

## 烯基功能化腙类共价有机框架对钯离子的选择性荧光检测

陈 乐,郝景茹,吴令霞,关 静,王国昌,谭伟强\*

(青岛理工大学 环境与市政工程学院,青岛 266525)

**摘 要:**共价有机框架(COFs)作为一类新兴的多孔晶体聚合物,在重金属离子化学传感器方面得到了极大关注。以 2,5-双(3-丁烯-1-氧基)对苯二甲酰肼为构筑单元,利用液液界面聚合法制备了烯基功能化腙类荧光共价有机框架材料(BB-TF COF)。通过 X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱、固体核磁和荧光光谱考察了材料结构、结晶性和荧光性能,研究了该材料对钯离子的荧光识别。结果表明:BB-TF COF 能够对水溶液中的钯离子实现高灵敏及高选择性的荧光淬灭检测,检出限为 0.15  $\mu\text{mol/L}$ 。

**关键词:**共价有机框架;钯离子;荧光检测

中图分类号:X832;O621.3 文献标志码:A 文章编号:1673-4602(2025)03-0064-08

### Selective fluorescence detection of palladium ions by alkenyl-functionalized hydrazone covalent organic frameworks

CHEN Le, HAO Jingru, WU Lingxia, GUAN Jing, WANG Guochang, TAN Weiqiang\*

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** As an emerging class of porous crystalline polymers, covalent organic frameworks (COFs) have attracted considerable attentions in chemosensors for heavy metal ions. Herein, taking 2,5-bis (but-3-en-1-yloxy) terephthalohydrazide as the building block, we designed and synthesized alkenyl-functionalized hydrazone fluorescent covalent organic framework (BB-TF COF) by using the liquid-liquid interfacial polymerization method. The structure, crystallinity and fluorescence properties of the BB-TF COF were investigated through X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectroscopy, solid state nuclear magnetic resonance and fluorescence spectroscopy. The fluorescence recognition of palladium ions by BB-TF COF was studied. The results showed that BB-TF COF can realize highly sensitive and selective fluorescence quenching detection of palladium ions in aqueous solution, and the detection limit was 0.15  $\mu\text{mol/L}$ .

**Key words:** covalent organic frameworks (COFs); palladium ions; fluorescent detection

钯(Pd)属于过渡金属元素,在珠宝、电子电器、制药、燃料电池等行业应用广泛<sup>[1]</sup>。工业中的大量使用不可避免会造成其在环境中的残留,引起环境重金属污染和人们的健康问题。2007年,欧洲药品评审

收稿日期:2023-05-21

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2022QB135;ZR2021MB104)

作者简介:陈 乐(1997—),女,吉林德惠人。硕士,研究方向为环境功能材料设计及应用。E-mail:a1835586096@163.com。

\* 通信作者:谭伟强(1979—),男,山东临沂人。博士,副教授,主要从事环境功能材料设计及应用等方面的研究。

E-mail:tanweiqiang@qut.edu.cn。

局(EMEA)颁发了金属催化剂或金属试剂残留量限度的指导原则,对钯含量限度进行了规定,在药品中日均允许暴露量(PDE)口服为  $100 \mu\text{g}/\text{d}$ ,注射为  $10 \mu\text{g}/\text{d}$ <sup>[2]</sup>;国际人用药品注册技术协调会(ICH)颁布了《元素杂质指导原则》(修订版)(ICH Q3D(R2)—2022),将元素钯列入 2B 类,需要进行风险评估,这也使得残留钯检测成为人们关注的重点<sup>[3]</sup>,因此对钯的检测与定量分析具有重要的意义。传统的检测方法包括原子吸收光谱法(AAS)、电感耦合等离子体法(ICP)、固相微萃取-高效液相色谱法(SPME-HPLC)和 X 射线荧光法(XRF)。然而,这些技术通常需要进行相对复杂的预处理过程和较高的仪器维护成本<sup>[4]</sup>,难以实现现场高效快速检测分析。与传统方法相比,荧光传感法<sup>[5]</sup>具有操作简单、响应迅速、灵敏度高、成本低等优点。目前已报道了多种针对  $\text{Pd}^{2+}$  的荧光传感器,这些传感器的设计主要基于罗丹明<sup>[6-7]</sup>、香豆素<sup>[8-9]</sup>或者金属有机框架<sup>[10-11]</sup>平台,其中大多数合成过程复杂,纯化过程繁琐,荧光稳定性差,选择性较差,阻碍了其在实际环境中的应用。因此,开发一种具有高稳定性、高选择性、高灵敏度、快速响应的  $\text{Pd}^{2+}$  传感器具有十分重要的意义。

共价有机框架(Covalent Organic Frameworks, COFs)材料因其比表面积大、孔径可调、稳定性好、能够通过周期性结构引入特定的结合位点等特点,广泛应用于传感领域<sup>[12-13]</sup>。近年来,基于 COFs 材料荧光性质的传感应用引起了分析检测领域的广泛关注<sup>[14-15]</sup>。基于脘键连接的 COFs 具有较高的物理和化学稳定性<sup>[16-17]</sup>,较高结晶度的脘类 COFs 在固态条件下和水环境中都具有强烈的荧光特性,在重金属离子<sup>[18-20]</sup>选择性检测和去除方面表现出优异的荧光传感性能和捕获效率。为此,本文利用液液界面聚合法,设计合成烯基功能化脘类荧光共价有机框架材料(BB-TF COF),研究其在钯离子荧光检测中的应用,为钯离子的快速荧光检测提供了新思路。

