吲哚啉-香豆素 pH 荧光探针的制备及其性能研究

曾碧涛[1],赵志刚[2],石治川[2*],何爱江[1]
(1.宜宾职业技术学院,四川 宜宾 644003; 2.西南民族大学化学与环境学院,四川 成都 610225)

摘要:强酸性环境(pH<4)的实时监测在工业安全与生物医学领域需求迫切,但现有荧光探针多适用于弱酸至碱性区间,极端酸性响应的探针相对稀缺。为此,合成了一种基于吲哚啉-香豆素的光诱导电子转移(PET)型荧光探针 IPQ。该探针在中性和碱性条件下因吲哚啉氮原子引发 PET 效应而荧光猝灭;当处于强酸性环境时,氮原子质子化阻断 PET 过程,实现荧光显著开启,机理经 ^{1}HNMR 验证。测得探针 pK_a 为 1.66±0.023,在 pH 1.0~2.5 范围内荧光强度显著增强,对多种金属离子、阴离子及活性氧/氮物种均表现出优异选择性,响应过程高度可逆。将探针负载于滤纸条后,可实现对盐酸和三氟乙酸蒸气裸眼快速识别检测。

关键词:pH 响应;荧光探针;强酸性检测;吲哚啉;香豆素;光诱导电子转移
中图分类号:O657.3 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0220-05
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.036

Preparation and performance of an indoline-coumarin pH fluorescent probe

ZENG Bi-tao[1], *ZHAO Zhi-gang*[2], *SHI Zhi-chuan*[2*], *HE Ai-jiang*[1]
(1.Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003, China;
2.College of Chemistry & Environment, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China)

Abstract: Real-time monitoring of strongly acidic environments (pH<4) is critically needed in both industrial safety and biomedical fields. However, most currently available fluorescent probes are designed for weakly acidic to alkaline conditions, and probes capable of responding under extreme acidity remain scarce. In this work, a photoinduced electron transfer (PET)-based fluorescent probe IPQ, derived from indoline-coumarin, was synthesized. Under neutral and alkaline conditions, the probe undergoes fluorescence quenching due to the PET effect induced by the indoline nitrogen atom, whereas under strongly acidic conditions, protonation of this nitrogen atom blocks the PET process, leading to a pronounced fluorescence turn-on. The sensing mechanism was unequivocally confirmed by ^{1}HNMR analyses. The probe exhibits a pK_a value of 1.66±0.023, and the fluorescence intensity is significantly enhanced within the pH range of 1.0-2.5. It also demonstrates exceptional selectivity towards various metal ions, anions, and reactive oxygen/nitrogen species, coupled with a highly reversible response. When loaded onto filter paper strips, the probe enables the rapid, naked-eye identification and detection of HCl and trifluoroacetic acid vapors.

Key words: pH response; fluorescent probe; strong acid detection; indoline; coumarin; photoinduced energy transfer

pH 的精准检测在生物学、工业及环境领域具有至关重要的意义[1-2]。在生物体系中,pH 通过调控酶活性深刻影响诸多生命过程:哺乳动物细胞内的线粒体、溶酶体、内质网等细胞器各自维持特定的弱酸性至弱碱性环境(pH 4~8),其精细的动态平衡直接决定细胞的正常功能与代谢;而人体胃液则依靠极低的 pH(1.5~3.5)激活消化酶群,保证食物的正常消化与营养吸收[3-4]。越来越多的研究表明,细胞内或组织局部的 pH 失衡与癌症、神经退行性疾病等多种人类重大疾病的发生发展显著相关[5]。在工业领域,盐酸(HCl)、氢氟酸(HF)等强酸凭借独特的化学反应性,被大量应用于玻璃蚀刻、金属表面清洗及电子元器件制造等关键工艺,然而这些强酸的意外泄漏会迅速造成严重的化学灼伤和全身性中毒,对操作人员及周边环境构成极大威胁[6-7]。因此,建立对强酸液体及其蒸气的实时监测与快速预警系统,是保障工业安全和环境健康的迫切需求。

