

基于1,8-萘酰亚胺的 SO₂衍生物荧光探针研究进展

曹碧霞¹, 刘荣^{1*}, 韩正枝², 杨欣梓²

(1. 甘肃省化工研究院有限责任公司, 甘肃兰州730020;

2. 甘肃省精细化工重点实验室, 甘肃兰州730020)

摘要:根据荧光探针分子的识别机理,综述了近年来基于1,8-萘酰亚胺基团的SO₂荧光探针的研究进展,并展望了其未来发展趋势。

关键词:SO₂衍生物;1,8-萘酰亚胺;荧光探针

中图分类号:O65;O62

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)10-0243-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.10.050

Research progress on 1,8-naphthalimide-based fluorescent probes for sulfur dioxide derivatives

CAO Bi-xia¹, LIU Rong^{1*}, HAN Zheng-zhi², YANG Xin-zi²

(1. Gansu Chemical Industry Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730020, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Fine Chemicals, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Latest research progress on 1,8-naphthalimide groups-based fluorescent probes for SO₂ is reviewed according to the molecular recognition mechanism, and the future development trends of the probes are predicted.

Key words: SO₂ derivatives; 1,8-naphthalimide; fluorescent probes

SO₂是常见大气污染物之一,主要由化石燃料的燃烧及一些工业生产产生^[1]。在生物体内,含硫氨基酸L-半胱氨酸可以代谢产生内源性SO₂,参与生物体内血压调节、血管舒张及细胞内的氧化还原平衡等生理活动^[2]。SO₂是水溶性的,溶于水后会形成SO₃²⁻和HSO₃⁻^[3],因此SO₂荧光探针是基于SO₃²⁻或HSO₃⁻来设计合成的。

1,8-萘酰亚胺是典型的双光子荧光团,具有较高的荧光量子产率、良好的光稳定性、大的斯托克位移和易于修饰的优点^[4]。从结构上看,1,8-萘酰亚胺具有较大的刚性平面结构,萘环一端具有强的给电子能力,酰亚胺一端具有强的吸电子能力,分子中存在着优良的“供-吸”电子共轭体系,因此很容易受到光的照射而发生跃迁产生荧光。此外,萘环上的取代基对1,8-萘酰亚胺供吸电子能力的影响大于酰亚胺上的取代基,因此研究者在设计以此结构为母核的荧光探针时一般都识别基团连接在萘环

部分^[5]。当识别基团与目标客体反应时,会对该体系的供吸电子效应产生较大的影响,从而引起相应的光谱性质发生变化。根据1,8-萘酰亚胺的上述特点,很多以此为荧光团的SO₂荧光探针被设计出来。本文中以分子内电荷转移(ICT)、C=N键异构化(C=N isomerization)和荧光共振能量转移(FRET)等不同的荧光传感机理进行分类,综述了近年来具有代表性的基于1,8-萘酰亚胺的SO₂有机小分子荧光探针。

1 基于分子内电荷转移机理

1,8-萘酰亚胺是D-π-A型荧光团,分子内部存在优良的“供-吸”电子体系,被光激发后,会发生由萘环至酰亚胺的分子内电荷转移过程。在设计以1,8-萘酰亚胺为荧光团的ICT荧光探针时,一般将识别基团连接于1,8-萘酰亚胺4位,当识别基团与目标客体作用后,会对其电子“供-吸”体系产生一

收稿日期:2020-11-04;修回日期:2021-08-02

基金项目:甘肃省精细化工重点实验室项目(18JR2RA021)

作者简介:曹碧霞(1988-),女,硕士,助理工程师,研究方向为有机小分子荧光探针的设计合成与应用,823803232@qq.com;刘荣(1983-),男,学士,高级工程师,研究方向为有机合成、精细化学品合成及化工助剂,通讯联系人,13659311387@163.com。