## 1 实验部分

### 1.1 主要仪器及试剂

仪器:X 射线衍射仪,SmartLab SE,日本理学公司;傅里叶变换红外光谱仪,Spectrum 100,珀金埃尔默企业管理上海有限公司;固体核磁共振波谱仪,Bruker 600 M,德国布鲁克科技有限公司;X 射线光电子能谱仪,K-Alpha,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;荧光分光光度计,F97 Pro,上海棱光技术有限公司。

试剂:2,5-双(3-丁烯-1-氧基)对苯二甲酰肼(BBTH),上海腾骞生物科技有限公司;1,3,5-苯三甲醛(TFB),吉林中科研伸科技有限公司;对甲苯磺酸(PTSA),毕得医药有限公司;氯化钯,阿拉丁试剂(上海)有限公司。

### 1.2 BB-TF COF 的制备

将 8.1 mg 的醛基单体 TFB 和 25.1 mg 的酰肼单体 BBTH 分别溶解于 30 mL 二氯甲烷和 PTSA 溶液中。采用直径 60 mm、高度 45 mm 的培养皿为反应容器。向培养皿中加入含 TFB 的二氯甲烷溶液,室温静置 3 min 后,将含 BBTH 的 PTSA 溶液缓慢注入反应液中,室温静置 7 d 后,液液界面形成 BB-TF COF 薄膜。将薄膜用石英片基底捞出后分别用去离子水和四氢呋喃淋洗,自然干燥后分析测试及表征,反应式如图 1 所示。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 表征分析

1) X 射线衍射:基底为硅片,Cu 靶为 X 射线源,电压为 40 kV,电流为 30 mA,扫描范围为  $2\sim 50^\circ$ ,扫描速率为  $1^\circ/\text{min}$ ,扫描步长为  $0.02^\circ$ ,狭缝宽度为  $1/8$ ;

2) 固体核磁:测试方法为交叉极化魔角旋转,样品旋转速率为 10 kHz,弛豫时间为 2 s;

3) 傅里叶变换红外光谱:基底为铜片,模式为衰减全反射光谱(ATR),累积量为 64,扫描范围为  $500\sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ ;

4) 荧光分光光度计:光源为 450 W 氙灯,狭缝宽度 4 nm,扫描间隔 1 nm,停留时间 1 s,扫描次数 1 次。

#### 1.3.2 光谱性质分析

称取 10 mg BB-TF COF 研磨后加入 500 mL 去离子水,经过超声分散形成均一稳定悬浮液,移取该

悬浮液 2 mL 加入至石英皿中,通过荧光光谱仪检测 BB-TF COF 的光学性质。

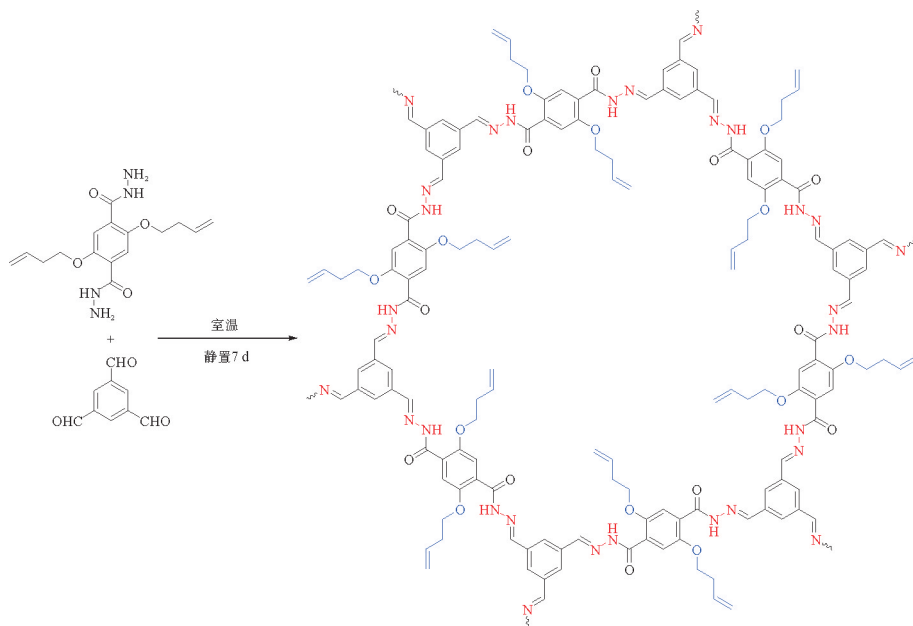


图 1 BB-TF COF 的制备

### 1.3.3 荧光检测实验

将  $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Pd}^{2+}$  的氯盐或硝酸盐配制成 1 mmol/L 的标准溶液,将  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  的钠盐配置成 1 mmol/L 的标准溶液。在进行金属离子识别分析时,将上述每种金属离子标准溶液与 2 mL 的 BB-TF COF 悬浮液置于石英皿中混合,设置激发波长为 360 nm,测试荧光光谱。在进行抗干扰实验时,向 BB-TF COF 悬浮液分别加入 120  $\mu\text{mol/L}$  不同阴、阳离子溶液测试荧光光谱,随后再加入 60  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Pd}^{2+}$  标准溶液后再次测试荧光光谱,测试条件同上。

