的络合比均为1:1, 与 Fe^{2+} 的络合比为2:1; Stern-Volmer方程判断该荧光猝灭类型为静态猝灭, 结合常数分别为 $K_{\text{Fe(III)}} = 9.63 \times 10^4$ L/mol, $K_{\text{Fe(II)}} = 3.65 \times 10^5$ L/mol, $K_{\text{Cu(II)}} = 2.32 \times 10^5$ L/mol; 该识别体系检测快速、灵敏度高, 对 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 的线性范围分别为: $5.0 \times 10^{-7} \sim 3.0 \times 10^{-5}$ 、 $5.0 \times 10^{-7} \sim 1.75 \times 10^{-5}$ 、 $5.0 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-5}$ mol/L, 检出限分别为 6.41×10^{-7} 、 3.28×10^{-7} 、 5.08×10^{-7} mol/L。

关键词: 二甲基姜黄素(ASC-J9); 脂质体; 荧光探针; 金属离子; 水

中图分类号: O657.34; O614 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2018)09-1046-05

Fluorescent Recognition of Metal Ions in Water Using Dimethyl Curcumin Liposome

LI Zheng-yi, SHAO Dan-di, YIN Yue, XIAO Tang-xin, SUN Xiao-qiang*

(Institute of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: A water-soluble molecular fluorescence probe, dimethyl curcumin(ASC-J9) liposome was developed for the recognition of Fe^{3+} , Fe^{2+} and Cu^{2+} through fluorescence quenching. The ASC-J9 liposome was prepared by thin-film dispersion, which had a uniform particle size distribution with a particle size of 145.7 nm and a polymer dispersity index(PDI) of 0.361. The optimal fluorescence conditions obtained by conditional screening were as follows: ASC-J9 liposome concentration: 5.0×10^{-5} mol/L, balance time: 5 min, temperature: 25 °C. The binding modes of ASC-J9 liposome with Fe^{3+} , Cu^{2+} and Fe^{2+} were achieved by Job's plot and fluorescence titration. Results showed that the binding ratios for the probe to Fe^{3+} and Cu^{2+} were both 1:1, while that for the probe to Fe^{2+} was 2:1. The fluorescence quenching type was determined by Stern-Volmer plot as static quenching, and the association constants of $K_{\text{Fe(III)}}$, $K_{\text{Fe(II)}}$ and $K_{\text{Cu(II)}}$ were 9.63×10^4 L/mol, 3.65×10^5 L/mol and 2.32×10^5 L/mol, respectively. With the advantages of rapid detection and high sensitivity, this method was applied in the identification of Fe^{3+} , Fe^{2+} and Cu^{2+} ions in water samples. The calibration curves for Fe^{3+} , Fe^{2+} and Cu^{2+} were $5.0 \times 10^{-7} \sim 3.0 \times 10^{-5}$ mol/L, $5.0 \times 10^{-7} \sim 1.75 \times 10^{-5}$ mol/L and $5.0 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-5}$ mol/L, with their limits of detection of 6.41×10^{-7} mol/L, 3.28×10^{-7} mol/L and 5.08×10^{-7} mol/L, respectively.

Key words: dimethyl curcumin(ASC-J9); liposome; fluorescence probe; metal ion; water

金属离子广泛存在于自然界和生命体中, 其中 Zn^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 等过渡金属离子是人体必需的微量元素, 对体内蛋白质合成、氧气输送以及细胞代谢等许多生理及病理过程起重要作用^[1-2]。人体内金属离子过多或过少均会引起生命体征的紊乱, 因此, 金属离子的检测对疾病的早期预防、诊断和治疗有着深远的意义^[3-5]。目前检测金属离子的常用方法有原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法和伏安法等^[6-8], 但这些仪器操作复杂且成本高。而荧光探针法具有操作简单快速、成本低、选择

