可用于连续识别 Cu^{2+} 和阴离子、中性分子荧光探针的研究进展孟宪娇^{*,a} 赵晋忠^a 马文兵^b^(a) 山西农业大学文理学院 山西晋中 030801)^(b) 中北大学化学工程与技术学院 太原 030051)

摘要 铜(Cu)含量的高低直接影响着生命体的正常运转和自然体系的平衡. 检测铜离子的方法多种多样, 其中具有较高敏感度和选择性的荧光化学传感器应用更加广泛. 综述了以 Cu^{2+} 为基的荧光化学传感器通过“替换”法实现了对阴离子 S^{2-} , CN^- , H_2PO_4^- , PPi 和 I^- 以及中性分子 ATP、ADP 和生物硫醇等的连续识别的研究进展.

关键词 连续识别; Cu^{2+} ; 荧光化学传感器; 阴离子; 生物硫醇

Progress in Fluorescent Probes for Cu^{2+} and Anions, Neutral Molecules Sequential RecognitionMeng, Xianjiao^{*,a} Zhao, Jinzhong^a Ma, Wenbing^b^(a) College of Arts and Sciences, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030801)^(b) School of Chemical Engineering and Technology, North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract The level of copper (Cu) directly affects the normal operation of the living body and the balance of the natural system. Fluorescence chemosensors with high sensitivity and selectivity are more widely used, although there are various methods for detecting copper ions. The research progress of fluorescence chemosensors for sequential recognition of anions S^{2-} , CN^- , H_2PO_4^- , PPi and I^- , neutral molecules ATP, ADP and biological thiols by “substitution” method based on Cu^{2+} is reviewed.

Keywords sequential recognition; Cu^{2+} ; fluorescence chemosensor; anion; biological thiol

铜作为人体中含量第三的过渡金属, 被广泛应用于制造业、工业、电子和建筑等领域. 对于动物和植物而言, 痕量的铜对于生命体的正常运转是很有必要的^[1], 人体往往通过饮食摄入一定量的铜, 并通过自身的调节系统控制其平衡. 例如, 铜基酶作为一种重要的催化剂, 可促使皮肤中的黑色素转化, 为生物化学反应提供能量等^[2]. 人体内铜含量过低会引起贫血、色素减退和骨质疏松症等多种疾病. 然而, 铜含量过高又会导致帕金森病、阿尔茨海默病和威尔逊氏病等多种与神经相关的氧化应激和障碍退行性疾病^[3,4]. 因此, 铜离子的定量检测具有相当的重要性.

目前铜离子的检测方法比较多, 包括电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)^[5]、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)^[6]、原子荧光光谱法(AFS)^[7]和原子吸收光谱法

(AAS)^[8]等. 然而, 这些检测方法通常需要精密的仪器设备和繁琐的操作流程, 在实际应用时将面临耗时、高成本以及样品不可回收等难题. 因此, 通常采用具有较高敏感度和选择性的荧光化学传感器对铜离子进行检测, 不仅能够提高检测的时效性, 保护样品的完整性, 还能够更好地达到绿色检测的目的^[9~14].

目前, 检测铜离子的荧光化学传感器的种类较多, 按照荧光基团的种类不同, 可划分为稠环芳烃类^[15~19]、喹啉类^[20~22]、萘酰亚胺类^[23,24]、罗丹明类^[25~27]和氟硼二吡咯(BODIPY)类^[28~30]. 然而, 由于 Cu^{2+} 的顺磁性, 单一检测 Cu^{2+} 的荧光化学传感器大都呈现荧光淬灭性^[31~33], 检测结果往往会受到体系内其它淬灭剂(如水等)的干扰. 能够连续识别 Cu^{2+} 的荧光化学传感器, 将有效地排除这种干扰, 展现出更佳的实用价值.

* Corresponding author. E-mail: 513091702@qq.com

Received August 28, 2019; revised September 19, 2019; published online October 13, 2019.

Project supported by the Shanxi Excellent Doctor Grant Award (No. SXYBKY2019046)..

山西省优秀博士来晋工作奖励(No. SXYBKY2019046)资助项目.

1 连续识别 Cu^{2+} 型荧光化学传感器的研究进展

1.1 用于连续识别 Cu^{2+} 和 S^{2-} 的荧光化学传感器

硫化物(S^{2-})在自然界中分布广泛,可用于制造硫磺、硫酸、染料和化妆品等。 S^{2-} 在酸性条件下可与 H^+ 反应生成有毒的 H_2S 或 HS^- ,且过高的硫含量容易引起多种生理和生化问题,包括刺激粘膜、呼吸不畅和昏迷等^[34]。因此, S^{2-} 的有效检测无论是对自然环境还是生物体都具有重要的意义。目前,识别 S^{2-} 的探针主要包括反应型和“替换”型。反应型荧光探针的主要缺点在于反应条件的苛刻和作用时间的冗长,对分析和生物条件的要求较高,而以铜离子配合物为基础的“替换”型探针用于 S^{2-} 的识别具有灵敏度高、选择性好和适用范围广等优点,得到了更广泛的关注和应用^[35-41]。

汤立军等^[42]以喹啉和氨基硫脲为原料制备的探针 **1**,对 Cu^{2+} 和 S^{2-} 具有“开-关-开”连续识别响应。探针 **1** 可在体积分数为 1% 的二甲基亚砜(DMSO)水溶液中进行测试,同 Cu^{2+} 可以 1:1 配位,测试溶液颜色由无色变成麦黄色,可实现裸眼识别。探针 **1** 同 Cu^{2+} 形成的配合物也可实现在多种阴离子存在时对 S^{2-} 的专一性识别。另外,该课题组^[43]又以罗丹明-苯并噻唑为基础合成出一种比色型荧光化学传感器 **2**,在中性条件下可用于 Cu^{2+} 和 S^{2-} 的连续比色识别,表现出较高的专一性,循环响应也具有较好的稳定性。

