

1,8-萘酰亚胺类荧光探针对胍的检测

常炜婕, 何雨婷, 许方龙, 张维冰, 钱俊红*

(上海市功能性材料重点实验室, 华东理工大学 化学与分子工程学院, 上海 200237)

摘要: 基于Gabriel反应, 在萘酰亚胺的4-位引入邻苯二甲酰亚胺、亚胺位引入溶酶体定位基团吗啉, 合成了探针 **NMA** 和 **NMB** 用于对胍的检测。实验结果表明两种探针对胍均有较强的光谱响应, 其中 **NMA** 对胍的响应更加灵敏、快速。胍的加入使 **NMA** 的吸收光谱红移 100 nm, 其在 527 nm 处的荧光信号最大增强约 500 倍。在 5.0~70 $\mu\text{mol/L}$ 范围内, **NMA** 的荧光强度与胍的浓度呈现良好的线性关系, 对胍的检出限为 1.83 $\mu\text{mol/L}$ 。此外, 通过高效液相色谱和密度泛函理论计算验证了探针 **NMA** 对胍的响应机理。细胞成像结果表明 **NMA** 能够实现溶酶体内胍的荧光成像。

关键词: 荧光探针; 1,8-萘酰亚胺; 胍; 溶酶体定位; 细胞成像

中图分类号: O657.3; O623.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2025)12-2601-06

1,8-Naphthalimide-based Fluorescent Probe for the Detection of Hydrazine

CHANG Wei-jie, HE Yu-ting, XU Fang-long, ZHANG Wei-bing, QIAN Jun-hong*

(Shanghai Key Laboratory of Functional Materials Chemistry, School of Chemistry & Molecular Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Based on the Gabriel reaction, two fluorescent probes, **NMA** and **NMB**, were synthesized for hydrazine detection. The probes were constructed with naphthalimide as the fluorophore, a phthalimide at the 4-position selected as the receptor and a morpholine at imide site as a lysosome-targeted group. Experimental results demonstrated that both probes exhibited evidently spectral responses to hydrazine. Compared to **NMB**, **NMA** displayed better performance such as higher sensitivity and faster response. The addition of hydrazine resulted in ~100 nm red shift in the absorption of **NMA**, accompanied with 500-fold fluorescence enhancement. The fluorescence intensity of **NMA** showed a good linear relationship with hydrazine concentration in the range of 5.0–70 $\mu\text{mol/L}$, with a detection limit ($3\sigma/k$) of 1.83 $\mu\text{mol/L}$. The response mechanism of **NMA** to hydrazine was validated by HPLC and theoretical calculations. Confocal imaging experiments demonstrated that **NMA** could realize imaging lysosomal hydrazine.

Key words: fluorescent probes; 1,8-naphthalimide; hydrazine; lysosome-targeting; cellular imaging

胍(N_2H_4)是一种极性强的无色液体, 由于相邻两个氮原子孤对电子的斥力, 胍具有强还原性、高反应活性、强碱性和良好的水溶性^[1-5], 常被应用于化工、医药和农业等领域。此外, 胍具有高毒性和污染性, 严重危害环境和人类健康^[6-8]。例如, 胍可通过皮肤或吸入等途径进入人体, 导致肝、肾、肺和中枢神经系统严重受损^[9-12]。鉴于此, 美国环境保护局(EPA)已将其列为潜在致癌物, 并规定胍在饮用水中的阈值为 10 ppb (0.312 $\mu\text{mol/L}$)^[13-14]。因此, 开发对环境或生物试样中的胍进行高效、灵敏检测的方法, 对人类身体健康以及胍的毒理学研究具有一定的现实意义。

目前检测胍的方法主要有高效液相色谱^[15]、色谱耦合质谱^[16-17]和电化学法^[18]等, 这些方法的灵敏度较高, 但样品前处理复杂、费时, 且仪器需要专业技术人员操作, 使用受到限制; 而荧光探针以高灵敏度、高选择性和操作简单等优点被广泛关注^[19-23]。已经报道的探针设计主要基于Gabriel反应、形成脎、脱保护和成环反应等机理^[24-27], 但针对细胞器靶向的胍荧光探针的报道较少^[28-29]。溶酶体是一

收稿日期: 2025-03-25; 修回日期: 2025-04-27

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1700400)

