

一种基于香豆素氟离子荧光探针的合成、表征及性能测试 ——“科研反哺教学”在有机化学综合实验教学中的探索与实践

王本花, 姚朝怡, 李一鸣, 刘清, 蓝敏焕, 喻桂朋, 罗一鸣, 宋相志*

中南大学化学化工学院, 长沙 410083

摘要: 基于科研实验, 深入融合有机化学基本理论和实验技术, 开发了一项研究型有机化学综合实验。该实验以4-(二乙氨基)水杨醛为原料, 通过亲核取代和Knoevenagel缩合反应, 合成了一种基于香豆素荧光团的氟离子荧光探针。利用柱层析纯化产物, 采用核磁共振技术对产物进行结构表征, 最终使用紫外-可见光谱和荧光光谱分析了该探针对于氟离子的检测性能。通过本实验, 学生不仅加深了对有机化学反应基本原理的学习、牢固掌握了有机化学基本实验操作, 而且深入了解有机荧光染料在分子检测和识别中的应用, 实现了理论知识与实际应用的有机融合。本实验的“科研反哺教学”模式, 有效地将科研创新与教学实践相融合, 极大激发了学生学习理论知识的积极性和参与科研实践的热情, 培养了学生们的科研素养和创新能力, 实验教学效果显著。

关键词: 科研反哺教学; 香豆素荧光探针; 氟离子; 有机化学

中图分类号: G64; O6

Synthesis, Characterization, and Performance Evaluation of a Coumarin-based Fluorescent Probe for Fluoride Ions: An Exploration of “Research Feedback Teaching” in Organic Chemistry Comprehensive Experiment

Benhua Wang, Chaoyi Yao, Yiming Li, Qing Liu, Minhuan Lan, Guipeng Yu, Yiming Luo, Xiangzhi Song*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China.

Abstract: This study describes a research-oriented organic chemistry experiment that deeply integrates fundamental theories and experimental techniques of organic chemistry. Utilizing 4-(diethylamino)salicylaldehyde as the starting material, a coumarin-based fluorescent probe for fluoride ions was synthesized through nucleophilic substitution and Knoevenagel condensation reactions. The product was purified using column chromatography and characterized via nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy. The probe's performance in detecting fluoride ions was evaluated using UV-Vis and fluorescence spectroscopy. This experiment not only deepens students' comprehension of the fundamental principles of organic reactions and solidifies their basic experimental skills but also enhances their understanding of the application of organic fluorescent dyes in molecular detection. It effectively merges theoretical knowledge with practical application. The “research feedback teaching” model successfully integrates scientific innovation with educational practice, significantly motivating students to engage with theoretical concepts and participate in scientific research, thereby cultivating their scientific literacy and innovative capabilities. The outcomes of this experimental teaching approach have been outstanding.

收稿: 2024-08-15; 录用: 2024-09-25; 网络发表: 2024-12-18

*通讯作者, Email: xzsong@csu.edu.cn

基金资助: 湖南省教育厅一般项目(2023jy134)

Key Words: Research feedback teaching; Coumarin-based fluorescent probe; Fluoride ion; Organic chemistry

教学和科研是高校的两大核心职能，相辅相成。教学为科研提供了坚实的基础，而科研则推动教学内容的更新和深化。然而，近些年来高校教育普遍出现了“重科研、轻教学”的现象，导致教学与科研脱节，严重影响了大学生的创新培养，制约了高校的高质量、可持续发展。因此，2019年10月，教育部发布了《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》，其中明确提出了“推动科研反哺教学”的战略。这一概念源自《初学记·鸟赋》中的“反哺”比喻，意味着科研成果应回馈并滋养教学活动，促进两者的共同进步。在科研反哺教学的理念指导下，对有机化学实验教学进行创新设计，不仅能够激发学生的好奇心和探索欲，而且能够培养学生的科研思维和创新意识^[1-4]。这种设计使得科研与教学在实验课程中实现了紧密的融合，为学生提供了一个实践理论知识、探索科学前沿，并亲自参与创新过程的平台。