## 2 结果与讨论

### 2.1 BB-TF COF 的形貌结构

BB-TF COF 的 X 射线衍射(XRD)谱图如图 2(a)所示,  $2\theta$  位于 3.3、6.6 和 26.6° 的衍射峰,分别对应材料的 100、200 和 301 晶面,其中 26.6° 处宽峰主要是由于 COF 层间的  $\pi$ - $\pi$  叠加,以上数据表明材料结晶度较高。为了进一步确认材料的拓扑结构,利用 Material Studio 软件中的 DFTB 模块模拟了 BB-TF COF 的理论晶体结构,测试得到的 XRD 数据与模拟的 AA 堆积方式匹配度更高(图 2(a))。XRD 数据可

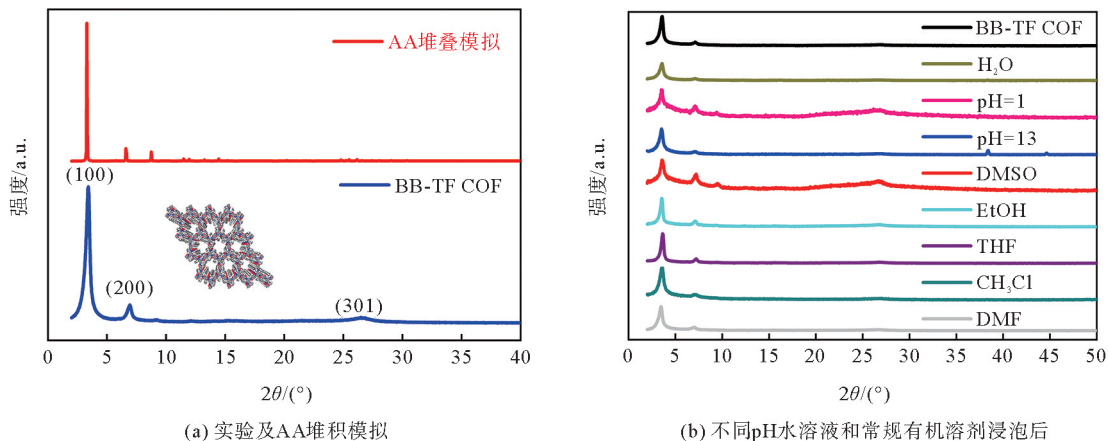


图 2 BB-TF COF 的 XRD 谱图

初步说明 BB-TF COF 已被成功合成且具有良好的结晶性。利用软件模拟的晶胞结构如图 2(a)插图所示,由图可清楚地看到 BB-TF COF 具有六角形蜂巢结构,具有一维孔道特征。为进一步分析材料的化学稳定性,室温条件下分别考察了 BB-TF COF 在常规有机溶剂二甲基亚砜(DMSO)、乙醇(EtOH)、四氢呋喃(THF)、三氯甲烷( $\text{CHCl}_3$ )、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)和不同 pH 水溶液中浸泡后的 XRD 谱图(图 2(b))。结果表明,在常规有机溶剂中 BB-TF COF 结构稳定;在 pH=1 和 pH=13 水溶液中的测试结果进一步说明,在强酸/碱中材料同样具有较强的化学稳定性。

BB-TF COF 的傅里叶变换红外光谱如图 3 所示,产物与 2 种单体的峰位差别显著,醛基单体 TFB 中羰基( $1691\text{ cm}^{-1}$ )和酰肼单体 BBTH 中的氨基( $3385$  和  $3319\text{ cm}^{-1}$ )峰消失,同时产物在  $3276$  和  $1661\text{ cm}^{-1}$  出现了新的特征峰,分属于脒键的 N—H 和 C=N 伸缩振动峰,这与前期工作中通过希夫碱反应合成的产物峰型相同<sup>[21]</sup>。

BB-TF COF 的  $^{13}\text{C}$  MAS NMR 如图 4 所示,分别在  $3.10$ 、 $6.72$ 、 $11.51$ 、 $13.33$ 、 $14.82$  和  $15.83\text{ kHz}$  出现较为明显的特征信号峰,其中化学位移值  $14.82\text{ kHz}$  归属于脒键中的 C=N 峰, $11.51$  和  $13.33\text{ kHz}$  为 1-丁烯基中双键上碳信号峰,而  $3.10$  和  $6.72\text{ kHz}$  为 1-丁烯基中 2 个  $-\text{CH}_2-$  碳信号峰,其余峰为苯环上的碳峰,以上结果说明 BB-TF COF 结构与目标产物一致。