收稿日期: 2018-04-27; 修回日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21572026); 江苏省先进催化与绿色制造协同创新中心项目(ACGM2016-06-05)

* 通讯作者: 孙小强, 博士, 教授, 研究方向: 超分子化学, E-mail: sunxiaoliang@yahoo.com

性和灵敏度高等优点,在生物、医学、化学及环境领域有着重要应用^[9-12]。近年来,金属离子荧光探针的研究引起了广泛关注,如萘酰亚胺型^[13]、香豆素类^[14]、罗丹明类^[15]、BMC 衍生物^[16]等探针分子对某些金属离子具有很好的荧光识别性能。

姜黄素及其衍生物是一类含有 β -二羰基基团且结构对称的化合物, β -二羰基易以C=O螯合双齿的形式与金属离子配位^[17-18],且共轭结构使其自身具有荧光性能。陈宁生等^[19]详细研究了姜黄素铜配合物与牛血清蛋白的荧光猝灭作用和机制;王峰等^[20]将钇配合物荧光猝灭法用于姜黄素含量的测定;Xu等^[21]将姜黄素溴丁醚衍生物对 Cu^{2+} 的选择性荧光增强作用应用于细胞成像。Chittigori等合成了水溶性的姜黄素聚乙二醇衍生物,在纯水中实现了对 Al^{3+} (荧光增强)和 Cu^{2+} (荧光猝灭)的检测^[22]。二甲基姜黄素(ASC-J9)作为天然姜黄素的重要衍生物,具有抗炎^[23]、抗肿瘤^[24]等作用,且毒副作用小。本课题组研究发现ASC-J9对 Al^{3+} 具有选择性荧光增强性能^[25],而对 Fe^{3+} 具有选择性紫外蓝移性能^[26],但ASC-J9的水溶性较差,实验需消耗大量的有机溶剂,限制了其在生物领域的应用。本文采用薄膜分散法制备ASC-J9脂质体,有效解决了ASC-J9水溶性差的问题,并成功实现了纯水介质中金属离子的荧光检测。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

ASC-J9(纯度>98%),根据文献自制^[26];大豆卵磷脂(生物试剂,德国Lipoid公司);胆固醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);金属盐及其他溶剂均为分析纯。

Scientz-750F超声波分散仪(宁波新芝生物科技股份有限公司);Thermo SL16R超速离心机(赛默飞世尔科技有限公司);Agilent Cary Eclipse型荧光分光光度计(美国安捷伦公司);ZS90纳米粒径电位分析仪(英国Malvern公司)。

1.2 水溶性ASC-J9脂质体的制备

取大豆卵磷脂0.5 g、胆固醇0.05 g、ASC-J9 5.0 mg,加入适量无水乙醇溶解后,倒入茄形瓶中减压蒸除溶剂,再加入75 mL水,置于旋蒸仪上,60℃常压旋转30 min,将瓶壁上的膜完全剥离入水中,水化完全后,置于60℃水浴中继续孵化3 h,然后冰水浴超声(525 W)分散15 min,冷却至4℃,高速离心取上层液体,得到ASC-J9脂质体,置于4℃冰箱内保存。

1.3 ASC-J9脂质体水溶液的配制

取少量ASC-J9脂质体,用乙醇稀释后进行高效液相色谱(HPLC)测定,分析条件:流动相为乙腈-水(体积比40:60),流速1.0 mL/min,柱温40℃,Agilent ZORBAX Eclipse XDB C₁₈反相柱(250 mm×4.6 mm,5 μm)。根据建立的ASC-J9乙醇溶液标准曲线得出ASC-J9脂质体中ASC-J9的浓度为 1.009×10^{-4} mol/L。取5 mL ASC-J9脂质体母液于10 mL容量瓶中,加水定容,得到浓度为50 μmol/L的ASC-J9脂质体水溶液。