吴学等^[44]以 7-二乙氨基香豆素为荧光基团,引入喹啉作为识别基团,制备的传感器 **3** 可与 Cu^{2+} 按照 2:1 进行配位,形成的配合物可对 S^{2-} 进行连续识别。传感器 **3** 具有较低的细胞毒性,可用于 HeLa 细胞成像。蒋宇扬等^[45]合成了基于喹啉和苯并咪唑的结构简单的酰胺类传感器 **4**,该传感器对 Cu^{2+} 呈现出了明显的荧光淬灭

响应,形成的配合物又对 S^{2-} 呈现出了明显的荧光增强响应,检测限分别为 2.2×10^{-7} 和 $4.6 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。传感器 **4** 的细胞毒性较低,可用于细胞内成像。

Paul 等^[46]合成了一种基于苯并咪唑的荧光化学传感器 **5**,可用于 Cu^{2+} 的比色和荧光响应,并以 1:1 进行配位,配位后的化合物可用于 S^{2-} 的连续识别(Eq. 1)。经过计算,检测限分别达到 1.6×10^{-9} 和 $5.2 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$,可用于道尔顿淋巴瘤细胞成像。

房建国等^[47]以蒽醌和二乙硫基乙二胺为原料,合成的含有部分苯并咪唑的荧光化学传感器 **6**,对 Cu^{2+} 和 S^{2-} 呈现出了明显的“开-关-开”荧光响应,并伴随着明显的颜色变化,可进行裸眼识别。以 Cu^{2+} 和 S^{2-} 作为输入信号,荧光强度作为输出信号时,信号的衰减程度不明显,说明传感器 **6** 对 Cu^{2+} 和 S^{2-} 的识别具有较高的稳定性。双少敏等^[48]以蒽醌和水杨醛为原料制备了一种含有邻羟基的单席夫碱荧光化学传感器 **7**,该传感器对 Cu^{2+} 进行识别时,测试溶液的颜色由粉色变成蓝色,荧光淬灭,形成的配合物可同 S^{2-} 作用,使得荧光恢复。在实际应用时,可做成滤纸条进行裸眼识别,也可对实际水样进行检测,检测的相对标准偏差(RSD)值低于 1.42%。另外,在进行细胞成像实验时,一定浓度范围内,细胞的存活率达到 90% 以上,着色的细胞呈现明显的荧光“开-关-开”的变化,且作用时间在 10 min 之内。

Rajak 等^[49]设计并合成了一种含有脲基的邻羟基单席夫碱型荧光化学传感器 **8**,用于 Cu^{2+} 和 S^{2-} 的连续识别。传感器 **8** 同 Cu^{2+} 以 2:1 配位后,最大吸收峰由 400 nm 红移至 460 nm,测试溶液颜色由粉红色变成淡黄色,荧光淬灭,加入 S^{2-} 之后,荧光和颜色均恢复。王成云等^[50]设计并合成了一种含有双席夫碱结构的荧光化学传感器 **9**,该传感器可实现对 Cu^{2+} 和 S^{2-} 的连续裸眼识别,响应时间低于 1 min。另外,经计算,传感器 **9** 的斯

托克斯位移高达 234 nm, 检测限分别为 1.8×10^{-8} 和 $1.5 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 可较好地实现水样中目标离子的检测. 吴芳英等^[51]以 4-二甲氨基苯甲酰肼和咪唑-2-甲醛为原料, 制备了含有酰肼基团的传感器 **10**, 该传感器可对 Cu^{2+} 和 S^{2-} 实现稳定的连续识别, 并伴随着明显的颜色变化, 可进行肉眼识别. 检测限可分别达到 $15 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.12 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 实际检测时敏感度较高.

1.2 用于连续识别 Cu^{2+} 和 CN^- 的荧光化学传感器

氰根离子(CN^-)作为一种毒性较高的阴离子, 主要来源于丙烯酸和尼龙等产品的制造过程中^[52]. 世界卫生组织对饮用水中 CN^- 的含量要求最高不能超过 $1.9 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[53], 这主要是由于过量的 CN^- 会同血红蛋白结合, 抑制生命体细胞的呼吸. 检测 CN^- 的方法较多, 包括氢键的相互作用^[54]、形成氰配合物^[55]、通过亲核作用于活化后的羰基或碳-碳双键^[56]以及“替换”法. 目前, 利用含有 Cu^{2+} 的配合物作为传感器, 通过“替换法”可高效地实现对 CN^- 快速专一的连续识别.

汤立军等^[57]基于苯并咪唑合成了含有喹啉的传感器 **11**, 该传感器可在甲醇/水(体积比为 1:1)的 4-羟乙基哌嗪乙磺酸(HEPES)缓冲液中实现对 Cu^{2+} 和 CN^- 的“开-关-开”型荧光响应, 检测限分别为 3.8×10^{-7} 和 $1.86 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 同年, 该课题组^[58]引入喹啉基团制备了另外一种含有苯并咪唑的喹啉传感器 **12**, 该传感器以荧光增强的方式实现了对 Cu^{2+} 和 CN^- 的连续识别, 并通过高分辨等方法对其机理进行了分析.

