

doi: 10.12452/j.fxcxb.25112101

基于荧光Eu-MOF探针检测痕量磺胺嘧啶

孙睿琳¹, 张 枫², 朱雨洁¹, 吴 欣¹, 金佳佳¹, 杜海川¹,
张宜明^{1*}, 王东辉^{1*}

(1. 浙江农林大学 食品与健康学院, 浙江 杭州 311300; 2. 东营市胜利第一初级中学, 山东 东营 257100)

摘要: 该文构建了荧光镧基金属有机框架(Eu-MOF)探针, 并基于其对磺胺嘧啶(SDZ)的荧光猝灭作用对SDZ进行检测。为获得最佳分析性能, 对激发波长、Eu-MOF探针的质量浓度、溶液体系的pH值和孵育时间进行优化, 在最佳实验条件下, 所建方法具有响应速度快(30 s), 线性范围良好(0~14 $\mu\text{g/mL}$), 检出限低(0.035 $\mu\text{g/mL}$)的优点, 并表现出优异的识别选择性。机理分析显示, Eu-MOF探针对于SDZ的选择性检测主要基于光诱导电子转移(PET)及内滤效应。探针在实际水样品分析中的准确度良好, 加标回收率为86.5%~110%, 相对标准偏差小于10%。该MOF探针在快速检测痕量SDZ中展现出广阔的应用潜力。

关键词: 磺胺嘧啶; 环境分析; 金属有机框架; 荧光探针

中图分类号: O657.3; R978.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)04-0886-07

Detection of Trace Sulfadiazine Based on Fluorescent Eu-MOF Probe

SUN Rui-lin¹, ZHANG Zong², ZHU Yu-jie¹, WU Xin¹, JIN Jia-jia¹, DU Hai-chuan¹,
ZHANG Yi-ming^{1*}, WANG Dong-hui^{1*}

(1. College of Food and Health, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. Shengli No. 1 Junior Middle School of Dongying, Dongying 257100, China)

Abstract: In this study, a fluorescent europium-based metal-organic framework (Eu-MOF) probe is fabricated for SDZ detection via a fluorescence quenching mechanism. To achieve optimal analytical performance, key parameters including excitation wavelength, mass concentration of the Eu-MOF probe, pH of the solution system, and incubation time are optimized. Under optimal conditions, the proposed method exhibits rapid response (30 s), a good linear range (0–14 $\mu\text{g/mL}$), and a low detection limit (0.035 $\mu\text{g/mL}$), along with excellent recognition selectivity. Mechanism analysis reveals that the selective detection of SDZ by the Eu-MOF probe primarily relies on photoinduced electron transfer (PET) and the inner filter effect. Furthermore, the probe demonstrates satisfactory accuracy in real water sample analysis, with good recovery (86.5%–110%) and low relative standard deviation (<10%). These results highlight the promising potential of the Eu-MOF probe for rapid detection of trace SDZ.

Key words: sulfadiazine; environment analysis; metal-organic framework; fluorescence probe

磺胺嘧啶(SDZ)是一种磺胺类抗生素, 具有成本低和广谱抗菌效果好等特点, 已广泛应用于畜牧业和水产养殖业^[1]。然而其在生态环境中的残留可引起人类的健康问题, 已成为公共安全领域的重要关注点之一^[2-3]。因此, 发展高效的SDZ检测方法对于保障人类健康和可持续发展具有重要意义。

目前SDZ的检测方法主要有高效液相色谱法、高效液相色谱-串联质谱法、免疫分析法、电化学法和荧光法等^[4-8]。其中荧光法的高灵敏性和快速便捷性可提高传感性能, 为实现快速检测痕量SDZ提供有力保证。而基于荧光材料(荧光有机染料、荧光量子点和荧光金属有机框架(MOF)等)的信号变化是目前实现SDZ有效检测的重要策略^[9-11]。相比于其他材料, 荧光MOF材料具有合成简便、结构可调、发光性能优良、比表面积大和活性位点多等优点, 可进一步提高对目标物的富集与检测性能。同时,

收稿日期: 2025-11-21; **修回日期:** 2026-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22406171); 浙江农林大学大学生科研训练项目(2024kx0167)

* **通讯作者:** 张宜明, 博士, 教授, 研究方向: 仿生识别材料和食品安全分析, E-mail: zym7307@zju.edu.cn

王东辉, 博士, 讲师, 研究方向: 食品与环境安全分析, E-mail: dhwang@zafu.edu.cn

网络首发日期: 2026-02-14

荧光MOF材料具有多孔性和功能化灵活性,有利于增加作用位点以及提高传质和检测效率,已在食品与环境污染物的荧光分析领域得到应用^[12-14]。然而高性能的荧光MOF材料用于SDZ特异性和快速高灵敏分析的报道仍较少^[15-16]。因此,有必要进一步开发具有高选择性能的荧光MOF材料,实现痕量SDZ的精准分析。

