

一种检测 ONOO^- 的新型荧光探针的构建与细胞成像研究李嘉欣[†] 贺如艳[†] 段森林 黎锦华 韩校净 叶 勇*

(郑州大学化学学院 郑州 450001)

摘要 过氧亚硝酸盐(ONOO^-)作为一种重要的活性氮,与多种疾病的发生密切相关,发展检测 ONOO^- 的方法对于理解其相关生理病理机制具有重要的意义. 以四苯乙烯作为荧光团,引入吡喃鎓基团作为 ONOO^- 的特异识别位点,成功构建一例新型的 ONOO^- 荧光探针 TPE- ONOO^- . 该探针对于 ONOO^- 具有较好的选择性、较强的抗干扰能力以及较高的灵敏度. 细胞试验表明探针具有较低的细胞毒性,并成功将其用于细胞外源性和内源性 ONOO^- 的成像监测. 该新型探针为研究 ONOO^- 生理过程提供了一种有效的研究工具.

关键词 荧光探针; ONOO^- ; 四苯乙烯; 细胞成像

Construction and Cell Imaging Study of a Novel Fluorescent Probe for ONOO^- DetectionLi, Jiaxin[†] He, Ruyan[†] Duan, Senlin Li, Jinhua Han, Xiaojing Ye, Yong*

(College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

Abstract As an important reactive nitrogen species, peroxynitrite (ONOO^-) is closely related to the occurrence of various diseases. The development of methods to detect ONOO^- is of great significance for understanding its related physiological and pathological mechanisms. A novel ONOO^- fluorescent probe TPE- ONOO^- was successfully constructed using tetraphenylethylene as a fluorophore and a pyrylium group as the specific recognition site of ONOO^- . The probe showed high selectivity, strong anti-interference ability and high sensitivity to ONOO^- . Cell assays suggested that the probe had low cytotoxicity and was successfully used for imaging monitoring of exogenous and endogenous ONOO^- in cells. The novel probe synthesized here provides an efficient tool for studying ONOO^- physiological processes.

Keywords fluorescent probe; ONOO^- ; tetraphenylethylene; cell imaging

作为氧化剂和硝化剂,过氧亚硝酸盐(Peroxynitrite, ONOO^-)与多种生理活动密切相关^[1]. 生理环境中的 ONOO^- 通常是由超氧负离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)和一氧化氮自由基($\text{NO}\cdot$)反应产生^[2], 因此, ONOO^- 的水平变化是氧化应激的重要指标之一^[3]. ONOO^- 浓度异常升高会对生物大分子比如蛋白质、DNA、硫醇以及脂质类化合物产生影响,从而引起细胞生理环境紊乱,诱导细胞凋亡和坏死,进一步导致相关疾病(炎症、肿瘤、心血管疾病和动脉粥样硬化等)的发生^[4]. 另外, ONOO^- 作为一种重要的信号分子^[5], 揭示 ONOO^- 确切的信号传导过程和致病机制对相关疾病的诊断与治疗具有重要意义^[6]. 因此,发展实时、快速和灵敏检测生理环境中的 ONOO^- 的方法是

十分必要的.

目前,传统检测 ONOO^- 的方法包括化学发光法、电化学法、拉曼法和荧光光谱法等^[7-10]. 荧光探针由于具有选择性高、灵敏度好和成本低等优点以及对样品可实现无损实时监测,已被广泛用于细胞和活体中相关活性分子的检测与成像^[11-12]. 迄今为止,基于罗丹明、香豆素、荧光素、BODIPY 和花菁类等荧光团设计的 ONOO^- 的荧光探针已被大量报道^[13-15]. 识别 ONOO^- 的基团包括三氟甲基酮类、酰肼类、硼酸脂类、碳碳/氮双键和有机硒/碲等^[16]. 最近研究发现吡喃鎓基团可实现对 ONOO^- 的特异性响应,具有选择性好和反应灵敏等优点^[17].

* Corresponding author. E-mail: yeyong03@tsinghua.org.cn

Received March 12, 2022; revised April 21, 2022; published online May 26, 2022.