Kim 等^[59]以久洛尼定水杨醛和 1-氨基-2-萘酚为原料合成了席夫碱型传感器 **13**, 该传感器通过比色法识别 Cu^{2+} , 测试溶液的颜色由黄色变成粉色, 实现了肉眼

识别. 传感器 **13**- Cu^{2+} 通过荧光分光光度法可实现对 CN^- 的连续识别, 且随着 CN^- 浓度的逐渐增加, 荧光强度逐渐增大. 周宏伟等^[60]以 6-甲氧基-2-甲酰基喹啉和二氨基顺丁烯二腈为原料合成了席夫碱型传感器 **14**, 该传感器可较好地实现对 Cu^{2+} 和 CN^- 比色连续识别响应. 在加入一定浓度的 Cu^{2+} 之后, 传感器 **14** 的最大吸收波长由 390 nm 红移至 530 nm, 红移了 140 nm, 测试溶液的颜色由淡黄色变成了红色. 在向传感器 **14**- Cu^{2+} 中加入 CN^- 之后, 测试溶液的颜色又由红色变成淡黄色.

另外, 在传感器的结构设计中, 通常引入钌配合物用作识别离子的配体. 郑泽宝等^[61]合成了两种含有钌配体的荧光化学传感器 **15** 和 **16**, 两种传感器均可实现对 Cu^{2+} 和 CN^- 的连续识别. 在加入 Cu^{2+} 之后, 粉红色荧光淬灭, 加入 CN^- 之后, 荧光恢复, 整个测试过程可在近乎完全的水溶液中进行.

1.3 用于连续识别 Cu^{2+} 和含磷阴离子的荧光化学传感器

磷酸盐(Pi)和焦磷酸盐(PPi)等含磷物质因其具有较明显的生物学意义而成为了荧光检测学的重要研究目标^[62~65]. 磷酸盐不仅是构成 DNA 的主要成分, 还是 ATP 代谢的副产物, 参与多种至关重要的反应过程^[66]. 然而, 由于磷酸盐结构的相似性, 寻找可单一识别某一种磷酸盐的荧光化学传感器将面临一定的挑战. 将同 Cu^{2+} 配位后的传感器用于含磷阴离子的识别也已经成为

为一种简便有效的方法.

本课题组^[67]以香豆素为荧光基团,引入“Tren”作为识别基团,对甲苯磺酰氯进行末端氨基修饰,成功合成了结构新颖的荧光化学传感器 **17**. 该传感器对 Cu^{2+} 和 H_2PO_4^- 呈现了明显的“开-关-开”型荧光响应,且分别按照 1:1 进行配位,检测限分别为 0.37 和 $1.6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 本课题组^[68]进一步引入喹啉基团进行末端修饰,合成出的传感器 **18** 可用于 Cu^{2+} 和 PPI 的连续识别. 加入 Cu^{2+} 之后,荧光淬灭率高达 99.6%,而阴离子 PPI 的加入使得荧光恢复,尤其是和同类含磷阴离子对比时,其专一性更高. 另外,本课题组^[69]继续以香豆素为荧光基团,引入具有三维树枝状结构的树枝石作为识别基团,合成了传感器 **19**,该传感器可用于 Cu^{2+} 和 PPI 的连续识别(Eq. 2),测试溶液的颜色也发生了明显的交替变化,可较好地实现裸眼识别.

汤立军等^[70]合成出一种含有双喹啉结构的荧光化学传感器 **20**,该传感器在 DMSO/水(体积比为 1:1)的 HEPES 缓冲溶液中实现了对 Cu^{2+} 和 PPI 的荧光“开-关-开”连续识别响应,检测限分别为 4.47×10^{-6} 和 $3.16 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 另外,该课题组^[71]又以茈作为荧光基团,合成了另外一种含有双喹啉结构的荧光化学传感器 **21**,该传感器在四氢呋喃(THF)/水(体积比为 1:1)的 HEPES 缓冲溶液中实现了对 Cu^{2+} 和 PPI 的连续识别响应, pH 的适用范围是 5~8.

张有明等^[72]以 4-二乙氨基水杨醛和联苯二胺为原料合成了一种含有双席夫碱结构的荧光化学传感器 **22**. 在多种金属阳离子存在下, Cu^{2+} 的加入会导致明显的蓝移, 荧光明显地淬灭, 加 H_2PO_4^- 之后荧光恢复. 但循环响应测试中荧光强度的回复不够稳定, 出现了较明显的衰减现象. 寇兴明等^[73]引入钌配体, 合成了含有双席夫碱结构的荧光化学传感器 **23**, 该传感器对 Cu^{2+} 呈现出了明显的荧光淬灭响应, 对 Hg^{2+} 呈现出了略微的荧光红移现象. 在向传感器 **23**- Cu^{2+} 中加入 PPI 之后, 荧光强度回复平稳, 无明显衰减. 传感器 **23** 在用于人体尿液中检测时, 其回复率数值可地保持在 103.8%~106.1%.

1.4 用于连续识别 Cu^{2+} 和 I^- 的荧光化学传感器

Kim 等^[74]合成了一种以 2,2'-氨基苯基-4-羟甲基噻唑为基的传感器 **24**, 该传感器基于分子内电荷转移机

理(ICT), 可用于 Cu^{2+} 和 I^- 的连续识别. 测试过程均在乙醇溶液中进行, 荧光信号以“开-关-开”的形式反馈. 另外, 该课题组^[75]引入丹磺酰荧光团合成了噻唑为基的荧光化学传感器 **25**, 该传感器同样实现了对 Cu^{2+} 和 I^- 的连续识别. 传感器 **24** 和 **25** 在同 Cu^{2+} 配位后, 加入的 I^- 能够通过将 Cu^{2+} 还原成 Cu^+ 并进行替换的方式使荧光发生明显的回复.

