

# 基于 Fluoral-P 衍生物的新型甲醛探针的光谱特性研究

曹思敏, 刘阳依, 周中能, 陈缙泉, 徐建华\*

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

**摘要** 甲醛(HCHO)是目前室内空气主要污染物之一, 长期暴露在过量甲醛环境中会对人的眼睛、皮肤、呼吸器官等产生严重危害, 甚至可能导致神经系统功能的丧失<sup>[1]</sup>以及耳、鼻和喉癌<sup>[2]</sup>。因此, 快速、高效、准确地实现甲醛气体的检测, 对于保障人类健康具有重大的意义。当前有很多种方法可以用于甲醛气体的检测。例如, 气相色谱法(GC)<sup>[3]</sup>和高效液相色谱法(HPLC)<sup>[4]</sup>, 色谱仪器能够提供低至  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  级别的浓度检测, 但是仪器较为大型笨重, 并且检测非常耗时, 难以实现实时连续地对甲醛气体浓度的监测; 基于气敏薄膜的半导体气体传感器具备响应时间短, 稳定性高以及可连续监测等优点, 然而这类传感器通常检测限较高( $>300 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 并且选择性差<sup>[5]</sup>; 基于酶的生物传感器通常有较好的灵敏性和选择性, 但是其热稳定性通常较差, 这严重限制了其应用<sup>[6]</sup>。比色法和荧光法由于响应速度快, 灵敏度高, 检测限低, 选择性好以及传感器简单便宜等特点, 被广泛地应用于甲醛气体传感器的设计中去<sup>[7-9]</sup>。这种方法是利用探针分子与甲醛发生特异性结合, 形成新的物质, 从而引起探针吸收光谱的变化或者发出荧光, 实现对甲醛的定量测量。Descamps 等使用 4-氨基-3-戊烯-2-酮(Fluoral-P)作为探针分子, 设计了一种手提式的甲醛检测仪<sup>[10]</sup>。Fluoral-P 是一种烯氨酮结构的物质, 能与甲醛特异性结合形成环状化合物 3,5-diacetyl-1,4-dihydrolutidine(DDL)。由于 Fluoral-P 自身的特征吸收带与 DDL 的吸收带相隔较远, 同时与甲醛结合后能够产生大斯托克斯位移的荧光峰, 因而被广泛应用于甲醛检测。然而, Fluoral-P 在空气中有水分子存在的情况下极其不稳定, 容易发生水解, 形成乙酰丙酮和氨气, 严重限制了 Fluoral-P 在甲醛检测上的应用<sup>[10]</sup>。采用紫外可见吸收光谱、稳态荧光光谱和气相色谱质谱(GC-MS)技术研究了 Fluoral-P 的一种衍生物, 4-氨基-1,1,1-三氟-3-丁烯-2-酮(3F-FP), 与甲醛溶液相互作用的光学和化学特性。实验发现, Fluoral-P 的水解速率为  $k=1.5559 \times 10^{-5} \text{ L}^2 \cdot \text{mol}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 然而, 3F-FP 具有非常低(接近 0)的水解速率, 水溶液环境下表现出了极好的稳定性。同时, 3F-FP 可以与甲醛反应生成一种类似 DDL 的环状化合物 6F-DDL, 使得 3F-FP 在 430 nm 处出现了一个新的吸收带, 并且在峰值 489 nm 处的荧光强度也得到了明显增强, 增强因子为 12, 在峰值处的荧光增长速率为  $k=7.881 \times 10^3 \text{ h}^{-1}$ 。下一步我们将使用多孔玻璃作为 3F-FP 探针的载体, 不仅可以提高 3F-FP 分子浓度, 也可以增加探针分子与甲醛的接触表面积<sup>[11]</sup>, 荧光增长速率还可以得到进一步的提高, 因此 3F-FP 分子在甲醛气体检测领域具备了良好的应用前景。

**关键词** 甲醛探针; Fluoral-P; 3F-FP; 水解速率; 荧光光谱

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0828-06

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

双光束紫外-可见分光光度计(TU1901, 北京普析通用); 稳态荧光光谱仪(FluoroMax-4, Horiba); 气相色谱质谱联用仪(Agilent 7890B-5977A, 美国安捷伦)。

