分析测试

巯基修饰 ZIF-90 的合成及对丙烯醛荧光传感性能研究

陈小枫,刘梦瑶,赵爱晨,杨 航,刘 玉*
(东北林业大学材料科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要:以 ZIF-90 为基体,通过合成后修饰法与半胱胺盐酸盐反应成功了制备巯基功能化的荧光传感 ZIF-90-SH 材料。结果表明,ZIF-90-SH 对丙烯醛具有高灵敏度,荧光强度与 ACR 浓度在 0.5~500 μmol/L 范围内呈良好线性关系(R^2=0.959),检测限低至 0.49 μmol/L。此外,ZIF-90-SH 在 pH 5~8 范围内表现出优异的荧光稳定性,且对甲醛等干扰物质具有较强的选择性与抗干扰能力。构建的基于功能化 MOF 的丙烯醛荧光传感探针,为实现丙烯醛的快速灵敏检测提供了新型材料与技术支撑。

关键词:丙烯醛;巯基 ZIF-90;荧光探针;席夫碱
中图分类号:O657.3 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0214-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.035

Synthesis of thiol-modified ZIF-90 and its fluorescent sensing performance study of acrolein

*CHEN Xiao-feng, LIU Meng-yao, ZHAO Ai-chen, YANG Hang, LIU Yu**
(College of Materials Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150000, China)

Abstract: In this study, ZIF-90 was used as a matrix, and through post-synthetic modification, it was successfully reacted with cysteamine hydrochloride to prepare thiol-functionalized fluorescent sensing ZIF-90-SH material. The results indicate that ZIF-90-SH exhibits high sensitivity to acrolein, with fluorescence intensity showing a good linear relationship with ACR concentration in the range of 0.5-500 μmol/L (R^2=0.959), and a detection limit as low as 0.49 μmol/L. In addition, ZIF-90-SH demonstrates excellent fluorescence stability within the pH range of 5-8 and strong selectivity and anti-interference ability against interfering substances such as formaldehyde. The acrolein fluorescent sensing probe based on the functionalized MOF constructed in this study provides new materials and technical support for rapid and sensitive detection of acrolein.

Key words: acrolein; thiol-modified ZIF-90; fluorescent probe; Schiff base

室内装饰材料长期释放的挥发性有机化合物(VOCs),对人体健康造成了严重威胁。丙烯醛作为人造板释放的 VOCs 含量较多的一种醛酮类化合物[1-3],是一种高反应活性的亲电性有毒化合物[4-5],会对人的眼睛、皮肤、上呼吸道黏膜等造成刺激,危害指数远高于甲醛和乙醛[6]。然而甲醛和乙醛等醛酮类化合物早已被人们重点关注,但是丙烯醛却并未引起人们的相应重视,其浓度检测相关研究很少涉及[7]。因此,开发高效精准的丙烯醛检测技术对人体健康防护具有重要现实意义。目前已有报道的丙烯醛检测方法包括:高效液相色谱法(HPLC)[8]、气相色谱-质谱法(GC-MS)[9]以及 ACR 代谢物检测[10]等,但多数方法存在耗时长、仪器成本高或探针合成复杂等局限,难以满足快速检测需求。荧光传感技术因灵敏度高、响应迅速的优势备受关注,其中功能化金属有机框架(MOFs)材料凭借高比表面积[11]、规整孔道结构[12]及易化学修饰性[13],成为构建荧光传感器的理想载体。沸石咪唑酯框架(ZIFs)作为 MOFs 的重要分支,兼具沸石的结构稳定性与 MOFs 的功能可塑性[13-14]。ZIF-90 具有典型的 SOD 拓扑结构,孔径均一且表面富含活性醛基,为合成后修饰提供了关键位点,其优异的热稳定性与化学稳定性也为传感应用奠定基础[15-16]。巯基(—SH)可通过迈克尔加成反应与丙烯醛的不饱和双键特异性结合,且能调控荧光分子的光致电子转移(PET)效应,是构建丙烯醛荧光探

收稿日期:2026-01-09;**修回日期**:2026-09-06
基金项目:黑龙江省自然科学基金(联合引导)(LH2023C041)
作者简介:陈小枫(2000-),男,硕士,研究方向为人造板释放丙烯醛的荧光传感技术,15855234497@qq.com;刘玉(1982-),女,博士,副教授,研究方向为人造板 VOC 释放控制技术,通讯联系人,liuyu820524@126.com。