* 通讯作者: 钱俊红, 博士, 教授, 研究方向: 荧光分子传感器, E-mail: junhongqian@ecust.edu.cn

网络首发时间: 2025-10-20

种重要的细胞器,其功能障碍可导致多种人类疾病^[30-31]。研究表明,胍可通过引发氧化应激,造成肝细胞溶酶体膜损伤^[32]。因此,开发溶酶体靶向荧光探针对于了解溶酶体中胍的生理功能以及指导胍中毒的诊断具有重要意义。

本文针对胍的亲核活性,基于Gabriel反应设计了两个荧光探针**NMA**和**NMB**(图1)用于对胍的检测及对细胞内外源性胍的荧光成像。探针的设计基于以下几点考虑:(1)利用胍可快速发生Gabriel反应的特性,选择邻苯二甲酰亚胺作为识别基团;(2)基于1,8-萘酰亚胺基团良好的刚性、稳定性和共平面性等优点,以其为荧光团;(3)引入弱碱性吗啉作为溶酶体靶向基团,以期实现对溶酶体内胍的检测。实验结果表明,两种探针对胍均具有较高的光谱响应以及良好的选择性,探针**NMA**可实现对细胞溶酶体内胍的荧光成像。

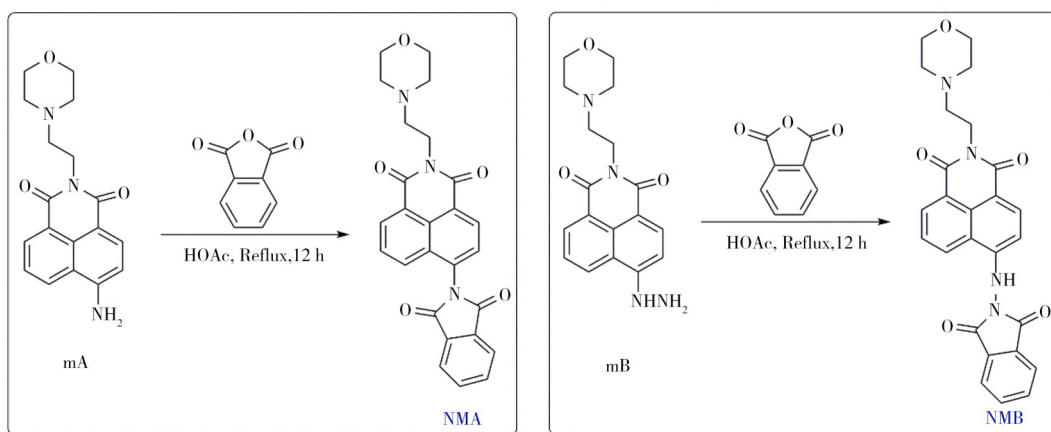


图1 探针**NMA**和**NMB**的合成路线

Fig. 1 Synthesis procedure of probes **NMA** and **NMB**

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

Lumina 荧光光谱仪、Evolution 220 紫外-可见分光光度计(美国 Thermo Fisher Scientific), Xevo G2 TOF MS 高分辨质谱仪(美国 Waters), AV-400 核磁共振波谱仪(瑞士 Bruker)。所有商品试剂使用前均未处理。4-溴-1,8-萘二甲酸酐、氘代氯仿、二甲基亚砜、4-(2-氨基吗啉)、叠氮化钠、碘化钠(阿拉丁试剂上海有限公司),2-二甲基乙胺、乙二醇单甲醚、二氯甲烷、石油醚、甲醇、乙酸、邻苯二甲酸酐、氯化钾、氯化钠、氯化钙、氯化镁、氯化锌、亚硫酸钠、亚硝酸钠、碳酸氢钠、硫酸钠、醋酸钠、硝酸钠、硫代硫酸钠、溴化钠、同型半胱氨酸、谷胱甘肽、半胱氨酸氯化铵、脯氨酸、甲硫氨酸、赖氨酸、组氨酸、色氨酸(上海泰坦科技有限公司)。

