

文章编号: 1000-7032(2024)05-0846-07

用于全氟辛烷磺酸盐检测的“开启”式荧光探针

宋学智¹, 宋一凡^{1,2}, WONG Shiqing¹, 张燕宁³, 刘俊杰¹,
王 婕^{2*}, 王丽娜³, 任相魁^{1,2*}

(1. 天津大学化工学院 天津市膜科学与海水淡化技术重点实验室, 天津 300350;

2. 天津大学 浙江研究院, 浙江 宁波 315201;

3. 河北师范大学 生命科学院, 河北 石家庄 050024)

摘要: 全氟辛烷磺酸盐 (Perfluorooctane sulfonate, PFOS) 是一种持久有机污染物, 具有生物毒性、高稳定性、存在范围广的特点, 严重威胁人类健康安全。因此, 对 PFOS 的检测具有重要意义。本文通过简单的合成制备了一种四苯基乙烯衍生物 (TPE-py) 用于检测 PFOS。通过核磁共振谱图、荧光光谱以及紫外-可见吸收光谱等方法对其分子结构、光物理性质、检测效果和传感机理进行了研究。实验结果表明, 基于静电相互作用和聚集诱导发光性质, TPE-py 可实现对 PFOS“开启”式的快速定量检测, 检测限为 0.11 $\mu\text{mol/L}$ 。

关键词: 四苯基乙烯; 聚集诱导发光; 全氟辛烷磺酸盐

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240035

A “Turn-On” Fluorescent Probe for Detection of Perfluorooctane Sulfonate

SONG Xuezhi¹, SONG Yifan^{1,2}, WONG Shiqing¹, ZHANG Yanning³, LIU Junjie¹,
WANG Jie^{2*}, WANG Lina³, REN Xiangkui^{1,2*}

(1. Tianjin Key Laboratory of Membrane Science and Desalination Technology, School of Chemical Engineering and Technology,

Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Zhejiang Institute of Tianjin University, Ningbo 315201, China;

3. College of Life Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

* Corresponding Authors, E-mail: 1566652921@163.com; renxiangkui@tju.edu.cn

Abstract: Perfluorooctane sulfonate (PFOS) is a persistent organic pollutant, which has the characteristics of bio-toxicity, high stability and wide distribution, which is a great threat to human health and safety. Therefore, the detection of PFOS is of great significance. In this paper, a tetraphenylvinyl derivative fluorescent probe (TPE-py) was prepared by simple synthesis for the detection of PFOS. The molecular structure, photophysical property, detection effect and sensing mechanism were studied by means of NMR spectroscopy, fluorescence spectrum and ultraviolet-visible absorption spectrum. The results show that TPE-py was successfully prepared and it can detect PFOS quickly and quantitatively based on the properties of electrostatic interaction and aggregation-induced emission by turn-on mode and the detection limit is 0.11 $\mu\text{mol/L}$.

Key words: tetraphenylethylene; aggregation-induced emission; perfluorooctane sulfonate

收稿日期: 2024-02-06; 修订日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(22175129, 21875157); 中国教育国际交流协会“中国-中东欧国家高校联合教育项目”(2021102)

Supported by National Natural Science Foundation of China(22175129, 21875157); The China Education Association for International Exchange(CEAIE)(2021102)

1 引言

全氟辛烷磺酸盐(Perfluorooctane sulfonate, PFOS)是一种重要的化工产品^[1-3],同时也是一种剧毒化学物质,严重危害人类的生殖健康、内分泌系统和肝脏^[4-6]。更糟糕的是,PFOS半衰期很长,极难降解和代谢,容易在环境和人体中不断累积^[7]。此外,PFOS还是造成水污染的主要多氟烷基化合物^[8-9],被列入持久性有机污染物法规^[10-11]。因此,建立一种准确、快速的检测PFOS的方法是十分有必要的。

到目前为止,已经有多种PFOS检测方法被报道,包括液相色谱-串联质谱法^[12]、核磁共振波谱法^[13]、极谱法^[14]和酶联免疫吸附法^[15]。但这些方法通常需要昂贵的仪器或复杂的操作。与传统方法相比,荧光探针具有低成本、响应快速、操作简单等优点,是一种更加理想的选择^[16-17]。然而,很多荧光探针容易受聚集猝灭效应的影响,其应用受到限制^[18-20]。

