新型二茂铁噻唑和咪唑衍生物的合成及其对 Fe^{3+} 的选择性识别

邬孝芳 武沛 李敬瑜 陆婧 王健春*

(首都师范大学化学系 北京 100048)

摘要 设计合成了 5 个新型二茂铁噻唑和咪唑衍生物, 其特点是二茂铁共轭单元与杂环共轭单元之间用羰基亚甲基 (COCH_2) 相连. 以二茂铁为原料, 经氯乙酰化反应生成氯乙酰基二茂铁(**1a**), **1a** 分别与不同的杂环化合物(2-巯基苯并噻唑、2-巯基苯并咪唑、咪唑和苯并咪唑)反应生成相应的四种新化合物; 二茂铁经乙酰化、溴代反应生成 1,1'-二(溴乙酰基)二茂铁(**1b**), **1b** 与 2-巯基苯并噻唑反应生成 1,1'-二茂铁二[(2-苯并噻唑-2-巯基)-1-乙酮] (**2e**). 五种新化合物的结构都经 ^1H NMR, ^{13}C NMR, ESI-MS, HRMS 和 IR 确认, 并得到 3 个化合物的 X 射线单晶结构. 利用紫外-可见光谱研究了 5 个新化合物对 14 种金属离子的识别性质, 发现这 5 个化合物只对 Fe^{3+} 离子具有离子识别作用, 其中 **2a** 具有最大的吸收光谱响应.

关键词 二茂铁; 噻唑; 咪唑; 铁(III)离子识别; 互变异构

Synthesis of Novel Ferrocenyl Thiazole and Imidazole Derivatives and Its Selective Recognition to Fe^{3+}

Wu, Xiaofang Wu, Pei Li, Jingyu Lu, Jing Wang, Jianchun*

(Department of Chemistry, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract Five novel ferrocenyl thiazole and imidazole derivatives were synthesized. The structure characterization of the five products showed that ferrocene conjugative unit and thiazole or imidazole conjugative unit were linked by carbonyl methylene skeleton (COCH_2). Chloroacetylferrocene (**1a**) was prepared by chloroacetylation of ferrocene which reacted with different heterocyclic compounds (2-mercaptobenzothiazole, 2-mercaptobenzimidazole, imidazole and benzimidazole) to give four novel compounds, respectively. 1,1'-Bis(bromoacetyl)ferrocene (**1b**) was prepared by acetylation and subsequent bromination of ferrocene, which then reacted with 2-mercaptobenzothiazole to produce **2e**. All the new compounds were confirmed by ^1H NMR, ^{13}C NMR, ESI-MS, HRMS and IR. Three single crystal structures were obtained. Recognition properties on 14 metal ions of the five new compounds were investigated by UV-vis spectrum. The results showed that the five new compounds possessed recognition properties only to iron(III), in which **2a** had maximum spectra response.

Keywords ferrocene; thiazole; imidazole; iron(III) ion recognition; tautomerism

过渡金属 Fe^{3+} 离子对生命过程至关重要, 生物体内很多酶以铁作为催化剂完成氧的新陈代谢和电子转移, 以及 DNA 和 RNA 的合成^[1]. 在人体中 Fe^{3+} 离子缺乏或过多都会引起严重的疾病; 因缺铁引起的萎黄病是广泛存在的农业生产问题, 它会导致农作物减产. 因此, 迫切地开展能够在环境和生物样本中检测 Fe^{3+} 离子的化学传感器的研究. 到目前为止, 很多主体分子被合成出来, 其中包括席夫碱^[2,3]、杯[4]吡咯^[4]、三嗪^[5]、萘二甲酰亚胺^[6]、咪唑^[7]、罗丹明 B^[8]、香豆醛^[9]等衍生物. 这

些主体分子除了对 Fe^{3+} 离子有识别功能之外, 大都对其它离子也有响应, 因此选择性受到影响.

二茂铁以其良好的热稳定性, 电化学性质和易于修饰等优势成为一类重要的主体分子. 目前比较成功的例子大多是二茂铁与杂环体系直接相连, 如二茂铁与咪唑类^[10,11]、噻唑类^[12]、吡嗪类^[13]和三唑类^[14]等杂环共轭体系相连, 可用于阴、阳离子和小分子的识别. 然而, 这些二茂铁杂环共轭体系主体分子的选择性较差, 可以和多种离子同时作用, 高选择性的主体分子依然缺乏.