1.2 探针的合成路线

探针**NMA**的合成:将113.75 mg 6-氨基-2-(2-吗啉乙基)-1H-苯并异喹啉-1,3(2H)-二酮(mA)(0.35 mmol)、331.52 mg 邻苯二甲酸酐(2.24 mmol)加至15 mL 乙酸中,在125 °C下回流搅拌12 h后,冷却至室温,减压除去溶剂。将粗产物通过硅胶柱提纯($V_{\text{DCM}}:V_{\text{MeOH}}=50:1$)得白色固体**NMA**(88 mg,产率55.3%)。¹H NMR(400 MHz, CDCl_3) δ (ppm): 8.72(d, $J=7.8$ Hz, 1H), 8.66(dd, $J=7.3, 1.1$ Hz, 1H), 8.05(dd, $J=5.5, 3.1$ Hz, 2H), 8.01(dd, $J=8.5, 1.1$ Hz, 1H), 7.93~7.87(m, 2H), 7.81~7.72(m, 2H), 4.37(t, $J=6.8$ Hz, 2H), 3.68(t, $J=4.6$ Hz, 4H), 2.72(t, $J=6.8$ Hz, 2H), 2.61(d, $J=4.6$ Hz, 4H); ¹³C NMR(151 MHz, CDCl_3) δ (ppm): 167.10、163.89、163.49、135.03、134.12、131.82、131.75、130.95、129.26、128.83、127.88、127.78、123.66、123.28、67.06、56.15、53.83、37.34、31.51、30.14、29.70、29.66、29.61、29.33、22.69、14.12。HR-MS m/z ($[\text{M}+\text{H}]^+$): 456.1515; $\text{C}_{26}\text{H}_{22}\text{N}_3\text{O}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 理论计算值: 456.1559。

探针**NMB**的合成:以6-胍基-2-(2-吗啡乙基)-1H-苯并[de]异喹啉-1,3(2H)-二酮(mB)代替mA,参考探针**NMA**的合成方法,得到淡黄色固体**NMB**(108 mg,产率69.7%)。¹H NMR(400 MHz, CDCl_3) δ

(ppm): 8.41(d, $J=7.3$ Hz, 1H), 8.32(d, $J=8.2$ Hz, 1H), 8.14(d, $J=8.5$ Hz, 1H), 8.01(dd, $J=5.5, 3.0$ Hz, 2H), 7.93~7.88(m, 2H), 7.56~7.42(m, 2H), 6.71(d, $J=8.2$ Hz, 1H), 4.37(t, $J=6.6$ Hz, 2H), 3.77(t, $J=4.7$ Hz, 4H), 2.84(d, $J=31.9$ Hz, 6H)。 ^{13}C NMR(151 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ (ppm): 166.30、164.07、163.37、148.72、135.86、133.68、131.62、130.12、130.02、128.71、126.42、124.41、122.78、119.62、55.39、53.87、37.05、31.71、31.62、30.30、29.50、29.19、29.17、29.04、22.56、14.42。HR-MS m/z ($[\text{M}+\text{H}]^+$): 471.166 7; $\text{C}_{26}\text{H}_{22}\text{N}_4\text{O}_5$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 理论计算值: 471.166 8。

1.3 储备液的制备

称取一定量的探针 **NMA** 和 **NMB** 溶于二甲基亚砜(DMSO)中制成 3 mmol/L 的探针储备液, 量取一定量的胍和其他分析物分别溶于 PBS-DMSO ($V:V=1:9$) 缓冲溶液和 PBS 缓冲溶液中, 配成 30 mmol/L 的储备液。

1.4 时间响应实验

准确移取 10 μL 探针储备液和 50 μL 胍储备液至 3 mL PBS-DMSO ($V:V=1:9$) 缓冲溶液中, 使探针和胍的浓度分别为 10 $\mu\text{mol/L}$ 和 500 $\mu\text{mol/L}$, 测试其在不同时间的发射光谱。

1.5 选择性和竞争性实验

选择性: 在探针 **NMA/NMB** 浓度为 10 $\mu\text{mol/L}$ 的缓冲液中, 加入不同的分析物, 分别反应 100 min 和 24 h 后测其吸收和发射光谱。

竞争性: 在探针 **NMA** 和 **NMB** 浓度为 10 $\mu\text{mol/L}$ 的缓冲液中, 同时加入 500 $\mu\text{mol/L}$ 胍和其它分析物, 分别反应 100 min 和 24 h 后测其吸收和发射光谱。

1.6 浓度滴定

准确移取不同体积的胍储备液至 **NMA/NMB** (10 $\mu\text{mol/L}$) 的缓冲液中以获得适当浓度的胍, 分别反应 100 min 和 24 h 后, 测量其发射光谱。