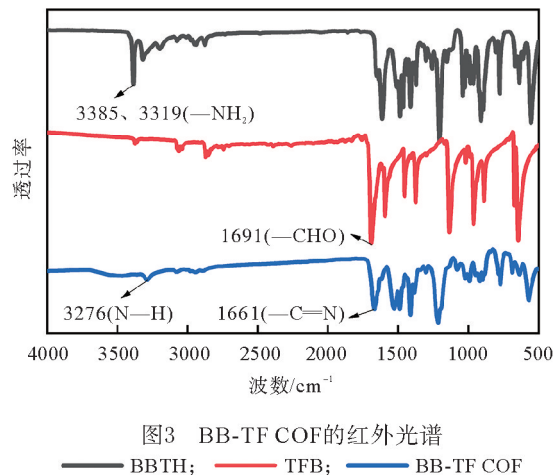


图3 BB-TF COF的红外光谱  
— BBTH; — TFB; — BB-TF COF

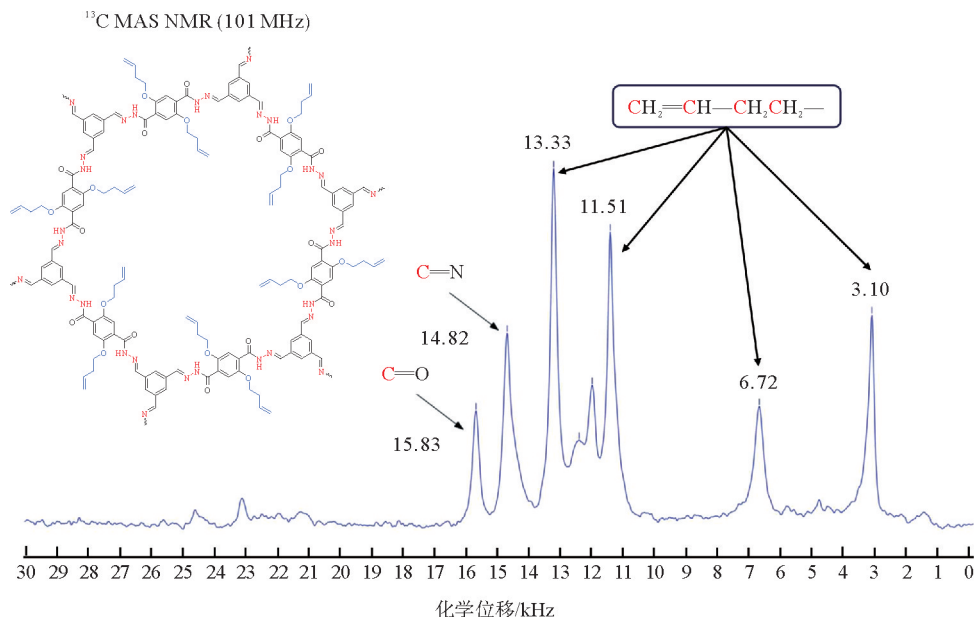


图4 BB-TF COF的 $^{13}\text{C}$ 固体核磁共振谱

## 2.2 BB-TF COF 对 $\text{Pd}^{2+}$ 的荧光检测

### 2.2.1 荧光特性

将 BB-TF COF 研磨后加入去离子水,经超声分散形成均一稳定悬浮液,其在  $365\text{ nm}$  紫外光条件下呈现出明亮的淡蓝色荧光(图 5 插图)。通过荧光光谱仪测试可知, BB-TF COF 的激发波长(Excitation,  $E_x$ )为  $360\text{ nm}$ ,发射波长(Emission,  $E_m$ )为  $435\text{ nm}$ (图 5)。

### 2.2.2 金属离子的识别分析

将16种金属离子分别加入到BB-TF COF悬浮液中,通过荧光实验分析材料的荧光淬灭行为(图6),其中, $I_0$ 为BB-TF COF悬浮液的初始荧光强度; $I$ 为加入金属离子后的荧光强度。由实验结果可以看出,仅有 $\text{Pd}^{2+}$ 对材料的荧光淬灭明显,而加入相同量的其他金属离子几乎不影响材料的荧光强度,说明BB-TF COF对 $\text{Pd}^{2+}$ 荧光识别响应最灵敏。

选择 $\text{Pd}^{2+}$ 为研究对象,在BB-TF COF悬浮液中加入不同浓度的 $\text{Pd}^{2+}$ ,研究 $\text{Pd}^{2+}$ 对BB-TF COF的荧光淬灭详细过程,结果如图7(a)所示,BB-TF COF悬浮液的荧光发射强度随着 $\text{Pd}^{2+}$ 浓度的增大逐渐降低。材料的荧光强度与 $\text{Pd}^{2+}$ 浓度在 $1\sim 50\ \mu\text{mol/L}$ 内呈现出良好的线性关系(图7(b)),根据式(1)可计算出其最低检测限为 $0.15\ \mu\text{mol/L}$ ,灵敏度较高,表明在一定范围内BB-TF COF对 $\text{Pd}^{2+}$ 具有特异性响应。

$$\text{LOD} = 3\sigma / K \quad (1)$$

式中: $\text{LOD}$ (Limit of Detection)为检出限,即该实验条件下能够检测到 $\text{Pd}^{2+}$ 的最低浓度; $\sigma$ 为空白样品的标准差; $K$ 为拟合曲线的斜率。

### 2.2.3 BB-TF COF 检测 $\text{Pd}^{2+}$ 的抗干扰实验

考虑到水中其他离子的存在可能对BB-TF COF检测 $\text{Pd}^{2+}$ 产生干扰,

因此将 $\text{Pd}^{2+}$ 分别与不同阳离子混合,考察BB-TF COF对 $\text{Pd}^{2+}$ 的选择性荧光识别的影响结果。由图8(a)