使用的所有化学试剂均商业购买且未经任何提纯处理。甲醛溶液(37%)购自上海麦克林生化科技有限公司; 4-氨基-3-戊烯-2-酮(Fluoral-P, 98%), 4-氨基-1,1,1-三氟-3-丁烯-2-酮(3F-FP, 95%)和乙腈(HPLC 纯)均购自百灵威科技有限公司; 冰醋酸购自于国药集团化学试剂有限公司; 实验所用的水均为  $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$  去离子水。

### 1.2 方法

收稿日期: 2018-02-05, 修订日期: 2018-06-10

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(11674101)资助

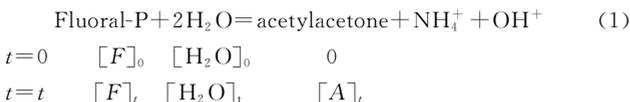
作者简介: 曹思敏, 1993 年生, 华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室硕士研究生

e-mail: 1306289306@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: jhxu@phy.ecnu.edu.cn

在酸性环境下, Fluoral-P 与甲醛反应速率更快<sup>[11]</sup>, 因而 Fluoral-P、3F-FP 与甲醛反应的相关实验均在酸性环境下进行。将乙腈与醋酸水溶液 (pH = 1.73) 按体积比 5 : 1 混合, 所有溶液均用该混合溶剂配置。配制  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Fluoral-P 和 3F-FP 溶液各 1 mL, 间隔一定时间测量吸收光谱, 得到 Fluoral-P 和 3F-FP 的水解过程; 配置  $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  3F-FP 溶液 1 mL, 加入  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醛溶液 1 mL, 反应 166 h 后测量 GC-MS; 配置上述相同 3F-FP 和甲醛溶液, 混合均匀后, 间隔一定时间测量紫外可见吸收光谱和稳态荧光光谱。采用 2 mm 石英比色皿, 荧光光谱使用 443 nm 激发。

### 1.3 Fluoral-P 水解速率计算



Fluoral-P 的水解过程可用式(1)表示, Fluoral-P 水解后生成产物乙酰丙酮<sup>[12]</sup>。其中  $[F]_0$  和  $[F]_t$  分别表示初始时刻和  $t$  时刻 Fluoral-P 的浓度,  $[\text{H}_2\text{O}]_0$  和  $[\text{H}_2\text{O}]_t$  分别表示初始时刻和  $t$  时刻水的浓度,  $[A]_t$  表示  $t$  时刻水解产物乙酰丙酮的浓度。根据反应方程可以得到  $t$  时刻乙酰丙酮和水的浓度分别为  $[A]_t = [F]_0 - [F]_t$  和  $[\text{H}_2\text{O}]_t = [\text{H}_2\text{O}]_0 - 2([F]_0 - [F]_t)$ 。

根据实验方法, 可以得到 Fluoral-P 初始浓度为  $[F]_0 = 200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} = 2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而水分子初始浓度为  $[\text{H}_2\text{O}]_0 = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}} \times V} = 6.1728 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \gg 2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = [F]_0$ , 考虑到水分子浓度远远大于 Fluoral-P 浓度, 因此水解过程中水的消耗可忽略不计, 该三级反应则可简化为一级反应来处理。水解反应动力学方程可用式(2)表示