基于此,本研究通过水热法制备了具有红光发射的Eu-MOF荧光探针,用于SDZ的选择性识别与有效检测。首先对制备的Eu-MOF探针的形貌与物理化学性质进行了表征。其次,基于SDZ对Eu-MOF探针的荧光猝灭作用,对激发波长、Eu-MOF探针的质量浓度、溶液体系的pH值和孵育时间进行了优化。在最优条件下,考察了Eu-MOF探针在溶液中对SDZ的检测行为。随后,研究了探针检测实际水样品中SDZ的性能。本研究为发展环境中痕量抗生素的快速检测技术提供了理论参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

1.1.1 试剂 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、乙醇(EtOH)、氯化钠(NaCl)、氯化钙(CaCl₂)、氯化铝(AlCl₃)、氯化镁(MgCl₂)和氯化钾(KCl)均购于国药集团化学试剂有限公司;氯化铕六水合物(EuCl₃·6H₂O)、磺胺嘧啶(SDZ)、硫酸卡那霉素(KAN)和盐酸四环素(TC)均购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;氧氟沙星(OFL)和间苯二甲酸(IPA)均购于上海麦克林生化科技有限公司;4-氨基-N-(5-甲氧基嘧啶-2-基)苯磺酰胺(SMM)、磺胺甲氧哒嗪(SA)、4-氨基-N-(噻唑-2-基)苯磺酰胺(ST)和磺胺甲噁唑(SMZ)均购于安徽泽升科技股份有限公司;葡萄糖(Glu)购于天津市永大化学试剂有限公司;实验中所用纯净水为去离子水。

1.1.2 仪器 扫描电子显微镜(SEM,日本日立公司,SU8010);X射线衍射仪(XRD,美国布鲁克公司,D2 PHASER);全自动比表面及孔隙度分析仪(BET,美国麦克默瑞提克公司,ASAP 2460);傅里叶红外光谱仪(FTIR,美国赛默飞世尔科技公司,Nicolet iS20);热重分析仪(TG,德国耐驰公司,TG209F1);荧光光谱仪(英国爱丁堡公司,FS5);鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司,DHG-9015A);超声清洗仪(昆山市超声仪器有限公司,KQ5200DE);恒温振荡器(上海力辰科学仪器有限公司,SHA-B)。

1.2 Eu-MOF探针的制备与表征

Eu-MOF基于文献方法稍作修改制备^[17]:将0.8 mmol(292.8 mg)的EuCl₃·6H₂O和0.8 mmol(132.9 mg)的间苯二甲酸(IPA)加入到由24 mL水和56 mL DMF组成的混合溶液中,在摇床振荡1.5 h后,超声处理15 min。将混合物转移至高压釜中在130 °C下反应12 h。反应完成后,过滤收集固体,分别用DMF和EtOH洗涤3次,并在60 °C下烘干固体获得白色粉末产物。通过扫描电子显微镜对MOF探针的形貌进行表征,借助能谱扫描对MOF探针的元素进行分析。采用X射线衍射仪表征MOF探针的晶型。通过全自动比表面及孔隙度分析仪测定MOF的比表面积和孔径大小。借助红外光谱仪分析MOF的官能团信息。利用热重分析仪测试MOF探针的热稳定性。采用荧光光谱仪研究MOF探针的荧光性质和检测性能。

1.3 荧光检测实验

将10 mg探针分散于10 mL水中制备MOF探针母液(1 mg/mL)。采用Tris-HCl缓冲溶液(50 mmol/L,pH 7.0)稀释配制100 μg/mL的探针溶液,取3 mL作为待测液,分别加入不同质量浓度(0~14 μg/mL)的SDZ溶液,测定荧光光谱图(激发波长为260 nm),用于考察MOF探针的线性响应范围和灵敏度。采用上述类似的实验条件,考察探针对SDZ、其他磺胺类药物(4-氨基-N-(5-甲氧基嘧啶-2-基)苯磺酰胺、磺胺甲氧哒嗪、4-氨基-N-(噻唑-2-基)苯磺酰胺、磺胺甲噁唑)和应用环境中潜在干扰物(四环素、氧氟沙星、卡那霉素、葡萄糖、Al³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺和K⁺)(质量浓度均为30 μg/mL)的荧光响应,用于评估探针的选择性。荧光强度分析均采用615 nm处的荧光值。

1.4 实际样品分析

采集常见水体(自来水、湖水)作为实际水样品开展加标实验。水样品经一步过滤后,分别加入不同质量浓度的SDZ标准溶液(0、0.1、2、5 μg/mL),随后与100 μg/mL的探针溶液进行共混,加入