2001年,Tang提出了聚集诱导发光(aggregation-induced emission, AIE)概念,很好地解决了聚集猝灭效应带来的问题^[21-24]。之后,各种AIE材料被开发出来。其中,四苯基乙烯因发光性能优异、结构可调等特点^[25-26],被广泛用于农药、炸药、重金属离子、抗生素的检测以及生物成像^[27-31]。但AIE分子在PFOS荧光检测方面的报道相对缺乏,开发基于四苯基乙烯基的PFOS荧光探针具有重要的科学意义和应用价值。

本文制备了一种水溶性四苯基乙烯基衍生物(TPE-py),它可以实现对全氟辛烷磺酸盐的“开启”式检测。TPE-py与PFOS之间的静电相互作用会引起TPE-py的聚集,从而导致荧光发射,实现对水中PFOS的“开启式”检测。

2 实验

2.1 试剂和仪器

四(4-吡啶联苯基)乙烯(97%),上海毕得医药科技股份有限公司;碘甲烷(98%),上海迈瑞尔生化科技有限公司;全氟辛基磺酸钾(98%),天津希恩思生化科技有限公司;其余药品及溶剂均购于天津市江天化工技术有限公司。所有药品直接使用,未经进一步纯化。

¹H NMR、¹³C NMR,布鲁克 AVANCE III HD 400 MHz 核磁共振谱仪;热失重曲线,美国 TA

Q100 热重分析仪;荧光光谱,日本日立公司 F-2500 荧光光谱仪;紫外-可见吸收光谱,PerkinElmer 分光光度计;Zeta 电位,马尔文仪器有限公司 Zetasizer Nano ZS 型纳米粒度及 Zeta 电位仪;扫描电镜图,日本日立公司 S-4800 场发射扫描电子显微镜。

2.2 合成方法

合成路线如图1所示。

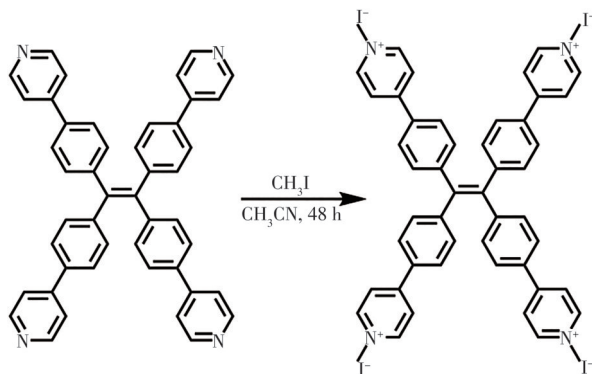


图1 TPE-py合成路线

Fig.1 Synthetic route of TPE-py

将四(4-吡啶联苯基)乙烯(200.00 mg, 0.31 mmol)加入到50 mL圆底烧瓶中,之后加入30 mL乙腈,超声使其分散均匀。将上述混合物置于黑暗避光环境,然后用注射器向其中加入碘甲烷(171.14 mg, 1.25 mmol),充分搅拌并加热至40℃,反应48 h。待反应完成,通过离心收集反应体系中的沉淀,用二氯甲烷进行多次洗涤并抽滤,干燥后得到黄色粉末状产物272.78 mg(产率84.8%)。

