含苯胺基硫脲单元的咔唑衍生物的合成及其对阴离子的识别传感研究

蹇军友 闫柏任 潘顶伍 谭 赞
吕新阳 杜 欢 鲍小平*

(贵州大学精细化工研究开发中心 绿色农药与农业生物工程国家重点实验室培育基地
教育部绿色农药与农业生物工程重点实验室 贵阳 550025)

摘要 以咔唑为起始原料设计合成了含苯胺基硫脲识别单元的咔唑类阴离子受体 **L**。通过 ^1H NMR、 ^{13}C NMR、MS、IR 和元素分析对其结构进行了表征。UV-Vis 和荧光滴定实验表明, 在二甲基亚砜(DMSO)中 **L** 能较好地识别 F^- 、 AcO^- 和 H_2PO_4^- 且对它们表现出强络合作用($K_a > 10^4$ L/mol), 识别过程伴随着肉眼可见的溶液颜色变化和明显的荧光猝灭, 这表明了受体 **L** 可作为阴离子的比色和荧光传感器。有趣的是, 在含水 10% 的 DMSO 中 **L** 能选择性识别 F^- 和 AcO^- ; 在含水 20% 的 DMSO 中 **L** 实现了对 AcO^- 的专一性识别。

关键词 苯胺基硫脲; 咔唑; 氢键; 阴离子识别; 传感

Synthesis, Recognition and Sensing Properties for Anions Based on a Carbazole Derivative Containing Phenylaminothiourea Units

Jian, Junyou Yan, Boren Pan, Dingwu Tan, Zan
Lü, Xinyang Du, Huan Bao, Xiaoping*

(Center for Research and Development of Fine Chemicals, State Key Laboratory Breeding Base of Green Pesticide and Agricultural Bioengineering, Key Laboratory of Green Pesticide and Agricultural Bioengineering, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract A carbazole-based anion receptor (**L**) containing phenylaminothiourea recognition units was designed and synthesized using carbazole as starting compound, and its structure was characterized by ^1H NMR, ^{13}C NMR, MS, IR and elemental analysis. UV-Vis and fluorescence titration experiments indicated that **L** selectively recognized F^- , AcO^- and H_2PO_4^- in DMSO, showing strong interactions ($K_a > 10^4$ L/mol) with these three anions. During the anion recognition process, a naked-eye detectable color change and a distinct fluorescence quenching of **L** were simultaneously observed, indicative of its potential as colorimetric and fluorescent sensors for anions. Interestingly, only F^- and AcO^- could be recognized by **L** in DMSO containing 10% (V/V) H_2O ; a specific recognition of **L** towards AcO^- was realized in DMSO containing 20% (V/V) H_2O .

Keywords phenylaminothiourea; carbazole; hydrogen bond; anion recognition; sensing

鉴于阴离子在化学、生物和环境等领域所起的重要作用, 设计合成具有选择性识别和传感能力的阴离子受体已成为当前超分子化学的一个研究热点^[1,2]。其中, 能将微观的阴离子识别事件转化为宏观易测的溶液颜色或荧光变化的阴离子受体(即阴离子比色/荧光传感器)在检测中具有仪器廉价、操作简单和容易监控等优点, 因而受到了人们的特别关注^[3,4]。氢键型阴离子受体是

目前研究最为广泛的一类阴离子受体, 常见的氢键供体有(硫)脲、酰胺、磺胺、吡咯、吡啶和羟基等单元。与其他氢键供体相比, 氨基硫脲基团能提供更多的 NH 位点参与对阴离子的氢键络合, 但基于该基团的阴离子受体目前报道还很少^[5~10]。

咔唑类化合物易于进行化学修饰, 具有特殊刚性结构和较大共轭体系, 其分子可发蓝色荧光; 更重要的是,

* E-mail: baosp_1980@aliyun.com

Received October 22, 2014; revised December 10, 2014; published online January 6, 2015.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21161005).