Project supported by the Innovation and Entrepreneurship Training Plan for College Students of Zhengzhou University (No. 2021cxcy215) and the Top Undergraduates Program of Zhengzhou University.

郑州大学大学生创新创业训练计划(No. 2021cxcy215)和郑州大学本科生拔尖计划资助项目.

[†] 共同第一作者(These authors contributed equally to this work).

四苯乙烯(TPE)是一种常见的具有聚集诱导发光(AIE)特性的荧光团,被广泛用于荧光探针的开发和设计中^[18-19]. 本工作通过在TPE中引入吡喃鎓基团成功构建一种新型的 ONOO⁻ 荧光探针 TPE-ONOO. 由于 ONOO⁻ 具有较强的亲核性,可特异性与吡喃鎓基团发生反应,经过加成、氧化和水解消除反应,最终产生烯酸产物. 光谱测试发现,探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 响应表现出优异的选择性和高灵敏度(检测限为 64 nmol/L). 细胞实验结果表明,探针 TPE-ONOO 可对细胞内源性和外源性 ONOO⁻ 进行特异性成像,为揭示 ONOO⁻ 相关生理机制提供一种新型有效研究工具.

1 结果与讨论

1.1 探针分子的设计与合成

探针分子经过三步反应构建,首先化合物 **H-1** 和 **H-2** 在四氢呋喃溶液中,在锌粉和四氯化钛存在下,高效反应得到化合物 **H-3**; 化合物 **H-3** 与正丁基锂作用后,进而与 *N,N*-二甲基乙酰胺反应生成中间化合物 **H-4**; 化合物 **H-4** 与化合物 **H-5** 在浓硫酸溶液中反应得到目标探针分子 TPE-ONOO. 该分子结构经核磁和高分辨质谱表征确证,合成路线如 Scheme 1 所示.

1.2 探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 的光谱性能研究

在得到目标探针后,首先考察探针 TPE-ONOO 在磷酸缓冲溶液(PBS) [pH=7.4, 10 mmol/L, 含二甲基亚砜(DMSO)体积分数为 60%]中的紫外吸收变化. 如图 1A 所示,探针 TPE-ONOO 溶液在 340 和 595 nm 具有两处明显的吸收峰. 在识别体系中加入 100 μmol/L ONOO⁻

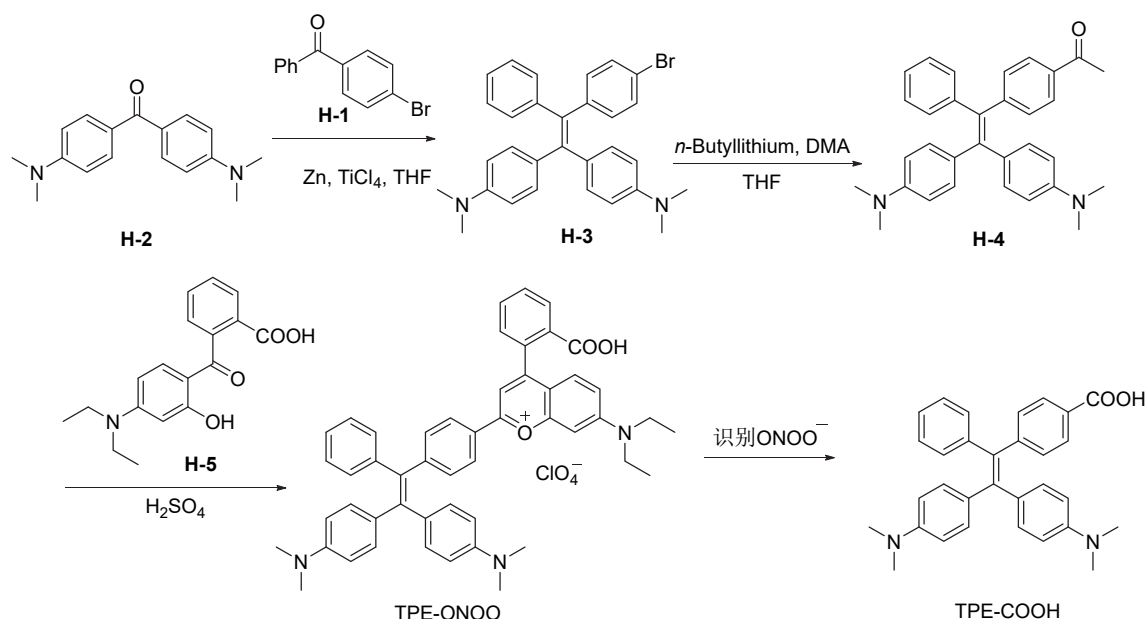
后, 595 nm 处吸收消失,而 340 nm 吸收峰向右红移,说明探针 TPE-ONOO 与 ONOO⁻ 发生反应释放 TPE 荧光团. 进一步考察了探针的 AIE 性能,在含有不同体积分数的 DMSO 的 PBS 缓冲溶液中测试了探针的荧光发射,未发现探针 TPE-ONOO 响应 ONOO⁻ 后具有 AIE 发光性质.