1.7 高效液相色谱(HPLC)实验

25 $^{\circ}\text{C}$ 下, 量取 10 μL **NMA** 和 **mA** 的储备液 (3 mmol/L) 分别添加到 3 mL 的 PBS 中, 取 50 μL 样品进行 HPLC 分析。将 **NMA** (10 $\mu\text{mol/L}$) 与 N_2H_4 (500 $\mu\text{mol/L}$) 在 PBS-DMSO 缓冲溶液中 ($V:V=1:9$) 混合 100 min 后, 取 50 μL 样品进行 HPLC 分析。流动相: A 相为水, B 相为乙腈, 检测波长为 420 nm, 色谱柱为 Sino Chrom ODS-BP (4.6 mm $\times$ 50 mm, 5 μm)。梯度洗脱程序为: 0~12 min, 5%~95% B; 12~15 min, 95% B; 15~20 min, 95%~5% B, 流速为 1 mL/min。

1.8 细胞培养及荧光成像

细胞共聚焦成像: 将 L929 细胞转移至培养皿中, 加入含 10% 胎牛血清的 DMEM 培养液, 放入培养箱中 (37 $^{\circ}\text{C}$, 5% CO_2) 培育 24 h, 用 2 mL PBS 清洗 3 次。一组细胞用 2 mL 含 10 $\mu\text{mol/L}$ 探针 **NMA** 的培养液孵育 30 min; 另一组细胞先用 2 mL 含 50 $\mu\text{mol/L}$ 胍的培养液培养 30 min, 用 PBS 清洗 3 次, 再用 2 mL 含 10 $\mu\text{mol/L}$ 探针 **NMA** 的培养液培养 30 min。

溶酶体定位实验: HeLa 细胞先用 2 mL 含 50 $\mu\text{mol/L}$ 胍的培养液培养 30 min, 之后用含 10 $\mu\text{mol/L}$ 探针 **NMA** 的无血清培养液和溶酶体追踪红色染料共同孵育 30 min, PBS 清洗 3 次后加入 1 mL PBS 完成制样。共聚焦显微镜采用 488 nm 激光器激发, 分别收集红色和绿色通道的信号。

2 结果与讨论

2.1 探针 **NMA** 和 **NMB** 对接的光谱响应

首先, 测试了两种探针本身的吸收和发射光谱。由图 2 可知, **NMA** 和 **NMB** 的最大吸收峰分别位于 340 nm 和 403 nm, 相差 63 nm, 可能是因为 **NMB** 的荧光团与受体之间的连接臂更长 (多了一个供电子的亚胺基 “—NH—”), 使得分子的电子推拉作用更强, 导致吸收峰的红移。两个探针的发射光谱也有区别: 因为强吸电子受体基团的存在, 探针 **NMA** 本身几乎没有荧光 (图 3A); 而 **NMB** 由于供电子亚胺基的存在, 在 520 nm 附近具有微弱荧光 (图 3B)。研究了 **NMA** 和 **NMB** 与胍混合体系在不同时间的吸

收和发射光谱。由图2和图3可知, 胍的加入使得 **NMA** 在 340 nm 处的吸收峰强度逐渐下降, 在 440 nm 处出现一个新的吸收峰并且强度不断增大, 同时在 527 nm 处的荧光信号强度随时间的延长而不断增强, 在 100 min 时荧光达到最大值(增强约 500 倍), 此后基本保持不变; 探针 **NMB** 与胍混合体系的吸收峰随着时间的延长不断红移, 在 24 h 后到达平衡, 最大吸收波长从 403 nm 逐渐红移至 434 nm, 同时在 540 nm 处的荧光增强约 5 倍。上述结果表明两个探针均与胍生成了新的化合物。但与 **NMA** 相比, **NMB** 的反应时间更长, 荧光增强倍数也更小, 可能是由于连接臂仲胺的存在, 使得受体基团的电子密度增大, 削弱了其亲电取代反应活性, 导致反应时间延长; 另一方面, **NMB** 与胍反应生成的 4-胍基苯酰亚胺衍生物, 由于胍基的强给电子作用, 其与荧光团之间存在光诱导电子转移(PET)作用, 使得反应产物的荧光较弱。由于 **NMA** 具有更强的荧光响应以及更快的响应速率, 选择 **NMA** 进行后续测试。