* Corresponding author. E-mail: cnuwj@cnu.edu.cn

Received November 25, 2016; revised February 9, 2017; published online February 27, 2017.

Project supported by the Beijing Natural Science Foundation (No. 2173060) and the General Plan of Beijing Municipal Education Commission (No. KM201710028007).

北京市自然科学基金(No. 2173060)和北京市教委科研计划(No. KM201710028007)资助项目.

本文以二茂铁为原料, 经乙酰化, 卤代反应及缩合反应与不同杂环化合物反应得到 5 个新化合物 **2a~2e** (Scheme 1), 经多种光谱方法确定其结构, 且得到其中 3 个化合物的 X 射线单晶衍射结构. 研究了 14 种常见金属离子(Pb^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Sn^{4+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Cr^{3+} , Cd^{2+} , Ag^+)对主体分子 **2a~2e** 的紫外-可见光谱影响, 结果表明只有 Fe^{3+} 对主体分子有响应, 并且可实现“裸眼”识别.

图式 1 化合物 **2a~2e** 的合成
Scheme 1 Synthesis of compounds **2a~2e**

1 结果与讨论

1.1 分子的设计与合成

二茂铁杂环化合物作为主体分子应用于阳离子、阴离子和小分子识别的研究受到关注^[15,16]. 这类化合物中二茂铁作为显示单元, 而杂环化合物是络合单元. 二茂铁共轭单元与杂环直接相连具有最好的效果, 但也存在选择性不高的问题. 提高选择性的方法是改变主体分子的电子效应和空间结构, 我们尝试把羰基亚甲基引入到二茂铁共轭单元和杂环共轭单元之间, 切断了两个单元的共轭关系, 也构造了新的空间结构, 期望提高选择性. 如 Scheme 1, 将二茂铁通过酰化反应生成氯乙酰基二茂铁(**1a**), 随后分别与 2-巯基苯并噻唑、2-巯基苯并咪唑、咪唑和苯并咪唑反应生成四个新化合物 **2a~2d**. 二茂铁经乙酰化反应生成 1,1'-二乙酰基二茂铁, 随后与丁基锂、NBS 反应生成 1,1'-二(溴乙酰基)二茂铁(**1b**), **1b** 与

2-巯基苯并噻唑反应生成 **2e**. 我们也尝试过用 **1b** 分别与 2-巯基苯并咪唑、咪唑和苯并咪唑等杂环反应, 期待合成双取代衍生物, 但是均未获成功. 可能的原因是 **1b** 在碱性条件下较活泼, 容易发生分子内消除反应生成不饱和[4]二茂铁环蕃^[17](Eq. 1).

1.2 X 射线单晶结构

图 1 是 **2a**, **2c**, **2d** 的 X 射线单晶结构, 二茂铁的 Fe—C 键键长在正常范围之内, 两个茂环几乎平行. 茂环与羰基所在平面的二面角在 $5^\circ \sim 10^\circ$ 之间, 由于亚甲基的引入, 茂环共轭单元与苯并噻唑、咪唑或苯并咪唑共轭单元没有共轭关系, 形成了一个倒 U 型的特殊三维结构. 三个晶体结构的数据比较见表 1.

图 1 **2a** (a), **2c** (b) 和 **2d** (c) 的分子结构图
Figure 1 Molecular structures of **2a** (a), **2c** (b), **2d** (c)

表 1 **2a**, **2c** 和 **2d** 的 X 射线单晶结构数据比较

Table 1 Data comparison of X-ray single crystal structures of **2a**, **2c** and **2d**

化合物	Fe—C 键长 范围/Å	两个茂环 二面角/(°)	茂环与羰基所 在的平面的二 面角/(°)	茂环与噻唑 或咪唑环的 二面角/(°)
2a	2.014~2.056	0.331	5.214	75.729
2c	2.033~2.053	0.896	10.005	78.784
2d	2.026~2.056	1.048	7.018	85.548

