基于咔唑-席夫碱的高选择性裸眼和荧光识别 Cu^{2+} 的探针李英俊^{*,a} 李继阳^a 许永廷^a 靳焜^b 曹欣^a^(a) 辽宁师范大学化学化工学院 大连 116029)^(b) 大连理工大学精细化工国家重点实验室 大连 116012)

摘要 合成了一种新型基于咔唑-席夫碱识别 Cu^{2+} 的荧光探针 **L**。利用紫外-可见和荧光光谱研究了探针 **L** 对阳离子的识别性能。实验结果显示, 当加入 Cu^{2+} 时, 探针 **L** 的 CH_3CN 溶液显示出明显的颜色变化, 由黄色变为无色。这表明, 利用探针 **L** 可裸眼识别 Cu^{2+} 。通过荧光光谱分析实验发现, 在 CH_3CN 溶剂中, 探针 **L** 对 Cu^{2+} 具有较高的选择性和灵敏度, 其荧光强度随着 Cu^{2+} 的浓度增大而逐渐增强, 不受其它金属离子影响, 抗干扰能力强。探针 **L** 与 Cu^{2+} 的结合常数为 $1.38 \times 10^4 \text{ L/mol}$, 检测限为 $2.34 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$, 低于世界卫生组织(WHO)规定的饮用水中 Cu^{2+} 的最大含量 $20 \mu\text{mol/L}$ 。探针 **L** 在检测环境中的 Cu^{2+} 含量方面具有潜在应用价值。

关键词 咔唑; 席夫碱; 裸眼识别; Cu^{2+} 荧光探针

Highly Selective Naked-Eye and Fluorescence Probe for Cu^{2+} Based on Carbazole Schiff-BaseLi, Yingjun^{*,a} Li, Jiyang^a Xu, Yongting^a Jin, Kun^b Cao, Xin^a^(a) College of Chemistry and Chemical Engineering, Liaoning Normal University, Dalian 116029)^(b) State Key Laboratory of Fine Chemicals, Dalian University of Technology, Dalian 116012)

Abstract A new fluorescence probe **L** based on carbazole Schiff-base for Cu^{2+} was synthesized. The recognition ability of probe **L** to metal ions was investigated by UV-Vis and fluorescence spectra. The experimental results showed that the probe **L** in CH_3CN displayed a distinct color change from yellow to colorless upon the addition of Cu^{2+} , which can be directly detected by the naked eye for Cu^{2+} . The fluorescence spectra showed that the probe **L** had high selective and sensitive recognition toward Cu^{2+} in CH_3CN , the fluorescence intensity was increased with the increase of Cu^{2+} concentration, and it was not affected by other metal ions. The association constant between the probe **L** and Cu^{2+} was detected to be $1.38 \times 10^4 \text{ L/mol}$ and the corresponding detection limit was calculated to be $2.34 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$. The detection limit of **L** for Cu^{2+} was far lower than the maximum allowable level of the WHO limit ($20 \mu\text{mol/L}$) for drinking water. The results indicate that the probe **L** should be applicable to the research on the environmental applications associated with Cu^{2+} .

Keywords carbazole; Schiff base; naked-eye recognition; Cu^{2+} fluorescence probe

Cu^{2+} 在环境、生物和化学领域起着重要的作用, 是人体中含量仅低于锌和铁的过渡金属元素^[1~5]。当其在人体中过量时, 可导致一系列的神经变性疾病, 如门克斯综合征^[6]、阿尔茨海默氏症^[7]、威尔逊氏症和帕金森症^[8,9]。因铜的广泛应用, 所以它也是一个重要的金属污染物^[6]。根据世界卫生组织(WHO)规定, 饮用水中可接受 Cu^{2+} 的最大含量为 $20 \mu\text{mol/L}$ ^[10~12]。由于 Cu^{2+} 的动态平衡对生理学和病理学的重要性, 以及 Cu^{2+} 对环境污染, 所以近年来检测 Cu^{2+} 已备受人们的关注。