本论文介绍的实验“一种基于香豆素氟离子荧光探针的合成、表征及性能测试”，来源于教师的科研成果，为提升本科生综合实验技能、拓展知识视野、增强科研创新能力，专门设计的有机化学综合实验^[5,6]。该实验内容包含了有机化学中的亲核取代(分子内和分子间)和Knoevenagel缩合反应，融入了基团保护和脱保护的策略，探讨了亲核取代反应的因素(溶剂效应和空间效应)；同时，紧密结合有机小分子荧光检测的科研前沿和理论，融入了紫外和荧光光谱知识。实验过程包含有机合成的基本操作，化合物的分离纯化涉及萃取、柱层析和重结晶等手段，采用核磁共振光谱对化合物的结构进行表征。本实验难度适中，非常适合作为化学专业高年级本科生的实验教学内容。本实验采用“科研反哺教学”的模式，要求学生自主查阅文献，采用逆合成分析设计合成路线，了解荧光检测的原理和应用。学生通过本实验，能够将有机化学基础理论知识应用于科研实践，同时熟练掌握有机化合物的合成和表征技术，培养创新思维和创新能力，激发科研兴趣。

1 研究背景

氟是人体必需的微量元素，对维持生命活动具有重要作用。适量的氟摄入有助于预防牙齿松脆和骨质疏松等健康问题。然而，氟离子在体内的过量积累可能导致氟斑牙、氟骨症以及癌症等疾病^[7]。此外，人类活动产生的含氟废弃物也加剧了环境氟污染的问题。因此，对环境和细胞内氟离子的准确、快速检测变得尤为关键。目前，氟离子的检测方法主要包括离子色谱法、氟试剂比色法和荧光探针法^[8,9]。其中，荧光探针分析法因其出色的选择性、高灵敏度和低检测限等优点，以及能够进行生物荧光成像的能力，受到广泛关注。荧光探针检测氟离子的机制通常基于氢键作用或氟化物诱导的脱硅基反应。由于氟离子具有极强的电负性和最小的离子半径，它在水溶液中具有显著的水合作用，这限制了基于氢键作用的荧光探针在水体系中氟离子的检测能力^[10]。因此，基于氟化物脱硅基反应的荧光探针近年来受到了科研工作者的特别青睐。

香豆素类荧光染料具有荧光量子产率高、Stokes位移大、光稳定性好等优异的光学特性；此外，香豆素分子结构中的多个反应位点为化学修饰提供了灵活性，可以通过引入不同取代基团来进一步优化其荧光性能。因此，近年来基于香豆素类荧光染料开发多种类型的荧光探针，成为国内外科人员的关注热点，其在生物传感、环境监测和医学诊断等众多领域的应用前景备受关注。

本文以4-(二乙氨基)水杨醛为起始原料，以叔丁基二苯基硅作为保护基团，通过亲核取代反应保护羟基，然后与丙二腈通过Knoevenagel反应缩合得到荧光探针CSU-F(图1)。利用核磁共振氢谱和碳谱对产物结构进行表征，并采用紫外-可见光谱和荧光光谱法研究其检测氟离子的性能。

2 实验目的

(1) 熟练掌握硅烷化试剂用于保护醇(酚)以及制备硅基醚的反应机理；(2) 熟练掌握Knoevenagel缩合反应的机理；(3) 熟练掌握薄层色谱法(TLC)、柱层析、萃取和重结晶等基本操作；(4) 学会利

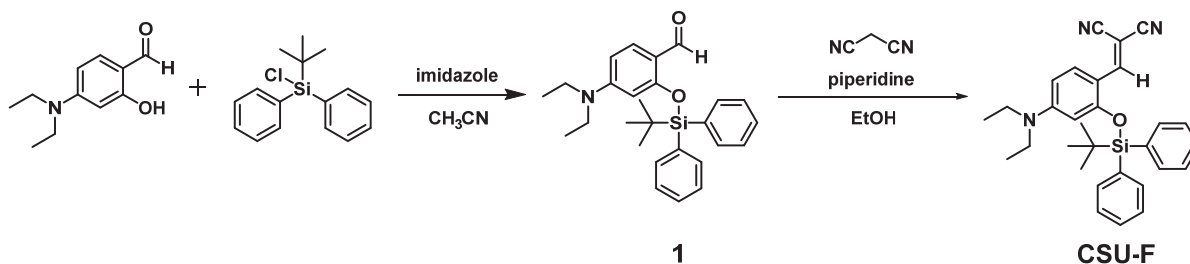


图1 氟离子荧光探针CSU-F的合成路线

用核磁共振氢谱和碳谱鉴定化合物结构的技术；(5) 了解荧光探针的识别原理，掌握紫外-可见吸收和荧光发射光谱的测试方法；(6) 了解实验室安全操作流程，培养安全环保的科学素养。

3 实验原理

氟离子是典型的路易斯碱，易与路易斯酸发生相互作用。在有机化学合成中，氟离子常作为亲核试剂，与有机硅氧化物反应，发生脱硅化反应，进而合成目标化合物。本实验巧妙应用该反应，设计了氟离子荧光探针。