1.3 探针 TPE-ONOO 识别 ONOO⁻ 的机理探究

根据文献报道^[15, 20],我们推测探针 TPE-ONOO 与 ONOO⁻ 反应后生成 TPE-COOH (Scheme 1). 为了验证反应后的产物,通过高分辨质谱对反应体系进行检测. 属于 TPE-ONOO 的峰出现在 *m/z* 738.3691(理论计算值为 738.3690),并监测观察到属于 TPE-COOH 的新峰 *m/z* 463.2380(理论计算值 463.2380). 此外,还通过核磁共振滴定实验验证化合物 TPE-COOH 的生成. 高分辨与核磁滴定结果表明探针 TPE-ONOO 与 ONOO⁻ 反应后释放出 TPE-COOH.

1.4 探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 的荧光选择性能研究

随后,对探针 TPE-ONOO 识别 ONOO⁻ 选择性进行考察. 在含有 10 μmol/L 探针的测试溶液中,分别加入 100 μmol/L 的活性氮和氧化物(NO, HNO, ClO⁻, ¹O₂, H₂O₂, *t*-BuOOH, •OH 和 O₂^{•-}),活性硫(GSH, Cys, Hcy 和 SO₃²⁻)和阴离子(F⁻, Cl⁻, Br⁻, I⁻, AcO⁻, CO₃²⁻, NO₃⁻ 和 NO₂⁻). 测试发现单独探针在 500 nm 表现微弱的荧光发射,只有在加入 ONOO⁻ (100 μmol/L)后,500 nm 处荧光强度明显增加,而加入其他分析物没有出现明显的荧光变化(图 1B). 荧光光谱实验结果表明探针 TPE-ONOO 识别 ONOO⁻ 具有专一选择性.



图式 1 探针 TPE-ONOO 的合成路线和识别 ONOO⁻ 的机理

Scheme 1 Synthetic route of probe TPE-ONOO and its response mechanism for ONOO⁻

1.5 探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 的荧光干扰性能研究

由于生理环境的复杂性,多种潜在物种可能会干扰探针的识别能力,为此对其抗干扰性进行考察.在 10 $\mu\text{mol/L}$ 探针溶液中分别加入 100 $\mu\text{mol/L}$ 的活性氮、活性氧、活性硫和常见阴离子,500 nm 处没有出现荧光发射.在含有干扰离子的探针溶液中,继续加入 100 $\mu\text{mol/L}$ ONOO⁻,在 500 nm 处荧光发射明显增强,荧光强度与空白对比一致.实验结果表明,即使在干扰物种存在下,探针依然表现出对 ONOO⁻ 特异性识别,具有在生理环境中的应用潜力.