$$\frac{d[F]_t}{dt} = -k[F]_t[\text{H}_2\text{O}]_0^2 \quad (2)$$

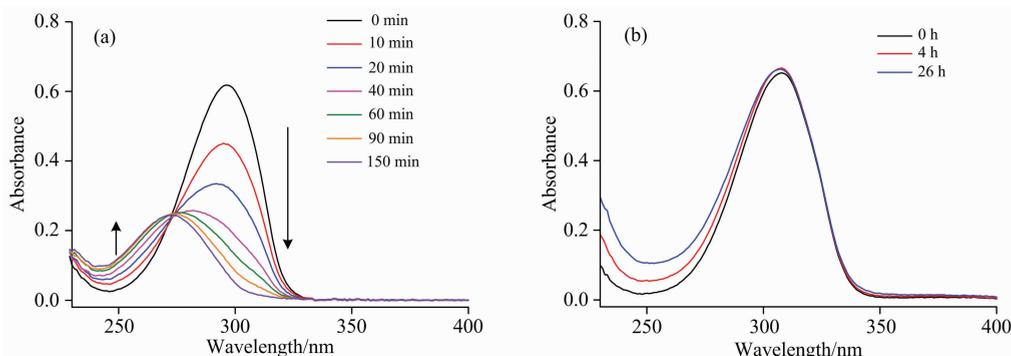


图 1  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (a) Fluoral-P 和 (b) 3F-FP 在室温环境、乙腈/醋酸 (pH 1.73) = 5/1 (V/V) 的混合溶液体系下的吸收光谱随时间的变化

Fig. 1 Absorption spectra evolution of  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (a) Fluoral-P and (b) 3F-FP at room temperature in acetonitrile/acetic acid solution (pH 1.73) = 5/1 (V/V)

随后, 为了定量描述 Fluoral-P 和 3F-FP 水解速率的差异, 我们计算了其水解反应速率常数  $k$ 。对于 Fluoral-P 分子, 我们采用其在 296 nm 峰值处的数据进行处理, 由于在 296 nm 处, Fluoral-P 和乙酰丙酮均具有较高的消光系数,

式中,  $k$  为 Fluoral-P 水解速率常数, 求解该微分方程得到 Fluoral-P 的浓度随时间的函数

$$[F]_t = [F]_0 e^{-k[\text{H}_2\text{O}]_0^2 t} + c \quad (3)$$

考虑到 Fluoral-P 和水解产物乙酰丙酮的吸收光谱存在重叠, 则吸光度应同时考虑两种物质的共同贡献, 设 Fluoral-P 和乙酰丙酮在同一波长处的消光系数分别为  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ , 则吸光度可表示为

$$A = \epsilon_1 [F]_t l + \epsilon_2 ([F]_0 - [F]_t) l \quad (4)$$

式中,  $l$  为吸收厚度。

结合式(3)和式(4)可用 Matlab 对吸光度变化进行拟合, 从而得到 Fluoral-P 水解速率常数  $R$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Fluoral-P 与 3F-FP 水解速率比较

为了比较 Fluoral-P 和 3F-FP 水解速率的差异, 首先研究了 Fluoral-P 和 3F-FP 在酸性环境下吸收光谱随时间的变化。Fluoral-P 分子在酸性环境下极易发生水解生成产物乙酰丙酮, 其对应的特征吸收带分别位于 300 nm<sup>[13]</sup> 和 273 nm<sup>[14]</sup> 处。图 1(a) 是 Fluoral-P 在不同时间测得的吸收光谱。初始时刻, 吸收峰位于 296 nm 处, 随着水解时间的增加, 296 nm 处的吸收峰逐渐下降, 并且峰值逐渐蓝移。120 min 后, 吸收峰蓝移至 273 nm 处, 随后基本保持不变。图 1(a) 表明在该溶液环境中, Fluoral-P 发生了水解反应生成乙酰丙酮, 从而引起吸收峰的蓝移。图 1(b) 是 3F-FP 在不同时间测得的吸收光谱。从图中可以看出, 初始时刻, 其吸收峰位于 308 nm 处, 与文献报道相一致<sup>[15]</sup>。在随后的 26 h 内, 其吸收峰位置始终保持不变, 整个吸收光谱也只有微小变化, 这表明在 26 h 内, 3F-FP 分子几乎没有发生水解, 表现出了较好的稳定性。

两种物质对 296 nm 处的吸光度贡献都需要考虑。水解反应初始时刻, 溶液体系中有  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Fluoral-P, 而 160 min 时 Fluoral-P 基本完全水解, 溶液体系中有  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  乙酰丙酮。分别利用在 0 和 160 min 时的吸收光谱计算