利用荧光化学传感器检测金属离子正逐渐成为环境监测和生物科学的研究热点, 因为这类传感器具有灵敏度高、选择性强、容易制造的优点。所以, 开发检测过渡金属离子和重金属离子的荧光化学传感器是化学、环境科学和生物科学一个活跃且令人着迷的研究领域^[13]。咔唑类化合物因其具有良好的共平面性、强的分子内电荷转移、良好的溶解性、稳定性、结构修饰简便等许多优点, 咔唑基团常被用作荧光团。咔唑类化合物在荧光探针方面具有重要的应用价值, 近几年来已成为

* Corresponding author. E-mail: chemlab.lnnu@163.com

Received November 12, 2016; revised December 26, 2016; published online January 17, 2017.

Project supported by the Natural Science Foundation of Liaoning Province (No. 20102126).

辽宁省自然科学基金(No. 20102126)资助项目。

研究热点^[14–20]. 席夫碱是一类重要的被广泛探索的有机化合物之一. 由于其合成成本低、容易合成并具有巨大的应用, 因而激发了研究人员将席夫碱作为化学传感器用于选择性检测有毒金属离子的研究^[4,21]. 虽然许多席夫碱类化合物已被用作检测各种金属离子的探针^[22–34], 但咪唑-席夫碱作为检测 Cu^{2+} 的荧光探针研究报道很少^[16,35]. 基于上述思路, 本文以咪唑为起始原料合成了目标化合物 **L** (Scheme 1), 期望目标化合物 **L** 在离子识别方面具有潜在的应用价值.

图式 1 探针 **L** 的合成路线

Scheme 1 Synthetic route of probe **L**

1 结果与讨论

1.1 裸眼识别

向探针 **L** 的 CH_3CN 溶液 ($1.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$) 中分别加入 1.0 equiv. 不同的阳离子, 然后在日光下和紫外灯照射下 ($\lambda = 365 \text{ nm}$) 观察溶液颜色的变化情况. 如图 1 所示, 向探针 **L** 的 CH_3CN 溶液加入 Cu^{2+} 后, 在日光下观察发现, 溶液的颜色由黄色变成无色, 而加入其它金属离子后溶液的颜色无明显变化; 在紫外灯照射下 ($\lambda = 365 \text{ nm}$) 观察发现, 加入 Cu^{2+} 后溶液发蓝光, 加入其它金属离子后溶液无明显发光变化. 这表明探针 **L** 与 Cu^{2+} 具有较强的作用力. 探针 **L** 可以裸眼识别 Cu^{2+} , 是

识别 Cu^{2+} 的化学传感器.

1.2 探针 **L** 的光谱性能研究

1.2.1 探针 **L** 对阳离子的选择性识别

为了研究探针 **L** 对金属离子的识别性能, 选择 Ag^+ 、 Al^{3+} 、 Ba^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Hg^{2+} 、 K^+ 、 Li^+ 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Na^+ 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Sn^{2+} 、 Sr^{2+} 和 Zn^{2+} 作为研究对象, 并利用紫外-可见吸收光谱和荧光光谱进行识别性能的研究. 紫外吸收光谱 (图 2a) 实验结果表明, 当加入 Cu^{2+} 之后在 298 nm 处的吸收峰明显增强, 而未加入离子或加入其它金属离子时, 探针 **L** 的紫外吸收光谱无明显变化. 荧光光谱 (图 2b) 实验结果表明, 当加入 Cu^{2+} 之后, 在 452 nm 处的荧光强度明显增强, 而未加入离子或加入其它金属离子时, 探针 **L** 的荧光强度很弱. 由此说明, 目标化合物 **L** 是对 Cu^{2+} 具有高选择性的探针.