Tris-HCl缓冲溶液(50 mmol/L, pH 7.0)配制成3 mL的待测液。进一步采用“1.3”所述荧光分析方法测定加标样品中的SDZ含量,用于验证方法的准确性和可行性。

2 结果与讨论

2.1 Eu-MOF探针的表征

首先对合成的Eu-MOF探针进行表征。利用SEM对获得的Eu-MOF探针进行形貌表征。如图1A所示,探针在形貌上表现为表面光滑的球形颗粒,平均直径大约为2 μm ,与文献中所合成的MOF材料具有相似结构,表明Eu-MOF探针成功制备^[17]。随后,通过能谱扫描分析MOF探针的元素分布与含量(图1B-E)。结果显示,元素C、O和Eu均匀分布在颗粒表面,原子百分比依次为60.59%、32.07%和7.34%,说明材料中主要为C和O元素。采用XRD仪对Eu-MOF探针的晶型进行分析。如图2A所示,相比于所用合成原料间苯二甲酸(IPA)和铕金属盐(EuCl_3),所制备的探针在 10° 左右具有新的晶面宽峰。虽然晶型欠佳,但在 10° 处的宽峰与模拟图谱所对应的主衍射峰位置一致,说明合成一定晶型的MOF探针。由BET测试结果可知Eu-MOF的比表面积为 $2.7528 \text{ m}^2/\text{g}$,平均孔径为20.07 nm,表明MOF为介孔材料(图2B)。红外光谱中(图2C), 3069 cm^{-1} 处的弱峰对应配体苯环上C-H的伸缩振动,证实了有机配体的存在; 1606 cm^{-1} 和 1391 cm^{-1} 处分别对应羧基的反对称和对称伸缩振动; 748 cm^{-1} 处的峰属于间苯二甲酸的间位取代振动; 530 cm^{-1} 归属于Eu-O的伸缩振动,说明了Eu-MOF的有效构建。进一步借助热重(TG)分析考察探针的稳定性(图2D)。在 500°C 之前,MOF探针的质量不断下降,主要是探针中残留溶剂和有机酸配体的质量损失; $500\sim 600^\circ\text{C}$ 之间,探针质量迅速下降,说明Eu-MOF分解;而在 600°C 后,探针质量趋于稳定。结果表明所制备的探针在 500°C 之前具有较好的热稳定性。

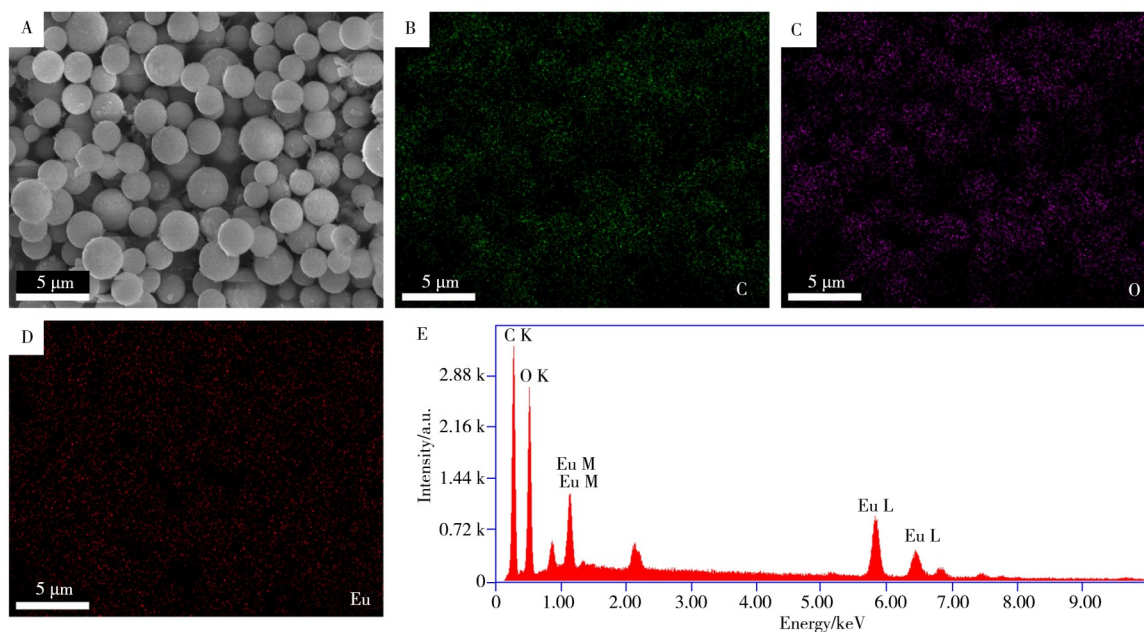


图1 Eu-MOF的SEM图像(A)和C、O和Eu元素的能谱分析(B-E)

Fig. 1 SEM image of Eu-MOF(A) and EDS analysis of C, O and Eu(B-E)