1.5 用于连续识别 Cu^{2+} 和 ATP/ADP 的荧光化学传感器

三磷酸腺苷(ATP)和二磷酸腺苷(ADP)是两种结构极为相近的核苷多磷酸盐, 影响着生物能量的转化和酶的催化等过程^[76]. 目前设计的探针注重于如何有效地解决溶剂效应、生理环境和专一性等方面的问题, 探针的种类包括金属离子配合物^[77,78]、量子点^[79]和自组装的胶束^[80,81]等. 目前, 检测 ATP 的探针要明显多于 ADP, 而 ADP 作为 ATP 的水解产物之一, 具有更高的稳定性, 其含量的高低也成为生命体是否正常运转的重要衡量标准. 因此, 开发出对 ADP 专一性更高的探针将具有更高的研究价值.

卢忠林等^[82]以 BODIPY 为基合成了一种含有两个 12 冠 N_3 结构的荧光化学传感器 **26**, 该传感器可在水相中实现对 Cu^{2+} 和 ADP 的连续识别. 传感器 **26** 同 Cu^{2+} 按照 1:2 进行配位, 荧光量子产率由 0.04 降低到 0.0004, 检测限为 $0.04 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 同类生物阴离子识别

中, ADP 的荧光回复最明显, 但 ATP 也表现出了一定程度的回复. 另外, 该课题组^[83]同样利用两个 12 冠 N_3 结构作为识别基团, 以蔡二酰亚胺作为荧光基团合成了传感器 **27**, 可在水相中实现对 Cu^{2+} 和 ATP 的连续识别. 传感器 **27** 同 Cu^{2+} 作用之后, 荧光强度降低了 127 倍, 加入 ATP 之后, 荧光回复. 传感器 **27** 因其具有较低的毒性、较好的水溶性和较高的敏感度, 可用于 HeLa 细胞内对 Cu^{2+} 和 ATP 的连续识别.

黄小欢等^[84]分别以“Tren”和二乙烯三胺作为连接基团, 合成了三脚型和两脚型荧光化学传感器 **28** 和 **29**. 这两种传感器都对 Cu^{2+} 呈现出明显的荧光淬灭响应, 但对含磷生物阴离子的选择性有所区别. 传感器 **28**- Cu^{2+} 可对 ATP 呈现出明显的荧光增强响应, 而传感器 **29**- Cu^{2+} 可对 ADP 响应. 两种传感器均可适用于 HeLa 细胞的荧光成像.

周宏伟等^[85]以罗丹明作为荧光基团, 合成了传感器 **30**, 该传感器可通过螺环的开环和闭环实现对 Cu^{2+} 和 ATP 的连续识别(Eq. 3), 检测限分别达到 0.1 和 1

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 循环响应测试中呈现出了较高的稳定性和回复率, 可应用于生物体系的识别检测.

1.6 用于连续识别 Cu^{2+} 和生物硫醇的荧光化学传感器

半胱氨酸(Cys)和谷胱甘肽(GSH)等生物硫醇是天然的含巯基化合物, 对于细胞内蛋白质的转换过程起着至关重要的作用^[86]. 通常, 细胞内生物硫醇含量的变化会导致多种疾病的发生, 例如牛皮癣、白细胞锐减、心血管疾病、后天免疫功能丧失综合症、银屑病、嗜睡、肝损伤和肌肉无力等. 另外, GSH 是细胞内分布最为广泛的非蛋白巯基, 可维持细胞内氧化还原活性, 作为体内氧化还原反应的重要调节剂, 当细胞内的 GSH 含量异常时, 容易引起癌症, 包括乳房癌症、直肠癌、鼻咽癌和肺癌等^[87~90]. 所以, 开发出用于检测生物硫醇的可靠方法是十分必要的.

Kim 等^[91]以久洛尼定水杨醛和 4-硝基邻苯二胺为原料, 合成了席夫碱型荧光化学传感器 **31**, 该传感器可在水溶液中对 Cu^{2+} 和 Cys 的连续识别, 测试溶液的颜色也随着离子的交替变化, 通过淡黄色和棕色的交替变化, 可较好地实现裸眼识别. 另外, 该课题组^[92]又以水杨醛和氨基硫脲为原料, 制备了另外一种席夫碱型荧光化学传感器 **32**, 该传感器可在水溶液中对 Cu^{2+} 和 Cys 的连续识别, 测试溶液颜色由无色变成黄色, 检测限分别为 0.48 和 $7.82 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Ghosh 等^[93]以 2-羟基萘酚和 2-吡啶酮为原料, 合成了含有邻羟基酰胺基团的荧光化学传感器 **33**, 该传感器在 DMSO/水(体积比为 3 : 7)体系中可实现 Cu^{2+} 和 Cys 的连续识别, 测试溶液的颜色发生了明显的交替变化, 检测限可分别低至 0.27 和 $2.9 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 张向阳等^[94]设计并合成了一种基于苯并噻唑的邻羟基单酰胺传感器 **34**, 该传感器在多种阳离子存在下对 Cu^{2+} 呈现出了明显的荧光淬灭响应, 但加入了 Cys, GSH 和 Hcy 之后, 荧光呈现出了明显的增强响应, 但 Cys 的灵敏度要明显高于 GSH 和 Hcy.