1.6 探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 的荧光滴定实验

接下来,考察了探针 TPE-ONOO 与 ONOO⁻ 浓度的关系.如图 2A 所示,随着 ONOO⁻ (0~100 $\mu\text{mol/L}$) 加入,探针 TPE-ONOO 在 500 nm 处的荧光强度不断增强,荧光强度呈规律性增加.将 500 nm 处荧光强度与 ONOO⁻ 的浓度进行线性拟合发现具有较好的线性关系(图 2B, $R^2=0.9941$),其回归线性方程式为 $Y=2046.5+232.1 \times [\text{ONOO}^-]$.根据检测限计算公式($DL=3\sigma/k$),得

到检测限为 64 nmol/L.实验结果表明 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 的检测具有较高的灵敏度以及定量检测的可能性.

1.7 探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 的动力学和 pH 适用范围研究

进一步分别测试了探针 TPE-ONOO (10 $\mu\text{mol/L}$) 溶液在加入 ONOO⁻ (100 $\mu\text{mol/L}$) 后不同时间的荧光发射曲线,单独探针 TPE-ONOO 溶液的随着时间增加,荧光强度并没有出现明显变化,表明探针具有良好的光稳定性.当加入 ONOO⁻ (100 $\mu\text{mol/L}$) 后,500 nm 荧光强度迅速增强,在 14 min 后达到最大响应平台,不再发生变化.为了考察探针 TPE-ONOO 在不同 pH 环境中对 ONOO⁻ 的识别情况,对探针在 pH 1~12 的 PBS 缓冲溶液中对 ONOO⁻ 荧光发射进行测试.单独探针 TPE-ONOO 在不同 pH 环境中荧光强度并没有出现明显变化,说明探针对 pH 不敏感.在加入 ONOO⁻ (100 $\mu\text{mol/L}$) 后,在 pH=7~9 范围内,500 nm 处荧光强度明显增加.以上实验结果证明探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻

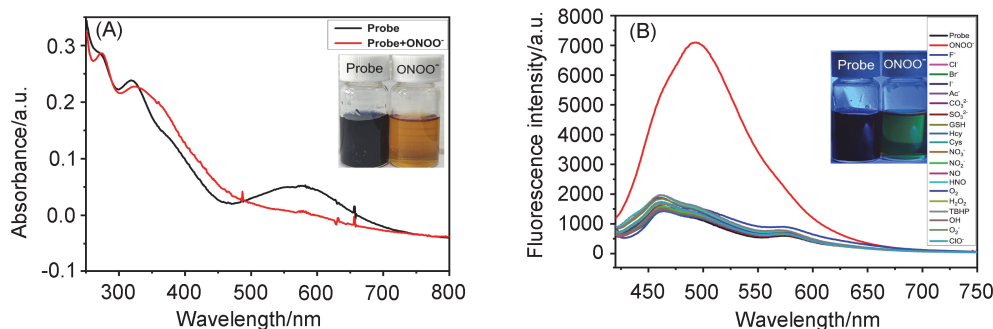


图 1 (A)探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 的紫外-可见光吸收光谱和(B)探针 TPE-ONOO (10 $\mu\text{mol/L}$)响应 ONOO⁻ (100 $\mu\text{mol/L}$)和其他离子(100 $\mu\text{mol/L}$)的荧光光谱

Figure 1 (A) UV-visible absorption spectrum of probe TPE-ONOO for ONOO⁻ and (B) fluorescence spectra of probe TPE-ONOO (10 $\mu\text{mol/L}$) in response to ONOO⁻ (100 $\mu\text{mol/L}$) and other ions (100 $\mu\text{mol/L}$)
pH=7.4, 25 $^{\circ}\text{C}$, $V(\text{PBS}) : V(\text{DMSO})=4 : 6$, spectra were tested after adding ONOO⁻ 0.5 h. Excitation: 400 nm, emission: 500 nm.