定的影响,如果作用后电荷转移程度增强了,整个体系的共轭程度也会随之增强,则发射光谱红移,反之则蓝移。

乙酰丙酮酸酯是常见的 SO_2 衍生物识别基团, SO_2 衍生物可与乙酰丙酮酸酯的末端羰基发生亲核加成反应,生成的羟基可进一步发生分子内环化,释放出荧光基团,使得探针的荧光发生改变,进而实现对 SO_2 衍生物的检测^[6]。2015 年, Hou 等^[7] 以 1,8-萘酰亚胺为荧光基团,乙酰丙酮酸酯为识别基团,设计合成了一个基于 ICT 机理的比色和荧光比率型探针 1(图 1)。游离探针 1 的荧光发射峰位于 414 nm,加入亚硫酸盐后, SO_3^{2-} 与乙酰丙酮酸酯发生加成环化反应,乙酰丙酮酸酯从探针脱去暴露出羟基,羟基在溶液中电离生成氧负离子,氧负离子具有更强的给电子能力,使得分子内产生了从氧负离子到酰亚胺端的 ICT 过程,探针的发射光谱红移至 554 nm,从而可以根据 $I_{554 \text{ nm}}/I_{414 \text{ nm}}$ 荧光强度的比例变化识别 SO_3^{2-} 。探针 1 对 SO_3^{2-} 的最低检测限为 $1.57 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$, 低于美国食品药品监督管理局(FDA)要求的食品或饮料中 $1.25 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 的限值。

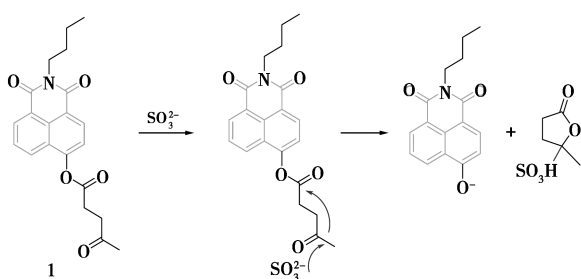


图 1 探针 1 和 SO_3^{2-} 作用机理

2 基于 $\text{C}=\text{N}$ 键异构化机理

2007 年,中国科学院理化技术研究所汪鹏飞教授最早提出了 $\text{C}=\text{N}$ 键异构化机理, $\text{C}=\text{N}$ 异构化是含有未桥联 $\text{C}=\text{N}$ 键化合物激发态的主要衰变途径,含有未桥联的 $\text{C}=\text{N}$ 键的化合物通常不发荧光。此类探针在设计时一般将荧光基团与识别基团通过 $\text{C}=\text{N}$ 双键相连,通过识别基团与目标客体的特异性结合来抑制 $\text{C}=\text{N}$ 键异构化,进而达到荧光传感的目的。

醛基也是常见的 SO_2 衍生物识别基团,具有较强的吸电子能力,在弱酸性条件下可与 SO_2 衍生物发生亲核加成反应,生成相应的 α -羟基磺酸盐,而

羟基作为良好的氢键供体可与 $\text{C}=\text{N}$ 键形成分子内氢键,抑制 $\text{C}=\text{N}$ 键异构化,表现出荧光增强现象。2012 年, Sun 等^[8] 将 1,8-萘酰亚胺和醛基通过 $\text{C}=\text{N}$ 键相连,合成了一个基于氢键抑制 $\text{C}=\text{N}$ 键异构化的 SO_2 荧光增强型探针 2(图 2)。游离探针 2 分子中的 $\text{C}=\text{N}$ 键通过非辐射跃迁的方式淬灭了 1,8-萘酰亚胺荧光团的荧光,因此探针基本不发荧光。加入 NaHSO_3 后, HSO_3^- 与醛基发生特异性加成反应,生成了强有力的氢键供体羟基,进一步与 $\text{C}=\text{N}$ 键生成了 $\text{O}-\text{H}\cdots\text{N}=\text{C}$ 氢键,形成了类似五元环的稳定结构,抑制了 $\text{C}=\text{N}$ 键异构化,增加了荧光基团辐射跃迁的几率,从而使得探针位于 535 nm 处的荧光增强 35 倍,发射出极强的绿色荧光。探针 2 对 HSO_3^- 的检测限低至 $0.1 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$, 在 $0 \sim 40 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ 范围内均显示良好的线性关系。