如图2所示，当氟离子存在时，氟离子进攻荧光探针CSU-F中的Si原子，发生亲核取代反应，使Si-O键断裂，叔丁基二苯基硅离去，形成羟基氧负离子。生成的氧负离子进而与邻近的芳烯丙二腈的碳氮三键发生分子内亲核加成反应，形成香豆素衍生物Cou-CN，发出强烈的绿色荧光。由于氟离子亲核性较强，而其他干扰离子如氯离子和溴离子等亲核性弱，因此仅有氟离子可以与探针分子反应，从而实现了对氟离子的特异性检测。

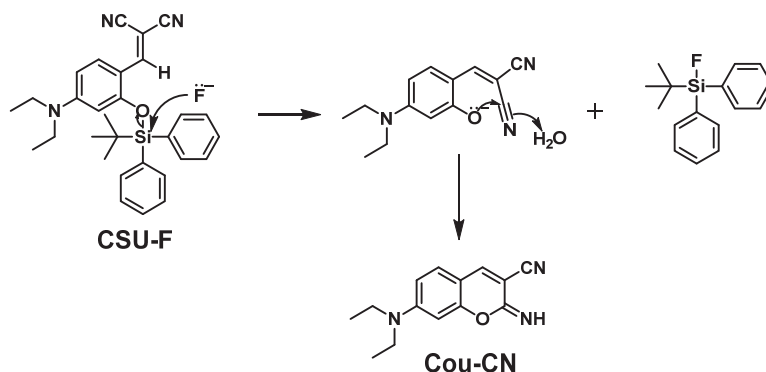


图2 荧光探针CSU-F对氟离子的识别机理

4 仪器和试剂

实验所需要的仪器及其型号和制造商如表1所示。

实验所需试剂：4-(二乙氨基)水杨醛(99%)、咪唑(99%)、叔丁基氯二苯基硅烷(98%)、丙二腈(99%)、哌啶(99%)、石油醚(分析纯)、二氯甲烷(分析纯)、无水乙醇(分析纯)、无水硫酸钠。

其他实验用品：硅胶板、硅胶粉(200–300目)、毛细管、烧杯、离心管、圆底烧瓶、分液漏斗、铁圈、铁架台、布氏漏斗、抽滤瓶、滤纸、量筒、胶头滴管、移液枪、比色皿、磁子等。

5 实验内容

5.1 化合物1的合成

称取4-(二乙氨基)水杨醛(386.0 mg, 2.0 mmol)和咪唑(326.0 mg, 4.8 mmol)置于25 mL圆底烧瓶

表1 实验所需主要仪器

仪器名称	型号	制造商
电子天平	AR124CN	上海奥豪斯
磁力加热搅拌器	MRHEL-TEC	德国Hedolph
循环式真空泵	SHZ-D(III)	浙江予华
紫外灯	ZF ₇	浙江予华
旋转蒸发仪	Heidolph G3	德国Hedolph
核磁共振波谱仪	AVANCE III 400 MHz	德国Bruker
紫外-可见分光光度计	UV-2540	美国Agilent
荧光分光光度计	F-7000	日本日立

中,加入8.0 mL乙腈作为溶剂,搅拌均匀。缓慢滴入2.0 mL叔丁基二苯基氯硅烷(823.5 mg, 3.0 mmol)的乙腈溶液,保持混合物在室温下搅拌大约1 h。通过TLC检测(展开剂为 $V_{\text{石油醚}}:V_{\text{二氯甲烷}}=1:1$)确定反应基本完成后,使用旋转蒸发仪除去溶剂,得到棕红色油状物。将该产品溶于约40.0 mL的二氯甲烷中,并加入40.0 mL纯水进行洗涤,重复洗涤操作三次。将有机相经无水硫酸钠干燥2 h,过滤后浓缩备用。

5.2 氟离子荧光探针CSU-F的合成

将化合物1 (808.0 mg, 1.8 mmol)和丙二腈(145.0 mg, 2.2 mmol)置于25 mL的圆底烧瓶中,加入10.0 mL无水乙醇作为溶剂,然后加入2.0 mL哌啶的乙醇溶液(425.0 mg哌啶溶于100 mL乙醇中),使反应混合物在室温下搅拌约30 min,反应过程中逐渐析出黄色固体。经TLC检测确认反应完成后,停止反应。利用旋转蒸发仪去除溶剂后,通过柱层析(固定相为硅胶,洗脱剂为 $V_{\text{石油醚}}:V_{\text{二氯甲烷}}=1:1$)纯化粗产品。再次去除溶剂后,采用乙醇作为重结晶溶剂对化合物进行进一步纯化,以去除可能残留的叔丁基二苯基氯硅烷。最后,过滤、干燥,称量产物并计算总产率。