1.2.2 时间响应光谱

通过荧光光谱研究了探针 **L** 对 Cu^{2+} 的响应时间 (图 3). 实验结果表明, 在 70 s 内受体分子 **L** 的荧光强度变化很小, 这表明受体分子 **L** 的荧光强度不受时间的影响; 而加入 Cu^{2+} 后, 在 20 s 内体系的荧光强度逐渐增强, 20 s 后荧光强度逐渐趋于平稳, 这表明探针 **L** 对 Cu^{2+} 的响应时间为 20 s .

1.2.3 共存离子的影响

为了进一步探究其它金属离子和 Cu^{2+} 共存时对 Cu^{2+} 测定的影响, 进行了干扰实验的研究. 当在探针 **L** 的 CH_3CN 溶液 ($1.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$) 分别加入 2.0 equiv. 的其它金属离子后发现荧光强度无明显变化, 但随后再分别加入 1.0 equiv. 的 Cu^{2+} 后, 荧光强度明显增强 (图 4). 实验结果表明, 在其它干扰离子存在时, 向探针 **L** 的 CH_3CN 溶液加入 Cu^{2+} 后荧光强度基本保持不变. 由此说明, 探针 **L** 对 Cu^{2+} 的识别具有较强的抗干扰能力, 是一个有着高选择性的荧光增强型探针.

1.2.4 不同浓度的 Cu^{2+} 对探针 **L** 荧光光谱的影响

在 CH_3CN 溶液中, 保持探针 **L** 的浓度不变 ($1.0 \times$

图 1 向受体 **L** 的 CH_3CN 溶液 ($1.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$) 中加入 1.0 equiv. 不同阳离子后溶液颜色的变化

Figure 1 Photographs of **L** ($c = 1.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$) after addition of 1.0 equiv. metal ions in CH_3CN
(a) Taken under daylight and (b) UV illumination ($\lambda = 365 \text{ nm}$)

图2 向 **L** 的 CH_3CN 溶液 (1.0×10^{-5} mol/L) 中加入 1.0 equiv. 不同的金属离子后的紫外吸收的变化(a)和荧光强度的变化(b) ($\lambda_{\text{ex}} = 298$ nm)

Figure 2 UV-Vis (a) and PL spectra (b) of **L** ($c = 1.0 \times 10^{-5}$ mol/L, CH_3CN) upon addition of 1.0 equiv. of different metal ions (1.0×10^{-5} mol/L) ($\lambda_{\text{ex}} = 298$ nm)

10^{-5} mol/L), 测定了在不同 Cu^{2+} 浓度条件下探针 **L** 荧光发射光谱(图 5). 荧光光谱显示, 随着 Cu^{2+} 浓度的逐渐

图3 探针 **L** 在 CH_3CN 溶液中与 Cu^{2+} 的时间响应光谱
Figure 3 Effect of time on the fluorescence responses of **L** to Cu^{2+}

$[\text{Cu}^{2+}] = 1.0 \times 10^{-5}$ mol/L, $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 298/452$ nm

增大, 在 452 nm 处的最大荧光发射强度不断增强, 当 Cu^{2+} 浓度为探针 **L** 浓度的 8.0 equiv. 时, 荧光发射强度基本保持不变, 说明反应体系已经达到饱和. 实验结果显示, 探针 **L** 在 452 nm 处的荧光强度与 Cu^{2+} 浓度有较好的线性关系, 表明探针 **L** 与 Cu^{2+} 很好的结合. 经过拟合得到线性回归方程: $y = 2.36258 \times 10^{-8}x + 3.25973 \times 10^{-4}$, $R^2 = 0.9953$, 并通过计算得到络合常数 $K_a = 1.38 \times 10^4$ L/mol(图 6a), 以探针 **L** 的 8 次荧光强度相对标准偏差计算得出, 探针 **L** 对 Cu^{2+} 的最低检测限为 2.34×10^{-7} mol/L(图 6b). 所得结果低于 WHO 所规定的饮用水中 Cu^{2+} 的最大含量(20 $\mu\text{mol/L}$). 探针 **L** 可以用于定量检测饮用水中 Cu^{2+} 浓度.