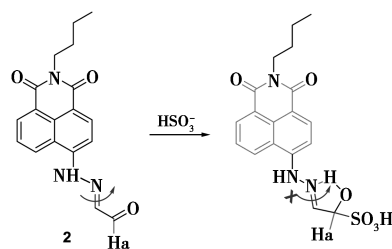


图 2 探针 2 和 HSO_3^- 作用机理

溶酶体是真核细胞中重要的细胞器,其中所含的水解酶在生物体多种代谢过程中发挥着重要作用,而 SO_2 可以诱导溶酶体裂解导致其水解酶释放增多,进而引起休克、癌症、类风湿性关节炎等疾病的发生^[9],因此, SO_2 溶酶体靶向荧光探针的开发具有重要意义。2018 年,在上述探针的基础上, Zhao 等^[10] 在取代基 R_2 的位置引进溶酶体靶向基团吗啉,设计合成了溶酶体靶向双光子荧光探针 3(图 3)。该探针可以有效分布于 HeLa 细胞溶酶体中进行 SO_2 的靶向识别,并且可以在单光子和双光子模式下成功检测斑马鱼中的 SO_2 衍生物,为生物医学

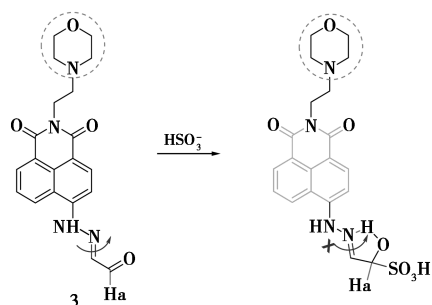


图 3 探针 3 和 HSO_3^- 作用机理

诊断和疾病研究中 SO₂ 的监测提供了可靠的途径。此外,研究者发现,探针 3 的应用与 pH 相关,当 pH=5.5,探针的最低检测限为 3.75×10^{-6} mol/L,应用范围为 $0 \sim 90 \times 10^{-6}$ mol/L,当 pH=7.4 时,探针的最低检测限为 4.12×10^{-6} mol/L,应用范围为 $70 \times 10^{-6} \sim 180 \times 10^{-6}$ mol/L。

3 基于荧光共振能量转移机理

上述基于 ICT 或 C=N 键异构化机理的 SO₂ 荧光探针,一般根据 SO₂ 与醛基或乙酰丙酮酸酯的特殊反应进行设计。然而醛基在中性体系中还可与半胱氨酸和同型半胱氨酸发生反应,生成五元或六元杂环加和物,从而对 SO₂ 的检测造成干扰。为了避免上述 2 种生物硫醇分子的干扰,以醛基为识别基团的 SO₂ 荧光探针一般在酸性体系中进行检测,因此限制了其广泛应用。而以乙酰丙酮酸酯为识别基团的探针由于含有不稳定的酯键,若是应用于生物体内,在细胞内的蛋白酶和酯水解酶的作用下,会发生水解反应释放出活化的荧光团,造成较高的背景干扰,影响其在生物体内的进一步应用。因此,近年来以 C=C 键为识别基团的 SO₂ 荧光探针被开发出来,此类探针能在生理条件下特异性结合 SO₂ 衍生物,而且不受细胞内广泛存在的毫摩尔级小分子生物硫醇的干扰。

探针在设计时一般将 1,8-萘酰亚胺荧光团作为荧光供体基团,通过典型的连接子(如哌嗪单元)及 C=C 键与另一荧光受体基团进行连接。哌嗪单元的刚性结构可促进连接基团之间的能量转移,因此可以将能量供体与受体进行有效连接^[11],而 C=C 键部分可与 SO₂ 衍生物发生迈克尔加成反应,从而中断两荧光团之间的能量转移过程。一般来说选定的荧光受体基团的吸收光谱与 1,8-萘酰亚胺的发射光谱有一定程度的重叠,因此,在光激发下会发生由荧光供体基团至荧光受体基团的 FRET 过程,而 C=C 键与 SO₂ 衍生物的加成反应会中断此过程的发生,因此探针可通过两荧光团发射光谱的比例变化识别 SO₂,相比于单纯的荧光强度改变型探针,此类探针还可有效避免激发光的干扰,改善信噪比,并减少介质颜色、外部环境和仪器灵敏度的影响,从而提高了方法的准确性和真实性,非常适用于在生物系统中进行痕量检测^[12]。