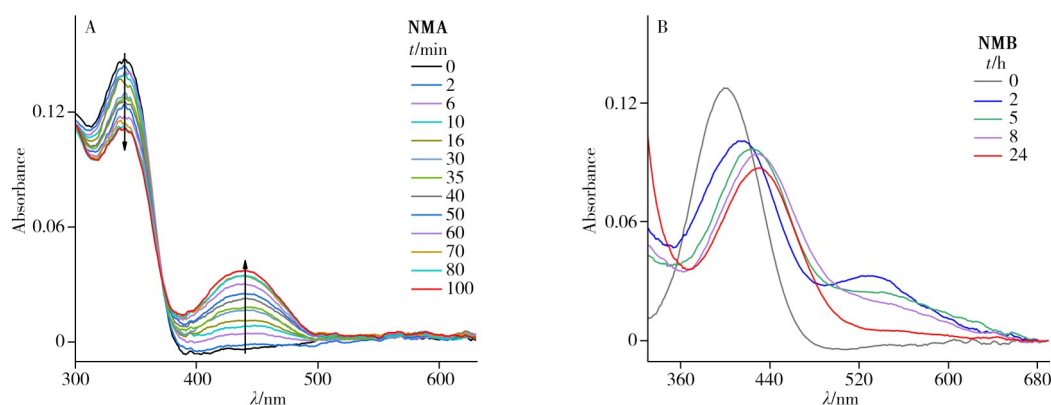


图2 探针与 N_2H_4 混合体系在不同时间的吸收光谱

Fig. 2 Time-dependent absorption spectra of the probe- N_2H_4 mixed systems

PBS-DMSO ($V:V=1:9$), $[\text{NMA}]=[\text{NMB}]=10 \mu\text{mol/L}$, $[\text{N}_2\text{H}_4]=500 \mu\text{mol/L}$

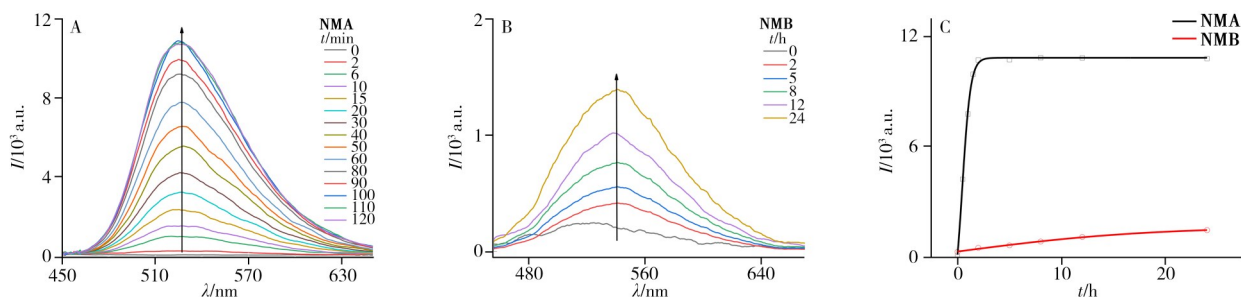


图3 探针与 N_2H_4 混合体系的发射光谱(A~B)及探针荧光强度随时间的变化曲线(C)

Fig. 3 Time-dependent emission spectra of the probe- N_2H_4 mixed systems(A~B), plots of fluorescence intensity as a function of time(C)

PBS-DMSO ($V:V=1:9$), $[\text{NMA}]=[\text{NMB}]=10 \mu\text{mol/L}$, $[\text{N}_2\text{H}_4]=500 \mu\text{mol/L}$; $\lambda_{\text{exc}}=540 \text{ nm}$,

$\lambda_{\text{em}}=420 \text{ nm}$ for **NMA** and 527 nm for **NMB**, respectively

2.2 探针 **NMA** 的选择性和竞争性

为考察探针 **NMA** 对胍的选择性, 测试了其对部分阳离子、阴离子(K^+ 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 SO_3^{2-} 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ac^- 、 NO_3^- 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 Br^- 、 S^{2-})、小分子硫醇以及氨基酸(Hcy、GSH、Cys、Pro、Met、Lys、His、Trp)的荧光响应。由图4可知, 其他分析物的存在对探针的光谱均无明显影响, 且几乎不影响探针与胍的测试, 表明探针 **NMA** 对胍具有较高的选择性和良好的抗干扰能力, 可用于胍的选择性检测。此外, 还测试了探针及其胍解产物在不同 pH 值介质中的发射光谱, 实验结果表明, 在 pH 4.0~10.0 范围内, 其光谱特性基本保持不变。