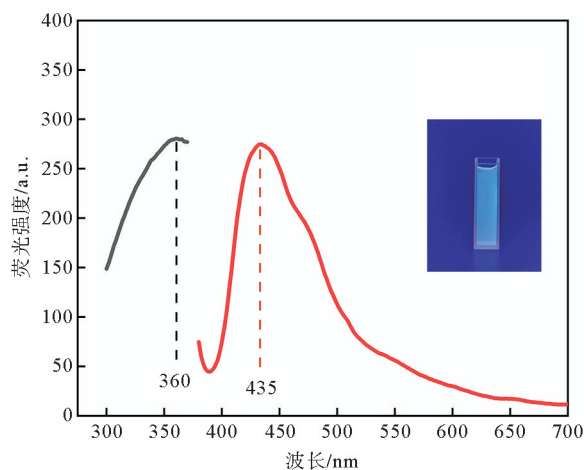


图5 BB-TF COF的激发发射荧光光谱

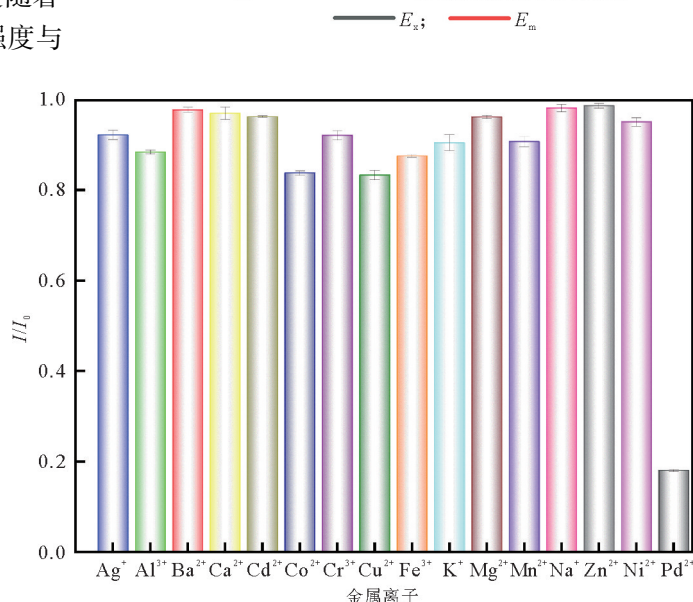
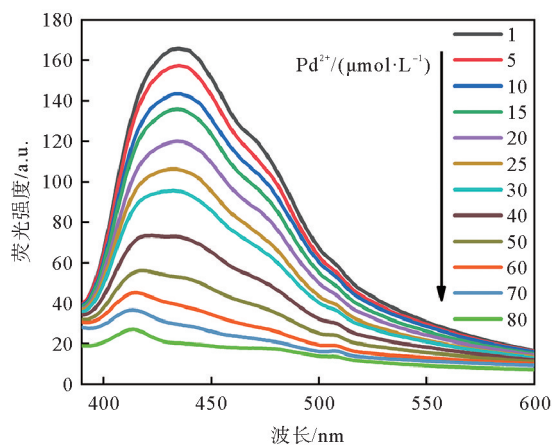
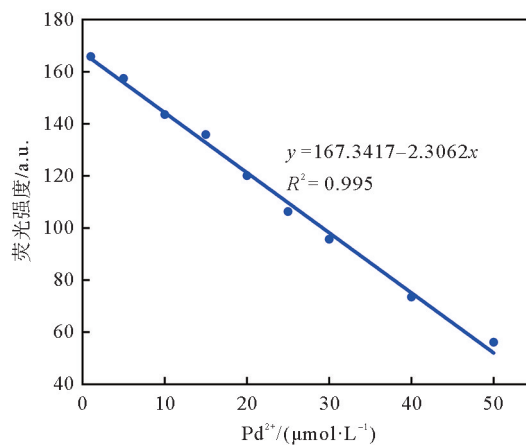


图6 不同金属离子对BB-TF COF的荧光淬灭



(a) 不同浓度 $\text{Pd}^{2+}$ 的荧光淬灭效果



(b)  $\text{Pd}^{2+}$ 浓度与荧光强度拟合曲线

图7  $\text{Pd}^{2+}$ 浓度对BB-TF COF荧光效应的淬灭影响分析

可知,当单独加入不同阳离子时,各组 BB-TF COF 的荧光强度并未发生明显淬灭,相比之下,在加入  $\text{Pd}^{2+}$  离子后各组 BB-TF COF 发生显著淬灭,其中多组荧光淬灭情况与单独加入  $\text{Pd}^{2+}$  时无明显差异,这说明 BB-TF COF 在检测过程中具备一定的抗阳离子干扰能力, $\text{Pd}^{2+}$  对 BB-TF COF 的荧光淬灭行为只与其自身相关,其他阳离子的存在对其淬灭行为无明显影响。

在 BB-TF COF 悬浮液中分别加入不同阴离子,各组荧光强度下降的程度相似(图 8(b)),说明加入的  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  对 BB-TF COF 的荧光强度无明显影响,当不同阴离子与  $\text{Pd}^{2+}$  共存时, BB-TF COF 发生明显淬灭,进一步说明 BB-TF COF 对  $\text{Pd}^{2+}$  具有良好的选择性。

此外,还考察了 pH 值对  $\text{Pd}^{2+}$  淬灭行为的影响(图 9),pH 值 2~10 时,各组 BB-TF COF 悬浮液的荧光强度基本一致,说明 pH 值对材料的荧光强度无明显影响。加入  $\text{Pd}^{2+}$  后,各组荧光淬灭率约 80%,表明 pH 值对  $\text{Pd}^{2+}$  的检测无影响。