2.2 Eu-MOF探针的荧光性能与检测条件优化

制备获得Eu-MOF探针后,对其光学性能进行考察。从Eu-MOF探针的激发谱图可知(图3A),探针在255~290 nm之间具有良好的光吸收行为。而荧光发射光谱显示(图3B),探针能够在红光至近红外光区域产生荧光,主要发射峰分别位于590、615、695 nm处,表现出典型的 Eu^{3+} 红色发光^[18],其中最强烈发射峰位于615 nm。此发光现象主要是因为IPA通过天线效应有效诱导 Eu^{3+} 的发光增强^[19-21]。当Eu-MOF探针体系中加入SDZ后,探针的荧光能够被有效猝灭,表明所制备的探针具有分析检测SDZ的潜力。

为获得良好的分析性能,对检测条件进行优化。考察了不同激发波长下探针的发光行为(图3C)。当激发波长为260 nm时,探针具有最好的荧光性能。因此,后续实验采用260 nm作为激发波长。随后

优化了Eu-MOF探针的质量浓度(图3D)。当探针质量浓度为100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,体系表现出最好的荧光猝灭率(F_0/F , F_0 : Eu-MOF起始荧光强度, F : 加入SDZ后体系荧光强度)。因此将100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 作为探针检测SDZ的质量浓度。其次,考察了不同pH值下MOF探针的荧光(图3E)。相比于偏酸或偏碱的溶液体系,探针在pH值为7.0的体系中展现出最强的荧光,因此选择pH 7.0的分析体系(50 mmol/L的Tris-HCl缓冲体系)作为最优pH值条件。另外,对探针与SDZ的孵育时间进行了优化(图3F)。当SDZ加入到探针体系时,体系的荧光在30 s内被快速猝灭,同时荧光猝灭率达到稳定状态。上述结果表明基于探针的检测体系具有响应快速的特点,展现出快速检测SDZ的应用潜力。

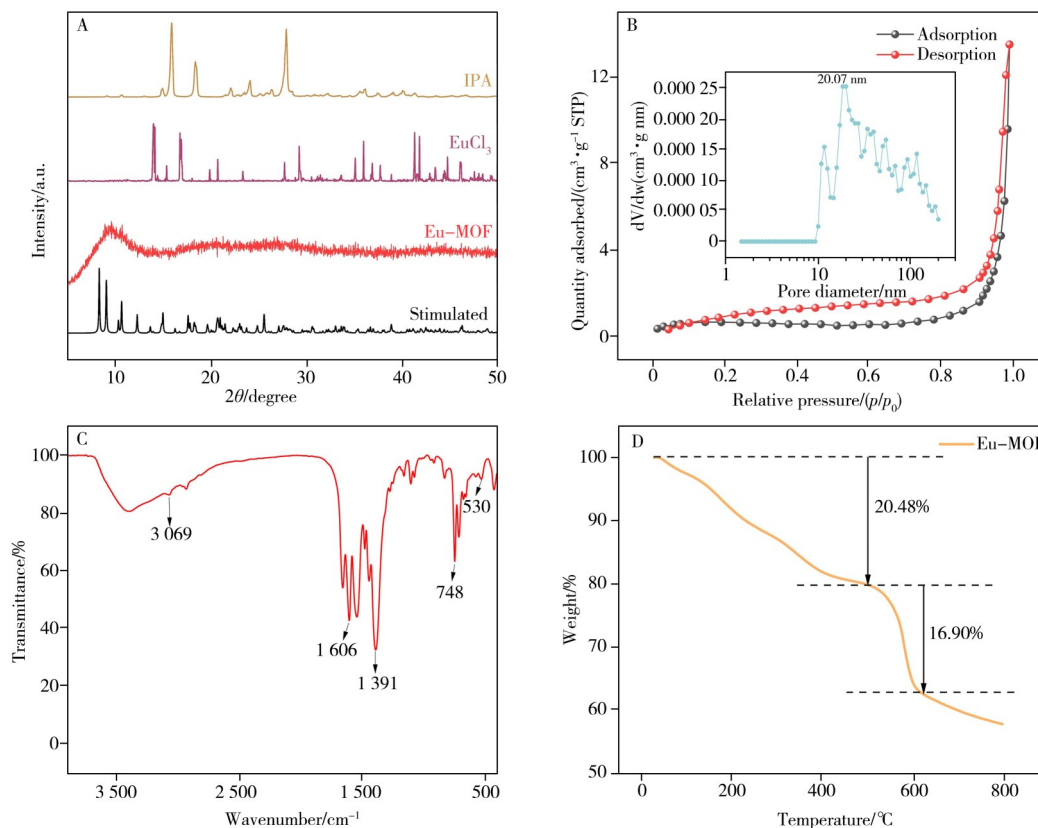


图2 IPA、 EuCl_3 和Eu-MOF的XRD图谱(A), Eu-MOF的 N_2 等温吸/脱附曲线(B, 内插图: Eu-MOF的孔径分布图), Eu-MOF的红外光谱图(C)和热重图(D)