目前,玻璃电极仍是 pH 测量的常用手段,但在实际分析中存在明显局限:强酸、浓碱及稀氢氟酸等介质会造成化学腐蚀[8-9];同时玻璃电极质脆易碎,操作要求较高。近年来,荧光探针技术已成为 pH 检测的重要替代方案,该类探针利用荧光信号变化实现高灵敏度、快速响应检测[10-12]。然而,现有荧光探针大多适用于弱酸性至碱性环境(pH 4~11)[13-16],能够特异性检测强酸性条件(pH<4)的探针仍相对匮乏[17-19]。这一缺口极大地限制了荧光传感技术在强酸相关工业预警和某些极端生物微环境研究中的应用。因此,开发可在强酸性条件下工作的荧光探针具有重要意义。

香豆素衍生物因具有荧光量子产率高、稳定性

收稿日期:2026-06-22;**修回日期**:2026-08-31
基金项目:宜宾市科技计划项目(2024CG005);青藏高原污染控制化学与环境功能材料重点实验室开放课题资助(26KFKT-011)
作者简介:曾碧涛(1982-),男,硕士,副教授,研究方向为有机合成,zbt917@163.com;石治川(1985-),男,硕士,高级实验师,研究方向为有机小分子合成,通讯联系人,szc169@swun.edu.cn。

好、易于化学修饰、合成简便以及生物相容性优良等优点,常被广泛用作荧光探针的荧光团骨架[20]。本研究将吲哚啉基团引入香豆素荧光团,构建了一种新型酸性 pH 敏感型荧光开启探针 IPQ。在中性和碱性溶液中,探针 IPQ 的荧光信号微弱,这归因于吲哚啉氮原子向香豆素荧光团发生光诱导电子转移(PET)。而在酸性条件下,吲哚啉基团被质子化,PET 过程受到抑制,荧光显著增强。因此,IPQ 能够以荧光"开启"模式响应 pH 变化。通过紫外-可见吸收光谱、荧光光谱和 ^{1}HNMR,系统性地研究 IPQ 对 pH 的响应特性及传感机制。

1　实验部分

1.1　实验仪器

AVANCE NEO 600 MHz 核磁共振波谱仪,德国布鲁克公司;Thermo Scientific LTQ Orbitrap 高分辨质谱仪,美国赛默飞公司;UV-6100 型双光束紫外-可见光分光光度计,上海美普达公司;Dual-FL 型荧光光谱仪,日本 HORIBA 公司;WP-UPT-10 型超纯水机,四川沃特尔水处理设备有限公司;PE28 型 pH 计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2　实验试剂

8-羟基久洛里定、三氯氧磷、1,2,3,3-四甲基-3H-吲哚碘化物,分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;*N*,*N*-二甲基甲酰胺(DMF)、无水乙醇(EtOH)、石油醚(PE)、乙酸乙酯、二氯甲烷、二甲基亚砜(DMSO),分析纯,成都金山化学试剂有限公司;哌啶、硼氢化钠、浓盐酸(质量分数为 36%),分析纯,成都科隆化学试剂有限公司。不同金属阳离子、阴离子溶液采用相应的醋酸盐、钠盐或 TBA(四丁基铵)盐,分析纯,成都科隆化学试剂有限公司。