针的理想功能基团[17-18]。

本研究以 ZIF-90 为基体,通过合成后修饰策略,使其与半胱胺盐酸盐反应制备巯基功能化的 ZIF-90-SH 材料。利用 X 射线衍射(XRD)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)及扫描电子显微镜(SEM)对材料的晶体结构、官能团组成与形貌进行系统表征。采用荧光光谱仪重点考察 ZIF-90-SH 对丙烯醛的荧光响应性能,分析 pH、温度等关键环境因素对其传感性能的影响规律。通过上述系统表征与性能评估,构建一种面向复杂环境、高选择性的 ACR 荧光传感新方法,从而为人造板等工业产品的丙烯醛快速、原位检测提供材料基础与方法参考。

1　实验部分

1.1　实验试剂与材料

乙酸锌(≥98%,分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、甲醇(≥99.5%)、*N*,*N*-二甲基甲酰胺(≥99.5%)、丙烯醛(化学纯)、乙醛(AA)、苯甲醛、戊二醛、甲苯(≥99.5%,分析纯)、二甲苯(≥99.0%,分析纯)、苯(≥99.5%,分析纯)、Na_2SO_4、K_2PO_4、NaCl、$CaCl_2$、KCl 和 $FeCl_3$,均购自中国国药集团化学试剂有限公司。咪唑-2-甲醛(≥98%,分析纯)、半胱胺盐酸盐(≥98%),购自上海麦克林生化科技有限公司。甲醛(37%),购自辽宁泉瑞试剂有限公司。

1.2　ZIF-90-SH 的合成与表征

ZIF-90 的合成:将 1.93 g 咪唑-2-甲醛 HICA 加入 50 mL DMF 中,在 70℃下搅拌,直至形成澄清溶液,然后放置在通风橱中,直至冷却至室温。同时,将 1.46 g 乙酸锌溶解在 50 mL 甲醇中。冷却后,将 HICA 溶液缓慢倒入锌溶液中并搅拌 30 min。接着通过离心 9 000 r/min 分离 30 min 形成沉淀,将沉淀物悬浮在甲醇中,真空抽滤并再次用甲醇洗涤 3 次,然后风干过夜。

ZIF-90-SH 的合成:将半胱胺盐酸盐(0.665 g)和氢氧化钠(0.24 g)溶解在 50 mL 甲醇中,并在室温下搅拌 15 min。将 0.50 g 干燥的 ZIF-90 滴加入上述溶液中,并超声 10 min,分散均匀。将所得混合物 40℃搅拌冷凝回流 8 h。冷却至室温后抽滤得到固体,用甲醇洗涤 3 次,并在 40℃下真空干燥 24 h。所得样品标记为 ZIF-90-SH。

采用扫描电子显微镜(德国,Sigma 360 型)观察 ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的微观形貌;傅里叶变换红外光谱仪(中国,IR-1600 型)表征 ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的表面官能团种类;X 射线衍射仪(日本,SmartLab SE 型)表征 ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的晶体结构;X 射线电子能谱仪(美国,K-Alpha 型)表征 ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的化学键种类;紫外-可见分光光度计与荧光光谱仪(日本,F-7000 型)表征 ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的荧光传感特性。

1.3　丙烯醛的荧光传感测试

为探究检测液的最佳工作条件,在进行测试荧光光谱前,需配制不同 pH(2、3、4、5、6、7、8、9、10、11)与不同孵育温度(10、20、30、40、50、60℃)的探针检测液,使用去离子水配制 1 mmol/L 丙烯醛标准液备用。光谱测试时,将探针浓度稀释到 0.1 mmol/L,然后将稀释到不同浓度的丙烯醛标准液滴加到不同 pH 探针检测液中,在不同温度下孵育 60 min,最后取 5 mL 检测液放入石英比色皿中进行荧光测试。