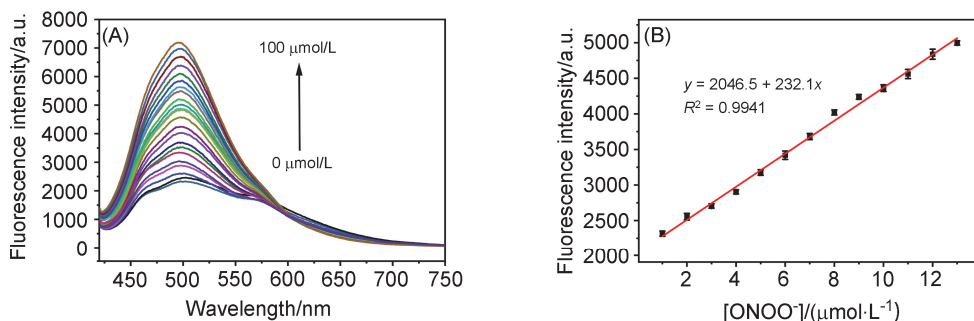


图 2 (A)探针 TPE-ONOO (10 $\mu\text{mol/L}$)响应 ONOO⁻ (0~100 $\mu\text{mol/L}$)的荧光光谱和(B)探针 TPE-ONOO 在 500 nm 荧光强度与 ONOO⁻ 浓度之间的线性关系

Figure 2 (A) Fluorescence spectra of probe TPE-ONOO (10 $\mu\text{mol/L}$) in response to ONOO⁻ (0~100 $\mu\text{mol/L}$) and (B) linear relationship between probe TPE-ONOO fluorescence intensity at 500 nm and ONOO⁻ concentration
pH=7.4, 25 $^{\circ}\text{C}$, $V(\text{PBS}) : V(\text{DMSO})=4 : 6$, spectra were tested after adding ONOO⁻ 0.5 h, Excitation: 400 nm, emission: 500 nm

具有良好的反应活性以及应用于生理 pH 环境中检测 ONOO⁻ 的实用价值。

1.8 探针 TPE-ONOO 的细胞应用研究

在体外光谱实验中, 探针 TPE-ONOO 对 ONOO⁻ 的识别表现出优异的光谱性能, 进一步评估探针对细胞的毒性和生物相容性。在 MCF-7 细胞中, 加入不同浓度(0, 5, 10, 15, 20 $\mu\text{mol/L}$)探针 TPE-ONOO 处理 24 h。通过噻唑蓝(MTT)毒性测试分析发现, 探针 TPE-ONOO 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 时, 细胞依然有超过 80.3% 的存活率, 说明探针对细胞具有较低的毒性和良好的生物相容性。进一步通过激光共聚焦荧光显微镜研究了 TPE-ONOO 对 MCF-7 细胞中外源性 ONOO⁻ 成像能力。在细胞中加入 TPE-ONOO, 在 37 $^{\circ}\text{C}$ 的 CO₂(体积分数为 5%) 孵育 0.5 h 后, 用 PBS 缓冲溶液洗三次后进行成像。如图 3a 所示,