1.3 不同金属阳离子对 **2a** 的紫外可见光谱响应

分别研究了 **2a**~**2e** 5 个主体分子对常见金属离子的紫外可见光谱响应。以 **2a** 为例, 在可见光区的最大吸收峰值为 458 nm, 除 Fe^{3+} 外, 其它金属离子对 **2a** 的最大吸收峰均无明显变化, 如图 2。并且肉眼可见只有加入 Fe^{3+} 的溶液颜色变深变红, 久置后浑浊。

图 2 不同金属离子对 **2a** 的紫外可见吸收光谱影响

Figure 2 UV-Vis spectra changes of compound **2a** upon addition of various metal ions

按照表 2 所示浓度配置一系列 Fe^{3+} 离子的溶液, 如图 3, 随着 Fe^{3+} 的加入, 溶液颜色逐渐从黄色转为红色, 并且随着 Fe^{3+} 浓度的增大, 溶液颜色逐渐加深。 Fe^{3+} 对其它主体分子有相似的变化, 且 **2a** 变化最明显。

表 2 不同离子溶液的浓度

Table 2 Concentration of various metal ion

瓶号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
浓度/(10^{-5} mol·L $^{-1}$)	0	0.4	1	2	4	10	20	40	80	100	200

1.4 机理研究

2a 的紫外可见谱显示当 Fe^{3+} 加入时吸收峰发生红移。如图 3, 从浓度系列的实验数据看, 当主客体浓度达到 1:1 的时候, 主体分子在 458 nm 的吸收峰基本不可见, 而低于这个浓度则主体分子的峰都清晰可见, 说明主客体发生了 1:1 的配位反应, 使主体分子的结构发生了变化, 因而产生了一个明显的吸收峰位移。实验测定了该方法的检出限为 5.083×10^{-5} mol/L。

分别研究了 **2a** 的氘代氯仿、氘代四氢呋喃和氘代 DMSO 溶液中的核磁共振氢谱(图谱见辅助材料), 发现 **2a** 的氘代氯仿和氘代 DMSO 谱图均可很好地解释其酮式结构, 但 **2a** 的氘代四氢呋喃谱图变得非常复杂, 在 δ 5.48 附近出现了碳碳双键烯氢的信号, 且在 δ 9.20 和 9.70 附近出现了活泼氢的信号。说明 **2a** 在四氢呋喃(THF)中发生了结构的变化, 曾试图分离和纯化所生成

图 3 化合物 **2a** 的紫外-可见吸收光谱随 Fe^{3+} 浓度的变化

Figure 3 UV-Vis spectra changes of **2a** in the presence of Fe^{3+} with various concentration

的各个化合物, 却在蒸干溶剂之后重新得到了纯 **2a** 的酮式结构。因此我们认为 **2a** 在 THF 中存在着互变异构现象, 酮式结构与烯醇式结构 **I** 和 **II** 存在着平衡(图 4)。

图 4 化合物 **2a** 在 THF 中的互变异构

Figure 4 Tautomerism of **2a** in the presence of THF

进一步研究发现 Fe^{3+} 的显色反应是一个三元体系, 即 **2a**, THF 和 Fe^{3+} 同时存在下才显色, 用其它溶剂替换并不显色, Fe^{2+} 与 **2a** 和 THF 共存也不显色。用核磁共振氢谱研究 Fe^{3+} 与 **2a** 在 THF 中的机理未获成功, 得到的氢谱为宽峰, 可能是体系中顺磁性物质存在的原因(图谱见辅助材料)。

2 结论

本文设计合成了 5 个新的二茂铁噻唑和咪唑衍生物, 用光谱方法确认结构。单晶结构表明以羰基亚甲基相连的二茂铁与噻唑或咪唑共轭单元具有特殊的空间构型和电子效应, 在常见的 14 种常见阳离子中, 仅与 Fe^{3+} 络合并显红色, 可用于 Fe^{3+} 的裸眼识别。机理研究显示 **2a** 在四氢呋喃中存在着互变异构, 而且 Fe^{3+} 的显色反应是一个三元体系。