2　试验方法

2.1　探针 IPQ 的合成

中间体Ⅱ以 8-羟基久洛里定(Ⅰ)为起始原料,根据已报道文献[21]制备所得。向圆底烧瓶中依次加入中间体Ⅱ(270 mg,1 mmol)和 1,2,3,3-四甲基-3H-吲哚碘化物(301 mg,1 mmol),用无水乙醇(50 mL)溶解后,加热至 80℃回流 12 h。待反应液冷却后,减压蒸馏除去溶剂,得到粗产物(图 1)。将粗产物用乙醇洗涤 3 次,经真空干燥后,得到中间体Ⅲ(390 mg),收率为 91.8%。^{1}HNMR(600 MHz, $CDCl_3$),δ:9.85(s,1H),8.58(d,J = 15.6 Hz,1H),7.92(d,J = 15.6 Hz,1H),7.69(s,1H),7.54~7.42(m,3H),7.37(d,J = 7.9 Hz,1H),4.24(s,3H),3.44(t,J = 5.8 Hz,4H),2.89(t,J = 6.5 Hz,2H),2.81(t,J = 6.3 Hz,2H),2.00(dq,J = 12.1,6.1 Hz,4H),1.81(s,6H)。

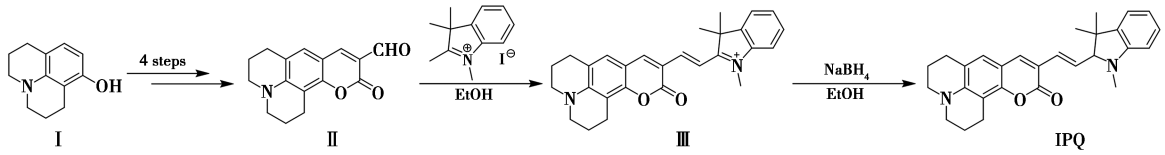


图 1　探针 IPQ 的合成路线

向圆底烧瓶中加入中间体Ⅲ(212 mg,0.5 mmol)和无水乙醇(2 mL),室温下搅拌 5 min 后,将混合液降温至 0℃,分批加入硼氢化钠(23 mg,0.6 mmol)。待反应完全后,将反应液过滤,得到固体粗产物(图 1)。粗产物用二氯甲烷溶解后,用少量饱和氯化钠溶液洗涤 3 次,减压旋干,经柱层析纯化(洗脱剂:石油醚/二氯甲烷 = 5∶1),得到黄色探针 IPQ(168 mg),收率为 78.9%。^{1}HNMR(600 MHz, $CDCl_3$),δ:7.58(s,1H),7.12(t,J = 7.6 Hz,1H),7.04(d,J = 7.2 Hz,1H),6.87(s,1H),6.76(t,J = 7.4 Hz,1H),6.69(d,J = 15.9 Hz,1H),6.55(d,J = 7.8 Hz,1H),6.49(dd,J = 15.9,8.9 Hz,1H),3.42(d,J = 8.9 Hz,1H),3.29~3.26(m,4H),2.90(t,J = 6.5 Hz,2H),2.77(t,J = 6.4 Hz,2H),2.70(s,3H),1.98(tq,J = 11.2,5.9,5.4 Hz,4H),1.33(s,3H),1.12(s,3H);^{13}CNMR(151 MHz, $CDCl_3$),δ:161.79,150.92,145.81,139.25,138.25,128.56,128.27,127.51,125.01,121.65,118.66,118.47,116.43,108.79,107.91,106.40,81.13,50.07,49.70,44.54,34.48,29.69,27.52,25.80,24.30,21.53,20.62,20.33;HRMS(ESI),$C_{28}H_{31}N_2O_2^+$[M+H]$^+$理论值 427.238 0,found 测试值 427.238 3。

2.2　溶液的配制及探针的光学响应测定

溶液的配制:探针 IPQ 用 DMSO 完全溶解后,用 DMSO/乙醇(V/V = 1/1)混合溶液稀释,配制成浓度为 1 mmol/L 的储备液。不同金属阳离子、阴离子溶液采用相应的醋酸盐、钠盐或 TBA(四丁基铵)盐,先用去离子水完全溶解,然后以 HEPES 缓冲溶