国家自然科学基金(No. 21161005)资助项目。

咪唑 9 位 NH 本身即可作氢键供体单元使用, 这些优势使咪唑类阴离子受体化学近年来得以快速发展^[11]. 最近我们课题组^[12]报道了含磺酰脲单元的咪唑类阴离子受体对阴离子的识别性能, 测试表明该受体在 DMSO 中能选择性地识别 F^- 、 AcO^- 和 $H_2PO_4^-$, 但对它们只表现出中等强度的亲和力 ($\approx 10^3$ L/mol). 文献检索表明, 将氨基硫脲单元引入到咪唑分子骨架中来合成具有光学响应的阴离子受体目前还未见报道. 本文以咪唑为起始原料经五步反应合成了含苯胺基硫脲单元为识别位点的阴离子受体 **L**, 合成路线见 Scheme 1. **L** 中咪唑 9 位 NH 和 6 个苯胺基硫脲 NH 可协同起来键联阴离子, 咪唑骨架自身充当信号单元可提供识别过程中的 UV-Vis 和荧光响应. 利用 UV-Vis、荧光和核磁滴定等方法研究了 **L** 在二甲基亚砜(DMSO)及含水 DMSO 中对不同阴离子的识别传感作用, 并提出了 **L** 与 F^- 的可能结合模式.

图式 1 受体 **L** 的合成路线
Scheme 1 Synthesis of receptor **L**

1 结果与讨论

1.1 UV-Vis 光谱滴定

图 1 为在受体 **L** 的 DMSO 溶液中加入 4.0 equiv. 不同阴离子后的吸收光谱变化. 由图 1 可知, 只有 F^- 、 AcO^- 和 $H_2PO_4^-$ 造成 **L** 的吸收光谱发生了明显变化, 其他阴离子(HSO_4^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 N_3^- 、 ClO_4^- 、 Br^- 和 I^-)对 **L** 的吸收光谱无影响. 值得注意的是, **L** 与上述 3 种离子作用后其溶液由无色变为淡黄色(300~450 nm 吸收带显著增强所致), 这实现了对这些阴离子的裸眼检测(图 2). 如图 3 所示, 随着加入的 F^- 浓度不断增加, **L** 在 258 nm 处的吸收峰及在 350 nm 处的肩峰逐渐增强并伴有一定的红移, 其中以 328 nm 为中心的咪唑骨架吸收带增强最为明显. Job 曲线法(图 4)及良好的 1:1 非线性拟合结果(图 3 插图)均证明受体 **L** 与 F^- 在 DMSO 中形成了化学计量比为 1:1 的配合物. 由图 5 可知, **L** 对

F^- 的检测限为 $6.81 \mu\text{mol/L}$ ^[13]. 向 **L** 的 DMSO 溶液中加入 AcO^- 或 $H_2PO_4^-$ 后, 其吸收光谱变化与 F^- 相似, **L** 对这两种离子的检测限分别为 4.58 和 $4.80 \mu\text{mol/L}$.

图 1 受体 **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) 在 DMSO 中与 4.0 equiv. 不同阴离子作用后的 UV-Vis 变化图

Figure 1 UV-Vis spectral changes of DMSO solution of receptor **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) upon addition of 4.0 equiv. of different anions

图 2 受体 **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) 的 DMSO 溶液加入 5.0 equiv. 不同阴离子后的颜色变化

Figure 2 Color changes of DMSO solution of receptor **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) upon addition of 5.0 equiv. different anions

图 3 受体 **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) 在 DMSO 中与 F^- 作用后的 UV-Vis 光谱变化

Figure 3 UV-Vis spectral changes of receptor **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) in DMSO upon addition of F^-

The inset was the nonlinear curve fitting of the absorbance at 328 nm against added F^- using a 1:1 binding model

为探求受体 **L** 的实际用途并进一步改善其识别选择性, 我们又在含水 DMSO 中考察了 **L** 对阴离子的识别

图4 受体 **L** 与 F^- 作用的 Job 曲线(总浓度为 $40 \mu\text{mol/L}$)