Fig. 2 XRD patterns of IPA, EuCl_3 , and Eu-MOF(A), N_2 adsorption-desorption isotherms of Eu-MOF(B, insert: pore size distributions of Eu-MOF), FTIR spectra (C) and TG analysis(D) of Eu-MOF

2.3 检出限及选择性实验

为进一步评估探针对SDZ的检测性能,在最优检测条件下,考察了探针对不同质量浓度SDZ的荧光响应行为(图4A~B)。随着SDZ质量浓度的增加,探针的荧光强度逐渐下降,荧光猝灭率和SDZ质量浓度在0~14 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 范围内呈现良好的线性关系,线性方程为 $y=0.2964x+1.003$,相关系数(r^2)为0.9942,方法检出限(LOD, $3\text{SD}/S$,其中SD为10次空白样的标准偏差, S 为线性方程的斜率)为0.035 $\mu\text{g}/\text{mL}$,低于国标要求的最大残留限量0.1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ (100 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[22]。同时,相比于现有报道的各类SDZ检测方法^[15-16,23-27],本方法具有较好的检测线性范围和灵敏度(表1)。相比于已报道的SDZ荧光MOF检测体系,所发展的Eu-MOF还具有发光波长长(615 nm)的特点。长波长检测体系有利于降低样品检测时来自短波长荧光组分的干扰,进而提高检测准确性。

通过选择结构类似物4-氨基-N-(5-甲氧基嘧啶-2-基)苯磺酰胺(SMM)、磺胺甲氧嘧啶(SA)、4-氨基-N-(噻唑-2-基)苯磺酰胺(ST)和磺胺甲噁唑(SMZ)以及其他抗生素四环素(TC)、氧氟沙星(OFL)和卡那霉素(KAN)和实际样品中可能存在的干扰成分(葡萄糖、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+),开展选择性检测实验(图4C)。结果显示,其他磺胺类药物由于结构与SDZ相近,也能有效猝灭MOF探针的荧光。但MOF探针对SDZ的荧光响应最显著,荧光猝灭效率最高。综上,Eu-MOF探针对SDZ的检测具有良好的选择性。

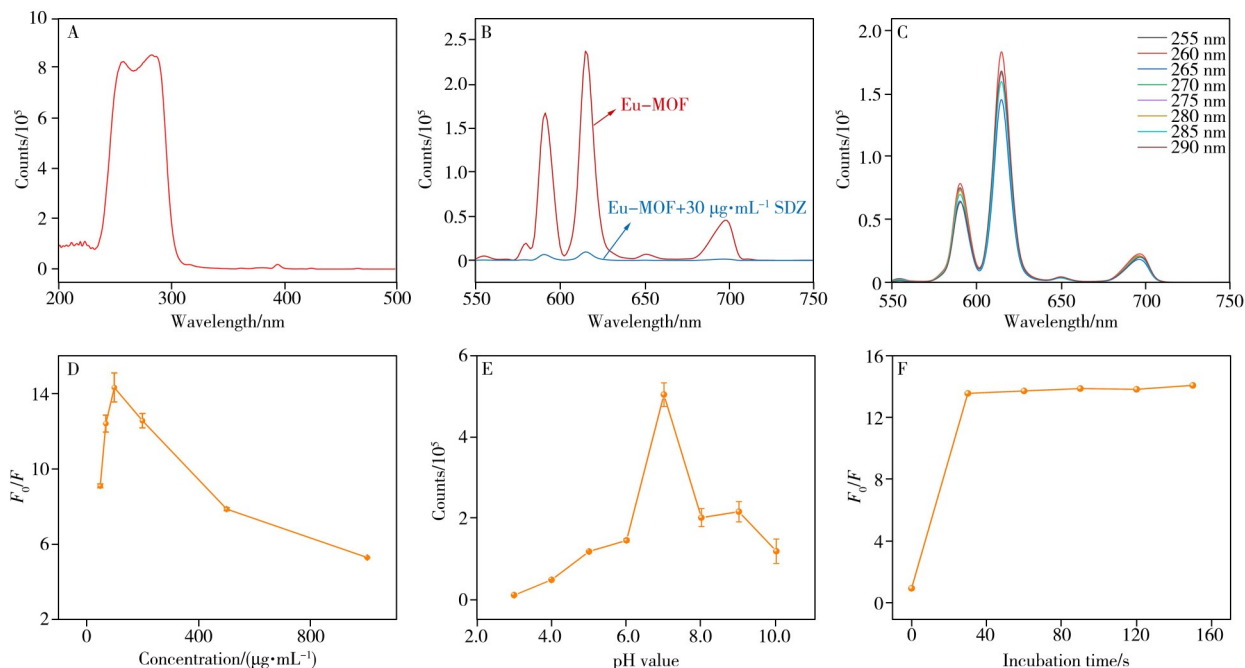


图3 Eu-MOF 探针的激发光谱图(A), Eu-MOF 探针对SDZ的荧光响应行为(B), Eu-MOF的激发波长、质量浓度、溶液体系pH值和孵育时间的优化(C~F)