Fluoral-P 和乙酰丙酮在 296 nm 处的消光系数  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ 。计算得到  $\epsilon_1 = 15\,450 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  和  $\epsilon_2 = 2\,000 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，与文献报道数据相近<sup>[16-17]</sup>。根据式(3)和式(4)，我们对 296 nm 处的吸光度数值进行拟合，得到 Fluoral-P 浓度随时间变化的曲线如图 2(a)所示。从图中可以看出，拟合曲线与实验数据基本吻合，拟合得到 Fluoral-P 水解速率常数为  $k = 9.335\,5 \times 10^{-4} \text{ L}^2 \cdot \text{mol}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} = 1.555\,9 \times 10^{-5} \text{ L}^2 \cdot \text{mol}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $R^2 = 0.997$ )。图 2(b) 是 3F-FP 浓度随时间的变化曲线，在 26 h 内，3F-FP 浓度基本没有明显改变，无法进行拟合，但可以看出 3F-FP 对应着一个极小的水解速率常数，接近 0。

## 2.2 3F-FP 与甲醛反应前后 GC-MS 的比较

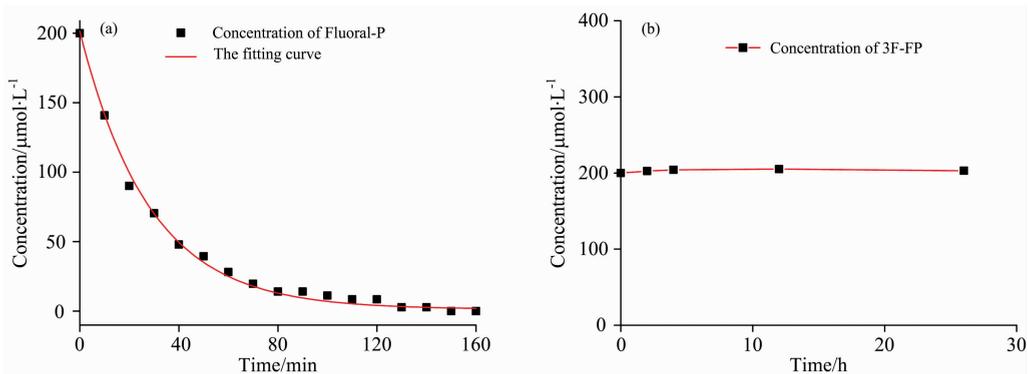


图 2 (a) Fluoral-P 和 (b) 3F-FP 在室温环境、乙腈/醋酸 (pH 1.73) = 5/1 (V/V) 的混合溶液体系下的浓度随时间的变化

Fig. 2 Concentrations of (a) Fluoral-P and (b) 3F-FP vs. time at room temperature in acetonitrile/acetic acid solution (pH 1.73) = 5/1 (V/V)