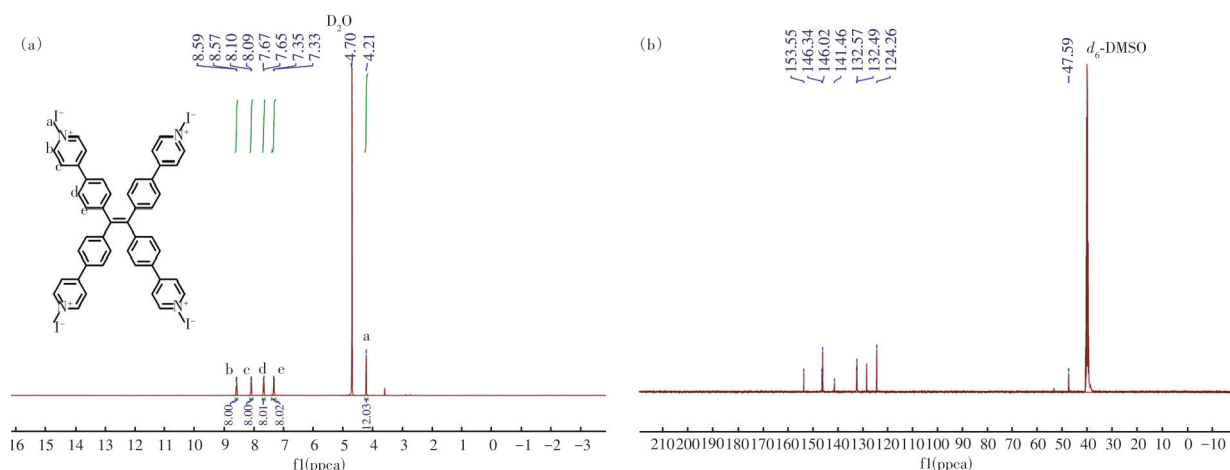
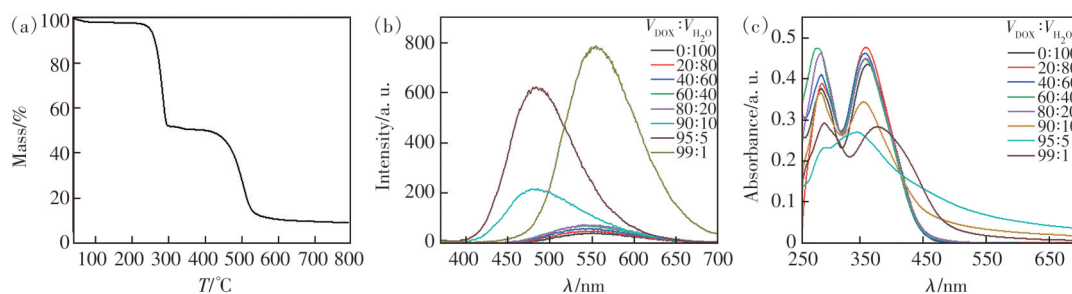
3 结果与讨论

3.1 目标产物确认

为验证目标产物的结构的准确性,我们分别用重水和氘代二甲基亚砜作为氘代试剂,通过核磁共振氢谱及碳谱对TPE-py分子结构进行了表征(如图2)。¹H NMR(400 MHz, D₂O), δ (10⁻⁶): 8.58(d, *J*=6.6 Hz, 8H), 8.0(d, *J*=6.7 Hz, 8H), 7.6(d, *J*=8.3 Hz, 8H), 7.3(d, *J*=8.3 Hz, 8H), 4.21(s, 12H); ¹³C NMR(400 MHz, *d*₆-DMSO), δ (10⁻⁶): 153.55, 146.34, 146.0, 141.46, 132.57, 128.45, 124.26, 47.59。

3.2 热稳定性及光物理性质测定

通过热失重实验分析了TPE-py的热稳定性,如图3(a)所示,TPE-py的热分解温度可达250℃,说明该材料具有良好的热稳定性。

图2 TPE-py:(a)在D₂O中的核磁共振氢谱;(b)在d₆-DMSO中的核磁共振碳谱Fig.2 (a) ¹H NMR of TPE-py in D₂O. (b) ¹³C NMR of TPE-py in d₆-DMSO图3 (a)TPE-py的热失重曲线;TPE-py在不同比例DOX/H₂O混合溶剂中的荧光光谱(b)和紫外-可见吸收光谱(c) ([TPE-py]=10⁻⁵ mol/L, λ_{ex}=355 nm)Fig.3 (a) TGA curve of TPE-py. Fluorescence spectra(b) and UV-Vis absorption spectra(c) of TPE-py in DOX/H₂O mixtures of different ratios([TPE-py]=10⁻⁵ mol/L, λ_{ex}=355 nm)

选取水为良溶剂,二氧六环为不良溶剂,对TPE-py的光物理性质进行分析。图3(b)为TPE-py在不同不良溶剂/良溶剂比例下的荧光光谱,当不良溶剂的含量逐渐增加时,荧光发射总体上呈现增强的趋势,但初期变化十分缓慢且荧光发射比较微弱。当不良溶剂含量增加到90%时,荧光强度明显增强;当不良溶剂含量为99%时,最大荧光强度可达初始强度的20倍之多。可见TPE-py具有明显的聚集诱导发光性质。此外,当不良溶剂含量在0~80%变化时,荧光光谱最大发射波长缓慢蓝移;当不良溶剂含量达到90%以及95%时,最大发射波长蓝移明显。但是,当不良溶剂含量为99%时,最大发射波长又出现红移现象。根据相关文献可以推测^[32],由于不良溶剂浓度过大,溶剂环境发生了明显改变,导致溶质与溶剂间作用力发生变化,从而出现波长移动现象。事实上,TPE衍生物在溶液中发生聚集通常呈现无序状态,分子间的排列状况也难以确定。根据文献^[33]可以推测,在不良溶剂含量达到90%、95%时,