2 结果与讨论

2.1 ASC-J9脂质体的表征及水溶性能

采用薄膜分散法,按“1.2”方法制备ASC-J9脂质体,利用纳米粒径电位分析仪测得其平均粒径为145.7 nm,分散系数为0.361。ASC-J9脂质体的粒径分布区间较窄(图1),说明其粒径分布均匀,能在水中很好地分散,有效改善了ASC-J9的水溶性。

2.2 ASC-J9脂质体对金属离子的选择性识别及抗干扰能力

在10 mL浓度为50 μmol/L的ASC-J9脂质体水溶液中分别加入200 μL 0.05 mol/L的 MCl_n ($\text{M} = \text{Ca}^{2+}$ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Pt^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+})、 $\text{M}(\text{NO}_3)_n$ ($\text{M} = \text{Al}^{3+}$ 、 Ag^+ 、 Ba^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、

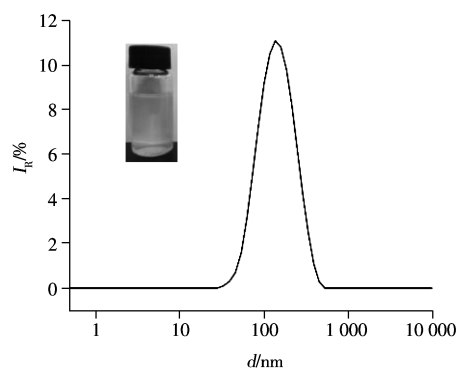


图1 ASC-J9脂质体的粒径分布
Fig. 1 Particlesize distribution of ASC-J9 liposome

Pb^{2+})、 $\text{M}(\text{OAc})_n$ ($\text{M} = \text{Ni}^{2+}$ 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+}) 和 CuSO_4 金属盐水溶液, 分别测试其荧光光谱(图2)。发现 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 及 Cu^{2+} 对 ASC-J9 脂质体有明显的荧光猝灭作用, 除 Al^{3+} 使 ASC-J9 脂质体的荧光略增强外, 其他金属离子对 ASC-J9 脂质体无明显的荧光响应。

以 Fe^{3+} 为例, 进一步考察了常见的其他金属离子和 Fe^{3+} 共存时对体系中 Fe^{3+} 识别的干扰情况。在 10 mL 浓度为 50 $\mu\text{mol/L}$ 的 ASC-J9 脂质体水溶液中分别加入 200 μL 0.05 mol/L 的 Fe^{3+} 和其他金属离子, 观察不同共存金属离子对 ASC-J9 脂质体识别 Fe^{3+} 的影响(图3)。结果显示, 除 Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 外, 其他金属离子对 ASC-J9 脂质体识别 Fe^{3+} 的影响很小。因此, 后续实验以 ASC-J9 脂质体识别 Fe^{3+} 为模型, 详细优化了荧光识别条件并测定识别性能参数。

2.3 荧光识别条件的优化

实验对 ASC-J9 脂质体浓度进行优化, 发现其自身荧光越强, 加入 Fe^{3+} 后猝灭现象越明显, 越有利于可视化观察。通过对比不同浓度($1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ mol/L) ASC-J9 脂质体水溶液的荧光强度, 最终选择 ASC-J9 脂质体的最佳浓度为 5.0×10^{-5} mol/L, 此时获得的荧光强度最大。

考察了 ASC-J9 脂质体识别 Fe^{3+} 的平衡时间。在 ASC-J9 脂质体水溶液中加入过量的 Fe^{3+} , 测试该溶液在不同时间下荧光强度的变化。结果发现, Fe^{3+} 加入 2 min 后荧光基本猝灭完全, 表明 ASC-J9 脂质体与 Fe^{3+} 的络合速度快。为充分保障作用效果, 最终选择 5 min 后进行荧光测试。