#### 2.2.4 机理分析

在紫外光条件下, BB-TF COF 表面电子变为激发态,在其返回到基态时,部分能量将以光的形式放出,因此材料呈现出淡蓝色荧光。为探究材料荧光淬灭机理,利用 FT-IR 和 XPS 对 BB-TF COF@Pd 进行了表征。如图 10(a)所示, BB-TF COF@Pd 中  $\text{C}=\text{C}$  特征峰( $920\text{ cm}^{-1}$ )消失。在 XPS 谱图(图 10(b))中, BB-TF COF@Pd 中  $\text{C}-\text{C}$ 、 $\text{C}-\text{N}$  和  $\text{C}=\text{O}$  的  $\text{C} 1s$  结合能与 BB-TF COF 相比未发生明显改变,但  $\text{C}=\text{C}$  结合能改变了  $0.5\text{ eV}$ ,由此推测 BB-TF COF 发生荧光淬灭与其结构中烯基有关。 $\text{Pd}^{2+}$  含有未被充满的 d 轨道,易与不饱和键发生配位作用,从而改变体系中电子或电荷分布,导致光诱导电子转移(PET)、分子内电荷转移(ICT)、荧光共振能量转移(FRET)等,从而引发荧光强度或荧光发射波长发生变化<sup>[22]</sup>。BB-TF COF 的淬灭可能是由于结构中烯基与  $\text{Pd}^{2+}$  发生配位,电子激发时,从  $\pi$  共轭骨架转移到  $\text{Pd}^{2+}$  的未占据的空轨道上<sup>[20]</sup>,破坏了原有供体受体电子结构,阻止激发态电子返回到基态,从而影响了荧光性能,发生荧光淬灭。