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

大多数的操作都是氮气保护的无水无氧条件下进行。溶剂四氢呋喃是用金属钾回流除水并蒸馏制得；异丙胺、三甲基氯硅烷等使用之前用分子筛干燥。熔点用上海易测仪器设备有限公司的 WRS-1B 型数字熔点仪测定，温度未校正；VARIAN NMRS 600 MHz 型核磁共振仪(CDCl₃ 为溶剂，TMS 为内标)；TENSOR 37 型红外光谱仪(KBr 压片)；Waters MicrYMass QToF 型质谱仪；UV-8000 紫外-可见分光光度计；Waters 公司的 MicrYMass QToF 质谱仪；AFC10/Saturn 724+单晶衍射仪。

3.2 实验方法

3.2.1 氯乙酰基二茂铁(1a)的合成

根据文献[18]合成。得紫色固体，产率 68.8%，m.p. 74~75 °C。

3.2.2 1,1'-二溴乙酰基二茂铁(1b)的合成

根据文献[19]合成。得深棕色固体，产率 62.3%，m.p. 84~85 °C。

3.2.3 目标化合物 2a~2d 的合成

取氯乙酰基二茂铁 100 mg (0.381 mmol)溶于乙腈中，再加入含 212 mg (1.14 mmol) 2-巯基苯并噻唑的丙酮溶液，再加入 552 mg (0.381 mmol) K₂CO₃ 乙腈溶液，加入干燥的 5 Å 分子筛，加热回流。4 h 后，过滤，固体溶解于二氯甲烷中，再依次用碱液、水洗后，旋干，粗产物经二氯甲烷与石油醚重结晶得 2-(1*H*-苯并噻唑-2'-巯基)-1-二茂铁-1-乙酮(2a)，红色针状晶体，产率 69.0%。m.p. 183~184 °C；¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ: 4.33 (s, 5H, Cp), 4.60 (t, *J*=1.9, 1.9 Hz, 2H, Cp), 4.73 (s, 2H, CH₂), 4.93 (t, *J*=1.9, 1.9 Hz, 2H, Cp), 7.30 (ddd, *J*=8.3, 7.3, 1.2 Hz, 1H, Ph), 7.40 (ddd, *J*=8.2, 7.2, 1.2 Hz, 1H, Ph), 7.79~7.74 (m, 1H, Ph), 7.89~7.84 (m, 1H, Ph)；¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ: 196.34, 165.70, 152.87, 135.57, 126.01, 124.35, 121.36, 121.10, 77.17, 72.87, 70.26, 69.69, 40.96；IR (KBr) ν: 3431, 3095, 2910, 1684, 1433, 1222, 1065, 995, 889, 822, 749, 4800 cm⁻¹；ESI-MS *m/z*: 393.9 (M+H)⁺。HRMS calcd for C₁₉H₁₆FeNOS₂ (M+H)⁺ 394.0023, found 394.0020。

化合物 2b~2d 按化合物 2a 方法合成。

2-(1*H*-苯并噻唑-2'-巯基)-1-二茂铁-1-乙酮(2b): 橙色粉末，产率 67.8%。m.p. 180~181 °C；¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ: 4.29 (s, 5H, Cp), 4.31 (s, 2H, CH₂), 4.66 (t, *J*=1.9, 1.9 Hz, 2H, Cp), 4.89 (t, *J*=1.9, 1.9 Hz, 2H, Cp), 7.20~7.56 (m, 4H, Ph)；¹³C NMR

(151 MHz, CDCl₃) δ: 200.34, 149.06, 137.66, 126.03, 122.52, 76.62, 73.70, 70.43, 69.96, 39.22；IR (KBr) ν: 3244, 31004, 2954, 1672, 1448, 1395, 1344, 1269, 1224, 1061, 8300, 7400, 487 cm⁻¹；ESI-MS *m/z*: 377.1 (M+H)⁺。HRMS calcd for C₁₉H₁₇FeN₂OS (M+H)⁺ 377.0411, found 377.0409。