在 ASC-J9 脂质体水溶液中加入过量的 Fe^{3+} , 考察了不同测试温度($5 \sim 40$ $^{\circ}\text{C}$) 对荧光强度变化的影响。结果表明, 温度对 ASC-J9 脂质体识别 Fe^{3+} 的影响不大, 为便于检测, 实验选择在室温(25 $^{\circ}\text{C}$) 下进行检测。

此外, 考察了不同阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^-) 的影响, 结果表明上述阴离子对 ASC-J9 脂质体识别 Fe^{3+} 的影响不大, 本文选择 FeCl_3 进行后续研究。

2.4 Job's 曲线与荧光滴定

Job's 曲线是确定探针与金属络合比的常见方法^[27]。固定 ASC-J9 脂质体和 Fe^{3+} 的总浓度为 50 $\mu\text{mol/L}$, 改变两者的浓度比, 以 Fe^{3+} 占两者总浓度的比例为横坐标, 前后两次荧光强度的差值(ΔI_F) 为纵坐标作图。结果表明, 当 Fe^{3+} 与 ASC-J9 脂质体的摩尔比为 1 : 1 时, 荧光强度差值最大, 由此推断 Fe^{3+} 与 ASC-J9 脂质体以 1 : 1 络合。

荧光滴定结果显示(图4), 随着 Fe^{3+} 的加入, 50 $\mu\text{mol/L}$ ASC-J9 脂质体的荧光强度不断减小, 当 Fe^{3+} 浓度达 50 $\mu\text{mol/L}$ 时, ASC-J9 脂质体的荧光完全猝灭, 进一步证实了两者的络合比为 1 : 1。

2.5 荧光猝灭类型及结合常数

采用 Stern-Volmer 方程判断猝灭类型^[28]:

$$\frac{F_0}{F} = K_{SV} + 1 = K_q \tau_0 [Q] + 1 \quad (1)$$

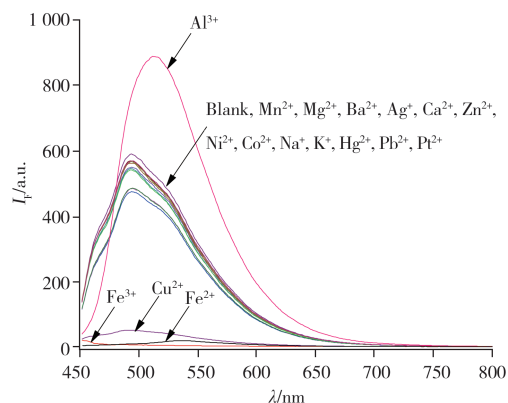


图2 水中 ASC-J9 脂质体对不同金属离子的荧光响应
Fig. 2 Fluorescent responses of ASC-J9 liposome recognize different metal ions in water
excitation wavelength: 440 nm, 25 $^{\circ}\text{C}$, 550 mV

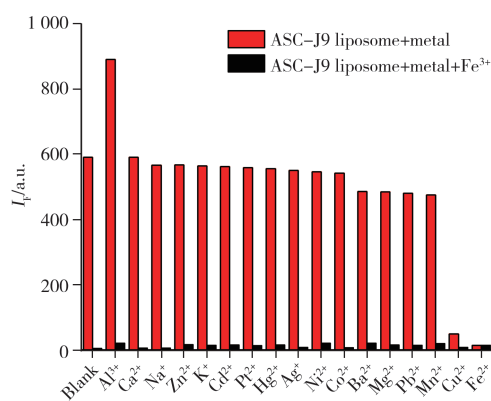


图3 不同金属离子对 ASC-J9 脂质体识别 Fe^{3+} 荧光强度的影响
Fig. 3 Fluorescence intensity of ASC-J9 liposome toward Fe^{3+} influenced by various metal ions