Figure 4 Job's plot between **L** and F^- with a total concentration of $40 \mu\text{mol/L}$

图5 在 DMSO 中受体 **L** 对 F^- 的检测限

Figure 5 Determination of limit of detection of **L** for F^- in DMSO

作用。在含水 10% 的 DMSO 中, **L** 能选择性识别 F^- 和 AcO^- (图 6); 当测试体系中含水量提升至 20% 时, **L** 对 AcO^- 表现出专一性识别作用。

1.2 荧光光谱滴定

考虑到咪唑类化合物具有良好的荧光发射性能, 受体 **L** 对阴离子的识别作用接下来采用荧光光谱法加以研究。当激发波长为 300 nm 时, 自由 **L** 在 333 nm 处有一明显的荧光发射峰(源于咪唑骨架)。如图 7 和图 8 所示, 加入 F^- 、 AcO^- 和 H_2PO_4^- 后 **L** 的荧光出现明显猝灭并伴随着肉眼可见的荧光颜色变化; 其它七种阴离子的加入对 **L** 的荧光影响几乎可以忽略。图 9 为受体 **L** 在 DMSO 中与 F^- 作用后的荧光光谱变化。随着加入的 F^- 浓度不断增加, **L** 在 333 nm 处的荧光逐渐减弱; 但其发射峰位置没有任何改变, 这表明 F^- 诱导的荧光猝灭属于典型的光诱导电子转移(PET)机理^[14]。 **L** 与 F^- 作用后形成的超分子体系电子云密度增加, 这使其向激发态咪唑的电子转移变得更容易, 从而诱导了荧光猝灭;

图6 在含水 10% 的 DMSO 中受体 **L** ($20 \mu\text{mol/L}$) 与 16.5 equiv. 不同阴离子作用后的 UV-Vis 光谱变化

Figure 6 UV-Vis spectral changes of receptor **L** ($20 \mu\text{mol/L}$) upon addition of 16.5 equiv. of different anions in DMSO containing 10% (V/V) H_2O

二者作用达到平衡后, **L** 荧光猝灭达 34%。加入 AcO^- 或 H_2PO_4^- 后, **L** 产生的荧光变化趋势与 F^- 类似。由图 10 可知, **L** 在 333 nm 处的荧光强度之比(I_0/I)与 F^- 的浓度 ($10 \sim 80 \mu\text{mol/L}$) 呈现出良好的线性关系, 这表明该浓度范围可用于 F^- 的定量检测。

图7 受体 **L** ($20 \mu\text{mol/L}$) 在 DMSO 中与 3.5 equiv. 不同阴离子作用后的荧光强度变化

Figure 7 Fluorescent changes of receptor **L** ($20 \mu\text{mol/L}$) in DMSO after addition of 3.5 equiv. of various anions

图8 在受体 **L** ($50 \mu\text{mol/L}$) 的 DMSO 溶液加入 5.0 equiv. 不同阴离子后的荧光颜色变化

Figure 8 Fluorescent color changes of DMSO solution of receptor **L** ($50 \mu\text{mol/L}$) upon addition of 5.0 equiv. of different anions under a UV-lamp ($\lambda_{\text{ex}} = 365 \text{ nm}$)

图9 受体 **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) 在 DMSO 中与 F^- 作用后的荧光变化
Figure 9 Fluorescent changes of receptor **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) upon addition of F^- in DMSO

The inset was the nonlinear curve fitting of the intensity at 333 nm against added F^- using a 1:1 binding model

图10 受体 **L** 在 333 nm 处的 I_0/I 与 $[\text{F}^-]$ 之间的线性关系
Figure 10 A linear relationship between I_0/I at 333 nm of **L** and the concentration of F^-