2-(1*H*-咪唑)-1-二茂铁-1-乙酮(2c): 红棕色针状晶体，产率 70.1%。m.p. 158~159 °C；¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ: 4.24 (s, 5H, Cp), 4.63 (t, *J*=1.9, 1.9 Hz, 2H, Cp), 4.82 (t, *J*=1.9, 1.9 Hz, 2H, Cp), 5.05 (s, 2H, CH₂), 6.98 (s, 1H, Ph), 7.14 (s, 1H, Ph), 7.54 (s, 1H, Ph)；¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ: 195.82, 129.59, 120.48, 75.66, 73.23, 70.14, 70.13, 69.17, 52.82；IR (KBr) ν: 3386, 3111, 2917, 1680, 1507, 1463, 1374, 1246, 1105, 1068, 889, 821, 7400, 657, 494 cm⁻¹；ESI-MS *m/z*: 295.1 (M+H)⁺。HRMS calcd for C₁₅H₁₅FeN₂O (M+H)⁺ 295.0534, found 295.0526。

2-(1*H*-苯并咪唑)-1-二茂铁-1-乙酮(2d): 橙色针状晶体，产率 64.7%。m.p. 170~171 °C；¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ: 4.25 (s, 5H, Cp), 4.65 (t, *J*=1.8, 1.8 Hz, 2H, Cp), 4.89 (t, *J*=1.8, 1.8 Hz, 2H, Cp), 5.27 (s, 2H, CH₂), 7.86~7.28 (m, 4H, Ph), 8.06 (s, 1H, CH)；¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ: 195.81, 123.29, 122.36, 120.57, 109.19, 75.60, 73.22, 70.06, 69.23, 50.71；IR (KBr) ν: 3424, 3095, 2917, 1680, 1500, 1374, 1246, 1173, 1068, 889, 830, 748, 606, 480 cm⁻¹；ESI-MS *m/z*: 345.1 (M+H)⁺。HRMS calcd for C₁₉H₁₇FeN₂O (M+H)⁺ 345.0690, found 345.0685。

3.2.4 目标化合物 2e 的合成

取 1,1'-二溴乙酰基二茂铁 502.9 mg (1.03 mmol)溶于乙腈中，再加入含 345.1 mg (2.06 mmol) 2-巯基苯并噻唑的丙酮溶液，再加入 18.8 mg (1.03 mmol) K₂CO₃ 乙腈溶液，加入干燥的 5 Å 分子筛，常温搅拌 0.5 h 后，过滤，固体溶解于二氯甲烷中，再依次用碱液，水洗后，旋干。用二氯甲烷和石油醚(*V*:*V*=1:5)重结晶，得橙色块状晶体 1,1'-二茂铁二[(2-苯并噻唑-2-巯基)-1-乙酮](2e)，446 mg，产率 72.1%。m.p. 183~184 °C；¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ: 4.64 (s, 4H, CH₂), 4.75 (t, *J*=1.9, 1.9 Hz, 4H, Cp), 5.08 (t, *J*=2.0, 2.0 Hz, 4H, Cp), 7.28~7.83 (m, 8H, Ph)；¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ: 195.76, 165.40, 152.74, 135.57, 126.03, 124.40, 121.29, 121.11, 78.66, 74.67, 71.41, 40.74；IR (KBr) ν: 3445, 3080, 2910, 1680, 1456, 1418, 1298, 1232, 1075, 1008, 881, 830, 748, 480 cm⁻¹；ESI-MS *m/z*: 601.0 (M+H)⁺。HRMS calcd for C₂₈H₂₀FeN₂NaO₂S₄ (M+Na)⁺ 622.9655, found 622.96500。

3.2.5 单晶结构测试

化合物 **2a** ($\text{C}_{19}\text{H}_{15}\text{FeNOS}_2$) 为红色针状晶体, 分子晶体结构图如图 1(a) (CCDC: 1518698). 单晶 X 射线测试表明化合物 $M_r=393.30$, 晶体结构属于单斜晶系, $P2_1/c$ 空间群. 晶胞参数 $a=6.270(15)$ Å, $b=18.794(4)$ Å, $c=14.269(3)$ Å, $\alpha=90.00^\circ$, $\beta=101.195(3)^\circ$, $\gamma=90.00^\circ$. $V=1649.5(7)$ Å³, $Z=4$, $D_c=1.584$ Mg/m³, $\mu=1.17$ mm⁻¹, $F(000)=808$. 光源: Mo K α 射线($\lambda=0.71073$ nm), 测试温度 293(2) K. 最终偏离因子: $R_1=0.0363$, $wR_2=0.0881$. 偏离因子: $R_1=0.0451$, $wR_2=0.0828$, GOF=1.050; 精修方法: 基于 F^2 的全矩阵最小二乘法. 全部氢原子通过理论加氢确定, 并在结构精修中采用各项同性热参数.