液(50 mmol/L,pH 7.4)稀释成浓度为 1 mmol/L 的储备液。过氧化氢(H_2O_2)、叔丁基过氧化氢(HOO*t*-Bu)、次氯酸钠(NaOCl)分别取自 30%、70%、10%水溶液,经 HEPES 缓冲溶液(50 mmol/L,pH 7.4)稀释成浓度为 1 mmol/L 的储备液。

pH 缓冲溶液的配制:使用氯化钾溶液(50 mmol/L,用于 pH 1~2 缓冲液)、邻苯二甲酸氢钾溶液(50 mmol/L,用于 pH 3~5 缓冲液)、磷酸二氢钾溶液(50 mmol/L,用于 pH 6~8 缓冲液)、四硼酸钠溶液(50 mmol/L,用于 pH 9~10 缓冲液)及碳酸氢钠溶液(50 mmol/L,用于 pH 11 缓冲液),通过添加 NaOH(0.1 mol/L)或 HCl(0.1 mol/L)溶液调节 pH。

光学响应测定:取 10 μL 上述探针 IPQ 储备液(1 mmol/L)置于 10 mL 比色管中,以乙醇/不同 pH 缓冲溶液(50 mmol/L,*V*/*V*=1/9)或乙醇/HEPES 缓冲溶液(50 mmol/L,*V*/*V*=1/9,pH 7.4)的混合溶液稀释至 10 mL,待充分摇匀后,分别测定其相应的紫外-可见吸收光谱与荧光发射光谱。荧光发射光谱测定条件:激发波长 422 nm,狭缝宽 2 nm,扫描范围 250~800 nm。

不同 pH 实验测定:将 IPQ(1 μmol/L)加入乙醇/不同 pH 缓冲液(50 mmol/L,*V*/*V*=1/9)体系中,记录不同 pH 下的荧光光谱(λ_{ex}=422 nm)。

选择性实验:将 IPQ(1 μmol/L)分别加入乙醇/pH 缓冲溶液(50 mmol/L,*V*/*V*=1/9,pH 1.0)体系以及含不同干扰物质(10 μmol/L)的乙醇/HEPES 缓冲溶液(50 mmol/L,*V*/*V*=1/9,pH 7.4)体系中,记录荧光光谱(λ_{ex}=422 nm)。

试纸实验:将滤纸条在 IPQ 的二氯甲烷溶液(5 mmol/L)中浸泡 5 min,取出后常温晾干,随后分别暴露于不同蒸气中 1 min。

3 结果与讨论

3.1 探针 IPQ 对不同 pH 溶液的光学响应

为考察 IPQ 对溶液 pH 的光学响应,测定了其在不同 pH 条件下的紫外-可见吸收光谱和荧光发射光谱(λ_{ex}=422 nm)。紫外-可见吸收光谱(图 2)显示,IPQ 在 422 nm 处有一明显吸收峰,随 pH 从 11.0 降至 2.0,该峰略微增强。在强酸性区域(pH 2.0~1.0),422 nm 处吸收峰红移至 443 nm,599 nm 处出现新的吸收峰,同时溶液由淡黄色变为绿色。荧光光谱(图 3)表明,随 pH 从 11.0 降至 1.0,510 nm 处的荧光强度显著增大。在 pH 11.0~3.0 范围内,荧光极弱;而当 pH 从 3.0 降至 1.0 时,荧光强度增加超过 10 倍(图 3 插图)。在 365 nm 紫外灯照射下,IPQ 在 pH 1.0 的缓冲溶液中发射出明亮的绿色荧光。上述光谱变化可归因于 IPQ 在强酸性条件下吲哚啉基团质子化抑制了 PET 过程,使荧光恢复。