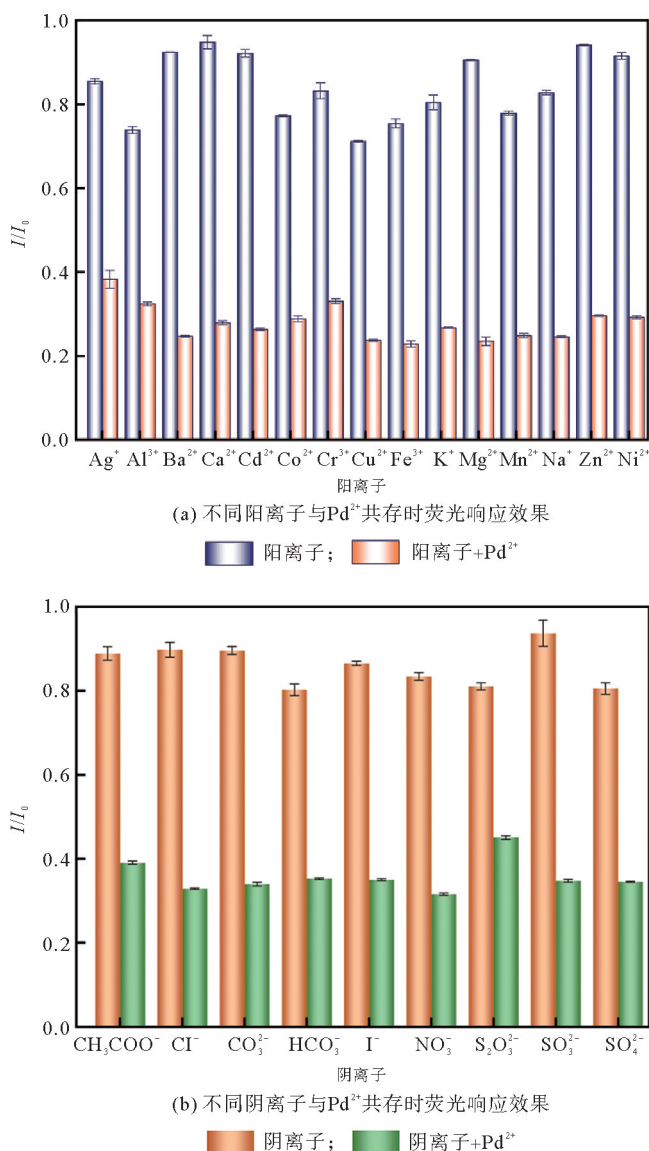


图8 BB-TF COF 检测  $\text{Pd}^{2+}$  抗干扰实验

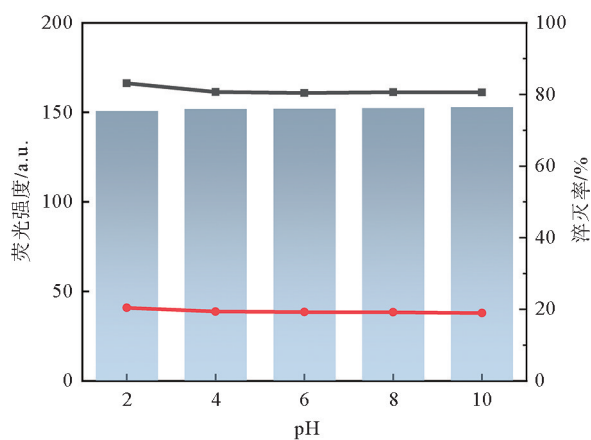
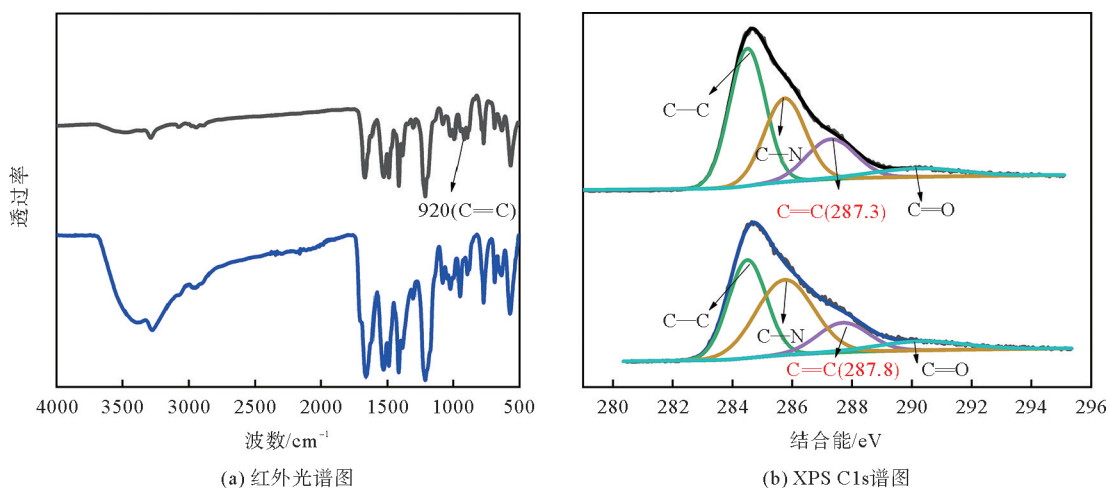


图9 不同pH条件下BB-TF COF对 $\text{Pd}^{2+}$ 荧光响应效果

— BB-TF COF; — BB-TF COF@Pd; ■ 淬灭率

破坏了原有供体受体电子结构,阻止激发态电子返回到基态,从而影响了荧光性能,发生荧光淬灭。

图10 BB-TF COF检测Pd<sup>2+</sup>前后的材料差异

— BB-TF COF; — BB-TF COF@Pd

### 3 结论

采用液液界面聚合法,通过席夫碱反应制备了烯基功能化脲类共价有机框架材料 BB-TF COF,利用 XRD 以及软件模拟确认了其晶形结构,通过 FT-IR 以及固体核磁表征确认了 BB-TF COF 的精细结构特征。将 BB-TF COF 应用于水中 Pd<sup>2+</sup> 的识别,结果表明其对 Pd<sup>2+</sup> 具有特异性荧光响应,检出限低至 0.15 μmol/L,在 pH 值为 2~10 时仍保持较强的荧光识别性能。综上所述, BB-TF COF 是一种新型有效的检测水中 Pd<sup>2+</sup> 的材料,为实现水环境中 Pd<sup>2+</sup> 的快速荧光检测提供了一种有效策略。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈柳州,赵泉林,叶正芳. 废液和废水中分离回收钯研究进展[J]. 贵金属,2022,43(4):97-102.  
CHEN Liuzhou,ZHAO Quanlin, YE Zhengfang. Research progress on separation and recovery of palladium from waste liquid and wastewater[J]. Precious Metals,2022,43(4):97-102.
- [2] EMEA 20077—2007,Guideline on the specification limits for residues of metal catalysts[S].
- [3] ICH Q3D(R2)—2022,元素杂质指导原则[S].  
ICH Q3D(R2)—2022,Guidelines for elemental impurities[S].
- [4] 要志丹,马继平,胡钢强,等. 离子色谱-氢化物发生原子荧光法测定海水中 4 种不同形态的砷[J]. 青岛理工大学学报,2014,35(5):58-63.  
YAO Zhidan,MA Jiping,HU Gangqiang, et al. Determination of 4 arsenic speciations in seawater by ion chromatography-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. Journal of Qingdao Technological University,2014,35(5):58-63.
- [5] 纪雪峰,单斌,王莎莎,等. 荧光探针在水中重金属离子检测中的应用研究进展[J]. 青岛理工大学学报,2021,42(1):109-118.  
JI Xuefeng,SHAN Bin,WANG Shasha, et al. Application research progress of fluorescent probe in the detection of heavy metal ions in water[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2021,42(1):109-118.
- [6] TANG F K,CHAN S M,WANG T, et al. Highly selective detection of Pd<sup>2+</sup> ion in aqueous solutions with rhodamine-based colorimetric and fluorescent chemosensors[J]. Talanta,2020,210:120634.
- [7] WU G,WANG Z,ZHANG W, et al. A novel rhodamine B and purine derivative-based fluorescent chemosensor for detection of palladium(II) ion[J]. Inorganic Chemistry Communications,2019,102:233-239.
- [8] ZHANG X P,YUAN Q,QI Y L, et al. An umbelliferone-derived fluorescent sensor for selective detection of palladium(II) from palladium(0) in living cells[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2019,220:117134.
- [9] CHEN X Z,MA X D,WANG H M, et al. A coumarin-based colorimetric and fluorescent dual probe for palladium(II) ions that can be used in live cells[J]. New Journal of Chemistry,2017,41(16):8026-8030.
- [10] GHOSH S,STEINKE F,RANA A, et al. A metal-organic framework with allyloxy functionalization for aqueous-phase fluorescence recognition of Pd(II) ion[J]. European Journal of Inorganic Chemistry,2021,2021(37):3846-3851.
- [11] ABADY A,AL-HUMAIDI J,REFAT M, et al. A novel strategy for preparing metal-organic framework as a smart material for selective detection and efficient extraction of Pd(II) and Au(III) ions from E-wastes[J]. Journal of Molecular Liquids,2023,369:120862.