3.1 1,8-萘酰亚胺-半花菁型

半花菁具有出色的光物理性质,结构中的 C⁺保

证了对亚硫酸(氢)盐的特异性识别能力^[13],更重要的是半花菁的吸收光谱和 1,8-萘酰亚胺的发射光谱有很大的重叠区域,因此可以将两荧光团以适宜的连接子相连,设计基于 FRET 机理的比例型荧光探针。

2019 年,Shen 等^[14]将半花菁和 1,8-萘酰亚胺有机结合,开发了一个基于 FRET 机理的比色和比例荧光探针 4(图 4)。加入亚硫酸氢盐后,HSO₃⁻ 进攻活性 C=C 双键,发生亲核加成反应,破坏了 FRET 结构并引起了荧光的比例变化,使得探针 4 的荧光强度比 ($I_{527\text{ nm}}/I_{590\text{ nm}}$) 从 0.205 0 增加到 2.860 6,探针显示出从红色到黄色的可见颜色变化,以及从红色到绿色的明显荧光变化。探针 4 对 HSO₃⁻ 的响应时间为 150 s,检测限可低至 0.981×10^{-7} mol/L,并可成功用于检测 MCF-7 细胞中的 HSO₃⁻。

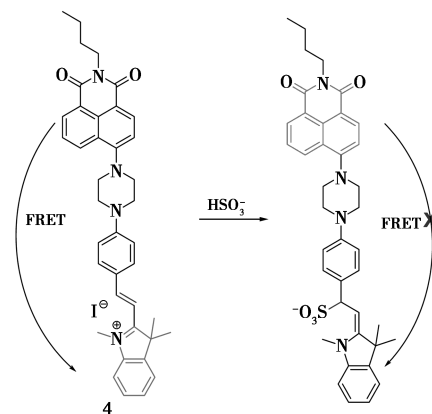


图 4 探针 4 和 HSO₃⁻ 作用机理

3.2 1,8-萘酰亚胺-苯并吡喃型

苯并吡喃具有良好的光学特性和亚硫酸(氢)盐的特异性识别能力^[15],同半花菁一样,吸收光谱与 1,8-萘酰亚胺的发射光谱有部分重叠。2020 年,Gao 等^[16]将 1,8-萘酰亚胺与苯并吡喃通过哌嗪相连,设计合成了比例荧光探针 5(图 5),用于可逆检测 SO₂ 和甲醛(FA)。游离探针主要显示位于 640 nm 处的苯并吡喃的荧光发射峰,加入 NaHSO₃ 后,HSO₃⁻ 会攻击苯并吡喃的 C=C 键发生迈克尔加成反应,破坏 FRET 过程,使得苯并吡喃受体的荧光峰逐渐减小,1,8-萘酰亚胺供体的荧光峰逐渐增强,从而通过荧光强度 ($I_{540\text{ nm}}/I_{640\text{ nm}}$) 的比例变化识别 SO₂ 衍生物。探针可在 5 s 内快速响应 SO₂,对 SO₂ 的检出限为 1.21×10^{-6} mol/L。当在 5-HSO₃⁻ 体系中加入 FA 时,FA 会与游离的 HSO₃⁻ 反应,导致逆

克尔加成反应逆向进行,使探针荧光恢复至初始状态,恢复效率几乎达到 100%。此外,探针因红色发射和低细胞毒性的优点,可成功可逆监测活细胞和小鼠体内的 SO₂ 和 FA,在探索生物体内 SO₂ 和 FA 的相关病理机制方面具有潜在的应用前景。