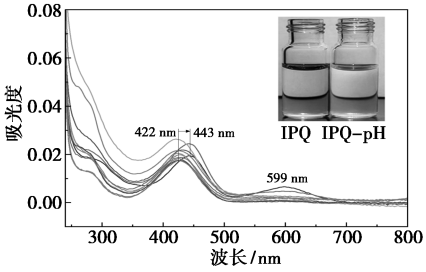


图 2 探针 IPQ 在不同 pH 下的紫外-可见吸收光谱

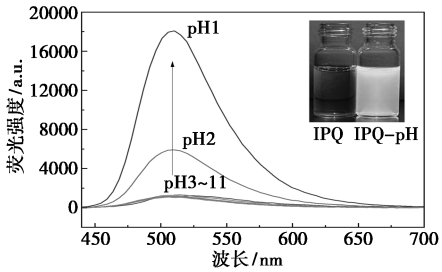


图 3 探针 IPQ 在不同 pH 下的荧光发射光谱

3.2 探针 IPQ 的荧光滴定实验及 pK_a 值

为探究强酸性范围(pH 3.0~1.0)内探针 IPQ 的荧光响应,进行了荧光滴定实验(图 4)。当 pH 从 3.0 逐步酸化至 1.0(pH=3.0、2.8、2.6、…、1.2、1.0),IPQ 在 510 nm 处的荧光强度逐渐增强。当 pH>2.8 时,荧光极弱且几乎不变。基于 Henderson-Hasselbalch 方程($\log[(I_{max}-I)/(I-I_{min})]=pK_a-pH$),绘制 $\log[(I_{max}-I)/(I-I_{min})]$ 与 pH 的关系(图 5),求得 IPQ 的 pK_a 值为 1.66±0.023,表明该探针适用于 pH 1.0~2.5 范围的测量。因此,IPQ 在 pH<2.5 时呈现荧光开启特性,可用于 HCl、HF 等剧毒强酸溶液的监测。

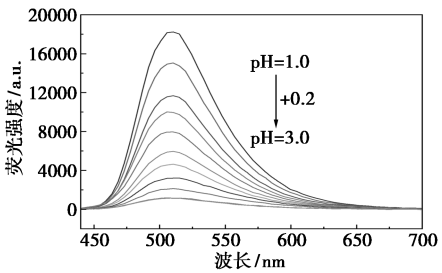


图 4 探针 IPQ 在 pH 1.0~3.0 范围内的荧光发射光谱

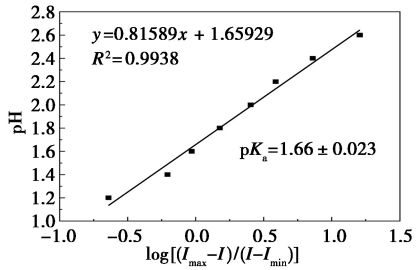
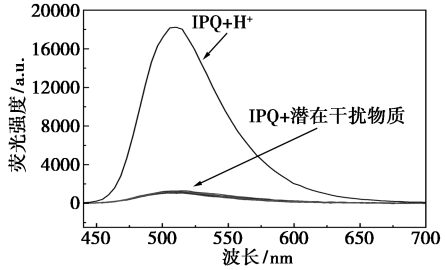


图 5　$\log[(I_{max}-I)/(I-I_{min})]$ 与 pH 的关系图

3.3　探针 IPQ 对酸性环境(H^+)的选择性荧光响应

为验证 IPQ 对酸性环境(H^+)的选择性荧光响应,系统考察了多种潜在干扰物质的影响。如图 6 所示,在 pH 1.0 条件下,IPQ 在 510 nm 处荧光显著增强;而在 pH 7.4 溶液中,无论存在 HSO_3^-、OAc^-、OH^-、ClO_4^-、CN^- 等阴离子,Al^{3+}、Ca^{2+}、Cd^{2+}、Co^{2+}、Hg^{2+}、Mg^{2+}、Ba^{2+}、Ni^{2+}、Pb^{2+}、Zn^{2+}、Cu^{2+}、Fe^{2+}、Fe^{3+} 等金属离子,还是 H_2O_2、HOO*t*-Bu、ClO^-、GSH、Cys、Hcy 等氧化还原活性物种,荧光强度均未发生明显变化。上述结果表明,IPQ 对 H^+ 具有高选择性荧光开启响应,可在复杂背景下监测酸性环境,而不受其他干扰物的影响。