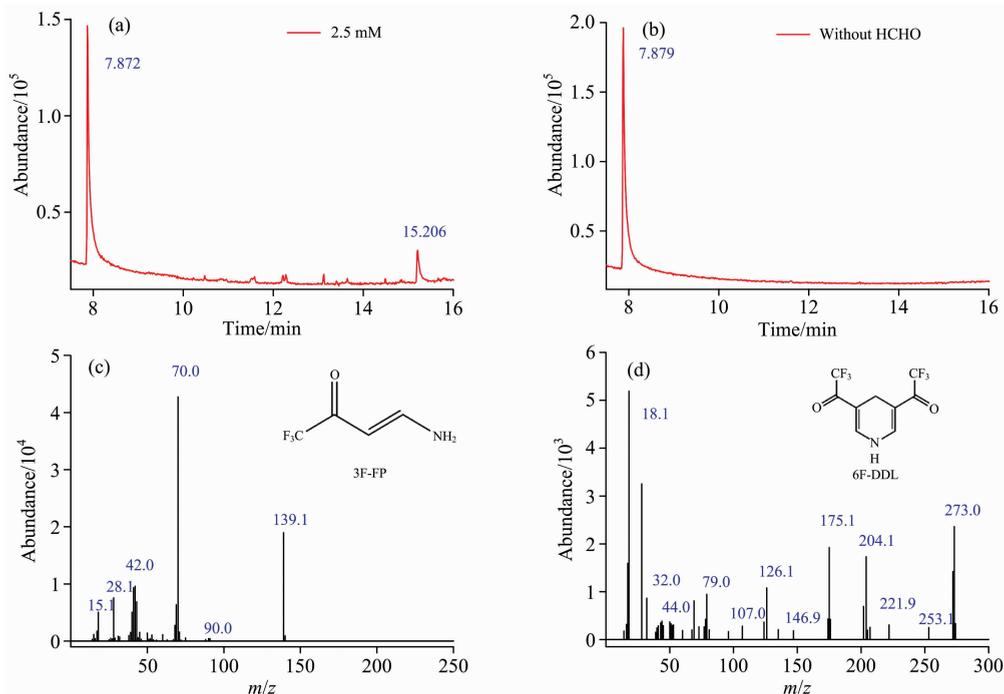


图 3  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  3F-FP 中分别 (a) 加入  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醛和 (b) 不加入甲醛，在室温环境、乙腈/醋酸 (pH 1.73) = 5/1 (V/V) 的混合溶液体系下反应 166 h 后的 GC-MS，(c) 和 (d) 分别是其在 7.879 和 15.210 min 所对应的质谱

Fig. 3 GC-MS of  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  3F-FP (a) with  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCHO and (b) without HCHO after 166 hours' reaction at room temperature in acetonitrile/acetic acid solution (pH 1.73) = 5/1 (V/V); (c) and (d) are the corresponding mass spectra at 7.879 and 15.210 min, respectively

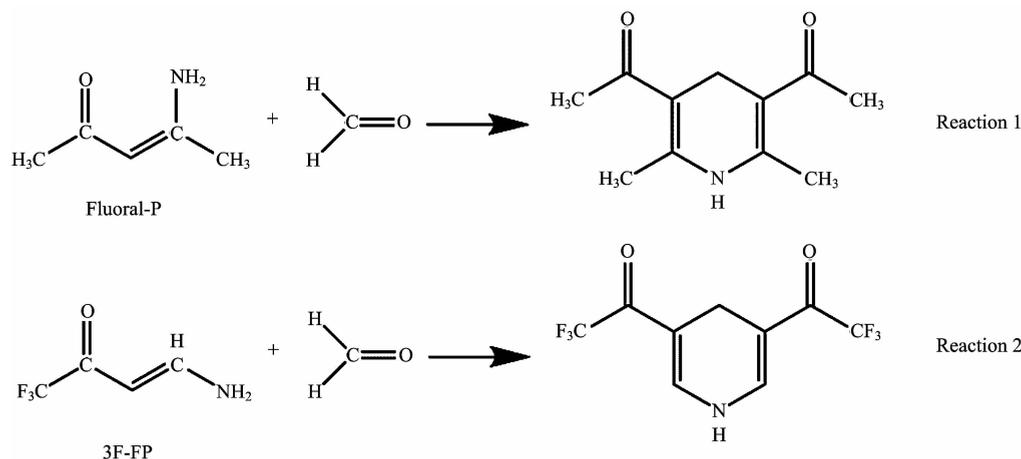


示意图 1 反应物 (Fluoral-P 和 3F-FP) 以及其与甲醛反应形成的二甲基吡啶衍生物的化学结构  
 Scheme 1 Chemical structures of reagents (Fluoral-P and 3F-FP) and their transformation into lutidine derivatives after reaction with HCHO

### 2.3 甲醛对 3F-FP 吸收光谱和荧光光谱的影响

我们进一步研究了甲醛对 3F-FP 紫外可见吸收光谱和荧光光谱的影响。图 4(a) 是向  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  3F-FP 中加入  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醛后, 在不同时刻测得的吸收光谱。可以看到, 随着时间的增加, 在  $430 \text{ nm}$  左右处出现了一个新的吸收带, 并且逐渐上升。图 4(b) 是  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  3F-FP 中加入  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醛后, 在不同时刻测得的荧光光谱。可

以看到, 初始时刻在  $489 \text{ nm}$  处有一个相对较弱的荧光峰, 随后, 这一荧光峰随时间增加而明显升高。166 h 后,  $489 \text{ nm}$  处的荧光强度增长到初始时刻的 12 倍以上。而没有加入甲醛时, 无论是吸收光谱还是荧光光谱在 166 h 内均没有明显改变。图 4(c) 是实验组和对照组在  $443 \text{ nm}$  处的吸光度随时间变化的比较, 加入甲醛的一组, 其吸光度随时间增加而明显增加, 并且曲线呈现出线性增长趋势。而没有加入甲醛的