在含水 10% 的 DMSO 中, F^- 和 AcO^- 仍能诱导 **L** 发生一定的荧光猝灭(图 11); 但当测试体系中含水量提升至 20% 时, **L** 则只对 AcO^- 表现出可测的荧光响应。

图11 受体 **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) 在含水 10% 的 DMSO 中与 15 equiv. 不同阴离子作用后的荧光变化

Figure 11 Fluorescent changes of receptor **L** (20 $\mu\text{mol/L}$) in DMSO containing 10% H_2O after addition of 15 equiv. of various anions

1.3 确定结合常数

在超分子体系中, 若主客体之间形成化学计量比为 1:1 的配合物, 可通过以下方程进行非线性拟合求出结合常数^[15].

$$X = X_0 + (X_{\text{lim}} - X_0) / 2C_0 \{ (C_H + C_G + 1/K_a) - [(C_H + C_G + 1/K_a)^2 - 4C_H C_G]^{1/2} \}$$

其中, C_H 为受体浓度, C_G 为加入的阴离子浓度, K_a 为结合常数, X_0 和 X 分别为自由受体和加入阴离子后受体的吸光强度(荧光滴定时则代表荧光强度). 若非线性拟合求出的相关系数(R)大于 0.99, 则证明受体与阴离子形成了 1:1 型的配合物^[16~22]. 表 1 为通过 UV-Vis 和荧光两种滴定法在不同体系中所求出的 **L** 与阴离子的结合常数及相关系数. 从中可知, 在 DMSO 中受体 **L** 与 AcO^- 、 F^- 和 H_2PO_4^- 均形成了 1:1 型配合物且对这三种离子表现出强络合作用($K_a > 10^4$ L/mol); 与我们^[12]最近报道的咪唑磺酰脲受体相比, **L** 对上述三种阴离子的 K_a 增强都超过 15 倍(H_2PO_4^- 达 25 倍, 基于 UV-Vis 拟合结果). 两种不同光谱滴定法求出的亲和性顺序均为 $\text{AcO}^- > \text{F}^- > \text{H}_2\text{PO}_4^- \geq$ 其他阴离子, 这种顺序主要是由相关阴离子的氢键接受能力所决定. 有趣的是, 在含水 10% 的 DMSO 中 **L** 对 F^- 和 AcO^- 的结合常数仍大于 10^4 L/mol; 在含水 20% 的 DMSO 中 AcO^- 与 **L** 也有中等强度的亲和力($K_a > 10^3$ L/mol).

1.4 核磁滴定

为探讨受体 **L** 与阴离子的识别机理, 我们又通过核磁滴定法做了进一步研究. 如图 12 所示, 在 $\text{DMSO}-d_6$ 中自由 **L** 在 δ 10.19、10.16、10.06 和 8.15 处出现四组活泼 NH 信号(D_2O 交换实验证实), 分别归属于咪唑 $\text{NH}(\text{H}_1)$ 、硫脲 $\text{NH}(\text{H}_2)$ 、硫脲 $\text{NH}(\text{H}_3)$ 和苯胺基 $\text{NH}(\text{H}_4)$ 质子. 加入 0~0.9 equiv. 的 F^- 后, H_2 信号峰缓慢向低场移动并最终与 H_1 重合, H_3 和 H_4 的信号峰积分强度逐渐减弱(无明显位移); 继续加入 F^- (0.9~6.5 equiv.) 后, 合并后的 H_1 和 H_2 新峰位置不变, H_4 信号峰强度继续减弱, H_3 信号峰消失. 在此过程中, 咪唑环上 H_5 和 H_6 分别向高场移动了 δ 0.24 和 0.32, 末端的苯环芳氢(H_7 、 H_8 和 H_9) 也出现了不同程度的高场移动(δ 0.06~0.11). 值得一提的是, 在 6.5 equiv. 的 F^- 存在下, δ 16.10 处未出现归属于 $[\text{HF}_2^-]$ 的特征信号峰, 上述现象表明在 0~6.5 equiv. 的 F^- 浓度范围内 **L** 与 F^- 之间只建立了分子间氢键作用而未发生 NH 去质子化. 综上所述, **L** 中 7 个 NH 单元都参与了对 F^- 的氢键络合, 这影响了 **L** 的分子内电荷转移(ICT)过程, 从而导致 **L** 发生了相应的 UV-Vis 和荧光光谱变化. 根据以上实验结果, 提出了受体 **L** 与 F^- 的可能结合模式(图 13). 加入 AcO^- 后, 受体 **L** 中 NH 和芳