化合物 **2c** ($\text{C}_{15}\text{H}_{14}\text{FeN}_2\text{O}$) 为红棕色针状晶体, 分子晶体图如图 1(b) (CCDC 1518699). 单晶 X 射线测试表明化合物 $M_r=294.05$, 晶体结构属于三斜晶系. $P\bar{1}$ 空间群. 晶胞参数 $a=7.4506(4)$ Å, $b=11.0284(6)$ Å, $c=16.0550(9)$ Å, $\alpha=81.879(3)^\circ$, $\beta=80.590(4)^\circ$, $\gamma=89.549(4)^\circ$. $V=1288.25(12)$ Å³, $Z=2$, $D_c=1.516$ Mg/m³, $\mu=1.16$ mm⁻¹, $F(000)=608$. 光源: Mo K α 射线($\lambda=0.71073$ nm), 测试温度 293(2) K. 最终偏离因子: $R_1=0.0401$, $wR_2=0.1070$. 偏离因子: $R_1=0.0501$, $wR_2=0.1140$, GOF=1.078; 精修方法: 基于 F^2 的全矩阵最小二乘法. 全部氢原子通过理论加氢确定, 并在结构精修中采用各项同性热参数.

化合物 **2d** ($\text{C}_{19}\text{H}_{16}\text{FeN}_2\text{O}$) 为橙色针状晶体, 分子晶体图如图 1(c) (CCDC 1518656). 单晶 X 射线测试表明化合物 $M_r=344.06$, 晶体结构属于三斜晶系, $P\bar{1}$ 空间群. 晶胞参数 $a=9.7648(2)$ Å, $b=11.5911(2)$ Å, $c=15.1987(3)$ Å, $\alpha=101.5780(10)^\circ$, $\beta=91.3020(10)^\circ$, $\gamma=114.4800(10)^\circ$. $V=1522.91(5)$ Å³, $Z=2$, $D_c=1.501$ Mg/m³, $\mu=1.00$ mm⁻¹, $F(000)=712$. 光源: Mo K α 射线($\lambda=0.71073$ nm), 测试温度 293(2) K. 最终偏离因子: $R_1=0.0360$, $wR_2=0.0739$. 偏离因子: $R_1=0.0538$, $wR_2=0.0823$, GOF=1.029; 精修方法: 基于 F^2 的全矩阵最小二乘法. 全部氢原子通过理论加氢确定, 并在结构精修中采用各项同性热参数.

3.2.6 紫外-可见光谱的测定

以 **2a** 为例, 主体分子 **2a** 配成 2.0×10^{-3} mol/L 的 THF 溶液, 客体离子分别配成 2.0×10^{-2} mol/L 的水溶液备用. 在含有 2 mL 主体溶液的一系列 10 mL 比色管中, 移入不同的客体 (Pb^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Sn^{4+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Cr^{3+} , Cd^{2+} , Ag^+) 2 mL, 并用 THF 定容, 得到主体分子的浓度为 4.0×10^{-4} mol/L, 客体离子浓度为 4.0×10^{-3} mol/L.

在测定离子浓度梯度时保持主体分子浓度为 4.0×10^{-4} mol/L, 配置一系列浓度的客体分子溶液, 所得客体离子浓度见表 2.

辅助材料(Supporting Information) 化合物 **2a**, **2c**, **2d** 单晶结构的主要键长键角, 目标化合物 **2a~2e** 的核磁氢谱、核磁碳谱谱图、红外光谱和高分辨质谱谱图. 这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载.