式中, F 和 F_0 分别为存在和不存在 Fe^{3+} 时 ASC-J9 脂质体的荧光强度; $[Q]$ 为 Fe^{3+} 的浓度; K_{SV} 为 Stern-Volmer 猝灭常数; K_q 为双分子荧光猝灭常数; τ_0 为不存在 Fe^{3+} 时 ASC-J9 脂质体的荧光平均寿命。将实验所得数据带入 Stern-Volmer 方程(式1), 以 F_0/F 为纵坐标, Fe^{3+} 的浓度为横坐标, 得到 ASC-J9 脂质体与 Fe^{3+} 络合的 Stern-Volmer 方程为 $y = 1.59 \times 10^6 x - 2.66$, $r^2 = 0.9771$, 由此得出 K_{SV} 为 1.59×10^6 。一般 τ_0 为 10^{-8} s, 从而计算出 K_q 为 1.59×10^{14} L/(mol·s)。根据 $K_q > 2 \times 10^{10}$ L/(mol·s) 推断出该荧光猝灭类型为静态猝灭。

采用 Lineweaver-Burk 双倒数曲线^[28] 计算结合常数:

$$\frac{1}{F_0 - F} = \frac{1}{F_0} + \frac{1}{K_a F_0 [Q]} \quad (2)$$

以 $1/(F_0 - F)$ 为纵坐标, $[Q]^{-1}$ 为横坐标作线性回归方程, 得到方程为 $y = 8.1450 \times 10^{-9} x + 7.84 \times 10^{-4}$, $r^2 = 0.9946$, 线性关系良好。计算得出 ASC-J9 脂质体与 Fe^{3+} 的结合常数 K_a 为 9.63×10^4 L/mol, 说明 ASC-J9 脂质体与 Fe^{3+} 的结合能力较强。

2.6 ASC-J9 脂质体识别 Fe^{3+} 的线性范围与检出限

向 ASC-J9 脂质体水溶液中分别加入一系列不同浓度的 Fe^{3+} 溶液, 测定对应的荧光强度, 以 Fe^{3+} 的浓度为横坐标, 对应荧光强度为纵坐标绘制回归方程。结果表明, Fe^{3+} 的浓度在 $5.0 \times 10^{-7} \sim 3.0 \times 10^{-5}$ mol/L 范围内与 ASC-J9 脂质体的荧光强度呈良好的线性关系, 线性方程为 $y = -15.55x + 593.3$ ($r^2 = 0.9918$)。通过 3σ (3 倍空白的标准偏差) 的方法^[29-30], 得到 ASC-J9 脂质体对 Fe^{3+} 的检出限 (LOD) 为 6.41×10^{-7} mol/L, 表明其对 Fe^{3+} 的识别具有较高的灵敏度。

2.7 ASC-J9 脂质体识别不同金属离子的性能参数对比

参照上述方法, 分别测得 ASC-J9 脂质体与 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 的络合比、结合常数、检出限及其线性范围, 结果如表 1 所示。ASC-J9 脂质体与 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 的络合比均为 1:1, 而与 Fe^{2+} 的络合比为 2:1; 且 ASC-J9 脂质体与 Fe^{2+} 的结合能力最强, 结合常数为 3.65×10^5 L/mol; ASC-J9 脂质体识别 3 种金属离子的检出限均较低, 检测灵敏度较高。

表 1 ASC-J9 脂质体与金属离子的络合比和识别性能

Table 1 Binding ratio and recognition performance of ASC-J9 liposome with metal ions

Metalion	Binding ratio	$K_a/(\text{L} \cdot \text{mol}^{-1})$	LOD($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Linear range($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)
Fe^{3+}	1:1	9.63×10^4	6.41×10^{-7}	$5.0 \times 10^{-7} \sim 3.0 \times 10^{-5}$
Fe^{2+}	2:1	3.65×10^5	3.28×10^{-7}	$5.0 \times 10^{-7} \sim 1.75 \times 10^{-5}$
Cu^{2+}	1:1	2.32×10^5	5.08×10^{-7}	$5.0 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-5}$