表1 受体 **L** 在不同体系中与不同阴离子的结合常数(K_a)和相关系数(R)Table 1 Association constants (K_a) and correlation coefficients (R) of receptor **L** with different anions in different solvents

Anion ^a	$K_a/(10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1})$, R (UV-Vis titration) ^b			$K_a/(10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1})$, R (Fluorescence titration) ^b		
	DMSO	10% H ₂ O-DMSO	20% H ₂ O-DMSO	DMSO	10% H ₂ O-DMSO	20% H ₂ O-DMSO
F ⁻	(6.70 ± 0.66), 0.9958	(2.13 ± 0.08), 0.9990	ND ^d , —	(7.71 ± 1.45), 0.9941	(2.70 ± 0.47), 0.9932	ND ^d , —
AcO ⁻	(7.08 ± 0.71), 0.9973	(3.61 ± 0.15), 0.9988	(0.33 ± 0.03), 0.9967	12.0 ± 1.6, 0.9943	(4.18 ± 0.51), 0.9975	(0.65 ± 0.01), 0.9897
H ₂ PO ₄ ⁻	(4.35 ± 0.16), 0.9987	ND ^d , —	ND ^d , —	(7.07 ± 0.98), 0.9920	ND ^d , —	ND ^d , —
Others ^c	ND ^d	ND ^d	ND ^d	ND ^d	ND ^d	ND ^d

^a All the anions were added as their tetrabutylammonium salts. ^b All the values of K_a and R were determined through the method of nonlinear curve fitting. ^c Others included Cl⁻, Br⁻, I⁻, NO₃⁻, N₃⁻, HSO₄⁻ and ClO₄⁻. ^d No or very slight spectral change was seen.

氢信号变化情况与 F⁻ 相似; 但加入 H₂PO₄⁻ 后, 咪唑环 H₆ 信号向低场移动了 δ 0.14, 其余信号峰变化均与 F⁻ 类似, 这表明咪唑环 H₆ 也通过跨空间效应参与了对 H₂PO₄⁻ 的氢键络合。

图12 在 DMSO-*d*₆ 中受体 **L** (2.0 mmol/L) 与 F⁻ 作用后的 ¹H NMR 变化图Figure 12 ¹H NMR spectra of receptor **L** (2.0 mmol/L) in DMSO-*d*₆ in the absence and presence of F⁻ 图13 受体 **L** 与 F⁻ 在 DMSO 中的可能作用模式Figure 13 The possible binding model between receptor **L** and F⁻ in DMSO

2 结论

我们将氨基硫脲作为阴离子识别单元引入到咪唑骨架中设计合成了受体 **L**, 通过 UV-Vis、裸眼观测、荧光和核磁滴定研究了 **L** 在 DMSO 中对不同阴离子的识别传感性质. 实验结果表明, **L** 能协同使用咪唑 9 位 NH 及苯胺基硫脲 NH 对 F⁻、AcO⁻ 和 H₂PO₄⁻ 产生选择性强络合作用 ($K_a > 10^4 \text{ L/mol}$), 识别过程伴随着肉眼可见的溶液颜色变化和明显荧光猝灭, 这表明 **L** 可同时作为阴离子的比色和荧光传感器加以使用. 此外, 在含水 10% 的 DMSO 中 **L** 能选择性识别 F⁻ 和 AcO⁻; 在含水 20% 的 DMSO 中 **L** 则表现出对 AcO⁻ 的专一性识别。