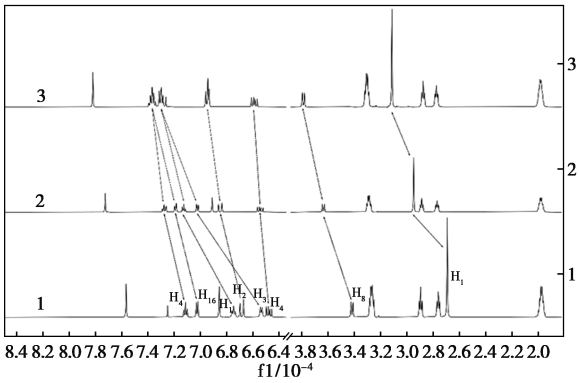


潜在干扰物质:HSO_3^-、OAc^-、OH^-、ClO_4^-、CN^-等阴离子,Al^{3+}、Ca^{2+}、Cd^{2+}、Co^{2+}、Hg^{2+}、Mg^{2+}、Ba^{2+}、Ni^{2+}、Pb^{2+}、Zn^{2+}、Cu^{2+}、Fe^{2+}、Fe^{3+}等金属离子,H_2O_2、HOO*t*-Bu、ClO^-、GSH、Cys、Hcy 等氧化还原活性物种

图 6　探针 IPQ 对不同物种的选择性

3.4　探针 IPQ 的 pH 依赖性荧光响应机制

为阐明 IPQ 的 pH 依赖性荧光开启机制,以三氟乙酸(TFA)为质子源,在 $CDCl_3$ 中进行了 ^{1}HNMR 滴定。随着 TFA 加入,香豆素骨架和吲哚啉基团的质子信号均不同程度向低场位移(图 7)。其中,吲哚啉的 H_1、H_8 及芳环质子(H_2、H_3、H_4、H_5)的低场位移尤为显著,烯烃质子 H_9 和 H_{10} 也呈向低场移动趋势。这归因于 TFA 质子化吲哚啉氮原子后,导致整个共轭体系电子云密度降低,质子去屏蔽效应增强。上述结果与图 8 描述的吲哚啉质子化抑制 PET 的机制完全吻合。在中性和碱性条件下,吲哚啉氮原子通过 PET 猝灭香豆素荧光,使 IPQ 荧光微弱;酸性条件下,氮原子质子化阻断 PET 过程,荧光恢复。因此,IPQ 以荧光开启方式对 pH 做出响应。



1—IPQ;2—IPQ+1.0 eq TFA;3—IPQ+excess TFA

图 7　探针 IPQ 与不同当量 TFA 共存时的核磁氢谱

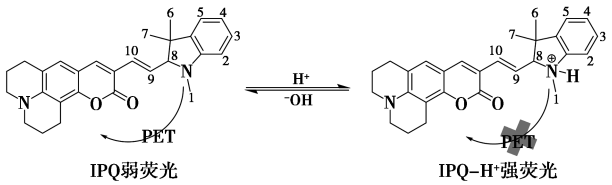


图 8　探针 IPQ 的 pH 依赖性荧光开启机制

3.5　探针 IPQ 荧光“关闭-开启”可逆性试验

为考察 IPQ 对 pH 响应的可逆性,进行了酸/碱循环测试。如图 9 所示,将溶液在酸性(pH = 1.0)和碱性(pH = 11.0)条件之间交替切换 3 个循环,IPQ 的荧光呈现可逆的“关闭-开启”变化。该结果与图 7 提出的质子化调控 PET 机制一致,表明 IPQ 具备良好的可逆性,可重复用于强酸性环境 pH 检测。