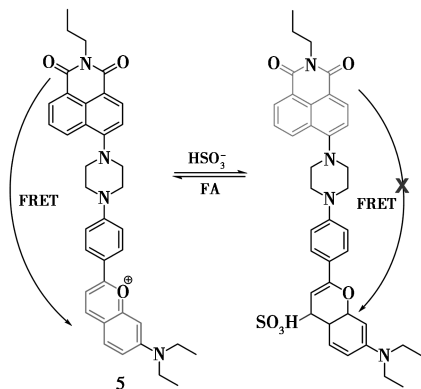


图 5 探针 5 和 HSO₃⁻ 及 FA 作用机理

由于奈环上的取代基 R₁ 对 1,8-萘酰亚胺基团供吸电子能力的影响大于酰亚胺上的取代基 R₂,因此研究者一般将识别基团及受体荧光团顺次连接在奈环部分,但也有一些研究者将其连接于酰亚胺基团上。比如 2020 年, Lu 等^[17] 将 1,8-萘酰亚胺和苯并吡喃通过不同位点连接,也合成了一个基于 FRET 机理的比例荧光探针 6(图 6),亲核的 SO₃²⁻ 可以通过迈克尔加成反应攻击苯并吡喃的 C=C 不饱和双键,中断探针分子的 π 共轭体系,破坏 FRET 过程,从而导致 1,8-萘酰亚胺供体位于 534 nm 的绿色荧光增加,苯并吡喃受体位于 634 nm 的红色荧光降低,荧光强度比(I_{534 nm}/I_{634 nm})增加 27 倍左右,同时溶液颜色由灰蓝色变为黄色。探针 6 对 SO₂ 的检出限低至 0.47×10⁻⁷ mol/L,在 5~40×10⁻⁶ mol/L 范围内表现出良好的线性关系,并在 pH=6.0~9.0 范围内具有良好的稳定性。生物成像实验表明,探针具有线粒体靶向特性,可用于活细胞中 SO₂ 衍生物的检测。

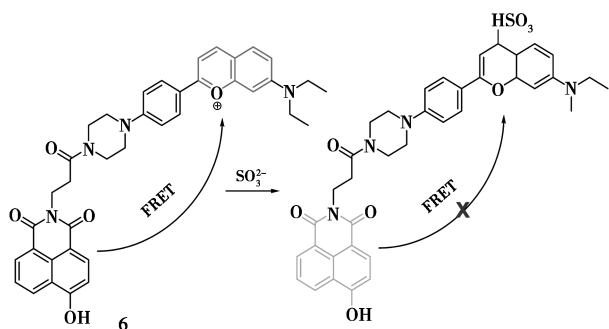


图 6 探针 6 和 SO₃²⁻ 作用机理

3.3 1,8-萘酰亚胺-螺吡喃型

还有一类探针比较特殊,此类探针是将 1,8-萘酰亚胺与一种光致变色有机化合物螺吡喃(SP)有机相连,螺吡喃经紫外线照射后,可迅速由闭环体可逆转变为开环体,并伴随明显的荧光信号变化^[18]。当螺吡喃处于开环状态时,极化的不饱和 C=C 双键可作为亲核试剂(如 SO₂)的亲核加成反应位点。

Zhang 等^[19] 利用螺吡喃的上述性质,将其与 1,8-萘酰亚胺有机结合设计合成了溶酶体靶向探针 7(图 7),探针处于闭环状态时在 535 nm 处显示 1,8-萘酰亚胺的绿色荧光,经紫外线照射转化为开环形式后,探针分子出现由 1,8-萘酰亚胺到开环螺吡喃(即半花菁)的 FRET 过程,因此在 630 nm 处显示微弱的半花菁的红色荧光。而当 SO₂ 衍生物与 C=C 键作用后, FRET 过程被抑制,探针恢复初始荧光。这种紫外光原位活化策略能够通过荧光比例变化准确监测溶酶体中的 SO₂,从而在很大程度上避免了细胞内假阳(或阴)性信号的干扰。