TPE-py分子之间的CH-π相互作用占主导地位,TPE-py呈面对面堆积。而不良溶剂含量为99%时的红移现象是分子间作用力与溶剂作用共同影响的结果。通过图3(c)的吸收光谱还可以发现,随着不良溶剂的增加,吸收呈现先增强后减弱的趋势。当不良溶剂含量为95%、99%时,吸收峰峰型发生明显变化,半峰宽加宽,与有关文献中TPE衍生物在不良溶剂中的吸收变化相吻合^[32]。对比吸收光谱和荧光光谱还可以发现,TPE-py具有较大的斯托克斯位移,背景干扰小,适合用于荧光检测。

3.3 PFOS检测

在PFOS检测中采用全氟辛基磺酸钾作为被检测物。为使对PFOS的检测达到较好的效果,尽可能减小探针分子的聚集程度,使用浓度为1 μmol/L的TPE-py水溶液作为标准检测溶液。在实际情况下,水体环境十分复杂,可能存在PFOS与多种物质共存的情况,且PFOS性质十分稳定,在极端环境中也可能继续存在。因此,有必要研

究不同环境中探针的性质及其对PFOS的检测效果。

如图4所示,随着PFOS浓度不断增大,最大荧光发射强度不断增强,直到PFOS浓度为20 $\mu\text{mol/L}$ 时,荧光强度达到最大。之后再继续加入PFOS,荧光强度变化不大。如图4(b)所示,对相对荧光强度(I/I_0)与0~20 $\mu\text{mol/L}$ 范围的浓度关系进行线性拟

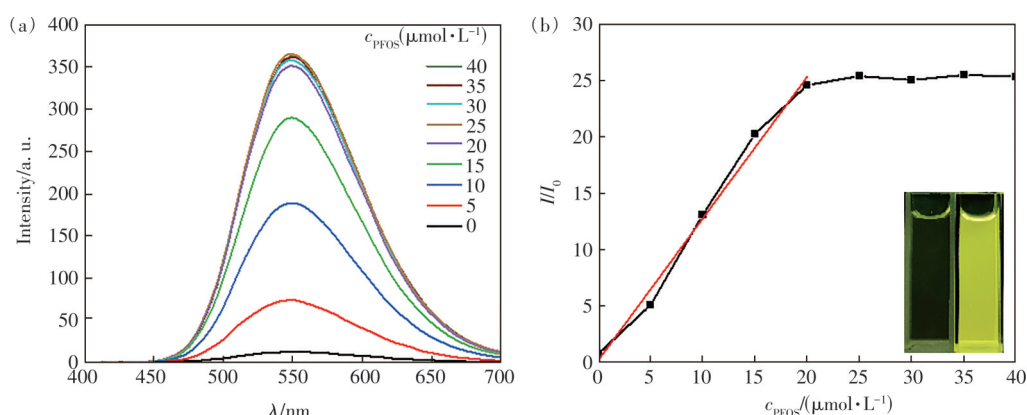


图4 (a) 1 $\mu\text{mol/L}$ TPE-py 标准检测液中加入不同浓度PFOS的荧光光谱;(b)相对荧光强度(I/I_0)与PFOS浓度的关系(I 为溶液在不同环境下的最大荧光强度, I_0 为1 $\mu\text{mol/L}$ TPE-py 标准检测液的最大荧光强度; $\lambda_{\text{ex}}=355\text{ nm}$;插图为紫外灯下标准检测液与PFOS浓度为30 $\mu\text{mol/L}$ 检测液的实物对比图)

Fig.4 (a) Fluorescence spectra of different concentrations of PFOS in 1 $\mu\text{mol/L}$ TPE-py standard detection solution. (b) The relationship between relative fluorescence emission intensity (I/I_0) and PFOS concentration (I represents the maximum fluorescence intensity of adding different concentrations of PFOS; I_0 represents the maximum fluorescence intensity of 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ TPE-py standard detection solution; $\lambda_{\text{ex}}=355\text{ nm}$. Insert: visual change of TPE-py in the absence and presence of PFOS (30 $\mu\text{mol/L}$) under UV light)

图5(a)显示,在pH范围为3~12时,TPE-py标准检测液荧光强度基本不发生改变,该探针溶液具有良好的酸碱稳定性。当PFOS存在时,荧光强度只有微小的改变,基本不会影响实际的检测效果。为模拟复杂的水环境,对多种阴阳离子、常见表面活性剂以及与PFOS结构组成相近的辛基磺酸钠、全氟辛酸等物质进行了对比测试,结果如图5(b)所示。可以发现,当加入其他干扰物时,溶液荧光强度基本不发生改变,对于其他种类的阴离子几乎没有响应,TPE-py对PFOS具有良好的专一性。由此推测,TPE-py与PFOS间具有比其他种类分子更强的静电引力^[34]。同时,在等量PFOS与干扰物共同存在的条件下,荧光强度与只有PFOS存在的条件下相比没有大的改变。由此可见,在复杂的环境中,TPE-py对于PFOS也具有良好的检测效果。