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

北京普析通用仪器有限公司的 TU-1900 型 UV-Vis 分光光度计; Horiba Scientific 公司的 Fluoromax-4 型荧光光谱仪; JEOL-ECX 500 NMR 核磁共振波谱仪 (TMS 内标); Agilent LC/MSD Trap VL 型液质联用仪; Elementar Vario-III CHN 型元素分析仪; Shimadzu IR Prestige-21 型红外光谱仪; 北京泰克仪器有限公司的 XT-4 型显微熔点仪 (温度计未校正). 干二氯甲烷、乙腈和三乙胺由氯化钙回流除水制备, 其他试剂和溶剂均为市售分析纯. 所用阴离子均为其四正丁基铵盐, 1,8-二氨基-3,6-二氯咪唑 (**2**) 的合成参照文献 [23].

3.2 实验方法

3.2.1 3,6-二氯-1,8-二异硫氰酸酯咪唑 (**1**) 的合成

向溶有 500 mg (1.89 mmol) **2** 的 100 mL 干二氯甲烷和 10 mL 干乙腈混合液中加入 0.58 mL (7.55 mmol) 硫光气后, 将上述体系冰浴冷却至 0 °C 后缓慢滴加 1.3 mL (9.43 mmol) 干三乙胺, 滴加完毕后恢复至室温继续反应 4 h. 停止反应后向上述混合物中加入 150 mL 饱和食盐

水淬灭过量硫光气,分出有机层后用无水硫酸镁干燥,浓缩后柱层析分离[淋洗剂: $V(\text{石油醚}):V(\text{乙酸乙酯})=100:1$]得淡黄色固体 432 mg, 收率 65.5%. m.p. 203~206 °C; ^1H NMR (500 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 12.77 (s, 1H), 8.38 (s, 2H), 7.82 (s, 2H); ^{13}C NMR (125 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 136.2, 134.0, 126.1, 125.0, 124.6, 121.2, 115.8; IR (KBr) ν : 2922, 2152, 2027, 1483, 1303, 852, 578 cm^{-1} .

3.2.2 受体[3,6-二氯-1,8-二(苯胺基硫脲)咔唑](**L**)的合成

在一单口烧瓶中加入中间体 **1** 100 mg (0.28 mmol)、10 mL 干乙腈和 70 μL (0.7 mmol) 苯肼, 氮气保护下加热回流 2 h 后, 停止反应后冷却至室温. 抽滤, 用乙腈和乙醇洗涤滤渣, 干燥后得灰色固体 88 mg, 收率 55.6%. m.p. 229~231 °C; ^1H NMR (500 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 10.20 (s, 1H, H_1), 10.16 (s, 2H, H_2), 10.06 (s, 2H, H_3), 8.19 (s, 2H, H_5), 8.16 (s, 2H, H_4), 7.38 (s, 2H, H_6), 7.29 (t, $J=7.6$ Hz, 4H, H_7), 6.89 (d, $J=7.9$ Hz, 4H, H_8), 6.85 (t, $J=7.2$ Hz, 2H, H_9); ^{13}C NMR (125 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 182.4, 148.5, 135.5, 129.6, 125.8, 125.7, 125.2, 123.4, 120.4, 118.6, 113.9; IR (KBr) ν : 3294, 3174, 1600, 1543, 1506, 1479, 1304, 750 cm^{-1} ; MS (ESI) m/z : 588.2 $[\text{M}+\text{Na}]^+$. Anal. calcd for $\text{C}_{26}\text{H}_{21}\text{Cl}_2\text{N}_7\text{S}_2$: C 55.12, H 3.74, N 17.31; found C 54.73, H 4.07, N 17.08.

辅助材料(Supporting Information) 本文所涉及到的其它 UV-Vis、荧光和核磁滴定图谱. 这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载.

References

- [1] Gale, P. A. *Chem. Soc. Rev.* **2010**, 39, 3746.
- [2] Bondy, C. R.; Loeb, S. J. *Coord. Chem. Rev.* **2003**, 240, 77.