5.3 光物理性质的测定

为了评估荧光探针CSU-F对氟离子的检测能力,选用乙醇作为溶剂,分别测定氟离子添加前后探针分子CSU-F的紫外-可见吸收光谱和荧光光谱的变化。具体操作如下:

① 探针母液的配制:准确称取1.9 mg的荧光探针CSU-F,溶解于2.0 mL无水乙醇中,配制成 $2.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的母液,置于冰箱中冷藏备用。

② 分析物溶液的配制:将NaF、NaCl、NaBr、NaI、NaNO₂、Na₂CO₃、Na₂SO₃、Na₂SO₄、CH₃COONa和Na₂S₂O₃分别溶于蒸馏水中,配制成 $2.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液,置于冰箱中冷藏备用。

③ 样品制备:用移液枪移取40.0 μL 探针母液加入容量瓶中,随后加入200.0 μL NaF溶液,用无水乙醇定容至2.0 mL,混匀。作为对照组,另取一个离心管,将40.0 μL 探针母液直接加入容量瓶,用无水乙醇定容至2.0 mL,混匀。室温下静置两组溶液30 min后,进行光谱测试。

④ 紫外-可见吸收光谱测定:使用UV-2540紫外-可见分光光度计测定两组样品的吸收光谱,得到相应吸光度后,根据公式 $\epsilon=A/cd$ 计算摩尔消光系数。其中, ϵ 代表染料的摩尔消光系数, A 为染料溶液的吸光度, c 为样品的浓度, d 为荧光池的宽度,通常为1.0 cm。

⑤ 荧光光谱测定:根据吸收光谱确定合适的激发波长,采用F-7000荧光分光光度计分别测定两组样品的荧光发射光谱。

6 结果与讨论

6.1 目标产物的合成与优化

在制备化合物1的过程中,其分离纯化遇到了挑战。由于原料4-(二乙氨基)水杨醛未能完全转化,

而且在薄层色谱分析中,其极性与化合物**1**较为接近(图3A),导致使用柱层析法进行分离时,需要采用低极性洗脱剂,消耗时间且需要大量溶剂,效率低下,不适合本科教学实验。针对此问题,老师和学生们在实验过程中细致观察后,认为未反应的4-(二乙氨基)水杨醛可以在下一步反应中去除,故化合物**1**的纯化步骤可以省略。

在第二步合成中,化合物**1**和未反应的4-(二乙氨基)水杨醛,在哌啶催化下均可与丙二腈发生Knoevenagel缩合反应。薄层色谱分析显示,这一步产生了两个极性差异明显的物质(图3B),其中荧光探针**CSU-F**的极性较小。因此,预期通过柱层析法能够较容易地从反应混合物中分离出化合物**CSU-F**。