3.4 传感机理研究

为了考察TPE-py荧光探针的传感机理,对其Zeta电位、溶液聚集体微粒微观形貌及其在不同浓

度,二者呈现良好的线性关系($R^2=0.9889$, $k=1.256$),根据IUPAC检测限的规定,可得PFOS的检测限为0.11 $\mu\text{mol/L}$,即LOD为0.11 $\mu\text{mol/L}$ 。此外,通过图4(b)中的插图发现,肉眼可以观察到在紫外灯下标准检测液几乎没有荧光发射,而当PFOS浓度为30 $\mu\text{mol/L}$ 时,呈现很强的黄色荧光,为检测效果可视化提供了参考。

度盐溶液中的荧光光谱进行分析,如图6所示。

图6(a)、(b)分别为加入PFOS前后的Zeta电位图。通过对比可以发现,加入PFOS之前溶液的Zeta电位为0.153 mV,当加入PFOS之后,Zeta电位变为-0.49 mV。Zeta电位的变化表明TPE-py与PFOS之间存在静电作用。通过图6中加入PFOS前后对应的扫描电镜插图也可以发现,标准检测液中的聚集体粒径约为30~70 nm;而加入PFOS之后,聚集体粒径迅速增大,粒径最窄处约为139~167 nm,最宽处可达约350~460 nm。并且,颗粒形态发生明显改变,由球状颗粒变为橄榄状颗粒,进一步说明PFOS能够使TPE-py分子发生聚集。通过图6(c)也可以发现,随着体系中盐溶液浓度增大,荧光发射逐渐减弱,逐渐接近标准检测液的荧光发射强度。根据有关文献^[35]可以推测,高浓度的盐溶液破坏了TPE-py与PFOS之间的静电作用,导致聚集体解离,TPE-py重新回到较低聚集程度的状态,进一步证明TPE-py是基于静电作用与聚集诱导发光性质对PFOS进行检测。

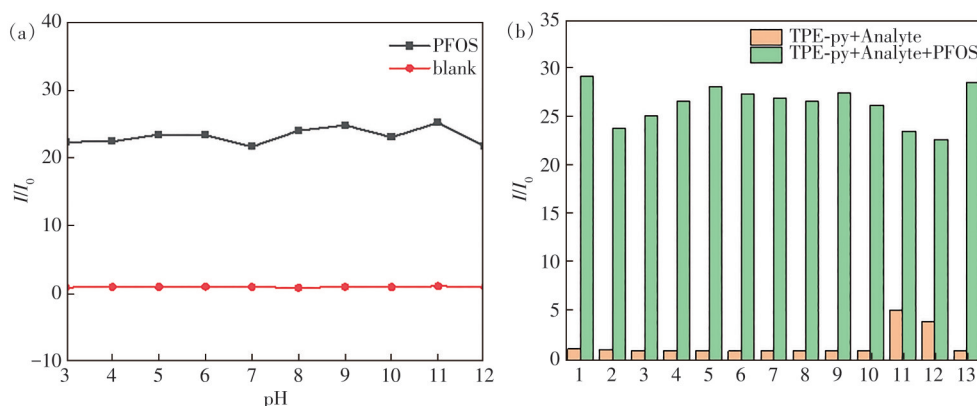


图5 相对荧光强度:(a)不同pH下标准检测液及加入PFOS;(b)加入不同干扰物后的标准检测液以及同时加入不同干扰物和PFOS,其中,(1)NaCl,(2)AgNO₃, (3)KI, (4)NaF, (5)K₂CO₃, (6)K₃PO₄, (7)K₂SO₄, (8)全氟丁基磺酸钾, (9)辛基磺酸钠, (10)全氟辛酸, (11)十二烷基磺酸钠, (12)十二烷基硫酸钠, (13)空白(I 为溶液在不同环境下的最大荧光强度, I_0 为1 $\mu\text{mol/L}$ TPE-py标准检测液的最大荧光强度, $[\text{PFOS}]=30 \mu\text{mol/L}$, $[\text{Analyte}]=30 \mu\text{mol/L}$, $\lambda_{\text{ex}}=355 \text{ nm}$)