2.3 探针 **NMA** 对胍的定量检测

鉴于 **NMA** 对胍较高的选择性和良好的抗干扰能力, 测试了不同胍浓度下探针的荧光光谱。结果显示, **NMA** 在 527 nm 处的荧光强度随着胍浓度的增加而增大, 胍浓度在 $5.0 \sim 70 \mu\text{mol/L}$ 范围内与探针的荧光强度之间呈现良好的线性关系, 检出限($3\sigma/k$)为 $1.83 \mu\text{mol/L}$ 。

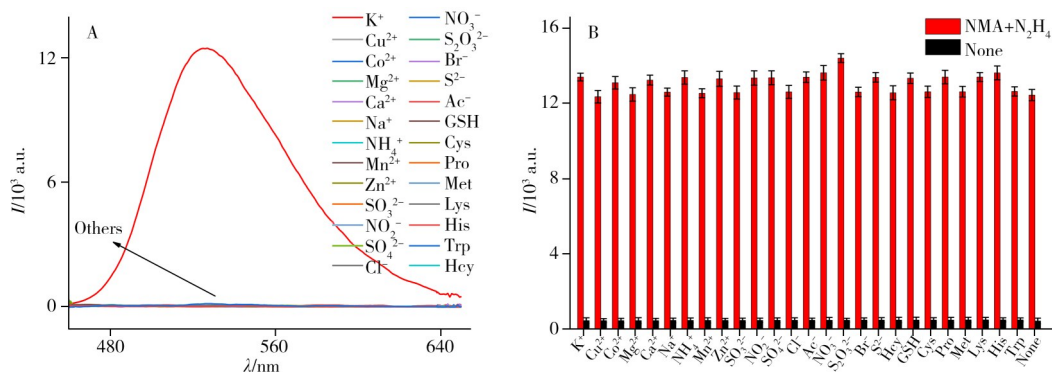


图4 不同分析物对NMA发射光谱的影响(A)及有(红色)无(黑色) N_2H_4 存在时体系的荧光强度(B)

Fig. 4 Effects of analytes on the emission spectra of NMA(A) and the fluorescence intensities in the presence (red) and absence (black) of N_2H_4 (B)

PBS-DMSO(V:V=1:9), $[\text{NMA}]=10 \mu\text{mol/L}$, $[\text{analytes}]=[\text{N}_2\text{H}_4]=500 \mu\text{mol/L}$; $\lambda_{\text{ex}}=420 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{em}}=527 \text{ nm}$

2.4 探针对胍的响应机理

由光谱变化推测探针NMA和胍依据Gabriel反应生成了mA(图5A), 并通过液相色谱验证了反应机理。由图5B可知, 探针NMA与中间体mA的保留时间分别为11.77 min和13.11 min; NMA和 N_2H_4 反应100 min后在13.11 min出现一个峰, 该峰与mA的保留时间相同, 表明NMA与胍反应生成了mA。由密度泛函理论(DFT)计算结果(图5C)可知, 探针NMA在HOMO轨道上的 π 电子主要分布在吗啉基团上, 而LUMO轨道上的 π 电子主要分布在邻苯二甲酰基上, 表明存在从吗啉到胍受体之间的光诱导电子转移, 因此探针本身几乎没有荧光。对于探针与胍的反应产物mA, 其在HOMO轨道上的 π 电子主要分布在吗啉基团上, 而LUMO轨道上的 π 电子主要分布在荧光团上, 表明电子转移过程受到部分抑制, 因此反应产物具有较强的荧光, 即对胍显示“turn-on”响应。