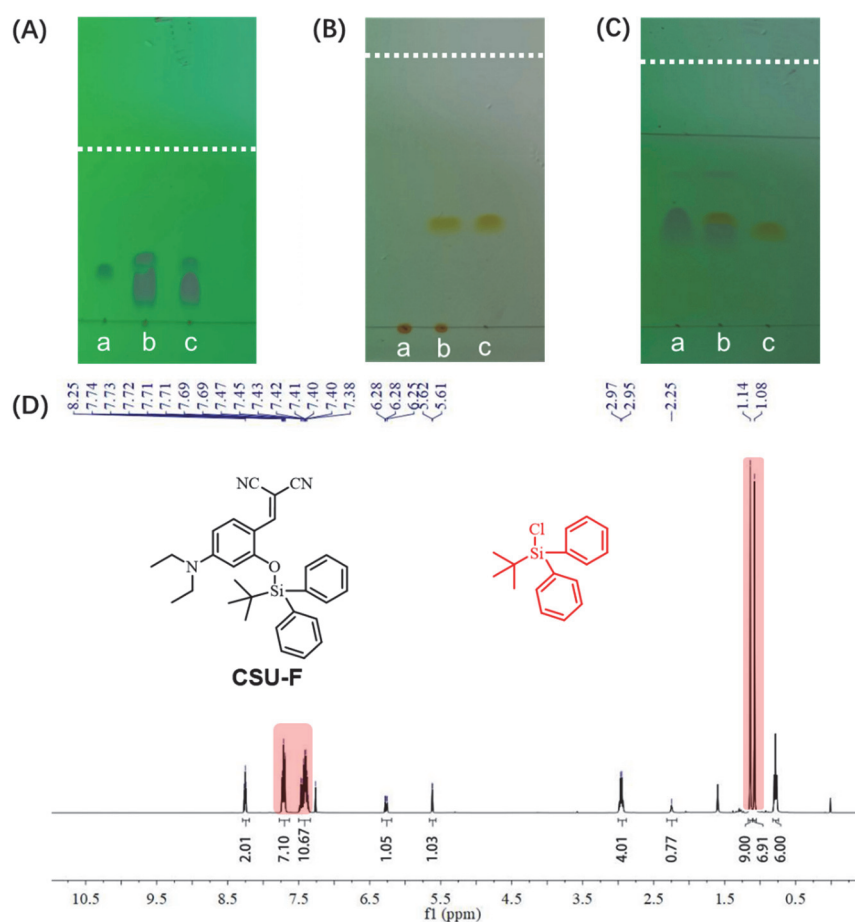


图3 (A–C) 薄层色谱分析; (D) 柱层析纯化后的荧光探针**CSU-F**的核磁共振氢谱

(A): a为4-(二乙氨基)水杨醛, c为4-(二乙氨基)水杨醛与叔丁基二苯基氯硅烷反应液, b为叠加点; (B): a为4-(二乙氨基)水杨醛和丙二腈反应液, c为荧光探针**CSU-F**, b为叠加点; (C): a为叔丁基二苯基氯硅烷, c为荧光探针**CSU-F**, b为叠加点

展开剂均为 $V_{\text{石油醚}}:V_{\text{二氯甲烷}}=1:1$

然而,柱层析纯化得到的化合物**CSU-F**的核磁共振氢谱显示,存在叔丁基二苯基氯硅烷(图3D),推测是第一步反应中未完全水解的叔丁基二苯基氯硅烷,其与荧光探针**CSU-F**的极性相近(图3C),难以通过柱层析去除。为了解决这一问题,在完成柱层析之后,对荧光探针**CSU-F**的粗产物进行重结晶,核磁共振氢谱显示成功去除了残留的叔丁基二苯基氯硅烷,获得了纯度较高的目标化合物,其比移值 R_f 约为0.35。

通过以上分离纯化的策略,充分提高了实验效率,同时两步反应的总收率约为65%。

6.2 荧光探针CSU-F的核磁表征

在核磁管中, 分别加入5.0 mg合成的化合物CSU-F和0.5 mL的 CDCl_3 , 充分摇匀溶解后在核磁共振波谱仪上进行测试。荧光探针CSU-F的核磁共振氢谱如图4A所示: ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 8.24 (m, 2H), 7.69 (d, $J = 6.6$ Hz, 4H), 7.42 (dt, $J = 14.3, 7.0$ Hz, 6H), 6.27 (dd, $J = 9.4, 2.4$ Hz, 1H), 5.62 (d, $J = 2.4$ Hz, 1H), 2.95 (q, $J = 7.1$ Hz, 4H), 1.13 (s, 9H), 0.78 (t, $J = 7.1$ Hz, 6H)。荧光探针CSU-F的核磁共振碳谱如图4B所示: ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ 158.65, 153.63, 151.31, 135.31, 131.64, 130.40, 128.18, 117.02, 115.82, 111.31, 106.53, 101.15, 100.00, 44.87, 26.55, 19.60, 12.26。