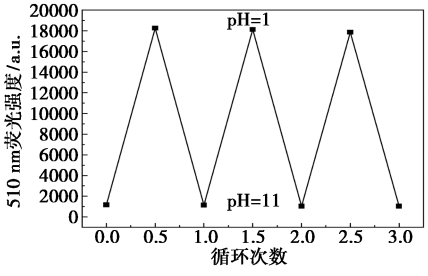


图 9　探针 IPQ 在酸性(pH 1.0)和碱性(pH 11.0)条件下的可逆性

3.6　探针 IPQ 对酸性蒸气的试纸检测应用

为进一步验证 IPQ 的实际检测能力,测试了其对酸性蒸气(如 HCl、TFA)及常见环境蒸气(氨水、甲胺、水合肼、乙醛、H_2O_2 等)的响应。如图 10 所示,暴露于 HCl 和 TFA 蒸气后,滤纸条在 365 nm 紫外灯下呈现强烈的绿色荧光;而 HNO_3、H_2SO_4、

AcOH 和甲酸等酸性蒸气因室温蒸气压较低,有效浓度不足,仅引起微弱甚至无荧光变化。暴露于氨水、甲胺、水合肼、乙醛和 H_2O_2 等非酸性蒸气时,未观察到明显荧光增强。此外,负载 IPQ 的滤纸条在酸、碱交替下同样表现出可逆的荧光“关闭-开启”特性(图 11)。这些结果证实,IPQ 基于 pH 依赖的 PET 效应,可在溶液和固态基底上实现对酸性物质的高选择性荧光检测。

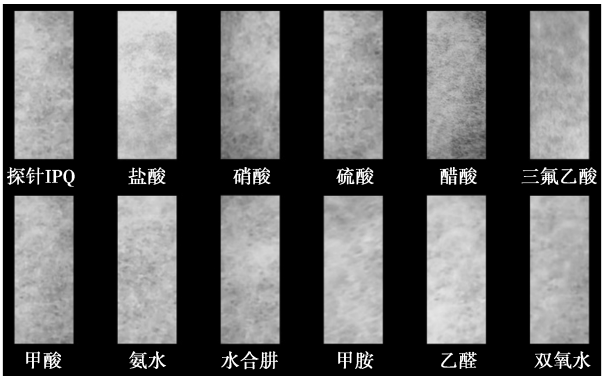


图 10 负载探针 IPQ 的滤纸条在不同蒸气中暴露 1 min 后的荧光响应

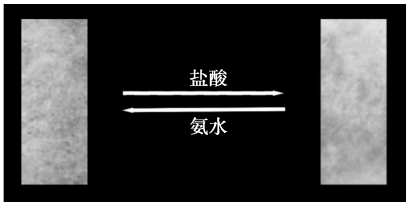


图 11 探针 IPQ 滤纸条的可逆性荧光转变

4 结论

本研究成功构建了基于香豆素-吲哚啉结构的荧光开启型探针 IPQ,旨在解决强酸性环境(pH<4)下高选择性、可逆荧光传感的难题。

(1)^{1}HNMR 滴定明确揭示了吲哚啉氮原子在强酸条件下质子化,有效阻断 PET 过程,从而触发显著荧光增强。

(2)探针具有极低的 pK_a 值(1.66±0.023),在 pH 1.0~2.5 区间内荧光强度提升超过数十倍,且对常见金属离子、阴离子及活性氧/氮物种均无明显干扰,展现出优异的选择性和完全可逆的响应行为。