Fig.5 Relative fluorescence intensity (I/I_0). (a) Standard detection solution and standard detection solution with PFOS at different pH. (b) Standard detection solution with different analyte and with different analyte and PFOS: (1) NaCl, (2) AgNO₃, (3) KI, (4) NaF, (5) K₂CO₃, (6) K₃PO₄, (7) K₂SO₄, (8) potassium perfluorobutyl sulfonate, (9) sodium octylsulfonate, (10) perfluorooctanoic acid, (11) sodium dodecyl sulfonate, (12) sodium dodecyl sulfate, (13) blank (I represents the maximum fluorescence intensity of different conditions, I_0 represents the maximum fluorescence intensity of 1 $\mu\text{mol/L}$ TPE-py standard detection solution, $[\text{PFOS}]=30 \mu\text{mol/L}$, $[\text{Analyte}]=30 \mu\text{mol/L}$, $\lambda_{\text{ex}}=355 \text{ nm}$)

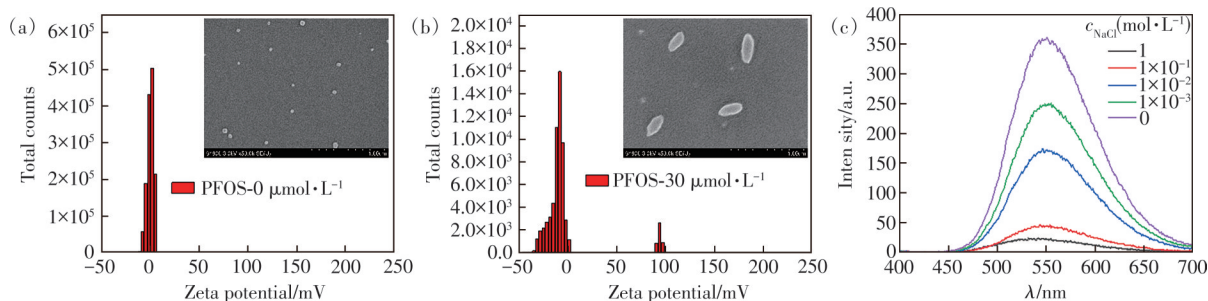


图6 Zeta电位图:(a)标准检测液;(b)标准检测液中加入PFOS;(c)不同浓度氯化钠溶液中TPE-py检测PFOS荧光光谱($[\text{PFOS}]=0, 30 \mu\text{mol/L}$, $[\text{NaCl}]=1, 1 \times 10^{-1}, 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}, 0 \text{ mol/L}$; $\lambda_{\text{ex}}=355 \text{ nm}$;插图分别对应标准检测液加入PFOS前后的溶液聚集体微粒的扫描电镜图)

Fig.6 Zeta potential diagram of (a) standard detection solution; (b) standard detection solution with PFOS; (c) fluorescence spectra of PFOS detected by TPE-py in sodium chloride solutions of different concentrations ($[\text{PFOS}]=0, 30 \mu\text{mol/L}$, $[\text{NaCl}]=1, 1 \times 10^{-1}, 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}, 0 \text{ mol/L}$; $\lambda_{\text{ex}}=355 \text{ nm}$. Inset: scanning electron microscope image of solution aggregate particles before and after adding PFOS to the standard detection solution)

4 结 论

本文合成了一种具有聚集诱导发光性质的水溶性四苯基乙烯衍生物TPE-py,通过核磁共振谱图等方法确认了其结构的正确性。光谱等实验结果表明,基于静电作用和聚集诱导发光效应的协同作用,该材料可实现对PFOS的“开启”式定量检测,检测限

为0.11 $\mu\text{mol/L}$,并且可以避免复杂环境对于检测结果的干扰。本文为新型荧光探针的设计和制备提供了新的思路。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240035>.

参 考 文 献:

- [1] LINDSTROM A B, STRYNAR M J, LIBELO E L. Polyfluorinated compounds: past, present, and future [J]. *Environ.*