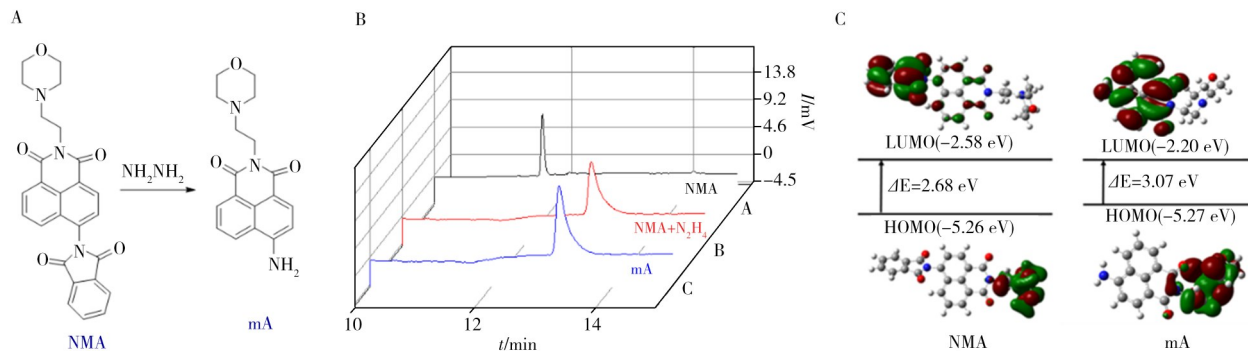


图5 探针NMA对 N_2H_4 的响应机理(A), 探针NMA与 N_2H_4 反应的HPLC图(B)以及NMA及其与 N_2H_4 反应产物mA的分子前线轨道(C)

Fig. 5 The response mechanism of NMA to N_2H_4 (A), HPLC spectra of the reaction between NMA and N_2H_4 (B), molecular frontline orbits of NMA and mA(C)

2.5 细胞中胍的荧光成像

采用MTT法测试了NMA对L929和HeLa细胞的毒性, 实验结果显示在探针浓度小于 $20 \mu\text{mol/L}$ 时, 细胞的成活率大于80%。鉴于探针NMA较低的细胞毒性, 评估了其对接活细胞中胍荧光成像的可能。L929细胞在用NMA孵育后, 未观察到明显的荧光信号(图6A); 但当用胍预处理后, 再用NMA孵育, 可以观察到明显的绿色荧光(图6B), 表明NMA可以用于对细胞中胍的荧光成像。最后, 用溶酶体定位染料与NMA对HeLa细胞进行共定位研究。由图6C可知, HeLa细胞内呈现较强NMA的绿色荧光以及溶酶体定位剂的红色荧光, 红色和绿色通道的皮尔森共定位系数为0.91, 表明NMA可以定位于溶酶体, 对研究溶酶体内胍的生理功能具有积极意义。

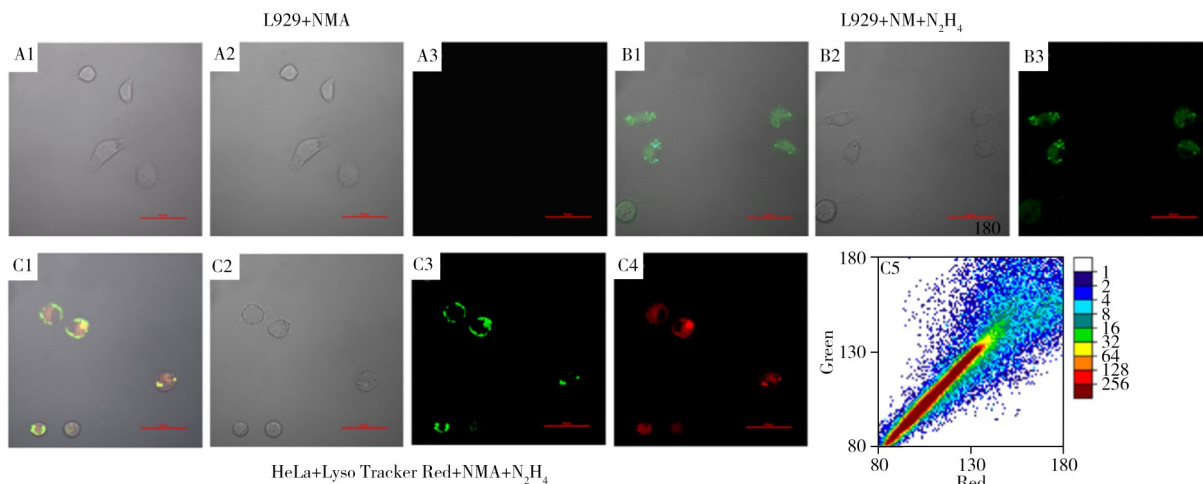


图6 探针 **NMA** 在 L929 及 HeLa 细胞的共聚焦荧光成像图

Fig. 6 Fluorescence imagings of L929 and HeLa cells

A. incubated with 10 $\mu\text{mol/L}$ **NMA** for 30 min, B. preincubated with 50 $\mu\text{mol/L}$ N_2H_4 for 30 min, then incubated with 10 $\mu\text{mol/L}$ **NMA** for 30 min, C. stained with **NMA** (10 $\mu\text{mol/L}$) and Lyso Tracker Red for 30 min; 1. merged filed, 2. bright field, 3. green field, 4. red field, 5. colocalization figures of **NMA** and Lyso Tracker Red, excited with a 488 nm laser