(3)将 IPQ 固载于滤纸后,成功构建了无需仪器的可视化传感器,可在数秒内裸眼识别 HCl 与 TFA 蒸气,并在酸/碱蒸气交替暴露下实现多次可逆颜色切换。

本文中基于吲哚啉-香豆素结构的荧光探针在强酸蒸气检测中展现出良好的实用性,具有潜在的应用前景,并可为极端酸性条件下荧光传感材料的设计与开发提供参考。

参考文献

[1] Kurkdjian A, Guern J. Intracellular pH: Measurement and importance in cell activity[J]. Annual Review of Plant Biology, 1989, 40(1): 271-303.
[2] Šimek M, Cooper J E. The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years[J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(3): 345-354.
[3] Casey J R, Grinstein S, Orlowski J. Sensors and regulators of intracellular pH[J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2010, 11(1): 50-61.
[4] Waldum H L, Hauso Ø, Fossmark R. The regulation of gastric acid secretion-clinical perspectives[J]. Acta Physiologica, 2014, 210(2): 239-256.
[5] Weisz O A. Organelle acidification and disease[J]. Traffic, 2003, 4(2): 57-64.
[6] Pirson J, Toussaint P, Segers N. An unusual cause of burn injury: Skin exposure to monochloroacetic acid[J]. Journal of Burn Care & Rehabilitation, 2003, 24(6): 407-409.
[7] Wu M L, Yang C C, Ger J, *et al*. Acute hydrofluoric acid exposure reported to Taiwan poison control center, 1991—2010[J]. Human & Experimental Toxicology, 2014, 33(5): 449-454.
[8] Ryan M F. Unreliable results[J]. Science, 1969, 165(3896): 851.
[9] Meinrath G, Spitzer P. Uncertainties in determination of pH[J]. Microchimica Acta, 2000, 135(3): 155-168.
[10] Yin J, Ying H, Y, Yoon J. Fluorescent probes and bioimaging: Alkali metals, alkaline earth metals and pH[J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44(14): 4619-4644.
[11] Lee M H, Park N, Yi C, *et al*. Mitochondria-immobilized pH-sensitive off-on fluorescent probe[J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(40): 14136-14142.
[12] Shi B J, Gao Y L, Liu C X, *et al*. A ratiometric fluorescent sensor for pH fluctuation and its application in living cells with low dark toxicity[J]. Dyes and Pigments, 2017, 136(1): 522-528.
[13] Tian M G, Liu C, Dong B L, *et al*. A dual-site controlled ratiometric probe revealing the simultaneous down-regulation of pH in lysosomes and cytoplasm during autophagy[J]. Chemical Communications, 2019, 55(70): 10440-10443.
[14] Liu X J, Wang L L, Bing T, *et al*. A mitochondria-targeted ratiometric fluorescent pH probe[J]. ACS Applied Bio Materials, 2019, 2(3): 1368-1375.
[15] Guo L X, Zhang X Y, Wen D N, *et al*. A novel two-channel ratio fluorescent probe for monitoring intracellular pH fluctuations[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2022, 360(1): 131655-131656.
[16] Shu W, Yu J, Li Z H, *et al*. A mitochondrial suitable ratiometric fluorescent probe for tracking pH change during mitophagy[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2022, 369(1): 132323-132329.
[17] Lee M H. Bis(naphthalimide-piperazine)-based off-on fluorescent probe for acids[J]. Journal of Fluorescence, 2016, 26(1): 807-811.
[18] Xu Y, Jiang Z, Xiao Y, *et al*. A new fluorescent pH probe for extremely acidic conditions[J]. Analytica Chimica Acta, 2014, 820(1): 146-151.
[19] Lee J J, Lee M H. Turn-on fluorescent detection of strong acids based on a naphthalimide-indoline hybrid[J]. Tetrahedron Letters, 2017, 58(32): 3178-3182.
[20] Cao D X, Liu Z Q, Verwilst P, *et al*. Coumarin-based small-molecule fluorescent chemosensors[J]. Chemical Reviews, 2019, 119(18): 10403-10519.
[21] Hou J T, Yang J, Li K, *et al*. A highly selective water-soluble optical probe for endogenous peroxynitrite[J]. Chemical Communications, 2014, 50(69): 9947-9950.■