- Sci. Technol.*, 2011, 45(19): 7954-7961.
- [2] 高宏平, 常薇, 张磊, 等. 纺织品中全氟辛烷磺酸及全氟辛酸的测定及其研究进展 [J]. *产业用纺织品*, 2011, 29(9): 41-44.
- GAO H P, CHANG W, ZHANG L, *et al.* Research progress on detection of PFOS and PFOA in textiles [J]. *Tech. Text.*, 2011, 29(9): 41-44. (in Chinese)
- [3] JIN C F, SUN Y H, ISLAM A, *et al.* Perfluoroalkyl acids including perfluorooctane sulfonate and perfluorohexane sulfonate in firefighters [J]. *J. Occup. Environ. Med.*, 2011, 53(3): 324-328.
- [4] HU X, LI S Z, CIRILLO P M, *et al.* Reprint of “metabolome wide association study of serum poly and perfluoroalkyl substances (PFASs) in pregnancy and early postpartum” [J]. *Reprod. Toxicol.*, 2020, 92: 120-128.
- [5] COPERCHINI F, AWWAD O, ROTONDI M, *et al.* Thyroid disruption by perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) [J]. *J. Endocrinol. Invest.*, 2017, 40(2): 105-121.
- [6] JACOBSEN A V, NORDÉN M, ENGWALL M, *et al.* Effects of perfluorooctane sulfonate on genes controlling hepatic fatty acid metabolism in livers of chicken embryos [J]. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2018, 25(23): 23074-23081.
- [7] NILSSON S, THOMPSON J, MUELLER J F, *et al.* Apparent half-lives of chlorinated-perfluorooctane sulfonate and perfluorooctane sulfonate isomers in aviation firefighters [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2022, 56(23): 17052-17060.
- [8] PRAMANIK B K, PRAMANIK S K, SARKER D C, *et al.* Removal of emerging perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate contaminants from lake water [J]. *Environ. Technol.*, 2017, 38(15): 1937-1942.
- [9] PONTIUS F. Regulation of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) in drinking water: a comprehensive review [J]. *Water*, 2019, 11(10): 2003.
- [10] European Chemicals Agency. List of substances subject to POPs regulation [EB/OL]. (2010-08-24). <https://echa.europa.eu/list-of-substances-subject-to-pops-regulation>.
- [11] Secretariat of the Stockholm Convention. Stockholm convention on persistent organic pollutants (POPs) [EB/OL]. *Text and Annexes (Revised in 2019)*. (2019-11-28). <http://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232>.
- [12] PAIANO V, FATTORE E, CARRÀ A, *et al.* Liquid chromatography-tandem mass spectrometry analysis of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid in fish fillet samples [J]. *J. Anal. Methods Chem.*, 2012, 2012: 719010.
- [13] CAMDZIC D, DICKMAN R A, AGA D S. Total and class-specific analysis of per- and polyfluoroalkyl substances in environmental samples using nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. *J. Hazard. Mater. Lett.*, 2021, 2: 100023.
- [14] 高燕梅, 陈文, 张之琛. 极谱法检测环境水体中的全氟辛烷磺酸 [J]. *分析科学学报*, 2022, 38(3): 297-302.
- GAO Y M, CHEN W, ZHANG Z C. Determination of perfluorooctane sulfonic acid in environmental water by polarography [J]. *J. Anal. Sci.*, 2022, 38(3): 297-302. (in Chinese)
- [15] 朱江, 郭小品, 姚宏伟, 等. 一种环境中全氟辛烷磺酸残留的酶联免疫检测方法: 中国, CN103487584A [P]. 2014-01-01.
- ZHU J, GUO X P, YAO H W, *et al.* Enzyme-linked immunosorbent assay method for detecting perfluorooctane sulfonate residue: CN, CN103487584A [P]. 2014-01-01. (in Chinese)
- [16] GAO T, ZHOU W F, ZHAO Y, *et al.* Polyhedral oligosilsesquioxane tethered perylene diimide for application in optical limiting and rapid detection of fluoride ions [J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55(20): 3012-3014.
- [17] GAO S Y, HUANG H J, ZHAO A J, *et al.* Turn-on fluorescent sensor for berberine chloride in aqueous solution based on dicyanodistyrylbenzene derivative [J]. *Dyes Pigm.*, 2022, 206: 110687.
- [18] 张志军, 康苗苗, 王媛玮, 等. 聚集诱导发光材料在光学诊疗中的研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(3): 361-378.
- ZHANG Z J, KANG M M, WANG Y W, *et al.* Recent advances of aggregation-induced emission materials in phototheranostics [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(3): 361-378. (in Chinese)
- [19] MEFTAH N, MANIAN A, CHRISTOFFERSON A J, *et al.* A computational exploration of aggregation-induced excitonic quenching mechanisms for perylene diimide chromophores [J]. *J. Chem. Phys.*, 2020, 153(6): 064108.
- [20] WANG X L, LIN X, LI R F, *et al.* Achieving molecular fluorescent conversion from aggregation-caused quenching to aggregation-induced emission by positional isomerization [J]. *Molecules*, 2022, 27(1): 193.
- [21] LUO J D, XIE Z L, LAM J W Y, *et al.* Aggregation-induced emission of 1-methyl-1,2,3,4,5-pentaphenylsilole [J].