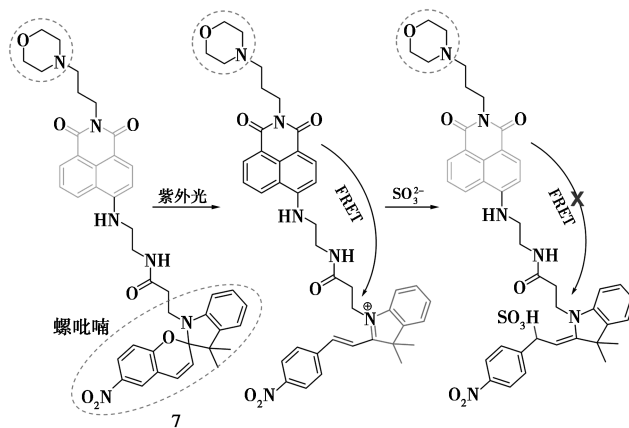


图 7 探针 7 的作用机理

4 基于双重识别机理

改变 2 个能量基团之间的连接子,可以在一定程度上改变其能量响应机理。2019 年, Li 等^[20] 将探针 5 的连接子由哌嗪变为噻吩,设计合成了一个基于双重识别机理的 AND 逻辑门类荧光探针 8(图 8)。探针 8 具有 2 个响应位点,溶酶体靶向基团吗啉和亚硫酸氢盐的特异性结合位点 C=C 键,2 个响应位点分别通过 PET 和 ICT 过程控制 1,8-萘酰亚胺荧光团的荧光。当探针处于中性或碱性环境,探针分子中由于 PET 效应的存在几乎不发荧光,同样的在未加入亚硫酸氢盐时,由于 ICT 效应的存在探针依然不发荧光,只有当探针处于酸性环境

(如溶酶体)并且在探针溶液中加入 HSO₃⁻ 时,此时半花菁部分的共轭结构被中断,可以抑制 ICT 过程,而吗啉基团中 N 原子的质子化会阻止 PET 过程,最终使得探针位于 524 nm 处的荧光发射峰显著增强。探针对 SO₂ 的检出限为 0.207×10^{-7} mol/L,并可在 200 s 内达到响应平衡。更重要的是该探针对活细胞显示出低细胞毒性,与含有吗啉基团的其他靶向探针相似,该探针可富集于活细胞溶酶体中,靶向检测溶酶体中的 SO₂。这种基于双重识别机理的 AND 逻辑门类探针可以避免复杂细胞环境对探针的影响,具有更好的选择性和更高的灵敏度,在实时监控方面具有更加实用和出色的能力。

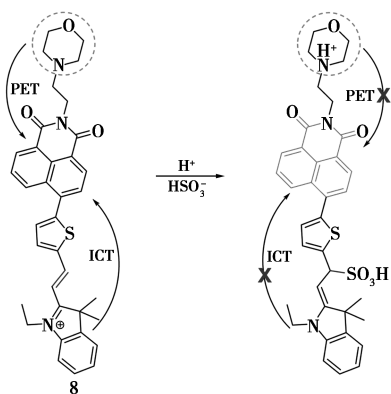


图8 探针8的作用机理

2019年, Kong等^[21]设计了首个针对双细胞器的荧光探针9(图9)。由于FRET效应的存在,游离探针只显示位于600 nm的半花菁基团的红色荧光,亚硫酸盐的加入抑制了FRET效应,半花菁基团的红色荧光消失,显示出位于530 nm的1,8-萘酰亚胺的绿色荧光。通过pH实验发现,绿色荧光在酸性条件下最强,其次是中性条件,在碱性条件下最

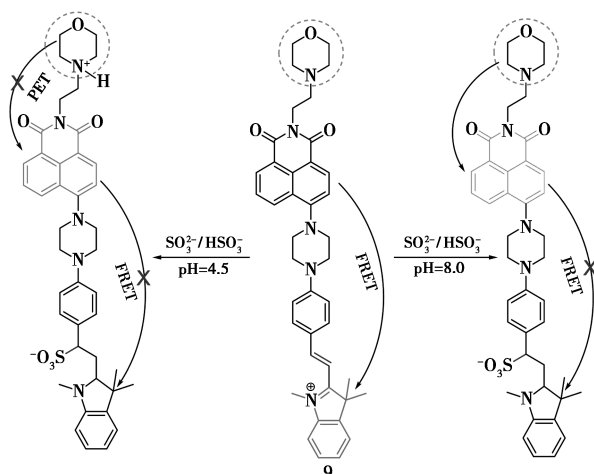


图9 探针9的作用机理

弱。原因是在酸性条件下,吗啉单元的氨基质子化,使得由吗啉中的N到萘酰亚胺荧光团的PET效应被抑制,因此1,8-萘酰亚胺基团可以得到强烈的释放,而在碱性条件下无法抑制该PET效应(吗啉的pKa值为8.3),因此在碱性条件下仅发出较弱的绿色荧光,但是这种现象并不影响探针在广泛pH条件下识别SO₂。此外,探针9在单光子($\lambda_{ex} = 405$ nm)和双光子($\lambda_{ex} = 800$ nm)激发下均可特异性检测溶酶体和线粒体中的SO₂,因此可以为两细胞器中的SO₂在调节细胞活性联系的研究中提供有力帮助。