Upadhyay 等^[95]以香豆素为基合成了一种简单的席夫碱型荧光化学传感器 **35**, 该传感器在水溶液可实现对 Cu^{2+} 和 Cys 的连续识别, 并可用于大肠杆菌的细胞成像. 王雅雯等^[96]以荧光素为基合成出一种结构简单的荧光化学传感器 **36**, 该传感器可在完全的 HEPES 缓冲溶液中对 Cu^{2+} 和 Cys 的连续识别, 并可用于 HepG2 的细胞成像. 王成云等^[97]以二腈异佛尔酮为基合成了传感器 **37**, 该传感器可用于 Cu^{2+} 和生物硫醇(Cys, GSH 和 Hcy)的连续识别, 检测限可达到 7.34 和 $10.3 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 并可用于细胞内的 Cu^{2+} 和 GSH 的连续识别.

2 结语

由于铜离子在生物体系和自然环境中的作用至关重要, 因此, 开发出结构新颖的荧光化学传感器用于铜离子的检测识别具有重要的研究价值. 其中, 通过连续识别的方式对 Cu^{2+} 进行检测, 一方面可以有效地排除 Cu^{2+} 本身和体系内其它淬灭剂的干扰, 同时也能实现探针的循环使用和多离子识别.

本论文综述了可连续识别 Cu^{2+} 型荧光化学传感器的研究进展, 通过“替换法”实现对 Cu^{2+} 和某些阴离子或分子的识别检测, 包括 S^{2-} , CN^- , H_2PO_4^- , PPi , I^- , ATP、ADP 或生物硫醇等. 但这些可连续识别 Cu^{2+} 型荧光化学传感器仍然存在一些问题: (1) 分子结构的新颖性不高, 尤其是识别基团或连接基团的形式过于单一; (2) 大多数的荧光探针水溶性较差, 实用性不高; (3) 同 Cu^{2+} 配位后的荧光探针在用于阴离子或分子的识别时, 专一性不是很高. 因此, 接下来研究的主要方向仍在于如何提高探针的结构新颖性、水溶性以及专一性等问题, 提高其实际应用价值.

References

- [1] Zhu, Y. M.; Wang, Z. L.; Yang, J.; Xu, X.; Wang, S. F.; Cai, Z. C.; Xu, H. J. *Chin. J. Org. Chem.* **2019**, *39*, 427 (in Chinese).
(朱阳明, 王忠龙, 杨剑, 徐徐, 王石发, 蔡正春, 徐海军, 有机