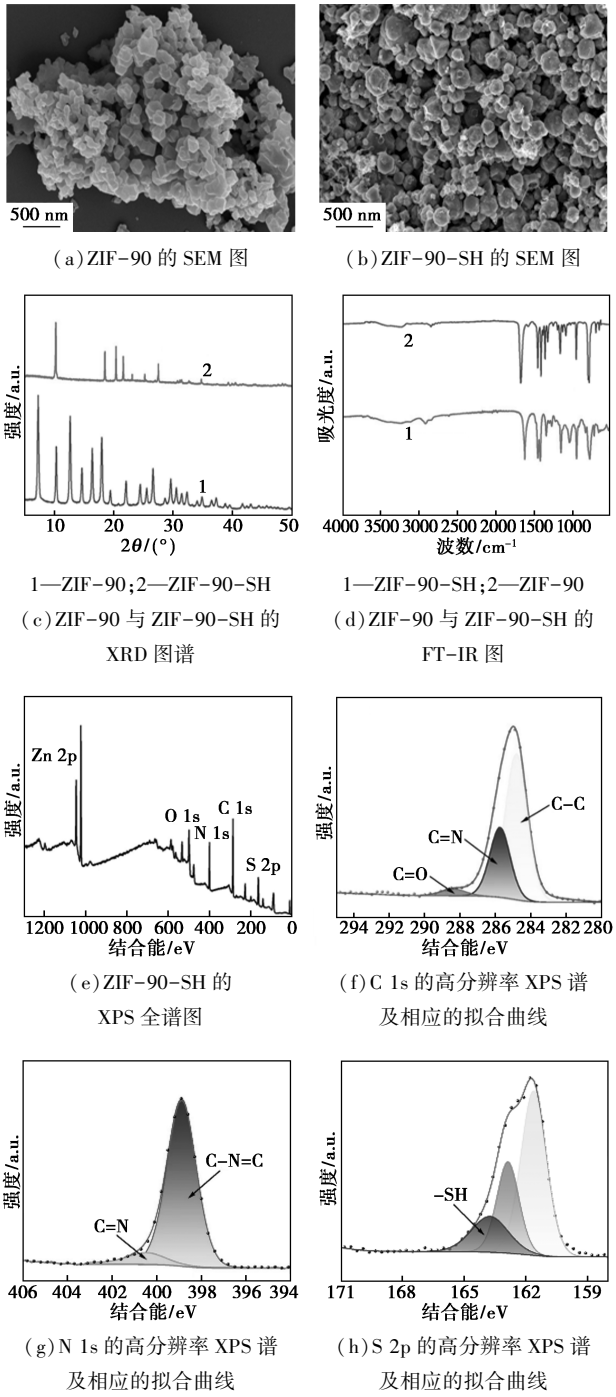
为探究 ZIF-90-SH 的荧光选择性,选择了几种人造板释放量较多的 VOCs(甲醛、乙醛、戊二醛、苯甲醛、苯、甲苯和二甲苯),用去离子水配制 1 mmol/L 标准液,再将其逐一加入已配制好的 0.1 mmol/L 探针溶液中,形成浓度为 0.5 mmol/L 的检测液。接着在 40℃下水浴孵育 60 min 形成均匀悬浮液后进行荧光强度测试。

2　结果与讨论

2.1　ZIF-90-SH 的微观形貌与结构分析

由图 1(a)可以看出原始 ZIF-90 呈现分散性良好的颗粒状形貌,对应其高结晶度的 MOF 骨架特征,与 XRD 结果一致;而图 1(b)中的 ZIF-90-SH 的形貌发生显著转变,颗粒团聚形成类球形聚集体,且表面粗糙度增加。这一形貌变化源于巯基修饰过程中席夫碱缩合反应对晶体生长的调控——官能团引入打破了 ZIF-90 的定向结晶趋势,促使颗粒发生团聚与形貌重构,为后续目标分子的界面吸附提供了丰富的接触位点。图 1(c)为 ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的 XRD 谱图。ZIF-90 的 XRD 谱呈现一系列尖锐的特征衍射峰,对应其高度有序的 MOF 晶体骨架;ZIF-90-SH 的 XRD 谱中,ZIF-90 的特征衍射峰基本保留,表明巯基修饰未破坏 ZIF-90 的多孔骨架结构,保障了丙烯醛分子的扩散通道,同时 ZIF-90 的特征衍射峰强度降低表明官能团引入导致材料结晶度与局部有序性下降,与 SEM 中团聚化、无序化的形貌特征形成对应。通过 FT-IR 技术分析 ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的化学结构和官能团,结果表明[图 1(d)],由于—CHO 部分的拉伸模式,ZIF-90