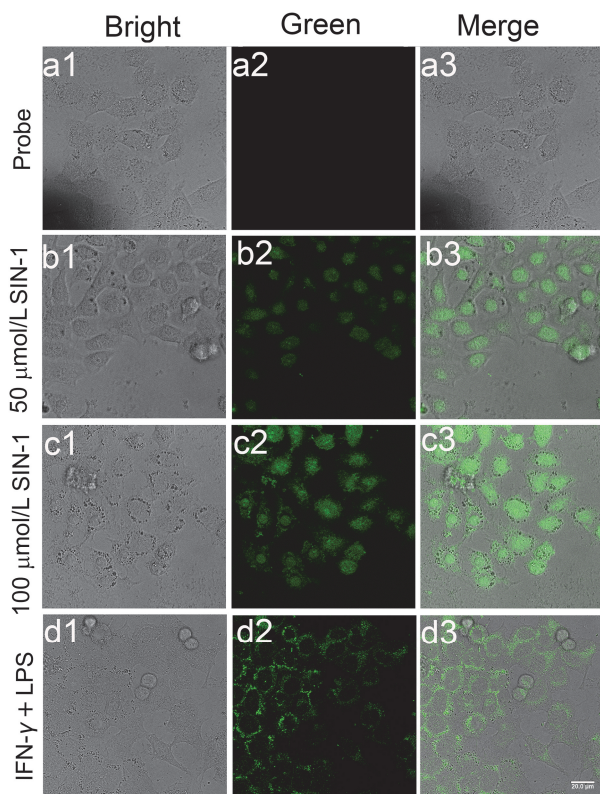


图 3 探针 TPE-ONOO 在 MCF-7 细胞中的荧光成像

Figure 3 Fluorescence imaging of probe TPE-ONOO in MCF-7 cells

MCF-7 cells were first co-incubated with the probe TPE-ONOO (10 $\mu\text{mol/L}$) for 0.5 h, and then imaged under natural light and green light channels. (a1) natural light; (a2) green channel; (a3) overlay of a1 and a2. Imaging was performed under natural light and green channel after adding 50 $\mu\text{mol/L}$ SIN-1 and co-incubating for 0.5 h. (b1) natural light; (b2) green channel; (b3) overlay of b1 and b2. Imaging was performed under natural light and green channel after adding 100 $\mu\text{mol/L}$ SIN-1. (c1) natural light; (c2) green channel; (c3) overlap of c1 and c2. Imaging was performed under natural light and green channel after adding LPS (10 $\mu\text{g/mL}$)/IFN- γ (50 ng/mL) staining respectively 4 h. (d1) natural light; (d2) green channel; (d3) overlap of d1 and d2. Excitation: 400 nm, Emission: 450~530 nm. Scale bar: 20 μm

MCF-7 细胞在荧光通道呈现微弱荧光发射。MCF-7 细胞在加入 50 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SIN-1 (ONOO⁻ 供体) 孵育 0.5 h 后, 再加入探针 TPE-ONOO (10 $\mu\text{mol/L}$) 共孵育 0.5 h, 荧光成像通道绿色荧光明显增强(图 3b, 3c)。细胞实验结果表明探针可以对细胞外源性的 ONOO⁻ 进行实时成像。

氧化应激的爆发是导致炎症发生的重要原因, ONOO⁻ 作为氧化应激的重要代谢产物, 实时监测其内源性变化是非常有必要的。通过干扰素- γ (IFN- γ) 和酯多糖(LPS)诱导 MCF-7 细胞氧化应激爆发, 内源性产生 ONOO⁻。从荧光成像结果来看(图 3d), 将细胞与 IFN- γ (50 ng/mL) 和 LPS (10 $\mu\text{g/mL}$) 孵育 4 h, 然后再加入探针 TPE-ONOO (10 $\mu\text{mol/L}$) 孵育 0.5 h, PBS 缓冲溶液冲洗后进行荧光成像, 观察到绿色荧光通道明显增强。以上实验结果证明探针可对内源性 ONOO⁻ 进行实时成像监测, 对于揭示 ONOO⁻ 生理机制具有重要意义。

2 结论

基于四苯乙烯荧光团和吡喃鎓基团识别位点成功设计合成一种新型 ONOO⁻ 荧光探针 TPE-ONOO。探针对 ONOO⁻ 具有特异的选择性以及较高的灵敏度(最低检测限为 64 nmol/L)。细胞毒性实验证明探针 TPE-ONOO 对细胞具有较低毒性与良好生物相容性。此外, 通过激光共聚焦成像, 探针 TPE-ONOO 实现对外源性 ONOO⁻ 的成像, 还可对干扰素- γ (IFN- γ) 和酯多糖(LPS)诱导内源性 ONOO⁻ 水平变化进行实时监测。该探针为揭示 ONOO⁻ 生理机制提供一种重要的成像工具, 对于 ONOO⁻ 相关疾病诊断与治疗具有重要意义。

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

¹H NMR (400 MHz) 和 ¹³C NMR (100 MHz) 采用 Bruker AvanceIII-400 型核磁共振仪测定, 溶剂为 CDCl₃, 内标为 TMS; 高分辨质谱采用 Waters Micromass 公司的 Q-ToF 型高分辨质谱仪测定; 紫外-可见光吸收光谱采用安捷伦公司安捷伦 8453 型紫外-可见分光光度计测定; 荧光发射光谱采用日立 FL4600 型荧光分光光度计测定; 细胞荧光成像采用 LeicaTCS SP8 动态超高分辨单双光子激光共聚焦联用系统测定。3-羟基-*N,N*-二乙基苯胺、四乙基米氏酮、邻苯二甲酰酐、锌、4-溴二苯甲酮、四氯化钛和 *N,N*-二异丙基乙胺购自阿拉丁试剂。化合物 **H-3**, **H-4** 参考已经报道的文献[21, 22]合成。