- Chem. Commun.*, 2001(18): 1740-1741.
- [22] 吕旭晨, 路琳, 黄汉军, 等. 用于快速检测苯胺的新型氰基苯乙烯荧光探针 [J]. *发光学报*, 2023, 44(5): 912-920.
- LYU X C, LU L, HUANG H J, *et al.* A novel cyanostilbene-based fluorescent probe for rapid detection of aniline [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(5): 912-920. (in English)
- [23] 杨学琴, 来守军, 丁媛媛, 等. 四苯乙烯类聚集诱导发光探针在生物分子检测领域的应用 [J]. *发光学报*, 2022, 43(6): 961-985.
- YANG X Q, LAI S J, DING Y Y, *et al.* Application of tetraphenylene aggregation-induced emission probes in field of bio-molecular detection [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(6): 961-985. (in Chinese)
- [24] DUO Y H, XIANG Z Y, GAO G, *et al.* Biomedical application of aggregation-induced emission luminogen-based fluorescent sensors [J]. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 2023, 167: 117252.
- [25] LIU J L, ZHANG J Q, TANG Z L, *et al.* Near-infrared aggregation-induced enhanced electrochemiluminescence from tetraphenylethylene nanocrystals: a new generation of ECL emitters [J]. *Chem. Sci.*, 2019, 10(16): 4497-4501.
- [26] DONG H, LUO M, WANG S, *et al.* Synthesis and properties of tetraphenylethylene derivatived diarylethene with photochromism and aggregation-induced emission [J]. *Dyes Pigm.*, 2017, 139: 118-128.
- [27] KANG Z Z, YANG J, JIANG J J, *et al.* Pillar[5]arenes modified tetraphenylethylene as fluorescent chemosensor for paraquat detection [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2022, 370: 132436.
- [28] TAO T, FANG D S, CHEN Y Y, *et al.* The length effect and color tuning of tetraphenylethylene functionalized oligothiophenes for effective detection of explosives [J]. *Dyes Pigm.*, 2021, 195: 109673.
- [29] ZHANG H F, YIN C X, LIU T, *et al.* Selective “off-on” detection of magnesium (II) ions using a naphthalimide-derived fluorescent probe [J]. *Dyes Pigm.*, 2017, 146: 344-351.
- [30] HUANG H J, GAO S Y, ZHAO A J, *et al.* Tetraphenylethylene sulfonate derivative as turn-on fluorescent sensor for berberine chloride detection in aqueous solution [J]. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 2022, 220: 115030.
- [31] OUYANG J, ZANG Q G, CHEN W S, *et al.* Bright and photostable fluorescent probe with aggregation-induced emission characteristics for specific lysosome imaging and tracking [J]. *Talanta*, 2016, 159: 255-261.
- [32] NADIMETLA D N, BHOSALE S V. Tetraphenylethylene AIEgen bearing thiophenylbipyridine receptor for selective detection of copper(II) ion [J]. *New J. Chem.*, 2021, 45(17): 7614-7621.
- [33] YU L R, ZHANG M X, LOU D D, *et al.* CH/ π -interaction-driven self-assembly of tetraphenylethylene derivatives into the face to face arrangement [J]. *RSC Adv.*, 2021, 11(4): 2377-2382.
- [34] GOU Z M, WANG A J, ZHANG X M, *et al.* Multi-head cationic siloxane based “turn on” fluorescent system for selective detection of perfluorooctanoic sulfonate (PFOS) [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2022, 367: 132017.
- [35] PANDEY S P, JHA P, NADIMETLA D N, *et al.* A tetracationic aggregation induced emission-based probe for efficient and improved detection of Heparin [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2022, 353: 131016.



宋学智(1998-),女,河北衡水人,硕士研究生,2020年于河北工业大学获得学士学位,主要从事四苯基乙烯衍生物合成及性能研究。

E-mail: songxuezhong@tju.edu.cn



任相魁(1980-),男,河北邢台人,博士,教授,2010年于南开大学获得博士学位,主要从事小分子及高分子材料的合成、相结构及性能研究。

E-mail: renxiangkui@tju.edu.cn



王婕(1996-),女,甘肃白银人,硕士,工程师,2022年于天津大学获得硕士学位,主要从事高分子材料的合成与加工。

E-mail: 1566652921@163.com