在光谱中 1 670 cm^{-1}处显示出强谱带,而在 ZIF-90-SH 的光谱中不存在—CHO 振动。在 1 625 cm^{-1}处出现了一个新的特征峰,分析这主要归属于 ZIF-90 的游离醛基和半胱胺盐酸盐的氨基之间发生席夫碱缩合反应形成的亚胺。由于 ν(C—H)和 ν(C—S)振动,分别在 2 918、720 cm^{-1}处的谱带进一步支持了该缩合反应。此外,ZIF-90-SH 在 2 612 cm^{-1}处出现的特征峰,与—SH 基团的伸缩模式相对应。同时,高分辨 XPS 光谱分析进一步验证巯基的成功引入[图 1(e)~(h)]。在 ZIF-90-SH 的高分辨率 C 1s 光谱[图 1(f)]285.6 eV 和 N 1s 光谱[图 1(g)]398.8 eV 的特征峰共同证实了 C═N 的存在,表明在 ZIF-90-SH 内形成了席夫碱结构,结果与 FT-IR 分析一致。图 1(h)中 163.7 eV 处出现的归属于—SH 的特征峰是巯基接枝到 ZIF-90 骨架中的直接证据。综上表征分析结果证明了 ZIF-90 与半胱胺盐酸盐通过席夫碱缩合反应引入了—SH 官能团,为与 ACR 的配位提供活性位点。



(a)ZIF-90 的 SEM 图　(b)ZIF-90-SH 的 SEM 图

1—ZIF-90;2—ZIF-90-SH
(c)ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的 XRD 图谱

1—ZIF-90-SH;2—ZIF-90
(d)ZIF-90 与 ZIF-90-SH 的 FT-IR 图

(e)ZIF-90-SH 的 XPS 全谱图

(f)C 1s 的高分辨率 XPS 谱及相应的拟合曲线

(g)N 1s 的高分辨率 XPS 谱及相应的拟合曲线

(h)S 2p 的高分辨率 XPS 谱及相应的拟合曲线

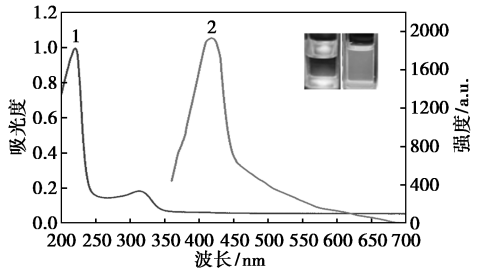
图 1　ZIF-90 与 ZIF-90-SH 材料的形貌与结构表征

2.2　ZIF-90-SH 的荧光传感性能研究

2.2.1　光学性能

本研究基于反应激活荧光的策略设计并合成了巯基修饰的 ZIF-90-SH 材料,核心在于利用巯基与 ACR 中的 α,β-不饱和羰基发生迈克尔加成反应。以 ZIF-90 为基体通过与半胱胺盐酸盐的席夫碱反应将半胱胺的氨基与咪唑醛配体的芳香体系相连,显著扩展了整个发色团的 π-共轭体系,同时引入的巯基作为强电子给体,通过光诱导电子转移(PET)与振动提供非辐射弛豫通道,双重淬灭 MOF 骨架的本征荧光。而反应则使得—SH 转变为硫醚结构,其电子给体能力减弱且振动活性消失,PET 与非辐射通道被同时阻断,从而引发荧光信号的特异性开启响应。本研究对 ZIF-90-SH 的光学性质进行探究发现[图 2(a)],ZIF-90-SH 的紫外-可见吸收光谱在 274 nm 处存在一个明显的吸收峰,归属于 C═N 键的 $\pi-\pi^*$ 跃迁[19];当暴露于 365 nm 紫外灯时,ZIF-90-SH 溶液仅显示出微弱的蓝色发光,为探讨 ZIF-90-SH 的传感特性,测试了 ZIF-90-SH 与 500 μmol/L 丙烯醛溶液反应后在不同激发波长下的发射行为[图 2(b)]。在激发波长为 340~390 nm 的范围内,体系的荧光强度呈现先增大后减小的变化规律。当激发波长为 380 nm 时,荧光发射光谱的峰值达到最大值。因此,380 nm 的波长为探针 ZIF-90-SH 的最佳激发波长。在不同激发波长下,其最大发射峰的位置并未发生显著位移。这说明 ZIF-90-SH 的 C═N 键 $\pi-\pi^*$ 跃迁特征未变,体系内没有荧光共振能量转移,荧光增强仅源于激发态电子的辐射跃迁效率提升。可见,ZIF-90-SH 本底荧光的微弱状态归因于巯基的引入,而当其与 ACR 发生特异性迈克尔加成后,反应有效抑制了由巯基主导的非辐射失活途径(如 PET),使得新的发色团吸收的能量得以更高效地通过荧光形式释放,从而呈现出显著的、依赖于 ACR 浓度的荧光增强信号,这些