Fig. 3 The excitation spectrum of Eu-MOF probe(A), the fluorescent behaviors of Eu-MOF probe to SDZ(B), optimization of excitation wavelength, mass concentration, pH value of solution, and incubation time for Eu-MOF(C~F)

F_0 : the initial fluorescence intensity of Eu-MOF, F : the fluorescence intensity of the system after the SDZ addition (F_0 : Eu-MOF 起始荧光强度, F : 加入SDZ后体系荧光强度)

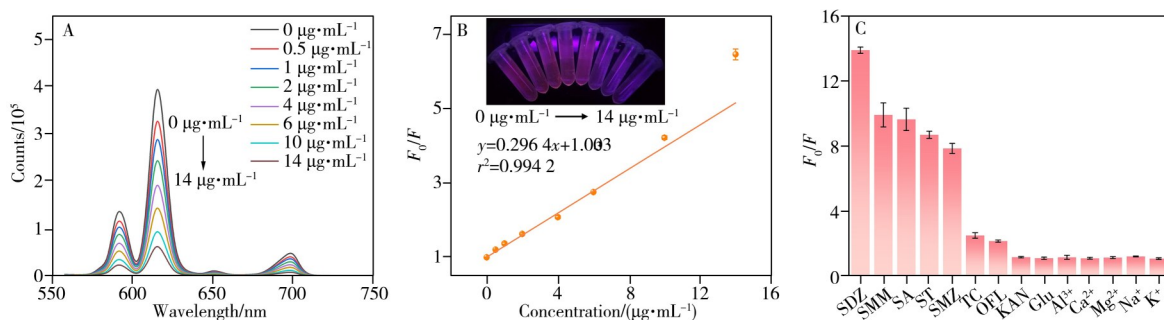


图4 Eu-MOF 对不同质量浓度SDZ的荧光响应(A)、SDZ质量浓度与荧光猝灭率之间的线性关系(B)(内插图: 体系荧光可视化图, 激发波长: 254 nm)和Eu-MOF对SDZ的选择性(C)

Fig. 4 The fluorescence response of Eu-MOF to different SDZ concentrations(A), the linear relationship between the SDZ concentration and the fluorescence quenching rate(B)(insert: the fluorescence photos of the analytical system under 254 nm light irradiation) and the selectivity of Eu-MOF for SDZ(C)

表1 本方法与已报道方法检测SDZ的性能对比

Table 1 Comparison between this method and other reported methods for SDZ detection performance

Method	Linear range/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Detection limit/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Reference
LMOF(CSMCRI-2)	0~5	0.05	[15]
Zn-MOF(FCS-1)	0~50	-	[16]
N-CQDs	0~7.5	0.01	[23]
CuNCs@FA-sensor	15~1 500	12.5	[24]
AuNPs-sensor	0.2~0.8	0.07 098	[25]
SERS	0.075~1	0.0 284	[26]
PMMA-NSs-sensor	1.25~10	0.06	[27]
Eu-MOF	0~14	0.035	This work

2.4 机理探讨

为验证检测机理,开展了密度泛函理论(DFT)计算。从图5可知,MOF的有机配体IPA的LUMO能级(-2.09 eV)低于SDZ的LUMO能级(-1.57 eV),电子可从SDZ的能级转移到IPA,从而产生光诱导电

子转移现象(PET), 进而有效猝灭MOF发光中心铕离子的荧光。因此, SDZ猝灭Eu-MOF荧光的机理为PET^[16, 28]。同时, 进一步研究了其他分析物的电子能级, 以揭示MOF探针的选择性分析性能。其中TC和OFL的LUMO能级均小于SDZ, 与实验所测荧光猝灭效果一致。而KAN和Glu的LUMO能级均大于SDZ和IPA, 因而无法有效猝灭SDZ荧光。