3 结论

本文采用薄膜分散法制备 ASC-J9 脂质体, 解决了 ASC-J9 水溶性差的问题, 并将其成功用于纯水介质中金属离子的荧光识别。研究表明, ASC-J9 脂质体能在纯水介质中通过荧光猝灭的方式识别 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 。通过 Job's 曲线和荧光滴定确定 ASC-J9 脂质体与 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 的络合比均为 1:1, 与 Fe^{2+} 的络合比为 2:1; 结合常数分别为 $K_{\text{Fe(III)}} = 9.63 \times 10^4$ L/mol, $K_{\text{Fe(II)}} = 3.65 \times 10^5$ L/mol, $K_{\text{Cu(II)}} = 2.32 \times 10^5$ L/mol; 该水溶性荧光探针能快速识别金属离子且灵敏度高。本研究进一步拓展了 ASC-J9 的应用范围, 为生命体系中金属离子的检测提供了新的思路和参考。

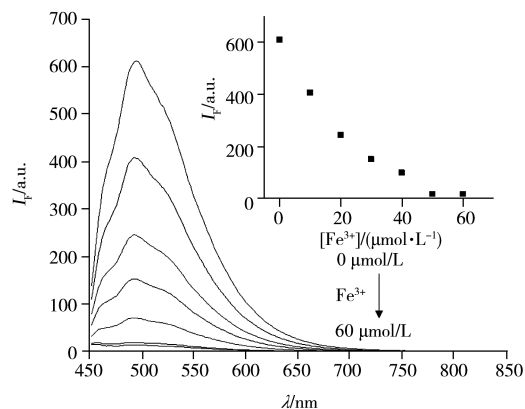


图 4 ASC-J9 脂质体 (50 $\mu\text{mol/L}$) 荧光强度随 Fe^{3+} 浓度的变化

Fig. 4 Fluorescence intensities of ASC-J9 liposome changed by different concentrations of Fe^{3+}
 Fe^{3+} : 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 $\mu\text{mol/L}$

参考文献:

- [1] Hentze M W, Muckenthaler M U, Galy B, Camaschella C. *Cell*, **2010**, 142(1): 24–38.
- [2] Zheng M, Tan H, Xie Z, Zhang L, Jing X, Sun Z. *ACS App. Mater. Int.*, **2013**, 5(3): 1078–1083.
- [3] Wei S L, Jia K, Shou H G, Zhou X F, Wang P, Liu X B. *Chem. Phys. Lett.*, **2017**, 678: 72–78.
- [4] Chen G F, Li H Y, Lan R J, Li J T. *Chem. Bull.* (陈国锋, 李弘扬, 兰瑞家, 李记太. 化学通报), **2013**, 76(1): 1002–1010.
- [5] Zhu W P, Xu Y F, Qian X H. *Chem. Bull.* (朱维平, 徐玉芳, 钱旭红. 化学通报), **2007**, 19(9): 1229–1238.
- [6] Matusch A, Depboylu C, Palm C, Wu B, Höglinger G U, Schäfer M K H, Becker J S. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, **2010**, 21(1): 161–171.
- [7] Akatsuka K, McLaren J W, Lam J W, Berman S S. *J. Anal. Atom. Spectrom.*, **1992**, 7(6): 889–894.
- [8] Van den Berg C M G. *Anal. Chem.*, **2006**, 78(1): 156–163.
- [9] Li Z Y, Su H K, Zhou K, Yang B Z, Xiao T X, Sun X Q, Jiang J L, Wang L Y. *Dyes Pigments*, **2018**, 149: 921–926.
- [10] Zhan X F, Tang J S, Wu J, Cao Z K. *J. Instrum. Anal.* (占霞飞, 唐建设, 吴军, 曹梓楷. 分析测试学报), **2016**, 35(11): 1461–1465.
- [11] Carter K P, Young A M, Palmer A E. *Chem. Rev.*, **2014**, 114(8): 4564–4601.
- [12] Li D X, Sun X, Huang J M, Wang Q, Feng Y, Chen M, Meng X M, Zhu M Z, Wang X. *Dyes Pigments*, **2016**, 125: 185–191.
- [13] Yin L Y, Chen T T, Zhu W P. *Imag. Sci. Photochem.* (殷丽艳, 陈甜甜, 朱维平. 影像科学与光化学), **2014**, 32(1): 84–90.
- [14] Jiang Q H, Liu G, Zhang Z, Sun X Q, Xi H T. *Chin. J. Synth. Chem.* (蒋祺骅, 刘钢, 张震, 孙小强, 席海涛. 合成化学), **2017**, 25(1): 37–41.
- [15] Liu H X, Liu Q, Huan Y F. *Mod. Chem. Ind.* (刘海兴, 刘清, 郇延富. 现代化工), **2017**, 37(4): 197–204.
- [16] Ye S C, Liang Q, Li Z Y, Xu S, Yao C. *Tetrahedron*, **2017**, 73(10): 1350–1357.
- [17] Kathiresan S, Dhivya R, Vigneshwar M, Rajasekaran M, Ranjani J, Rajendhran J, Srinivasan S, Mugesh S, Murugan M, Athappan P, Annaraj J. *J. Coord. Chem.*, **2015**, 69(2): 238–252.
- [18] John V D, Krishnankutty K. *Transit. Metal Chem.*, **2005**, 30(2): 229–233.
- [19] Chen N S, Fang R P, Zhang Y, Zhang H Y. *Chin. J. Spectros. Lab.* (陈宁生, 方瑞萍, 张颖, 张红颖. 光谱实验室), **2013**, 30(1): 367–370.
- [20] Wang F, Huang W, Zhang Y J, Tang B. *Chem. Res. Appl.* (王峰, 黄薇, 张运军, 唐波. 化学研究与应用), **2012**, 24(2): 253–259.
- [21] Xu G, Wang J, Si G, Wang M, Xue X, Wu B, Zhou S. *Sens. Actuator B*, **2016**, 230: 684–689.
- [22] Chittigori J, Kumar A, Li L, Thota S, Kokil A, Samuelson L A, Sandman D J, Kumar J. *Tetrahedron*, **2014**, 70(4): 991–995.
- [23] Lin S J, Chou F J, Lin C Y, Chang H C, Yeh S, Chang C. *Oncotarget*, **2016**, 7(41): 66769–66775.
- [24] Lai K P, Huang C K, Chang Y J, Chung C Y, Yamashita S, Li L, Lee S O, Yeh S, Chang C. *Am. J. Pathol.*, **2013**, 182(2): 460–473.
- [25] Li Z Y, Yan J B, Yin Y, Zhang Z H, Wang Z M, Xu D F, Sun X Q. *Chin. J. Chem.*, **2016**, 34(7): 657–661.
- [26] Li Z Y, Yan J B, Yin Y, Xu D F, Sun X Q. *J. Instrum. Anal.* (李正义, 严金贝, 殷乐, 徐德峰, 孙小强. 分析测试学报), **2016**, 35(10): 1306–1310.
- [27] Yue X L, Wang Z Q, Li C R, Yang Z Y. *Tetrahedron Lett.*, **2017**, 58(48): 4532–4537.
- [28] Zhang B W, Li B, Xia W S, Ding L. *Prog. Pharm. Sci.* (张冰卫, 李博, 夏文水, 丁黎. 药学进展), **2011**, 35(7): 296–303.
- [29] Leng Y L, Zhang J H, Li Q, Zhang Y M, Lin Q, Yao H, Wei T B. *New J. Chem.*, **2016**, 40(10): 8607–8613.
- [30] Lin Q, Cai Y, Li Q, Chang J, Yao H, Zhang Y M, Wei T B. *New J. Chem.*, **2015**, 39(5): 4162–4167.