5 结论与展望

荧光探针技术的发展为监测和分析活细胞中与多种代谢活动相关的SO₂衍生物提供了巨大的机会,1,8-萘酰亚胺作为优良的双光子荧光团被广泛应用于SO₂衍生物荧光探针的开发。但是,由于生物环境的复杂性(如pH的变化、背景荧光的干扰以及其他生物小分子的存在),容易对现实生物环境(如细胞和生物体)中SO₂衍生物的检测产生干扰,特别是依赖于荧光强度变化的探针更容易受到此类问题的影响。为了解决这个问题,研究者们将1,8-萘酰亚胺与某些特定荧光团进行连接,设计出了一系列基于FRET机理的比例型SO₂荧光探针,此类探针在与SO₂衍生物作用后,不仅会产生荧光强度的变化,而且会产生发射波长的偏移,因此可以通过发射波长的比例变化识别SO₂衍生物。而近几年来,研究者们又开发出一类光致变色型荧光探针,此类探针是将1,8-萘酰亚胺与光致变色基团(如螺吡喃)有机连接,光致变色基团可以通过远程光控方式在2个异构状态之间可逆转换,因此能够以“双重检测”机制(即2个同分异构状态之间的可逆变化)检测SO₂衍生物,从而避免了假信号对检测的干扰,更重要的是光致变色探针的远程光控是非侵入性的,具有高时空分辨率,是适应当前生物传感和生物成像技术蓬勃发展的传感原理,因此可以基于光致变色基团的开发,构建性能更佳的光控智能型荧光探针。

参考文献

- [1] Chen W, Fang Q, D Yang, *et al.* Selective, highly sensitive fluorescent probe for the detection of sulfur dioxide derivatives in aqueous and biological environments [J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(1): 609-616.