- 化学, **2019**, 39, 427.)
- [2] Warrior, S. B.; Kharkar, P. S. *J. Lumin.* **2018**, 199, 407.
 - [3] Saravanan, A.; Subashini, G.; Shyamsivappan, S.; Suresh, T.; Kadirvelu, K.; Bhuvanesh, N.; Nandhakumar, R.; Mohan, P. S. *J. Photochem. Photobiol., A* **2018**, 364, 424.
 - [4] Xu, J. B.; Liu, N.; Hao, C. W.; Han, Q. Q.; Duan, Y. L.; Wu, J. *Sens. Actuators, B* **2019**, 280, 129.
 - [5] Hall, K. A.; Jiang, L. W.; Marcus, R. K. *J. Anal. At. Spectrom.* **2017**, 32, 2463.
 - [6] Corte Rodríguez, M.; Álvarez-Fernández García, R.; Blanco, E.; Bettmer, J.; Montes-Bayón, M. *Anal. Chem.* **2017**, 89, 11491.
 - [7] Liu, Z. F.; Zhu, Z. L.; Zheng, H. T.; Hu, S. H. *Anal. Chem.* **2012**, 84, 10170.
 - [8] Resano, M.; Aramendía, M.; Belarra, M. A. *J. Anal. At. Spectrom.* **2014**, 29, 2229.
 - [9] Murugan, A. S.; Vidhyalakshmi, N.; Ramesh, U.; Annaraj, J. *Sens. Actuators, B* **2018**, 274, 22.
 - [10] Gu, B.; Huang, L. Y.; Xu, Z. F.; Tan, Z.; Hu, M.; Yang, Z. T.; Chen, Y. X.; Peng, C.; Xiao, W. P.; Yu, D. H.; Li, H. T. *Sens. Actuators, B* **2018**, 273, 118.
 - [11] Wang, P.; Fu, J. X.; Yao, K.; Chang, Y. X.; Xu, K. X.; Xu, Y. Q. *Sens. Actuators, B* **2018**, 273, 1070.
 - [12] Huang, X. H.; Li, K. Q.; Wang, X.; Xia, P. *Spectrochim. Acta, Part A* **2018**, 205, 287.
 - [13] Rani, R.; Kumar, G.; Paul, K.; Luxami, V. *J. Lumin.* **2016**, 180, 292.
 - [14] Zhang, Y.; Yan, B. *Talanta* **2019**, 197, 291.
 - [15] Praikaew, P.; Maniam, S.; Charoenpanich, A.; Sirirak, J.; Promarak, V.; Langford, S. J.; Wanichacheva, N. *J. Photochem. Photobiol., A* **2019**, 382, 111852.
 - [16] Roy, S. B.; Rajak, K. K. *J. Photochem. Photobiol., A* **2017**, 332, 505.
 - [17] Zong, L. Y.; Wang, C.; Song, Y. C.; Xie, Y. J.; Zhang, P.; Peng, Q.; Li, Q. Q.; Li, Z. *Sens. Actuators, B* **2017**, 252, 1105.
 - [18] Wu, Y. S.; Li, C. Y.; Li, Y. F.; Li, D.; Li, Z. *Sens. Actuators, B* **2016**, 222, 1226.
 - [19] Chen, Y.; Lv, Q.; Liu, Z. Q.; Fang, Q. *Inorg. Chem. Commun.* **2015**, 52, 38.
 - [20] Liu, L. L.; Dan, F. J.; Liu, W. J.; Lu, X.; Han, Y. L.; Xiao, S. Z.; Lan, H. C. *Sens. Actuators, B* **2017**, 247, 445.
 - [21] More, P. A.; Shankarling, G. S. *Sens. Actuators, B* **2017**, 241, 552.
 - [22] Zhang, B. B.; Liu, H. Y.; Wu, F. X.; Hao, G. F.; Chen, Y. Z.; Tan, C. Y.; Tan, Y.; Jiang, Y. Y. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2017**, 243, 765.
 - [23] Fu, Y.; Pang, X. X.; Wang, Z. Q.; Chai, Q.; Ye, F. *Spectrochim. Acta, Part A* **2019**, 208, 198.
 - [24] Dong, J. Y.; Hu, J. F.; Baigude, H.; Zhang, H. *Dalton Trans.* **2018**, 47, 314.
 - [25] Fu, Y. L.; Fan, C. B.; Liu, G.; Pu, S. Z. *Sens. Actuators, B* **2017**, 239, 295.
 - [26] Nair, R. R.; Raju, M.; Patel, N. P.; Raval, I. H.; Suresh, E.; Haldar, S.; Chatterjee, P. B. *Analyst* **2015**, 140, 5464.
 - [27] Yuan, Y.; Sun, S. G.; Liu, S.; Song, X. W.; Peng, X. J. *J. Mater. Chem. B* **2015**, 3, 5261.
 - [28] Huang, Y.; Li, C. F.; Shi, W. J.; Tan, H. Y.; He, Z. Z.; Zheng, L. Y.; Liu, F. G.; Yan, J. W. *Talanta* **2019**, 198, 390.
 - [29] Saura, A. V.; Burguete, M. I.; Galindo, F.; Luis, S. V. *Org. Biomol. Chem.* **2017**, 15, 3013.
 - [30] Yang, C. D.; Gong, D. Y.; Wang, X. D.; Iqbal, A.; Deng, M.; Guo, Y. L.; Tang, X. L.; Liu, W. S.; Qin, W. W. *Sens. Actuators, B* **2016**, 224, 110.
 - [31] Murugan, N.; Prakash, M.; Jayakumar, M.; Sundaramurthy, A.; Sundramoorthy, A. K. *Appl. Surf. Sci.* **2019**, 476, 468.
 - [32] Mani, K. S.; Rajamanikandan, R.; Murugesapandian, B.; Shankar, R.; Sivaraman, G.; Ilanchelian, M.; Rajendran, S. P. *Spectrochim. Acta, Part A* **2019**, 214, 170.
 - [33] Mukherjee, S.; Hazra, S.; Chowdhury, S.; Sarkar, S.; Chattopadhyay, K.; Pramanik, A. *J. Photochem. Photobiol., A* **2018**, 364, 635.
 - [34] Mani, S.; Cao, W.; Wu, L. Y.; Wang, R. *Nitric Oxide* **2014**, 41, 62.