References

- [1] Umesh, F.; Sanjay, A.; Anil, K. *Chem. Phys. Lett.* **2013**, 584, 165.
- [2] Choi, Y. W.; Park, G. J.; Na, Y. J.; Jo, H. Y.; Lee, S. A. You, G. R.; Kim, C. *Sens. Actuators, B* **2014**, 194, 343.
- [3] Xu, D.; Wang, M.-M.; Zeng, R.-J.; He, S.-G.; Zhang, Y.; Wang, H.; Shen, H.-T. *Appl. Chem. Ind.* **2013**, 42, 1712 (in Chinese). (徐栋, 王鸣明, 曾瑞杰, 何森, 张玉, 王辉, 盛鸿婷, 应用化工, **2013**, 42, 1712.)
- [4] Bhatt, K. D.; Makwana, B. A.; Vyas, D. J.; Mishra, D. R.; Jain, V. K. *J. Lumin.* **2014**, 146, 450.
- [5] Zhang, H.; Wu, X.-X.; Wu, F.-Y. *Chin. J. Inorg. Chem.* **2013**, 29, 2394 (in Chinese). (张华, 徐孝武, 吴芳英, 无机化学学报, **2013**, 29, 2394.)
- [6] Du, B.; Ding, Z.-J.; Guo, L.; Wang, P.-H.; Li, Z.-J.; Yu, J.-H. *Spectrosc. Spectral Anal.* **2015**, 35, 470 (in Chinese). (杜斌, 丁志军, 郭磊, 王普红, 李志军, 余建华, 光谱学与光谱分析, **2015**, 35, 470.)
- [7] Zhang, S.-L.; Zhao, B.; Ran, L.; Qin, D.-B.; Luo, J.-W. *Chem. Reag.* **2014**, 36, 925 (in Chinese). (张仕禄, 赵波, 冉利, 秦大斌, 罗杰伟, 化学试剂, **2014**, 36, 925.)
- [8] Su, N.; Yang, M.-P.; Meng, W.-F.; Yang, B.-Q. *Chin. J. Org. Chem.* **2015**, 35, 175 (in Chinese). (苏娜, 杨美盼, 孟文斐, 杨秉勤, 有机化学, **2015**, 35, 175.)
- [9] Garcia-Beltran, O.; Cassels, B. K.; Perez, C.; Mena, N.; Nunez, M. T.; Martine, N. P.; Pavez, P.; Aliaga, M. E. *Sensors* **2014**, 14, 1358.
- [10] Maria, A.; Arturo, E.; Alberto, T.; Pedro, M. *Org. Lett.* **2011**, 13, 2078.
- [11] Zapata, F.; Caballero, A.; Espinosa, A.; Tarraga, A.; Molina, P. *J. Org. Chem.* **2009**, 74, 4787.
- [12] Caballero, A.; Lloveras, V.; Curiel, D. T.; Tarraga, A.; Espinosa, A.; Garcia, R.; Vidal-Gancedo, J.; Rovira, C.; Wurst, K.; Molina, P. *Inorg. Chem.* **2007**, 46, 825.
- [13] Zapata, F.; Caballero, A.; Espinosa, A.; Tarraga, A.; Molina, P. *Inorg. Chem.* **2009**, 48, 11566.
- [14] Romero, T.; Caballero, A.; Tarraga, A.; Molina, P. *Org. Lett.* **2009**, 11, 3466.
- [15] Zhuo, J.-B.; Yan, X.-Q.; Wang, X.-X.; Xie, L.-L.; Yuan, Y.-F. *Chin. J. Org. Chem.* **2015**, 35, 1090 (in Chinese). (卓继斌, 晏希泉, 王小雪, 谢莉莉, 袁耀锋, 有机化学, **2015**, 35, 1090.)
- [16] Zhuo, J.-B.; Wan, Q.; Yan, X.-Q.; Xie, L.-L.; Yuan, Y.-F. *Chem. J. Chin. Univ.* **2015**, 36, 477 (in Chinese). (卓继斌, 万倩, 晏希泉, 谢莉莉, 袁耀锋, 高等学校化学学报, **2015**, 36, 477.)
- [17] Molina, P.; Tarraga, A.; Curiel, D.; Velasco, M. D. *J. Organomet. Chem.* **2001**, 637~639, 258.
- [18] Ferreira, A. P.; Ferreira da Silva, J. L.; Duarte, M. T.; Minas da Piedade, M. F.; Robalo, M. P.; Harjivan, S. G.; Marzano, C.; Gandin, V.; Marques, M. M. *Organometallics* **2009**, 28, 5412.
- [19] Tarraga, A.; Molina, P.; Curiel, D.; Velasco, M. D. *Organometallics* **2001**, 20, 2145.

(Zhao, X.)