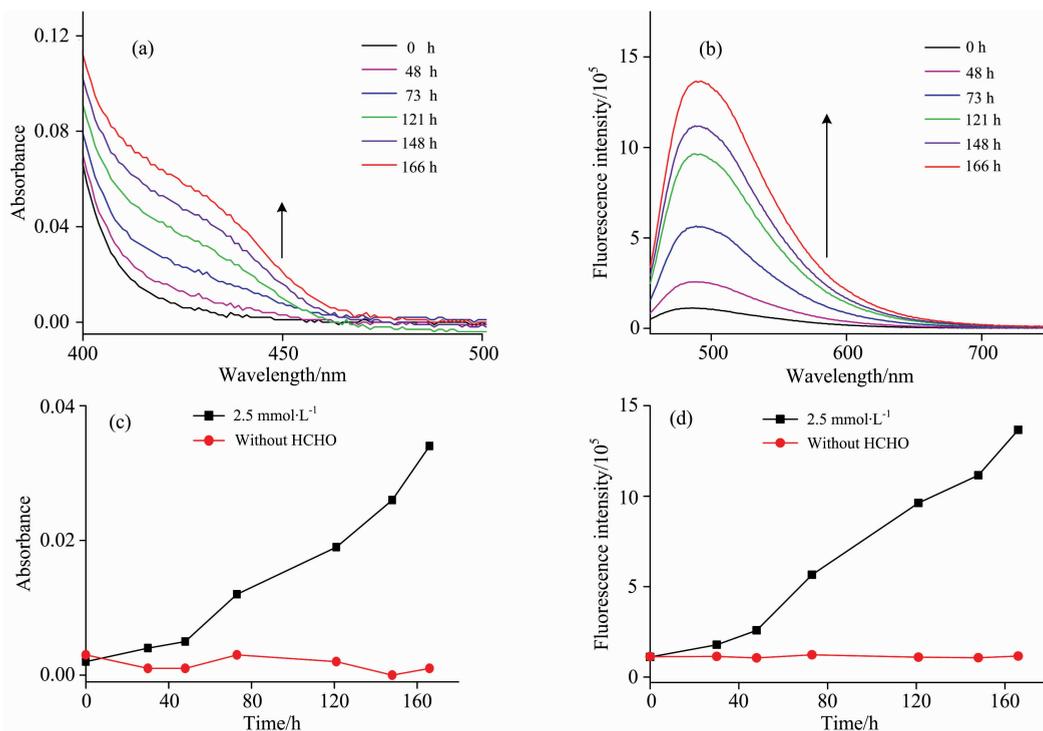


图 4  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  3F-FP 和  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醛在室温环境、乙腈/醋酸 ( $\text{pH} 1.73$ ) = 5/1 (V/V) 的混合溶液体系下的 (a) 吸收光谱和 (b) 荧光光谱随时间的变化; (c) 和 (d) 分别是吸收光谱在  $443 \text{ nm}$  和荧光光谱在  $489 \text{ nm}$  处的强度变化

Fig. 4 (a) Absorption and (b) fluorescence spectra evolution of  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  3F-FP with  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCHO at room temperature in acetonitrile/acetic acid solution ( $\text{pH} 1.73$ ) = 5/1 (V/V); (c) absorbance change at  $443 \text{ nm}$  and (d) fluorescence change at  $489 \text{ nm}$

一组,其吸光度随时间增加基本没有明显变化,曲线保持平稳趋势。图 4(d)是实验组和对照组在 489 nm 处的荧光强度随时间变化的比较,与吸光度比较的结果相类似,加入甲醛的一组,荧光强度随时间增长而明显增加,并且曲线呈现出线性增长趋势。没有加入甲醛的一组,其荧光强度基本不随时间变化。