 - [35] Yang, L. L.; Wang, J. P.; Yang, L.; Zhang, C.; Zhang, R. L.; Zhang, Z. P.; Liu, B. H.; Jiang, C. L. *RSC Adv.* **2016**, 6, 56384.
 - [36] Joo, D. H.; Mok, J. S.; Bae, G. H.; Oh, S. E.; Kang, J. H.; Kim, C. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2017**, 56, 8399.
 - [37] Wang, Y. P.; Qiu, D. L.; Li, M. N.; Liu, Y. J.; Chen, H. B.; Li, H. M. *Spectrochim. Acta, Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.* **2017**, 185, 256.
 - [38] Wang, H.; Shi, D. L.; Li, J.; Tang, H. Y.; Li, J.; Guo, Y. *Sens. Actuators, B* **2018**, 256, 600.
 - [39] Subashini, G.; Saravanan, A.; Shyamsivappan, S.; Arasakumar, T.; Mahalingam, V.; Shankar, R.; Mohan, P. S. *Inorg. Chim. Acta* **2018**, 483, 173.
 - [40] Dalbera, S.; Kulovi, S.; Dalai, S. *ChemistrySelect* **2018**, 3, 6561.
 - [41] Feng, Y.; Yang, Y.; Wang, Y. Z.; Qiu, F. Z.; Song, X. R.; Tang, X. L.; Zhang, G. L.; Liu, W. S. *Sens. Actuators, B* **2019**, 288, 27.
 - [42] Tang, L. J.; Zhou, P.; Zhang, Q.; Huang, Z. L.; Zhao, J.; Cai, M. J. *Inorg. Chem. Commun.* **2013**, 36, 100.
 - [43] Tang, L. J.; Dai, X.; Wen, X.; Wu, D.; Zhang, Q. *Spectrochim. Acta, Part A* **2015**, 139, 329.
 - [44] Li, C. M.; Liu, Z. X.; Miao, Y.; Zhou, X.; Wu, X. *Dyes Pigm.* **2016**, 125, 292.
 - [45] Liu, H. Y.; Wu, F. X.; Zhang, B. B.; Tan, C. Y.; Chen, Y. Z.; Hao, G. F.; Tan, Y.; Jiang, Y. Y. *RSC Adv.* **2016**, 6, 77508.
 - [46] Paul, A.; Anbu, S.; Sharma, G.; Kuznetsov, M. L.; Guedes da Silva, M. F. C.; Koch, B.; Pombeiro, A. J. L. *Dalton Trans.* **2015**, 44, 16953.
 - [47] Hu, Y. S.; Kang, J.; Zhou, P. P.; Han, X.; Sun, J. Y.; Liu, S. D.; Zhang, L. W.; Fang, J. G. *Sens. Actuators, B* **2018**, 255, 3155.
 - [48] Hou, L. J.; Kong, X. Y.; Wang, Y. S.; Chao, J. B.; Li, C. Z.; Dong, C.; Wang, Y.; Shuang, S. M. *J. Mater. Chem. B* **2017**, 5, 8957.
 - [49] Parua, S. P.; Sinha, D.; Rajak, K. K. *ChemistrySelect* **2018**, 3, 1120.
 - [50] Li, J. Z.; Leng, T. H.; Wang, Z. Q.; Zhou, L.; Gong, X. Q.; Shen, Y. J.; Wang, C. Y. *J. Photochem. Photobiol., A* **2019**, 373, 146.
 - [51] Fang, H.; Huang, P. C.; Wu, F. Y. *Spectrochim. Acta, Part A* **2018**, 204, 568.
 - [52] Xu, Z. C.; Chen, X. Q.; Kim, H. N.; Yoon, J. *Chem. Soc. Rev.* **2010**, 39, 127.
 - [53] Qu, W. J.; Fang, H.; Huang, Q.; Zhang, Y. M.; Lin, Q.; Yao, H.; Wei, T. B. *Chin. J. Org. Chem.* **2019**, 39, 1226 (in Chinese). (曲文娟, 房虎, 黄青, 张有明, 林奇, 姚虹, 魏太保, 有机化学, **2019**, 39, 1226.)
 - [54] Miyaji, H.; Sessler, J. L. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2001**, 40, 154.
 - [55] Dao, T. C.; Kieu, N. M.; Luong, T. Q. N.; Cao, T. A.; Nguyen, N. H.; Le, V. V. *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* **2018**, 9, 025006.
 - [56] Tsui, Y. K.; Devaraj, S.; Yen, Y. P. *Sens. Actuators, B* **2012**, 161, 510.
 - [57] Tang, L. J.; Wang, N. N.; Zhang, Q.; Guo, J. J.; Nandhakumar, R. *Tetrahedron Lett.* **2013**, 54, 536.
 - [58] Tang, L. J.; Zhou, P.; Zhong, K. L.; Hou, S. H. *Sens. Actuators, B* **2013**, 182, 439.
 - [59] Park, G. J.; Hwang, I. H.; Song, E. J.; Kim, H.; Kim, C. *Tetrahedron* **2014**, 70, 2822.
 - [60] Wu, C. J.; Wang, J. B.; Shen, J. J.; Zhang, C. Y.; Wu, Z. Y.; Zhou, H. W. *Tetrahedron* **2017**, 73, 5715.
 - [61] Zheng, Z. B.; Huang, Q. Y.; Han, Y. F.; Zuo, J.; Ma, Y. N. *Sens. Actuators, B* **2017**, 253, 203.
 - [62] Li, Z. L.; Acharya, R.; Wang, S. S.; Schanze, K. S. *J. Mater. Chem. C* **2018**, 6, 3722.
 - [63] Wang, W.; Wu, M.; Liu, H. M.; Liu, Q. L.; Gao, Y.; Zhao, B. *Tetrahedron Lett.* **2019**, 60, 1631.
 - [64] Wu, Y.; Zhang, Y.; Wu, J. J.; Zhou, J.; Liu, H.; Tu, T. *Chin. J. Org. Chem.* **2018**, 38, 705 (in Chinese). (吴彦, 张扬, 吴嘉杰, 周俊, 刘鸿, 涂涛, 有机化学, **2018**, 38, 705.)
 - [65] Chang, Y. X.; Li, B.; Guo, M.; Cai, Y. H.; Xu, K. X. *Chin. J. Org. Chem.* **2019**, 39, 2485 (in Chinese). (常永新, 李白, 郭淼, 蔡永红, 徐括喜, 有机化学, **2019**, 39, 2485.)
 - [66] Gomathi, A.; Vasanthi, M.; Viswanthamurthi, P.; Suresh, S.;