3.2 实验方法

TPE-ONOO 的合成: 在 50 mL 圆底烧瓶中, 将化合物 **H-4** (460.0 mg, 1 mmol) 和 **H-5** (313.2 mg, 1 mmol) 溶于 5 mL 98% H₂SO₄ 中, 在 90 $^{\circ}\text{C}$ 加热条件下反应 12 h。

反应完成后, 将其倒入 50 mL 冰水中, 并加入 1 mL 高氯酸产生固体沉淀, 减压抽滤获得粗产物. 通过柱色谱法 [MeOH/二氯甲烷(DCM), $V:V=1:15$] 得到 130.2 mg 紫色固体, 产率为 17.9%. m.p. 220~221 °C; ^1H NMR (CDCl_3 , 400 MHz) δ : 8.10 (d, $J=8.11$ Hz, 1H), 7.73 (d, $J=8.76$ Hz, 2H), 7.65 (d, $J=8.08$ Hz, 1H), 7.28 (s, 1H), 7.10~7.18 (m, 6H), 7.05 (d, $J=6.92$ Hz, 2H), 6.87~6.95 (m, 5H), 6.82 (d, $J=8.76$ Hz, 2H), 6.48~6.55 (m, 4H), 3.54~3.57 (m, 4H), 2.92 (s, 12H), 1.28 (t, $J=7.00$ Hz, 6H); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 100 MHz) δ : 168.5, 161.3, 157.4, 153.9, 151.2, 148.9, 144.3, 144.2, 140.7, 135.6, 132.8, 132.7, 132.6, 132.5, 132.2, 131.7, 131.6, 130.7, 130.1, 129.9, 129.5, 127.9, 127.6, 127.1, 126.4, 126.1, 115.3, 113.5, 112.0, 111.5, 113.5, 112.0, 111.5, 106.2, 96.5, 77.3, 77.0, 76.7, 45.7, 40.6, 40.4, 12.5; HRMS calcd for $\text{C}_{49}\text{H}_{47}\text{N}_3\text{O}_3$ 738.3690, found 738.3691.

探针 TPE-ONOO 母液的配置: 用分析天平称取 (8.38 mg) 的 TPE-ONOO 溶解于 DMSO 中, 配置成 1 mmol/L 母液, 然后放置于 4 °C 冰箱备用.

过氧亚硝酰离子溶液的配置 (ONOO^-): 取 0.7 mol/L 过氧化氢加入 0.6 mol/L HCl 溶液中酸化与配置好的 0.6 mol/L 亚硝酸钠 (0.207 g, NaNO_2 溶于 5 mL 去离子水) 混合, 迅速加入 1.5 mol/L 氢氧化钠 (0.3 g, NaOH 溶解于 5 mL 去离子水), 在冰水浴条件下配置, 得到黄色溶液. 加入适量二氧化锰 (除去过量的过氧化氢), 过滤二氧化锰得到 ONOO^- 原液. 用 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液稀释, 根据紫外吸收光谱测 302 nm 处的吸光度, 并根据朗伯比耳定律计算 $A=kbc$ ($k=1670 \text{ mol/L}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, $b=1 \text{ cm}$). 其他活性氧物种配置见辅助材料.

辅助材料(Supporting Information) 探针 TPE-ONOO 的 ^1H NMR, ^{13}C NMR 和 HRMS 图谱. 这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载.