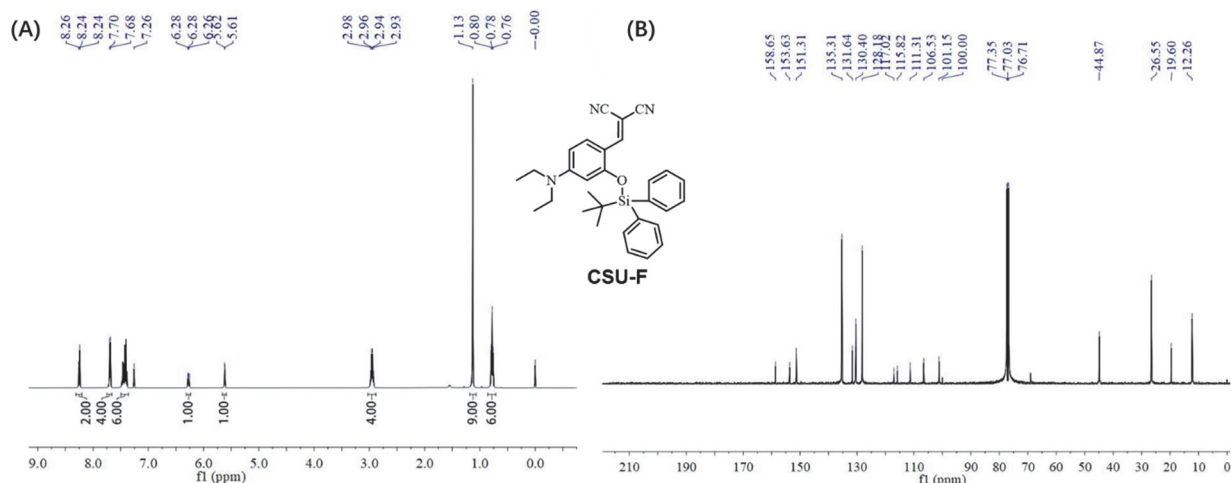


图4 (A) 荧光探针CSU-F的核磁共振氢谱; (B) 荧光探针CSU-F的核磁共振碳谱

6.3 荧光探针CSU-F对氟离子的响应

成功合成了设计的荧光探针分子CSU-F后, 采用紫外-可见分光光度计和荧光分光光度计, 测定了探针分子在氟离子作用前后的光谱变化, 研究了该探针分子对氟离子的识别性能。

如图5A所示, 在紫外-可见光谱测试中, 探针分子CSU-F呈现出最大吸收峰位于440 nm。当加入氟离子后, 探针的最大吸收波长发生微弱的红移。随后, 在荧光分光光度计上设置激发波长为430 nm, 并保持激发与发射狭缝宽度为5.0 nm, 以观察探针分子CSU-F在氟离子加入前后的荧光变化。如图5B所示, 在乙醇溶液中, 未处理的探针分子CSU-F几乎没有荧光信号。然而, 在加入氟离子反应30 min后, 探针分子CSU-F在478 nm处出现了明显的荧光发射峰, 荧光强度增强约180倍。此外, 在365 nm紫外灯的照射下, 探针本身仅显示微弱荧光, 而氟离子加入后, 溶液呈现出强烈的蓝绿色荧光(图5C), 进一步证实探针分子CSU-F对氟离子的荧光识别能力。

为了评估探针CSU-F对 F^- 检测的特异性, 选取了多种阴离子(如 Cl^- 、 Br^- 、 I^- 、 NO_2^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 CH_3COO^- 和 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)作为潜在的干扰物, 并通过荧光强度变化来研究荧光探针分子CSU-F对这些阴离子的响应情况。如图5D所示, 当氟离子加入后, 探针在478 nm处的荧光发射峰显著增强, 而其他阴离子的加入对荧光强度几乎没有影响, 表明探针分子CSU-F对氟离子具有很高的选择性。氟离子之所以能够裂解 $\text{Si}-\text{O}$ 键并形成稳定的 $\text{Si}-\text{F}$ 键, 这主要得益于其出色的亲核性和较小的原子半径。 F^- 的半径较小, 电荷更集中, 亲核性较强。然而, 在质子性溶剂中, 溶剂会使负离子溶剂化, 降低亲核能力。为了增强 F^- 对 Si 原子的亲核进攻能力, 通过在探针分子结构中巧妙地引入了大空间位阻的叔丁基二苯基基团, 创造一个疏水性空腔, 隔绝质子性溶剂的干扰, 从而维持了 F^- 的强亲核性。

通过上述光谱测试, 学生掌握了紫外-可见分光光度计和荧光分光光度计的工作原理及操作技能, 同时学习了如何对荧光探针分子的性能进行评估, 对于学生的实验技能培养具有重要意义。