- [3] Beer, P. D.; Gale, P. A. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2001**, 40, 486.
- [4] Zhou, Y.; Zhang, J. F.; Yoon, J. *Chem. Rev.* **2014**, 114, 5511.
- [5] Pandurangan, K.; Kitchen, J. A.; Gunnlaugsson, T. *Tetrahedron Lett.* **2013**, 54, 2770.
- [6] Liu, B.; Tian, H. *Chem. Lett.* **2005**, 34, 686.
- [7] Gunnlaugsson, T.; Kruger, P. E.; Jensen, P.; Tierney, J.; Ali, H. D. P.; Hussey, G. M. *J. Org. Chem.* **2005**, 70, 10875.
- [8] Zhang, Y.; Xu, W.; Yao, H.; Wei, T. *Chin. J. Chem.* **2006**, 24, 1406.
- [9] Wei, W.; Zhang, Y.; Wei, T. *Chin. J. Chem.* **2008**, 26, 1935.
- [10] Cao, C.; Wei, T.; Wang, A.; Lin, Q.; Yao, H.; Zhang, Y. *Prog. Chem.* **2011**, 23, 1069 (in Chinese).
(曹成, 魏太保, 王爱霞, 林奇, 姚虹, 张有明, 化学进展, **2011**, 23, 1069.)
- [11] Liu, Y.; Zhang, F.; Zou, L.; Jian, J.; Bao, X. *Chin. J. Org. Chem.* **2013**, 33, 2485 (in Chinese).
(刘勇, 张峰, 邹林波, 蹇军友, 鲍小平, 有机化学, **2013**, 33, 2485.)
- [12] Zhang, F.; Tan, Z.; Yan, B.; Pan, D.; Bao, X. *Chin. J. Org. Chem.* **2014**, 34, 2499 (in Chinese).
(张峰, 谭赞, 闫柏任, 潘顶伍, 鲍小平, 有机化学, **2014**, 34, 2499.)
- [13] Chen, J.; Liu, C.; Zhang, J.; Ding, W.; Zhou, M.; Wu, F. *Chem. Commun.* **2013**, 49, 10814.
- [14] De Silva, A. P.; Gunaratne, H. Q. N.; Gunnlaugsson, T.; Huxley, A. J. M.; McCoy, C. P.; Rademacher, J. T.; Rice, T. E. *Chem. Rev.* **1997**, 97, 1515.
- [15] Valeur, B.; Pouget, J.; Bourson, J.; Kaschke, M.; Ernsting, N. P. *J. Phys. Chem.* **1992**, 96, 6545.
- [16] Bourson, J.; Pouget, J.; Valeur, B. *J. Phys. Chem.* **1993**, 97, 4552.
- [17] Schneider, H. J.; Kramer, R.; Simova, S.; Schneider, U. *J. Am. Chem. Soc.* **1988**, 110, 6442.
- [18] Wu, F.-Y.; Li, Z.; Wen, Z.-C.; Zhou, N.; Zhao, Y.-F.; Jiang, Y.-B. *Org. Lett.* **2002**, 4, 3203.
- [19] Liu, S.-Y.; Fang, L.; He, Y.-B.; Chan, W.-H.; Yung, K.-T.; Cheng, Y.-K.; Yang, R.-H. *Org. Lett.* **2005**, 7, 5825.
- [20] Bao, X.; Yu, J.; Zhou, Y. *Sens. Actuators B* **2009**, 140, 467.
- [21] Bao, X.; Zhou, Y. *Sens. Actuators B* **2010**, 147, 434.
- [22] Zhou, Y.-H.; Zheng, P.-C.; Bao, X.-P. *Supramol. Chem.* **2014**, 26, 761.
- [23] Chmielewski, M. J.; Charon, M.; Jurczak, J. *Org. Lett.* **2004**, 6, 3501.

(Qin, X.)