1.2.5 探针 **L** 与 Cu^{2+} 的络合方式

为了进一步研究探针 **L** 与 Cu^{2+} 之间的络合比, 采用等物质的量连续变化法(Job's Plot)^[36,37] 计算两者的络合

图4 其它金属离子 (2.0×10^{-5} mol/L) 和 Cu^{2+} (1.0×10^{-5} mol/L) 共存时探针 **L** (1×10^{-5} mol/L) 在 CH_3CN 溶液中的荧光发射光谱 ($\lambda_{\text{ex}} = 298$ nm)

Figure 4 Fluorescence response of probe **L** (1.0×10^{-5} mol/L) upon addition of various metal ions (2.0×10^{-5} mol/L) in and without the presence of Cu^{2+} (1.0×10^{-5} mol/L) in CH_3CN solution ($\lambda_{\text{ex}} = 298$ nm)

图5 探针 **L** 的 CH_3CN 溶液 ($1.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$) 中加入不同浓度 Cu^{2+} (0~8.0 equiv.) 的荧光发射光谱 ($\lambda_{\text{ex}} = 298 \text{ nm}$)

Figure 5 Fluorescence titration curves of probe **L** in CH_3CN solution ($1.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$) upon addition of Cu^{2+} from 0 to 8.0 equiv. ($\lambda_{\text{ex}} = 298 \text{ nm}$)

图6 (a) **L** 与 Cu^{2+} 的结合常数和 (b) **L** 对 Cu^{2+} 的检测限

Figure 6 Benesi-Hildebrand plot of **L**- Cu^{2+} complexes (a) and calibration curve of **L**- Cu^{2+} (b) in acetonitrile solution

比。随着 Cu^{2+} 摩尔分数的不断改变, 体系的荧光强度在 452 nm 处随之变化, 如图 7 所示。当 Cu^{2+} 摩尔分数为 0.7 时, 探针 **L** 与 Cu^{2+} 形成的络合物在 452 nm 处出现的荧光强度最大。由此表明, 探针 **L** 与 Cu^{2+} 的络合比为 1:2。由实验结果可知, 探针 **L** 与 Cu^{2+} 的络合方式如图 8 所示。

图7 探针 **L** 和 Cu^{2+} 的 Job 曲线 ($\lambda_{\text{ex}} = 298 \text{ nm}$)

Figure 7 Job's plot of probe **L** and Cu^{2+} ($\lambda_{\text{ex}} = 298 \text{ nm}$)

图8 探针 **L** 与 Cu^{2+} 可能的络合机理

Figure 8 Proposed binding mode between **L** and Cu^{2+}

1.2.6 探针 **L** 的应用

为了研究探针 **L** 的实际应用价值, 我们设计了一个简单的实验, 即测试饮用水中 Cu^{2+} 的含量。将 0.1 mL 探针 **L** 的乙腈溶液 ($1.0 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$) 分别加入到饮用水-乙腈和二次蒸馏水-乙腈溶液中 (10 mL, $V:V = 1:1$), 然后测试其荧光光谱。将所得的 I_F 数值代入上述所得的回归方程 $y = 2.36258 \times 10^{-8}x + 3.25973 \times 10^{-4}$, 即得出饮用水中 Cu^{2+} 含量是 $2.36 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$, 该数值低于 WHO 所规定的饮用水中 Cu^{2+} 的最大含量 ($20 \mu\text{mol/L}$)。利用等离子体发射光谱 (ICP) 测定相同饮用水样品中 Cu^{2+} 的含量为 $5.636 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ 。显然, 两种方法测定的 Cu^{2+} 含量具有相同的数量级。实验结果表明, 探针 **L** 在检测环境水中 Cu^{2+} 方面具有潜在的应用价值。

2 结论

本文利用简单的合成方法制备出了一个新型的基于咪唑-席夫碱衍生物 **L**。实验结果表明, 探针 **L** 对 Cu^{2+} 具有较强的选择性, 可高选择性裸眼和荧光识别 Cu^{2+} 。探针 **L** 与 Cu^{2+} 形成 1:2 的配合物, 具有较低检测限 ($2.34 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$), 且低于 WHO 规定的饮用水中 Cu^{2+} 的最大含量 ($20 \mu\text{mol/L}$)。表明探针 **L** 在检测环境水中 Cu^{2+} 方面具有潜在的应用价值。同时探针化合物 **L** 自身稳定性强、合成方法简单、产率较高, 是一种可行性高

的探针.