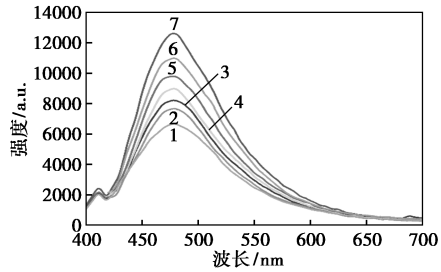
特性使其具有作为丙烯醛荧光探针的优异潜力。



1—Abs;2—Em

插图:自然光和 365 nm 紫外光的照片

(a)ZIF-90-SH 的紫外-可见光谱和荧光发射光谱



1—340 nm;2—350 nm;3—390 nm;4—365 nm;

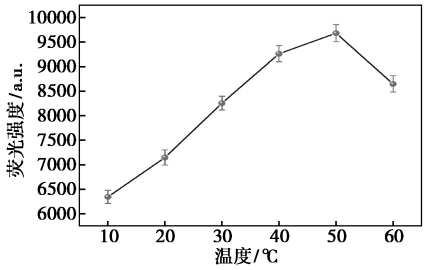
5—380 nm;6—370 nm;7—360 nm

(b)ZIF-90-SH 检测液在不同激发波长下的荧光强度

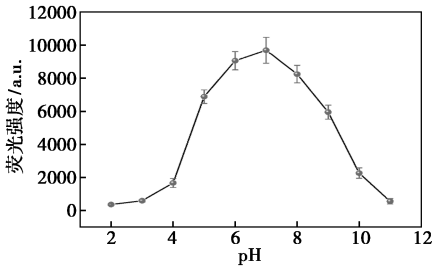
图 2　ZIF-90-SH 的光学测试

2.2.2　传感条件优化

针对人造板丙烯醛响应环境变化,本研究考察了温度及 pH 变化对 ZIF-90-SH 与丙烯醛检测液荧光稳定性的影响。图 3(a)表明,当温度在 10~60℃范围内变化时,反应荧光强度随温度升高整体呈上升趋势。这表明温度升高可加快 ZIF-90-SH 与丙烯醛的反应动力学,增强了荧光基团的激发效率;但温度过高(60℃)可能导致材料结构稳定性下降,从而使荧光强度略有降低。图 3(b)所示,ZIF-90-SH 的荧光强度急剧变化,在 pH≤3 的酸性环境下,荧光强度极低,这是由于 ZIF-90-SH 中的巯基官能团质子化,导致丙烯醛的亲核加成反应几乎无法进行,同时质子化改变整个体系的电荷分布,激发态能级可能更倾向于非辐射弛豫,导致荧光响应极弱。随着 pH 升高,酸性减弱(pH=4~8),ZIF-90-SH 官能团的质子化程度降低,巯基与丙烯醛的亲核加成反应活性增强,有效阻断 PET,同时 C═N 共轭结构处于最佳发光状态,因此荧光强度显著提升。在 pH 为 9~11 时,ZIF-90-SH 的 MOF 骨架可能因碱蚀发生坍塌,C═N 共轭结构被破坏[20],荧光基团丧失。同时巯基等官能团过度去质子化(如—SH→-S^-),导致其与丙烯醛的结合能力或反应选择性下降,最终荧光响应急剧减弱。