实验结果表明,在 3F-FP 中加入甲醛后,其吸收光谱和荧光光谱发生了明显的改变。吸收光谱在 430 nm 处出现了一个新的吸收带,而荧光光谱在 489 nm 处的荧光强度也随时间逐渐增强。Fluoral-P 与 HCHO 发生反应会生成环状化合物 DDL,在 410 nm 处形成新的吸收带,并且在 510 nm 处会有新的荧光峰出现<sup>[11]</sup>。图 3 和图 4 的实验结果以及前面 GC-MS 的实验结合表明,在 3F-FP 中加入甲醛后,发生了与 Fluoral-P 类似的反应生成了环状化合物 6F-DDL(反应方程式如 Scheme 1 所示),从而引起紫外可见吸收光谱和荧光光谱的相应改变。

由图 4 可见,荧光增强相对于吸收增强更加明显,并且在 489 nm 处的荧光表现出线性增长的趋势。因而,我们对 489 nm 处的荧光变化进行线性拟合,如图 5 所示,拟合得到曲线斜率为  $k=7.881 \times 10^3 \text{ h}^{-1}$  ( $R^2=0.972$ )。曲线斜率表示荧光增长速率,反映了 3F-FP 与甲醛反应速率的快慢。这一荧光增长速率还可以通过以下多种方法进一步提高:(1)通过旋涂或溶胶凝胶等方法,将 3F-FP 引入固体媒介中可以提

高 3F-FP 浓度,文献表明 Fluoral-P 在固体载体中的浓度可以高达几个摩尔级别<sup>[10]</sup>; (2)在气体实验环境下,通过采用多孔玻璃等作为探针载体,可以提高探针分子与甲醛的接触表面积,从而提高反应速率; (3)通过气体泵浦的方式提高气流速度也可以提高反应速率<sup>[11]</sup>; (4)还可以选择合适的催化剂从而加快这一反应速率。总而言之,3F-FP 在气体甲醛检测领域表现出了良好的应用前景。

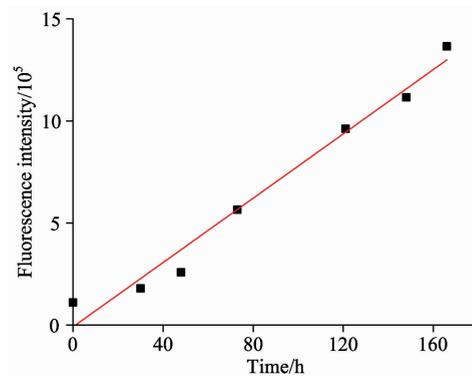


图 5 489 nm 处荧光强度变化的线性拟合

Fig. 5 linear fit of fluorescence at 489 nm

致谢:感谢法国科学院 NIMBE 研究所研究员 Thu-Hoa TRAN-THI 对实验的建议和指导。

## References

- [1] Chung P R, Tzeng C T, Ke M T, et al. *Sensors*, 2013, 13(4): 4468.
- [2] Salthammer T, Mentese S, Marutzky R. *Chemical Reviews*, 2010, 110(4): 2536.
- [3] Hopkins J, Still T, Al-Haider S, et al. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(18): 2557.
- [4] Levin J O, Andersson K, Lindahl R, et al. *Analytical Chemistry*, 1985, 57(6): 1032.
- [5] Lv P, Tang Z A, Yu J, et al. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2008, 132(1): 74.
- [6] Ma Q, Cui H, Su X. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, 25(4): 839.
- [7] Suzuki Y, Nakano N, Suzuki K. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(24): 5695.
- [8] Pinheiro H L, de Andrade M V, de Paula Pereira P A, et al. *Microchemical Journal*, 2004, 78(1): 15.
- [9] Allouch A, Guglielmino M, Bernhardt P, et al. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2013, 181(3): 551.
- [10] Descamps M, Bordy T, Hue J, et al. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 170: 104.
- [11] Compton B J, Purdy W C. *Analytica Chimica Acta*, 1980, 119(2): 349.
- [12] Vignau-Laulhere J, Mocho P, Plaisance H, et al. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 409(26): 6245.
- [13] Paolacci H, Porterat D, Tran-Thi T H. *Sensors and Transducers Journal*, 2007.
- [14] Li Y, Liu Y, Zhou M. *Dalton Trans*, 2012, 41(13): 3807.
- [15] Buback M, Tost W, Huebsch T, et al. *Cheminform*, 1989, 20(36): 1179.
- [16] Dagnelie R, Crassous A, Tran T H. *Journal of Membrane Science*, 2010, 365(1): 98.
- [17] Hammond G S, Borduin W G, Guter G A. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 81(17): 1834.