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

X-5 显微熔点测定仪(温度计未经校正); 德国 TENSOR 27 型 FT-IR 红外光谱仪, KBr 压片; 德国 BRUKER 500 MHz 核磁共振仪, $\text{CDCl}_3/\text{DMSO}-d_6$ 为溶剂, TMS 为内标; 德国 Elementar 公司 Vario EL 型元素分析仪; 美国 Perkin Elmer Lambda 35 紫外-可见分光光度计; 日本 HITACHI F-7000 荧光光谱仪; 美国 Prodigy XP 型全谱直读等离子发射光谱仪. 所用药品均为试剂公司购买的分析纯试剂.

3.2 探针 *N*-乙基-3,6-双(二氨基马来腈)咪唑席夫碱(L)的合成

中间体化合物 **1** 参照文献[38]方法合成, 中间体化合物 **2** 参照文献[39]方法合成. 化合物 **1** 和 **2** 的波谱数据与文献[40]一致. 在 50 mL 干燥的圆底烧瓶中依次加入 0.25 g (1 mmol) 中间体化合物 **2**、0.22 g (2 mmol) 二氨基马来腈、20 mL 无水乙醇和几滴冰醋酸, 加热回流 3 h, 薄层色谱(TLC)监测反应进程. 反应完成后, 将反应混合物冷却至室温, 抽滤, 用乙醇重结晶后即得到 0.36 g 探针化合物 **L**, 黄色粉末状固体, 产率 81.2%. m.p. > 270 °C; ^1H NMR ($\text{DMSO}-d_6$, 500 MHz) δ : 8.78 (s, 2H), 8.42 (s, 2H), 8.23 (d, $J=8.5$ Hz, 2H), 7.77 (brs, 4H), 7.73 (d, $J=9.0$ Hz, 2H), 4.54 (q, $J=7.0$ Hz, 2H), 1.38 (t, $J=7.5$ Hz, 3H); ^{13}C NMR ($\text{DMSO}-d_6$, 125 MHz) δ : 157.67, 144.12, 130.03, 129.55, 129.10, 127.47, 124.55, 116.55, 115.76, 112.04, 105.44, 39.50, 15.74; IR (KBr) ν : 3459, 3330, 3160, 3055, 2954, 2871, 2231, 2203, 1608, 1602, 1594, 1487, 1375, 1347. Anal. calcd for $\text{C}_{32}\text{H}_{29}\text{N}_5\text{O}_2$: C 66.81, H 3.97, N 29.22; found C 67.05, H 3.82, N 29.43.

3.3 荧光光谱测定方法

以 DMSO 为溶剂, 将化合物 **L** 配置成 5.0×10^{-3} mol/L 的储备溶液, 然后移取一定的体积再用 CH_3CN 稀释成 1.0×10^{-5} mol/L 的待测溶液; 以二次蒸馏水为溶剂, 配制 5.0×10^{-3} mol/L 的金属离子溶液 [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 CaCl_2 、 KNO_3 、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 、 NaCl 、 $\text{LiClO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 AgNO_3], 以留备用. 荧光光谱的测定均在室温条件下进行.

测试条件: 室温, 样品池为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 石英比色皿, 激发夹缝宽度为 5.0, 发射夹缝宽度为 5.0, 激

发波长 λ_{ex} 为 298 nm, 于 320~580 nm 范围内测试荧光.

辅助材料(Supporting Information) 探针 **L** 的 ^1H NMR 和 ^{13}C NMR 谱. 这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载.