(a)ZIF-90-SH 在 10~60℃条件下对丙烯醛检测液的荧光强度



(b)ZIF-90-SH 在 pH 为 2~11 范围内对丙烯醛检测液的荧光强度

图 3　ZIF-90-SH 对丙烯醛的传感条件测试

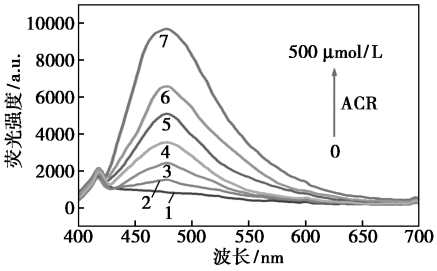
2.2.3　检测性能与灵敏度

在优化的实验条件(温度 40℃,pH=7)下,利用荧光光谱仪对 ZIF-90-SH 加入不同浓度 ACR 的荧光强度变化进行监测,如图 4(a)所示,随着 ACR 浓度的增加,ZIF-90-SH 在 478 nm 处的荧光强度逐渐增大,且荧光强度与 ACR 浓度的对数是线性相关的,能够很好地拟合方程:I_{478} = 1 299ln C_{ACR} + 779(R^2 = 0.959),涵盖 0.5~500 μmol/L 的浓度范围[图 4(b)]。使用以下公式计算出 ZIF-90-SH 在此实验条件下对丙烯醛溶液的检测限(LOD)为 0.49 μmol/L。

$$SD = \sqrt{\sum (I_0 - I_1)^2/(N-1)}$$

$$LOD = 3SD/S$$

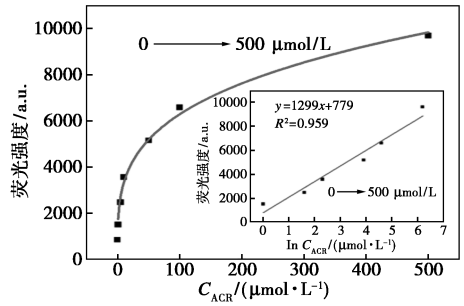
式中,SD 为 ZIF-90-SH 荧光强度的标准偏差;I_0 为 ZIF-90-SH 的荧光强度;I_1 为加入不同浓度 ACR 的 ZIF-90-SH 荧光强度;S 为校准曲线的斜率。



1—0 μmol/L;2—1 μmol/L;3—5 μmol/L;4—10 μmol/L;

5—50 μmol/L;6—100 μmol/L;7—500 μmol/L

(a)ZIF-90-SH 分别对不同浓度 ACR 的荧光光谱



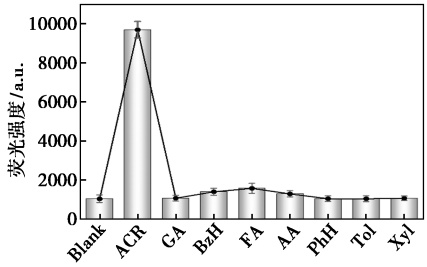
(b)ZIF-90-SH 对不同浓度 ACR 的荧光强度拟合曲线

图 4 ZIF-90-SH 对 ACR 的响应性能与灵敏度

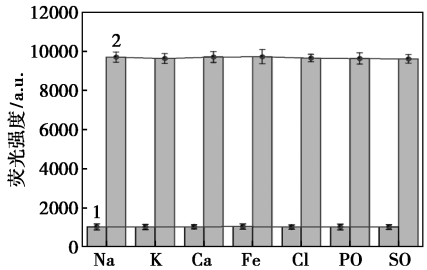
2.2.4 选择性和抗干扰能力

通过考察结构类似物对 ZIF-90-SH 荧光强度的影响,进一步评价了 ZIF-90-SH 对 ACR 的选择性和抗干扰性,结果表明,只有 ACR 的加入才能引起 ZIF-90-SH 荧光强度的明显变化,而在相同的检测条件下,其他类似物(甲醛、乙醛、戊二醛、苯甲醛、苯、甲苯和二甲苯)的存在对 ZIF-90-SH 的荧光强度并没有影响[图 5(a)]。因此,本研究基于巯基与 ACR 的 α,β-不饱和羰基结构之间的特异性迈克尔加成反应而制备的 ZIF-90-SH 对 ACR 表现出高水平的特异性。