- Nandhakumar, R. *ChemistrySelect* **2018**, 3, 11809.
- [67] Meng, X. J.; Li, S. L.; Ma, W. B.; Wang, J. L.; Hu, Z. Y.; Cao, D. L. *Dyes Pigm.* **2018**, 154, 194.
- [68] Meng, X. J.; Cao, D. L.; Hu, Z. Y.; Han, X. H.; Li, Z. C.; Liang, D.; Ma, W. B. *Tetrahedron Lett.* **2018**, 59, 4299.
- [69] Zhao, C. Y.; Chen, J.; Cao, D. L.; Wang, J. L.; Ma, W. B. *Tetrahedron* **2019**, 75, 1997.
- [70] Tang, L. J.; Zhou, P.; Huang, Z. L.; Zhao, J.; Cai, M. J. *Tetrahedron Lett.* **2013**, 54, 5948.
- [71] Zhong, K. L.; Guo, B. F.; Sun, X. H.; Zhou, X.; Zhang, Q.; Tang, L. J.; Zhang, X. R. *Chin. J. Org. Chem.* **2017**, 37, 2002 (in Chinese). (钟克利, 郭宝峰, 孙笑寒, 周雪, 张强, 汤立军, 张行荣, 有机化学, **2017**, 37, 2002.)
- [72] Qu, W. J.; Yan, G. T.; Ma, X. L.; Wei, T. B.; Lin, Q.; Yao, H.; Zhang, Y. M. *Sens. Actuators, B: Chem.* **2017**, 242, 849.
- [73] Zhang, S. T.; Li, P. P.; Kou, X. M.; Xiao, D. *ChemistrySelect* **2018**, 3, 10057.
- [74] Seo, H.; An, M.; Kim, B. Y.; Choi, J. H.; Helal, A.; Kim, H. S. *Tetrahedron* **2017**, 73, 4684.
- [75] Kim, B. Y.; Pandith, A.; Cho, C. S.; Kim, H. S. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2019**, 40, 163.
- [76] Tan, K. Y.; Li, C. Y.; Li, Y. F.; Fei, J. J.; Yang, B.; Fu, Y. J.; Li, F. *Anal. Chem.* **2017**, 89, 1749.
- [77] Jiao, S. Y.; Li, K.; Wang, X.; Huang, Z.; Pu, L.; Yu, X. Q. *Analyst* **2015**, 140, 174.
- [78] Ding, A. X.; Shi, Y. D.; Zhang, K. X.; Sun, W.; Tan, Z. L.; Lu, Z. L.; He, L. *Sens. Actuators, B* **2018**, 255, 440.
- [79] Hu, T. Y.; Na, W. D.; Yan, X.; Su, X. G. *Talanta* **2017**, 165, 194.
- [80] Jung, S. H.; Kim, K. Y.; Lee, J. H.; Moon, C. J.; Han, N. S.; Park, S. J.; Kang, D. M.; Song, J. K.; Lee, S. S.; Choi, M. Y.; Jaworski, J.; Jung, J. H. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, 9, 722.
- [81] Zhu, J. H.; Yu, C.; Chen, Y.; Shin, J.; Cao, Q. Y.; Kim, J. S. *Chem. Commun.* **2017**, 53, 4342.
- [82] Zhang, Y.; Gao, Y. G.; Shi, Y. D.; Tan, L. Q.; Yue, J. S.; Lu, Z. L. *Chin. Chem. Lett.* **2015**, 26, 894.
- [83] Gao, Y. G.; Tang, Q.; Shi, Y. D.; Zhang, Y.; Lu, Z. L. *Talanta* **2016**, 152, 438.
- [84] Xia, P.; Su, Z. H.; Sun, J. Y.; Li, D. Z.; Huang, X. H. *ChemistrySelect* **2017**, 2, 11620.
- [85] Jin, X. L.; Gao, J. K.; Xie, P.; Yu, M. C.; Wang, T.; Zhou, H. W.; Ma, A. J.; Wang, Q.; Leng, X.; Zhang, X. H. *Spectrochim. Acta, Part A* **2018**, 204, 657.
- [86] Bragoszewski, P.; Wasilewski, M.; Sakowska, P.; Gornicka, A.; Böttinger, L.; Qiu, J.; Wiedemann, N.; Chacinska, A. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2015**, 112, 7713.
- [87] Yan, P. P.; Wang, T.; Zhang, D.; Ma, X. X. *Chin. J. Org. Chem.* **2019**, 39, 916 (in Chinese). (闫沛沛, 王婷, 张丹, 马晓雪, 有机化学, **2019**, 39, 916.)
- [88] Roy, N.; Nazeem, P. A.; Babu, T. D.; Abida, P. S.; Narayanankutty, A.; Valsalan, R.; Valsala, P. A.; Raghavamenon, A. C. *Interdiscip. Sci. Comput. Life Sci.* **2018**, 10, 686.
- [89] Wu, L. L.; Han, H. H.; Liu, L. Y.; Gardiner, J. E.; Sedgwick, A. C.; Huang, C. S.; Bull, S. D.; He, X. P.; James, T. D. *Chem. Commun.* **2018**, 54, 11336.
- [90] Geng, P. L.; Yao, J.; Zhu, Y. F. *Mol. Biol. Rep.* **2014**, 41, 2299.
- [91] Kim, Y. S.; Park, G. J.; Lee, S. A.; Kim, C. *RSC Adv.* **2015**, 5, 31179.
- [92] You, G. R.; Lee, J. J.; Choi, Y. W.; Lee, S. Y.; Kim, C. *Tetrahedron* **2016**, 72, 875.
- [93] Singh, Y.; Arun, S.; Singh, B. K.; Dutta, P. K.; Ghosh, T. *RSC Adv.* **2016**, 6, 80268.
- [94] Shen, Y. M.; Zhang, X. Y.; Zhang, C. X.; Zhang, Y. Y.; Jin, J. L.; Li, H. T. *Spectrochim. Acta, Part A* **2018**, 191, 427.
- [95] Kumar, V.; Kumar, A.; Diwan, U.; Singh, M. K.; Upadhyay, K. K. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2016**, 89, 754.
- [96] Fu, Z. H.; Yan, L. B.; Zhang, X. L.; Zhu, F. F.; Han, X. L.; Fang, J. G.; Wang, Y. W.; Peng, Y. *Org. Biomol. Chem.* **2017**, 15, 4115.
- [97] Zhang, M. Z.; Han, H. H.; Zhang, S. Z.; Wang, C. Y.; Lu, Y. X.; Zhu, W. H. *J. Mater. Chem. B* **2017**, 5, 8780.

(Zhao, C.)