References

- [1] Liu, W. Y.; Li, H. Y.; Lü, H. S.; Zhao, B. X.; Miao, J. Y. *Spectrochim. Acta, Part A* **2012**, 95, 658.
- [2] Li, W.; Zhang, Y.; Gan, X. P.; Yang, M. D.; Mie, B.; Fang, M.; Zhang, Q. Y.; Yu, J. H.; Wu, J. Y.; Tian, Y. P.; Zhou, H. P. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2015**, 206, 240.
- [3] Qin, J. C.; Yang, Z. Y. *J. Photochem. Photobiol., A* **2016**, 324, 152.
- [4] Zhang, C. H.; Gao, B. Z.; Zhang, Q. Y.; Zhang, G. M.; Shuang, S. M.; Dong, C. *Talanta* **2016**, 154, 278.
- [5] Na, Y. J.; Choi, Y. W.; Yun, J. Y.; Park, K. M.; Chang, P. S.; Kim, C. *Spectrochim. Acta, Part A* **2015**, 136, 1649.
- [6] An, R. B.; Zhang, D. T.; Chen, Y.; Cui, Y. Z. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2016**, 222, 48.
- [7] Yu, H.; Lee, J. Y.; Angupillai, S.; Wang, S.; Feng, S. H.; Matsumoto, S.; Son, Y. A. *Photochem. Photobiol., A* **2015**, 151, 48.
- [8] Dusek, P.; Roos, P. M.; Litwin, T.; Schneider, S. A.; Flaten, T. P.; Aaseth, J. J. *Trace Elem. Med. Biol.* **2015**, 31, 193.
- [9] Razi, S. S.; Srivastava, P.; Ali, R.; Gupta, R. C.; Dwivedi, S. K.; Misra, A. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2015**, 209, 162.
- [10] Xiong, J. J.; Huang, P. C.; Zhou, X.; Wu, F. Y. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2016**, 232, 673.
- [11] Li, S.; Zhang, D.; Xie, X. Y.; Ma, S. G.; Liu, Y.; Xu, Z. H.; Gao, Y. F.; Ye, Y. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2016**, 224, 661.
- [12] Tian, M. Z.; Hu, M. M.; Fan, J. L.; Peng, X. J.; Wang, J. Y.; Sun, S. G.; Zhang, R. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2013**, 23, 2916.
- [13] Zhu, W. J.; Yang, L. L.; Fang, M.; Wu, Z. Y.; Zhang, Q.; Yin, F. F.; Huang, Q.; Li, C. *J. Fluoresc.* **2015**, 158, 38.
- [14] Danjou, P. E.; Lyskawa, J.; Delattre, F.; Becuwe, M.; Woisel, P.; Ruellan, S.; Fourmentin, S.; Dennina, F. C. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2012**, 171~172, 1022.
- [15] Zhang, J.; Cui, H. L.; Hojo, M.; Shuang, S. M.; Dong, C. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2012**, 22, 343.
- [16] Yang, L. L.; Zhu, W. J.; Fang, M.; Zhang, Q.; Li, C. *Spectrochim. Acta, Part A* **2013**, 109, 186.
- [17] Sharma, S.; Pradeep, C. P.; Dhir, A. *Mater. Sci. Eng., C* **2014**, 43, 418.
- [18] Feng, G. L.; Geng, L. J.; Wang, T.; Li, J. Y.; Yun, X. D.; Wang, Y. Q.; Li, Y.; Xie, D. Y. *J. Fluoresc.* **2015**, 167, 65.
- [19] Feng, Y.; Li, D. X.; Wang, Q.; Wang, S. X.; Meng, X. M.; Shao, Z. L.; Zhu, M. Z.; Wang, X. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2016**, 225, 572.
- [20] Li, D. X.; Sun, X.; Huang, J. M.; Wang, Q.; Feng, Y.; Chen, M.; Meng, X. M.; Zhu, M. Z.; Wang, X. *Dyes Pigm.* **2016**, 125, 185.
- [21] Kundu, A.; Hariharan, P. S.; Prabakaran, K.; Anthony, S. P. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2015**, 206, 524.
- [22] Gou, C.; Qin, S. H.; Wu, H. Q.; Wang, Y.; Luo, J.; Liu, X. Y. *Inorg. Chem.* **2011**, 14, 1622.
- [23] Chen, H. H.; Guan, R. F.; Cao, D. X.; Liu, Z. Q.; Sun, Y. H.; Ma, L.; Wang, K. N.; Shan, Y. Y. *Mater. Lett.* **2014**, 122, 70.
- [24] Wang, W. G.; Li, R.; Song, T. W.; Zhang, C. J.; Zhao, Y. *Spectrochim. Acta, Part A* **2016**, 164, 133.
- [25] Velmathi, S.; Reena, V.; Suganya, S.; Anandan, S. *J. Fluoresc.* **2012**, 22, 155.
- [26] Liu, G.; Shao, J. *J. Fluoresc.* **2012**, 22, 397.