- [2] Wang X B, Jin H F, Tang C S, *et al.* Significance of endogenous sulphur-containing gases in the cardiovascular system [J]. *Experimental Pharmacology and Physiology*, 2010, 37(7): 745-752.
- [3] Bing Y, Jing X A, Hlz A. Recent progress in the small-molecule fluorescent probes for the detection of sulfur dioxide derivatives ($\text{HSO}_3^-/\text{SO}_3^{2-}$) [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2019, 145: 42-60.
- [4] 齐齐, 哈涌泉, 孙岳明. 1,8-萘酰亚胺衍生物的研究进展[J]. *材料导报*, 2013, 27(19): 17-22.
- [5] Banerjee S, Veale E B, Phelan C M, *et al.* Recent advances in the development of 1,8-naphthalimide based DNA targeting binders, anticancer and fluorescent cellular imaging agents[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(4): 1601-1618.
- [6] Choi M G, Hwang J, Eor S, *et al.* Chromogenic and fluorogenic signaling of sulfite by selective deprotection of resorufin levulinate[J]. *Organic Letters*, 2010, 12(24): 5624-5627.
- [7] Hou P, Chen S, Voitchovsky K, *et al.* A colorimetric and ratiometric fluorescent probe for sulfite based on an intramolecular cleavage mechanism[J]. *Luminescence*, 2015, 29(7): 749-753.
- [8] Sun Y Q, Pi W, Jing L, *et al.* A fluorescent turn-on probe for bisulfite based on hydrogen bond-inhibited C=N isomerization mechanism[J]. *Analyst*, 2012, 137(15): 3430-3433.
- [9] Sang N, Yun Y, Gao Y Y, *et al.* SO_2 -induced neurotoxicity is mediated by cyclooxygenases-2-derived prostaglandin E(2) and its downstream signaling pathway in rat hippocampal neurons[J]. *Toxicological Sciences*, 2011, 124(2): 400-413.
- [10] Zhao Y, Ma Y, Lin W. A lysosome-targeted two-photon fluorescence probe for imaging of sulfur dioxide derivatives in living cells and zebrafish[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2018, 268: 157-163.
- [11] Yuan L, Lin W, Zheng K, *et al.* FRET-based small-molecule fluorescent probes: Rational design and bioimaging applications[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2013, 46(7): 1462-1473.
- [12] Ma Y, Gao W, Zhu L, *et al.* A ratiometric fluorescent probe for reversible monitoring of endogenous SO_2 /formaldehyde in cytoplasm and nucleoli regions and its applications in living mice[J]. *The Analyst*, 2020, 145(5): 1865-1870.
- [13] Yang X, Zhou Y, Zhang X, *et al.* A TP-FRET-based two-photon fluorescent probe for ratiometric visualization of endogenous sulfur dioxide derivatives in mitochondria of living cells and tissues[J]. *Chemical Communications*, 2016, 52(67): 10289-10293.
- [14] Shen R, Qian Y. A novel ratiometric fluorescent probe for specific detection of HSO_3^- at nanomolar level through 1,4-Michael addition[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2019, 387: 112110-112118.
- [15] Lv H, Yuan G, Zhang G, *et al.* A novel benzopyran-based colorimetric and near-infrared fluorescent sensor for Hg^{2+} and its imaging in living cell and zebrafish[J]. *Dyes and Pigments*, 2019, 172: 107658-107661.
- [16] Gao W, Y Ma, Lin W. Design of a FRET-based fluorescent probe for reversible detection of SO_2 and formaldehyde in living cells and mice[J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(32): 13654-13658.
- [17] Lu Y, Dong B, Song W, *et al.* Mitochondria-targeting ratiometric fluorescent probe for the detection of sulfur dioxide in living cells[J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(28): 2461-2468.
- [18] Samanta D, Galaktionova D, Gemen J, *et al.* Reversible chromism of spiropyran in the cavity of a flexible coordination cage[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 641-650.
- [19] Zhang W, Huo F, Yue Y, *et al.* Heat stroke in cells tissues related sulfur dioxide level precisely monitored by light-controlled fluorescent probes[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, 142(6): 3262-3268.
- [20] Li J Z, Sun Y H, Wang C, *et al.* An AND-logic based fluorescent probe for selective detection of lysosomal bisulfite in living cells[J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(18): 11946-11951.
- [21] Kong X, Yin J, Li M, *et al.* Simultaneously imaging of SO_2 in lysosomes and mitochondria based on a dual organelle-targeted fluorescent probe[J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2019, 292: 80-87. ■

SABIC 携手微软开发旗下首款使用再生海洋塑料的产品

沙特基础工业公司(SABIC)日前与微软合作开发首款以再生海洋塑料为原料的消费电子产品——微软海洋塑料鼠标。这款鼠标的外壳含有 20% 的再生海洋塑料。

作为其 2030 年零废弃物计划的一部分,微软发起的这个项目意在开发一种至少含有 10% 的再生海洋塑料的树脂原料。在了解项目的初步构想后,SABIC 立即加入该项目,进行回收材料可行性方案研究,并开发了能满足微软严格品质标准的原型树脂。微软该项目的设计团队与 SABIC 的技术专家通过密切协作,对原型树脂进行了多轮优化后,最终将该树脂产品成功应用于鼠标外壳,其中再生海洋塑料含量按重量计算高达 20%,远高于微软起初 10% 的设定目标。

SABIC 与微软的此次合作采用了 SABIC 的全新 XENOY™ 树脂。作为 SABIC TRUCIRCLE™ 循环解决方案的新成员,这款含有 20% 再生海洋塑料的新型 XENOY 树脂有助于减少海洋塑料垃圾。按照含有 20% 再生海洋塑料计算,每生产 1 000 t 这款 XENOY PC/PET 产品,就相当于从海洋、汇入海洋的水道或邻近的海滩上清除 2 400 万个 0.5 L 的一次性 PET 塑料瓶。

SABIC 的 TRUCIRCLE™ 可持续产品组合涵盖了一系列产品和服务,包括可回收性设计、物理回收产品、从废旧塑料原料中回收的获认证可再生产品、采用生物基原料的获认证可再生产品以及将塑料回收到高质量应用中并避免其被废弃的闭环解决方案。(赵艳燕)