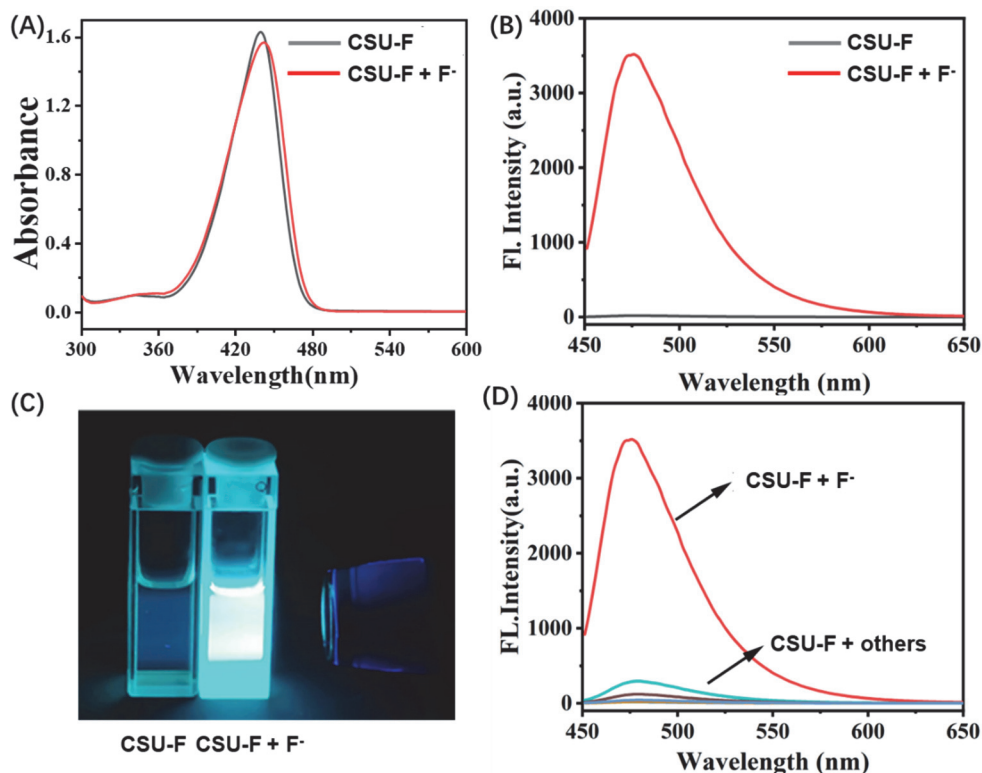


图5 荧光探针CSU-F对氟离子的响应

荧光探针CSU-F ($40.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)加入氟离子($200.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)前后的紫外-可见吸收光谱(A)、荧光光谱图(B)及紫外灯照射下的颜色变化图(C); (D) 荧光探针CSU-F ($40.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)与不同阴离子分析物(F^- 、 Cl^- 、 Br^- 、 I^- 、 NO_2^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 CH_3COO^- 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, $200.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)分别混合后的荧光光谱图

7 实验思考题

- (1) 为什么选用叔丁基二苯基氯硅烷作为羟基的保护基团，而不是叔丁基二甲基氯硅烷？
- (2) 第二步Knoevenagel缩合反应的机理是什么？哌啶在反应中有何作用？
- (3) 第二步反应中，如果体系中有水存在，会发生什么副反应？

8 实验注意事项

- (1) 干燥过程：在萃取后使用无水硫酸钠干燥有机相时，应确保干燥剂与溶剂充分接触，以彻底去除水分。同时，确保所有使用的玻璃仪器事先经过干燥处理，以避免引入水分或杂质。
- (2) 柱层析准备：在填充柱层析柱时，要确保柱床均匀无气泡。避免柱子开裂或出现断层，否则会影响分离效率和纯化效果。
- (3) TLC监测：在利用TLC监测反应进度时，应适当稀释反应液，避免直接使用未经稀释的原液进行点样。过浓的样品会导致TLC板上的斑点拖尾，影响对反应进程的准确判断。

9 实验组织和运行方式

本创新型综合实验已在中南大学化工学院2021–2024级陈新民拔尖班和强基班进行了教学实践。本实验为16学时，课时安排如表2所示，具体组织实施如下：

- (1) 为了提升科研能力和自主学习技巧，学生需做好课前预习，查阅相关文献资料，深入理解香豆素荧光染料的基础知识和荧光探针识别氟离子的机制。在此基础上，学生需要利用提供的原料，

表2 实验课时安排

实验学时	实验内容
2	讲解实验原理、内容与步骤, 强调注意事项
4	合成化合物1
4	合成荧光探针CSU-F
2	讲解核磁的工作原理, 核磁确认化合物的结构
4	讲解荧光原理, 测试荧光探针CSU-F对氟离子的检测性能

独立设计制备目标化合物的合成路线以及实验方案。这一过程不仅有助于培养学生的科研素养, 还能锻炼他们在资料搜集、信息整合以及创新思维方面的能力。

(2) 在实验课程的讲解环节, 教师将与学生共同讨论各小组提出的实验设计方案, 以确定最佳合成路线。为了确保教学质量和互动性, 建议课堂规模控制在每班约30名学生, 并采取小组合作模式, 每组2人。在实验过程中, 教师将重点指导学生如何正确操作实验室中的大型仪器, 包括旋转蒸发器、核磁共振波谱仪、紫外-可见分光光度计以及荧光分光光度计等。此外, 教师详细讲解每种仪器的工作原理、操作步骤及安全注意事项, 确保学生不仅能够熟练使用这些设备, 而且能够理解其在实验中的重要性和作用。