此外,在存在潜在干扰物质的情况下,测试了 ZIF-90-SH 的抗干扰性能。结果表明,在各种阳离子(Fe^{3+}、Na^+、Ca^{2+}、K^+)与阴离子(PO_4^{3-}、Cl^-、SO_4^{2-})的存在下,ZIF-90-SH 在引入 ACR 后的荧光强度依旧维持在原有检测水平,不受各种离子的影响[图 5(b)],这表明该探针对 ACR 的荧光检测表现出显著的抗



(a)ZIF-90-SH 识别 ACR 及其结构类似物的选择性



1—无 ACR;2—带有 ACR

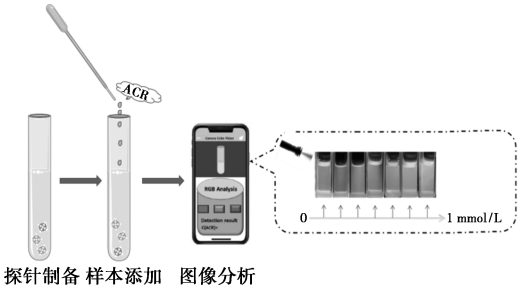
(b)ZIF-90-SH 对不同金属离子的抗干扰能力

图 5 ZIF-90-SH 的选择性与抗干扰性测试

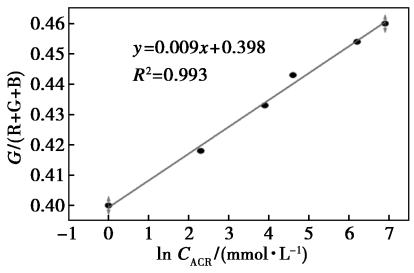
干扰性能。由此可得出,ZIF-90-SH 探针在复杂环境中表现出优异的选择性和抗干扰性。

3 基于智能手机传感平台的 ACR 检测

鉴于人类视觉感知在检测探针颜色的细微差异方面的固有局限性,开发了利用智能手机辅助的 ZIF-90-SH 探针识别 ACR 的视觉检测程序[图 6(a)]。基于智能手机的检测方法包括 3 个步骤:样品制备、图像采集和数据分析。在含有巯基 MOF 探针的离心管内加入不同浓度的 ACR。孵育 60 min 后,将溶液转移到比色皿中,用智能手机在暗箱中采集图像。最后,将图像颜色通过智能手机下载的 Color Picker 软件转换为 RGB 颜色模型的数值,便于 ACR 的定量检测。如图 6(a)所示,在 365 nm 紫外手电筒的照射下,随着 ACR 浓度从 1 μmol/L 增加到 1 000 μmol/L,智能手机捕获的图像表现出明显的颜色变化,从浅蓝色变为明亮的青色。在分析 RGB 值之后,发现在 1~1 000 μmol/L 的范围内,ACR 浓度的自然对数与荧光图像的 $G/(R+G+B)$ 比率($y=0.009x+0.398$,$R^2=0.993$)之间存在显著相关性[图 6(b)]。该相关性分析结果与荧光光谱仪观察到的响应趋势极为相似,表明本研究建立的智能手机辅助 ACR 视觉检测程序具有快速、经济、有效 ACR 定量测定潜力。



(a)智能手机辅助的 ACR 的视觉检测示意图



(b)ACR 浓度对数与 RGB 值的标准曲线

图 6 ZIF-90-SH 探针识别 ACR 的可视化检测

4 结论

本研究采用合成后修饰策略,通过席夫碱反应

在 ZIF-90 表面引入巯基官能团,构建了巯基与丙烯醛迈克尔加成反应的特异性识别机制。该巯基 MOF 探针对丙烯醛表现出优异的荧光传感性能,在 1~500 μmol/L 浓度范围内呈现良好的线性关系(R^2=0.959),荧光强度随着丙烯醛浓度的升高而显著提升,检测限低至 0.49 μmol/L,且在 pH 5~8 范围内具有良好的稳定性以及对常见 VOCs、金属离子与阴离子干扰表现出较强的选择性与抗干扰能力。此外,探针的荧光强度通过智能手机的辅助识别增强了其通过将颜色变化转换为数值来视觉确定 ACR 的能力。因此,本研究所提出的巯基 MOF 荧光探针为 ACR 的实时检测提供了一种方便、直接的方法,也为拓展该功能化策略至其他 MOF 材料,构建用于人造板释放的多种 VOCs 快速检测的系列化荧光传感器提供了一种案例。

参考文献

[1] Grosso A L,Morozova K,FerrentinoG,*et al*.Early detection of acrolein precursors in vegetable oils by using proton transfer reaction-mass spectrometry[J].Talanta,2024,270:125513.