References

- [1] Liu, X.; He, L.; Gong, X.; Yang, Y.; Cheng, D.; Peng, J.; Wang, L.; Zhang, X.-B.; Yuan, L. *CCS Chem.* **2021**, *4*, 356.
- [2] Grzelakowska, A.; Zielonka, M.; Debowska, K.; Modrzejewska, J.; Szala, M.; Sikora, A.; Zielonka, J.; Podsiadly, R. *Free Radicals Biol. Med.* **2021**, *169*, 24.
- [3] Ding, Z.; Tan, J.; Feng, G.; Yuan, Z.; Wu, C.; Zhang, X. *Chem. Sci.* **2017**, *8*, 5101.
- [4] Xie, X.; Liu, G.; Su, X.; Li, Y.; Liu, Y.; Jiao, X.; Wang, X.; Tang, B. *Anal. Chem.* **2019**, *91*, 6872.
- [5] Yang, X.; Zhang, D.; Ye, Y.; Zhao, Y. *Coord. Chem. Rev.* **2022**, *453*, 214336.
- [6] Zhao, X.; Li, N.; Liu, F.; Gao, C.; Feng, J.; Liu, L.; Guan, X.; Yan, N. *Chin. J. Org. Chem.* **2020**, *40*, 4339 (in Chinese). (赵小龙, 李娜, 刘发玉, 高超, 丰久彪, 刘乐平, 关晓琳, 燕娜, 有机化学, **2020**, *40*, 4339.)
- [7] Wang, B.; Wang, Y.; Wang, Y.; Zhao, Y.; Yang, C.; Zeng, Z.; Huan, S.; Song, G. *Anal. Chem.* **2020**, *92*, 4154.
- [8] Liu, F.; Dong, H.; Tian, Y. *Analyst* **2019**, *144*, 2150.
- [9] Li, D.; Chen, H.; Gan, Z.; Sun, J.; Guo, D.; Qu, L. *Sens. Actuators, B* **2018**, *277*, 8.
- [10] Liu, Z.; Tian, Y. *Sci. Chin. Chem.* **2021**, *64*, 915.
- [11] Deng, Y.; Feng, G. *Anal. Chem.* **2020**, *92*, 14667.
- [12] Yin, X.; Feng, W.; Gong, S.; Feng, G. *Dyes Pigm.* **2020**, *172*, 107820.
- [13] Xia, Q.; Feng, S.; Hong, J.; Feng, G. *Sens. Actuators, B* **2021**, *337*, 129732.
- [14] Xiong, J.; Wang, W.; Wang, C.; Zhong, C.; Ruan, R.; Mao, Z.; Liu, Z. *ACS Sens.* **2020**, *5*, 3237.
- [15] Cheng, D.; Gong, X.; Wu, Q.; Yuan, J.; Lv, Y.; Yuan, L.; Zhang, X. *Anal. Chem.* **2020**, *92*, 11396.
- [16] Mao, Z.; Xiong, J.; Wang, P.; An, J.; Zhang, F.; Liu, Z.; Kim, J. S. *Coord. Chem. Rev.* **2022**, *454*, 214356.
- [17] Cheng, D.; Pan, Y.; Wang, L.; Zeng, Z.; Yuan, L.; Zhang, X.; Chang, Y. T. *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 285.
- [18] Tian, X.; Zuo, M.; Niu, P.; Wang, K.; Hu, X. *Chin. J. Org. Chem.* **2020**, *40*, 1823 (in Chinese). (田雪琪, 左旻瓚, 牛蓬勃, 王开亚, 胡晓玉, 有机化学, **2020**, *40*, 1823.)
- [19] Han, T.; Yan, D. Y.; Wu, Q.; Song, N.; Zhang, H. K.; Wang, D., *Chin. J. Chem.* **2021**, *39*, 677.
- [20] Xu, W.; Yang, Q.; Zeng, J.; Tan, L.; Zhou, L.; Peng, L.; Zhou, Y.; Xie, C.; Luo, K.; Zhang, Z. *Sens. Actuators, B* **2022**, *359*, 131565.
- [21] Kang, M.; Gu, X.; Kwok, R. T. K.; Leung, C. W. T.; Lam, J. W. Y.; Li, F.; Tang, B. Z. *Chem. Commun.* **2016**, *52*, 5957.
- [22] Wang, E.; Zhao, E.; Hong, Y.; Lam, J. W. Y.; Tang, B. Z. *J. Mater. Chem. B* **2014**, *2*, 2013.

(Zhao, C.)