- [12] SKORJANC T, SHETTY D, VALANT M. Covalent organic polymers and frameworks for fluorescence-based sensors[J]. ACS Sensors, 2021, 6(4): 1461-1481.
- [13] ZHANG S J, LIU D Q, WANG G T. Covalent organic frameworks for chemical and biological sensing[J]. Molecules, 2022, 27(8): 2586.
- [14] XUE R, GUO H, WANG T, et al. Fluorescence properties and analytical applications of covalent organic frameworks[J]. Analytical Methods, 2017, 9(25): 3737-3750.
- [15] MENG Z, MIRICA K A. Covalent organic frameworks as multifunctional materials for chemical detection[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(24): 13498-13558.
- [16] LI Y, YANG L, DU M, et al. Rational design of a boron-dipyrromethene-based fluorescent probe for detecting Pd<sup>2+</sup> sensitively and selectively in aqueous media[J]. Analyst, 2019, 144(4): 1260-1264.
- [17] WU X, HONG Y L, XU B, et al. Perfluoroalkyl-functionalized covalent organic frameworks with superhydrophobicity for anhydrous proton conduction[J]. Journal of the American Chemical Society, 2020, 142(33): 14357-14364.
- [18] DING S Y, DONG M, WANG Y W, et al. Thioether-based fluorescent covalent organic framework for selective detection and facile removal of mercury(II)[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(9): 3031-3037.
- [19] ZHOU Z, ZHONG W, CUI K, et al. A covalent organic framework bearing thioether pendant arms for selective detection and recovery of Au from ultra-low concentration aqueous solution[J]. Chemical Communications, 2018, 54(71): 9977-9980.
- [20] LU Y, LIANG Y, ZHAO Y, et al. Fluorescent test paper via the in situ growth of COFs for rapid and convenient detection of Pd(II) ions[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2021, 13(1): 1644-1650.
- [21] 韩向丽, 关静, 陈乐, 等. 气液界面法合成芘基二维聚合物薄膜[J]. 功能高分子学报, 2021, 34(5): 476-482.  
HAN Xiangli, GUAN Jing, CHEN Le, et al. Synthesis of pyrene-based two-dimensional polymer film by gas-liquid interface strategy[J]. Journal of Functional Polymers, 2021, 34(5): 476-482.
- [22] 袁阳蕾, 陈欣, 王红梅, 等. 配位型钯离子荧光探针的研究进展[J]. 化学通报, 2019, 82(8): 696-705.  
YUAN Yanglei, CHEN Xin, WANG Hongmei, et al. Progress in coordination-based fluorescent probes for palladium ion[J]. Chemistry, 2019, 82(8): 696-705.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)

### (上接第 16 页)

- [11] 徐晗昕, 俞斌杰, 柳丽, 等. 改进小波阈值函数在手部姿态获取中的应用[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(11): 165-168.  
XU Hanxin, YU Binjie, LIU Li, et al. Application of improved wavelet threshold function in hand pose acquisition[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(11): 165-168.
- [12] SALEH M, KARFOUL A, AMAR K, et al. Efficient stepsize selection strategy for given parametrized ICA applied to EEG denoising[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(6): 882-886.
- [13] 徐景秀, 张青. 改进小波软阈值函数在图像去噪中的应用[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(1): 92-101.  
XU Jingxiu, ZHANG Qing. Research and application of an improved wavelet soft threshold function in image denoising[J]. Computer Engineering and Science, 2022, 44(1): 92-101.
- [14] 沙磊. 一种新小波阈值算法的变形监测数据去噪方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(8): 847-850.  
SHA Lei. A new wavelet threshold algorithm for deformation monitoring data denoising[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(8): 847-850.
- [15] GROSSMANN A, MORLET J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape[J]. Siam Journal on Mathematical Analysis, 1984, 15(4): 723-736.
- [16] LIU C Y, YAO C L, XIONG J. Geophysical potential field anomaly separation method with optimal mother wavelet and spatial locating multiresolution analysis (MRA)[J]. IEEE Access, 2019, (7): 62840-62851.
- [17] GOH H H, LIAO L, ZHANG D, et al. Denoising transient power quality disturbances using an improved adaptive wavelet threshold method based on energy optimization[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 15(9): 3081.
- [18] SRIVASTAVA M, ANDERSON C L, FREED J H. A new wavelet denoising method for selecting decomposition levels and noise thresholds[J]. IEEE Access Practical Innovations Open Solutions, 2016, 4: 3862-3877.
- [19] ARSHAD W, ABBAS N, RIAZ M, et al. Simultaneous use of runs rules and auxiliary information with exponentially weighted moving average control charts[J]. Quality and Reliability Engineering, 2017, 33(2): 323-336.
- [20] COHEN A, ATOUI M A. On wavelet-based statistical process monitoring[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, (3): 1-14.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)