- [27] Ye, W. P.; Wang, S. X.; Meng, X. M.; Feng, Y.; Sheng, H. T.; Shao, Z. L.; Zhu, M. Z.; Guo, Q. X. *Dyes Pigm.* **2014**, *101*, 30.
- [28] Wang, L. Y.; Yang, L. L.; Cao, D. *J. Fluoresc.* **2014**, *24*, 1347.
- [29] Kim, H.; Rao, B. A.; Jeong, J. W.; Mallick, S.; Kang, S. M.; Choi, J. S.; Lee, C. S.; Son, Y. A. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2015**, *210*, 173.
- [30] Hammud, H. H.; Shazly, S. E.; Sonji, G.; Sonji, N.; Bouhadir, K. H. *Spectrochim. Acta, Part A* **2015**, *150*, 94.
- [31] Bu, J.; Duan, H. D.; Wang, X. J.; Xu, T.; Meng, X.; Qin, D. W. *Res. Chem. Intermed.* **2015**, *41*, 2767.
- [32] Zhu, W. J.; Yang, L. L.; Fang, M.; Wu, Z. Y.; Zhang, Q.; Yin, F. F.; Huang, Q.; Li, C. *J. Lumin.* **2015**, *158*, 38.
- [33] Liu, W.; Wu, G. Y.; Gu, X. M.; Yuan, X. S.; Li, J. Y.; Wang, H. B. *J. Fluoresc.* **2015**, *25*, 557.
- [34] Thangavel, S.; Rajamanikandan, R.; Friedrich, H. B.; Ilanchelian, M.; Omondi, B. *Polyhedron* **2016**, *107*, 124.
- [35] Sharma, S.; Pradeep, C. P.; Dhir, A. *Mater. Sci. Eng., C* **2014**, *43*, 418.
- [36] Hou, S. H.; Qu, Z. G.; Zhong, K. L.; Bian, Y. J.; Tang, L. J. *Chin. J. Org. Chem.* **2016**, *36*, 768 (in Chinese).
(侯淑华, 曲忠国, 钟克利, 边延江, 汤立军, 有机化学, **2016**, *36*, 768.)
- [37] Meng, W. F.; Yang, M. P.; Li, B.; Cheng, Z.; Yang, B. Q. *Tetrahedron* **2014**, *70*, 8577.
- [38] Jagadeeswari, S.; Paramaguru, G.; Thennarasu, S.; Renganathan, R. *J. Mol. Struct.* **2014**, *1060*, 191.
- [39] Ramkumar, S.; Manoharan, S.; Anandan, S. *Dyes Pigm.* **2012**, *94*, 503.
- [40] Budreckiene, R.; Buika, G.; Grazulevicius, J. V.; Jankauskas, V.; Staniskiene, B. *J. Photochem. Photobiol., A* **2006**, *181*, 257.

(Li, L.; Lu, Z.)