[2] Zhang D,Jiang X,Xiao L,*et al*.Mechanistic studies of inhibition on acrolein by myricetin[J].Food Chemistry,2020,323:126788.

[3] 沈隽,刘玉,张晓伟,等.人造板有机挥发物(VOCs)释放的影响及研究[J].林产工业,2006,(1):5-9.

[4] Adamová T, Hradecký J, Pánek M. Volatile organic compounds (VOCs) from wood and wood-based panels: Methods for evaluation, potential health risks, and mitigation[J]. Polymers, 2020, 12(10):1-21.

[5] Kim S,Kim J A,An J Y,*et al*.TVOC and formaldehyde emission behaviors from flooring materials bonded with environmental-friendly MF/PVAc hybrid resins[J].Indoor Air,2007,17(5):404-415.

[6] 许旺.刨花板醛酮类化合物释放表征及丙烯醛净化研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2023.

[7] Jiang K,Huang C,Liu F,*et al*.Origin and fate of acrolein in foods[J].Foods,2022,11(13):1976.

[8] Kumar R,Adhikari S,Driver E M,*et al*.Towards a novel application of wastewater-based epidemiology in population-wide assessment of exposure to volatile organic compounds[J].Science of the Total Environment,2022,845:157008.

[9] Custodio-Mendoza J A,Almeida P J,Lorenzo R A,*et al*.GC-MS determination of malondialdehyde, acrolein, and 4-hydroxy-2-nonenal by ultrasound-assisted dispersive liquid-liquid microextraction in beverages[J].Food Chemistry,2022,384:132530.

[10] Tong Z J,Kuo C W,Yen P C,*et al*.Acrolein plays a culprit role in the pathogenesis of diabetic nephropathy in vitro and in vivo[J].European Journal of Endocrinology,2022,187(4):579-592.

[11] Zhu Q L,Xu Q.Metal-organic framework composites[J].Chemical Society Reviews,2014,43(16):5468-5512.

[12] Farha O K,Eryazici I,Jeong N C,*et al*.Metal-organic framework materials with ultrahigh surface areas:Is the sky the limit[J].Journal of the American Chemical Society,2012,134(36):15016-15021.

[13] Liu B,Vellingiri K,Jo S H,*et al*.Recent advances in controlled modification of the size and morphology of metal-organic frameworks[J].Nano Research,2018,11(9):4441-4467.

[14] Liédana N,Galve A,Rubio C.CAF@ ZIF-8:One-step encapsulation of caffeine in MOF ACS appl[J].Mater Interfaces,2012,4:5016-5021.

[15] Vasconcelos I B,Silva T G,Militão G C G,*et al*.Cytotoxicity and slow release of the anti-cancer drug doxorubicin from ZIF-8[J].RSC Advances,2012,2(25):9437-9442.

[16] Zheng M,Liu S,Guan X.One-step synthesis of nanoscale zeolitic imidazolate frameworks with high curcumin loading for treatment of cervical cancer ACS appl[J].Mater Interfaces,2015,7:22181-22187.

[17] Li H,Feng X,Guo Y,*et al*.A malonitrile-functionalized metal-organic framework for hydrogen sulfide detection and selective amino acid molecular recognition[J].Scientific reports,2014,4(1):4366.

[18] Xu H,Zhang C,Huai R P,*et al*.A NIR fluorescent probe based on CN isomerization for fast detection of toxic acrolein[J].Sensors and Actuators B:Chemical,2022,371:132547.

[19] Mandal S,Pal J,Subramanian R,*et al*.Amplified fluorescence of Mg^{2+} selective red-light emitting carbon dot in water and direct evaluation of creatine kinase activity[J].Nano Research,2020,13(10):2770-2776.

[20] Bhattacharjee S,Lee Y R,Ahn W S.Post-synthesis functionalization of a zeolitic imidazolate structure ZIF-90:A study on removal of Hg(Ⅱ) from water and epoxidation of alkenes[J].CrystEngComm,2015,17(12):2575-2582.■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:http://www.xdhg.com.cn