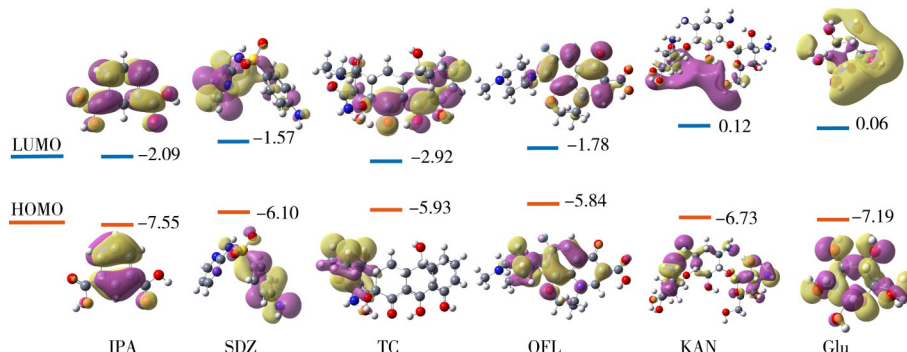


图5 IPA、SDZ和其他分析物的理论HOMO和LUMO能级

Fig. 5 Theoretical HOMO and LUMO energy levels for IPA, SDZ and other analytes

内滤效应也是常见荧光猝灭机制, 本文考察了分析物的紫外吸收光谱(图6)。SDZ、TC和OFL均与MOF探针在吸收光谱上有重叠, 说明能够产生内滤效应, 进而诱导MOF的荧光猝灭。而KAN和Glu几乎没有紫外吸收, 不能有效产生内滤效应。因此, MOF探针对于SDZ选择性检测机理主要来源于PET和内滤效应的共同作用。

2.5 加标实验

为揭示MOF探针检测体系在实际样品中的分析能力, 进一步开展了实际水样品加标检测实验。如表2所示, 所构建的MOF探针体系能有效定量分析常见自来水以及湖水样品中SDZ的含量, 表现出较好的加标回收率(86.5%~110%), 同时相对标准偏差(RSD)均小于10%。另外, 考察了探针检测SDZ的稳定性。从图7可知, MOF探针在检测周期9天内保持了良好的SDZ分析稳定性。因此, 以上结果证实了所构建MOF探针检测体系有效分析痕量SDZ的潜力。

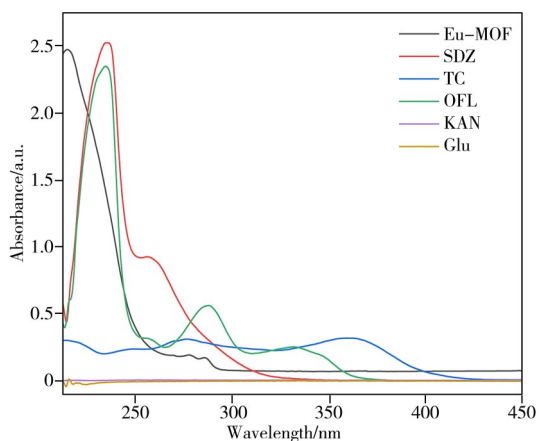


图6 Eu-MOF、SDZ和其他分析物的紫外吸收光谱图

Fig. 6 UV-Vis absorption spectra of Eu-MOF, SDZ, and other analytes

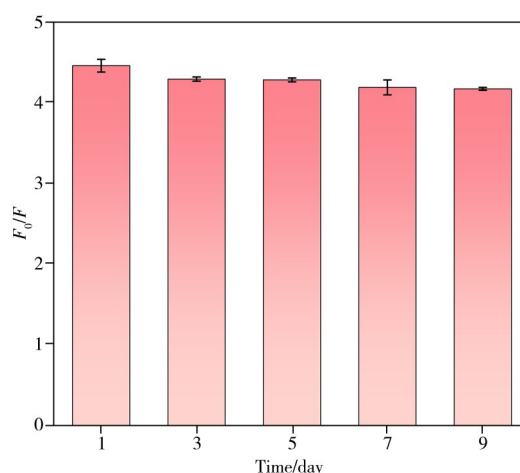


图7 Eu-MOF检测SDZ的稳定性(n=3)

Fig. 7 Stability of Eu-MOF for SDZ detection

表2 加标样品中SDZ的检测(n=3)

Table 2 Detection of SDZ in spiked samples(n=3)

Sample	Spiked/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Found/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Recovery/%	RSD/%
Tap water	0	0	0	0
	0.1	0.091	91.0	6.4
	2	1.74	87.0	1.2
	5	4.47	89.4	3.2
Lake water	0	0	0	0

(续表 2)

Sample	Spiked/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Found/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Recovery/%	RSD/%
	0.1	0.11	110	5.5
	2	1.73	86.5	3.0
	5	4.80	96.0	4.3

3 结 论

本研究发展了基于荧光 Eu-MOF 探针有效检测痕量 SDZ 的方法。该方法展现出良好的线性范围(0~14 $\mu\text{g}/\text{mL}$), 检出限达 0.035 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 可实现 SDZ 的选择性检测。同时该方法能够定量分析实际水样品中的痕量 SDZ。本研究成果为环境水体中 SDZ 残留的快速和准确分析提供了技术参考。

参考文献:

- [1] Yang J Y, Yang Z, Wang J, Liang Y P, Zeng H H, Qin L T, Song X H, Mo L Y. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **2025**, 289: 117685.
- [2] Biošić M, Mitrevski M, Babić S. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **2017**, 24(10): 9802-9812.
- [3] Li X, Wang C, Liu L, Zhang X Y, Wei J, Song Y H. *J. Environ. Eng. Technol.* (李霞, 王晨, 刘利, 张新怡, 魏健, 宋永会. 环境工程技术学报), **2024**, 14(2): 681-691.
- [4] Lin H D, Xie S X, Feng D X, Yang P H. *J. Instrum. Anal.* (林海丹, 谢守新, 冯德雄, 杨培慧. 分析测试学报), **2003**, 22(1): 94-96.
- [5] Li S, Yu S Y, Zhang M Y, Li Z Y, Yu H, Xing Z F, Mao B B, Zhao P. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, **2025**, 257: 116714.
- [6] Xiao X Y, Chen Z Z, Chen J W, Tang Y Y, Zhang G, Peng J, Liu D F, Hammock B D, Lai W H. *Food Biosci.*, **2025**, 67: 106350.
- [7] Akila B, Mary R K, Chen T W, Chen S M, George M, Kogularasu S, Victor A S, Stanley M M, Chang-Chien G P. *Food Chem.*, **2025**, 493: 145678.
- [8] Jie M S, Lan S K, Zhu B, Zhu A M, Yue X Y, Xiang Q S, Bai Y H. *Food Chem.*, **2024**, 458: 140304.
- [9] Zhang Z, Li M, Shen F, Ren X Q. *Anal. Methods*, **2015**, 7(14): 5794-5800.
- [10] Shi T, Tan L J, FU H L, Wang J T. *Mar. Pollut. Bull.*, **2019**, 146: 591-597.
- [11] Huang Y Q, Ming Q, Huang W H, Yang W M. *Chin. J. Anal. Lab.* (黄勇强, 明秦, 黄卫红, 杨文明. 分析实验室), **2024**, 43(6): 767-773.
- [12] Wang X R, Jiang Y P, Tissot A, Serre C. *Coord. Chem. Rev.*, **2023**, 497: 215454.
- [13] Shi L H, Li N, Wang D M, Fan M K, Zhang S L, Gong Z J. *TrAC Trends Anal. Chem.*, **2021**, 134: 116131.
- [14] Zhang W X, You S J, Sun J, Lv Y J, Wang X L, Li X, Su Z M. *Coord. Chem. Rev.*, **2025**, 542: 216894.
- [15] Goswami R, Mandal S C, Seal N, Pathak B, Neogi S. *J. Mater. Chem. A*, **2019**, 7(33): 19471-19484.
- [16] Zhu X D, Zhang K, Wang Y, Long W W, Sa R J, Liu T F, Lü J. *Inorg. Chem.*, **2018**, 57(2): 1060-1065.
- [17] Yang Z R, Wang M M, Wang X S, Yin X B. *Anal. Chem.*, **2017**, 89: 1930-1936.
- [18] Li H, Wang D H, Liu W, Ma Z, Wang D N, Li Y, Huan W W, Zhang Y M. *Talanta*, **2025**, 281: 126879.
- [19] Yin H Q, Yin X B. *Acc. Chem. Res.*, **2020**, 53(2): 485-495.
- [20] Peng H B, Li S Q, Cao X H, Liu Y H. *J. Instrum. Anal.* (彭洪波, 李世琪, 曹小红, 刘云海. 分析测试学报), **2024**, 43(10): 1626-1634.
- [21] Wang H W, Gao X, Liu J X, Xiong Z L, Zhao L S. *J. Alloys Compd.*, **2024**, 1003: 175730.
- [22] Mo H X, Li X Y, Zhou X Y, Jia X F, Wang H, Xu Z L, Wei X Q. *J. Chromatogr. A*, **2023**, 1700: 464046.
- [23] Yang W M, Liu C H, Zhang B L, Wu C C, Cao Y, Huang W H, Xu W Z. *Food Anal. Methods*, **2024**, 17: 1689-1701.
- [24] Bai Y F, Liu J, Feng F, Yang X M. *Colloids Surf. A*, **2020**, 605: 125376.
- [25] Liang D, Yang X Y, Li Q, Chang H, Liu X. *Environ. Geochem. Health*, **2024**, 46: 257.
- [26] Huang J Y, Xia L, Xiao X H, Li G K. *New J. Chem.*, **2024**, 48: 11457-11464.
- [27] Gao Z K, Luan Y, Lu Y, Zhou Z P, Liu T S, Li B L, Qiu Z F, Yang W M. *Microchim. Acta*, **2019**, 186: 625.
- [28] Xiao J N, Liu M Y, Tian F L, Liu Z L. *Inorg. Chem.*, **2021**, 60(7): 5282-5289.

(责任编辑: 盛文彦)