3 结 论

以 1, 8-萘酰亚胺为荧光团、邻苯二甲酰胺为识别基团, 设计合成了两种“turn-on”型荧光探针 **NMA** 和 **NMB** 用于对胍的检测。实验结果表明, 荧光团与受体之间供电子基团的存在显著降低了探针 对胍的光谱响应; 不含间隔臂的 **NMA** 对胍具有较强的光谱响应, 胍的加入导致其吸收光谱红移 100 nm, 在 527 nm 处的荧光信号最大增强约 500 倍; 在 5.0~70 $\mu\text{mol/L}$ 范围内, 探针 **NMA** 的荧光强度和胍 浓度之间具有良好的线性关系, 检出限为 1.83 $\mu\text{mol/L}$ 。此外, **NMA** 亦可用于溶酶体中外源性胍的荧 光成像。

参考文献:

- [1] Roy B, Bandyopadhyay S. *Anal. Methods*, **2018**, 10(10): 1117–1139.
- [2] Chen Y, Zhao C, Liu X, Zhang Q, Jiang Y, Shen J. *Analyst*, **2023**, 148(4): 856–862.
- [3] Ma J, Kong X, Zhao M, Jiao Z, Zhang X, Xie H, Zhang Z. *Sci. Total Environ.*, **2024**, 944: 173810.
- [4] Lan J, Guo J, Jiang X, Chen Y, Hu Z, Que Y, Li H, Gu J, Ho R J Y, Zeng R, Ding Y, Zhang T. *Anal. Chim. Acta*, **2020**, 1094: 70–79.
- [5] Han J, Yue X, Wang J, Zhang Y, Wang B, Song X. *Chin. Chem. Lett.*, **2020**, 31(6): 1508–1510.
- [6] Jiang Y, Chen Y, Yang Q, Zhu S, Shen J. *J. Mol. Struct.*, **2022**, 1256: 132509.
- [7] Sun X, Jiang X, Wang Z, Li Y, Ren J, Zhong K, Li X, Tang L, Li J. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 479: 135701.
- [8] Qin X, Lin M, Lai Z, Mo J, Wen S, Yang X. *Dyes Pigm.*, **2024**, 231: 112378.
- [9] Shang Z, Tian S, Wang Y, Zhang C, Meng Q, Zhang R, Zhang Z. *Sens. Actuators B*, **2024**, 398: 134725.
- [10] Huang J, Zhou Y, Wang W, Zhu J, Li X, Fang M, Wu Z, Zhu W, Li C. *Spectrochim. Acta A*, **2023**, 286: 122011.
- [11] Xing M, Han Y, Zhu Y, Sun Y, Shan Y, Wang K N, Liu Q, Dong B, Cao D, Lin W. *Anal. Chem.*, **2022**, 94 (37): 12836–12844.
- [12] Fu D, Wang X, Liu B. *Spectrochim. Acta A*, **2024**, 309: 123808.
- [13] Zhu D, Rajalakshmi K, Wang R, Wu H, Kannan P, Song J W, Lee H J, Muthusamy S. *Dyes Pigm.*, **2023**, 216: 111370.
- [14] Rajalakshmi K, Muthusamy S, Lee H J, Kannan P, Zhu D, Song J W, Nam Y S, Heo D N, Kwon I K, Luo Z, Xu Y. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 465: 133036.
- [15] Christofi M, Markopoulou C K, Tzanavaras P D, Zacharis C K. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, **2020**, 187: 113354.
- [16] Oh J A, Park J H, Shin H S. *Anal. Chim. Acta*, **2013**, 769: 79–83.
- [17] Popov M S, Ul'yanovskii N V, Kosyakov D S. *Microchem. J.*, **2024**, 197: 109833.
- [18] Annalakshmi M, Balasubramanian P, Chen S M, Chen T W. *Sens. Actuators B*, **2019**, 296: 126620.