# Study on Spectral Characteristics of a Novel Formaldehyde Probe Based on Fluoral-P Derivatives

CAO Si-min, LIU Yang-yi, ZHOU Zhong-neng, CHEN Jin-quan, XU Jian-hua\*

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract** Formaldehyde (HCHO) is one of the main pollutants of indoor air. Exposure to excessive formaldehyde for a long time will cause serious damage to human eyes, skin and respiratory organs, and even lead to loss of the function of nervous system<sup>[1]</sup>, as well as ear, nose and laryngeal cancer<sup>[2]</sup>. Therefore, a rapid, efficient and accurate detection of gaseous formaldehyde is of great significance to human health. So far, there have been a lot of techniques that can be used for the detection of gaseous formaldehyde, such as gas chromatography (GC)<sup>[3]</sup> and high-performance liquid chromatography (HPLC)<sup>[4]</sup>. Although chromatographic apparatus may provide detection limits of several  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , they are time-consuming and not suitable for real-time and continuous monitoring of formaldehyde concentration because of their weight and bulk. Semiconductor gas sensors based on gas-sensitive films provide a good alternative in indoor formaldehyde monitoring due to their advantages of high stability, short response time and continuous monitoring. However, high detection limit ( $>300 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and poor selectivity is considered to be a great limitation for such sensors<sup>[5]</sup>. Enzyme-based biosensors usually have a good sensitivity and selectivity, but their thermal stability is usually poor, which seriously restricts their application<sup>[6]</sup>. Colorimetric and fluorescence methods are widely applied in the design of formaldehyde gas sensors because of their fast response, high sensitivity, low detection limit, good selectivity, simplicity and low cost<sup>[7-9]</sup>. These methods are based on the combination of probes and formaldehyde which can generate new substances, resulting in the change of absorption spectrum or fluorescence enhancement, so that ones may achieve quantitative detection of formaldehyde. Descamps et al developed a portable formaldehyde detector by using 4-amino-3-penten-2-one (Fluoral-P) as a probe. Fluoral-P<sup>[10]</sup> is a reagent with enaminone structure which can selectively react with formaldehyde to form cyclic compound 3,5-diacetyl-1,4-dihydrolutidine (DDL). Since the absorption band of Fluoral-P is far apart from the absorption band of DDL, and a fluorescence peak with large Stokes shift can be produced after combined with formaldehyde, it is widely applied for the detection of formaldehyde. However, Fluoral-P is extremely unstable and easy to hydrolyze to form acetylacetone and ammonia under the presence of water, which severely limits its application in formaldehyde detection<sup>[10]</sup>. In this work, we have studied the optical and chemical properties of the interaction between 4-amino-1,1,1-trifluorobut-3-en-2-one (3F-FP), a derivative of Fluoral-P, and formaldehyde solution by UV-vis absorption steady state fluorescence spectroscopy and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). We found that the hydrolysis rate of Fluoral-P is  $k=1.5559 \times 10^{-5} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , however, 3F-FP has very low hydrolysis rate (close to 0) and shows excellent stability in water environment. Meanwhile, 3F-FP can react with formaldehyde to form cyclic compound 6F-DDL, and a new absorption band appears at 430 nm and the fluorescence peak intensity at 489 nm also gets a significant enhancement and the enhancement factor is 12. The fluorescence growth rate is  $k=7.881 \times 10^3 \text{ h}^{-1}$ . In the following work, we will use porous glass as the carrier for 3F-FP<sup>[11]</sup>, by which the concentration of 3F-FP and contact surface area between the 3F-FP probe molecule and formaldehyde can be increased, leading to further increase of the fluorescence growth rate. In conclusion, 3F-FP has shown good application prospects in the field of gaseous formaldehyde detection.

**Keywords** Formaldehyde probe; Fluoral-P; 3F-FP; Hydrolysis rate; Fluorescence spectroscopy

(Received Feb. 5, 2018; accepted Jun. 10, 2018)

\* Corresponding author