(3) 在完成目标化合物的合成后, 每组同学需对合成产物进行核磁共振谱图测试, 以确定化合物的分子结构。在确认了化合物的结构之后, 各组同学需要进行紫外-可见光谱和荧光光谱等测试, 验证所合成的目标化合物对氟离子的检测性能。通过这一过程, 学生将能够加深对化学合成、光谱分析和性能验证的理解, 同时培养独立科研和解决问题的能力。

(4) 在实验课程结束后, 每位学生独立完成实验报告的撰写。报告中需要包含对核磁共振谱图的详细分析, 准确归属各个特征峰, 并基于紫外和荧光光谱图数据进行系统的整理与分析。通过这一过程, 引导学生学会总结实验数据, 并对结果进行科学分析, 从而培养基础的科研分析技能。此外, 鼓励学生在讨论环节中开展创新性思考, 不拘泥于现有知识, 勇于探索未知的科学问题, 以激发对科学探索的热情和好奇心。

10 学生反馈

实验结束后开展了调研活动, 以评估学生对实验的感受和收获。调研结果表明, 学生们对该综合创新实验表现出极大的兴趣和热情。他们普遍认为, 荧光探针的制备不仅充满创新性, 而且极具吸引力, 这一过程不仅加深了他们对有机化学理论的理解, 还让他们得以将萃取、重结晶、柱层析和蒸馏等基础实验技能融会贯通。此外, 学生们反映, 通过参与荧光探针的制备实验, 他们的知识视野得到了扩展, 实验技能和创新思维得到了提升, 为未来的科研工作奠定了基础。调研结果强调了将前沿科研成果融入实验教学的重要性, 这不仅有助于学生掌握最新科研动态, 还能够激发他们的科研兴趣, 增强他们的科研实践能力和创新能力。

11 结语

本实验采用“科研反哺教学”策略, 成功将香豆素类荧光探针的设计合成与性能测试融入有机化学综合实验教学中。实验选取4-(二乙氨基)水杨醛为起始原料, 依次通过亲核取代反应和Knoevenagel缩合反应, 构建了一种对氟离子具有响应能力的荧光探针。利用核磁共振、紫外-可见光谱和荧光光谱等技术, 对探针分子的结构和性能进行了全面的表征与评估。实验结果表明该探针分

子对氟离子具有高灵敏度，验证了其在环境监测和生物传感领域的应用潜力。本实验的设计充分考虑了教学与科研的结合，不仅提高了学生的实验操作技能和科研素养，而且激发了他们的创新思维 and 实践能力。通过参与本实验，学生们能够将有机化学的理论知识与实际应用相结合，深入理解有机化学反应的基本原理及荧光染料的分子检测机制，为未来的科研工作奠定了坚实的基础。本实验的实施，不仅丰富了教学内容，也为高等化学教育提供了宝贵的创新实践案例，对于培养学生的科研兴趣和实验技能具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 魏榕, 王学, 于水欢, 姚哲侃, 苗志伟. *大学化学*, **2021**, *36* (2), 1912043.
- [2] 刘红瑜, 金谷, 姚奇志, 李娇, 李玲玲. *大学化学*, **2021**, *36* (2), 1912006.
- [3] 张烜阁, 陆天宇, 蔡岩, 燕子红, 苗志伟. *大学化学*, **2020**, *35* (3), 76.
- [4] 李一鸣, 王本花, 魏保生, 宋相志, 罗一鸣, 喻桂朋. *大学化学*, **2023**, *38* (12), 61.
- [5] Hou, P.; Chen, S.; Wang, H.; Wang, J.; Voitchovsky, K.; Song, X. *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 320.
- [6] Liu, X.; Qi, F.; Su, Y.; Chen, W.; Yang, L.; Song, X. *J. Mater. Chem. C* **2016**, *4* (19), 4320.
- [7] Kaur, K.; Mittal, S. K.; Kumar, S. K. A.; Kumar, A.; Kumar, S. *Anal. Methods* **2013**, *5*, 5565.
- [8] Cametti, M.; Rissanen, K. *Chem. Soc. Rev.* **2013**, *42*, 2016.
- [9] 张惠敏, 吴彦城, 尤嘉宜, 曹梁, 丁沙, 蒋凯, 汪朝阳. *有机化学*, **2016**, *36* (11), 2559.
- [10] Zhou, Y.; Zhang, J.; Yoon, J. *Chem Rev.* **2014**, *114* (10), 5511.