

酰肼类荧光探针的设计合成及其性质研究

李金国*, 麻建飞

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年4月11日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

本实验选用3-叔丁基-5-溴水杨醛和马来酸二酰肼作为反应物, 以无水乙醇作为溶剂, 并添加少量冰醋酸作为催化剂, 在60°C条件下通过乙醇回流法成功制备了荧光探针G1。通过¹H NMR检测, 确认了该探针的纯度较高。进一步的溶剂效应实验表明, 与其它溶剂相比, 该荧光探针在DMSO (二甲亚砜)中的溶解性最佳。因此, 以DMSO为溶剂, 以该荧光探针为溶质, 进行了后续的性质探究。首先, 通过阳离子全扫实验, 发现Zn²⁺、Cu²⁺和Fe³⁺这三种阳离子能够引起荧光探针的特殊响应。接着, 分别对这三种阳离子进行了滴定实验、抗干扰实验、含水率测试以及时间响应实验, 并得到了相应的工作变化曲线。然后, 通过Job图实验确定了荧光探针与这三种阳离子的配位比。最后, 通过测定一系列酚类物质的响应情况, 发现该荧光探针对于酚类物质具有特殊的识别效果, 这表明其可以应用于特定场合中酚类物质的检测。

关键词

酰肼类化合物, 荧光探针, Zn²⁺、Cu²⁺、Fe³⁺检测, 酚类的鉴别

Design, Synthesis, and Properties of Acylhydrazone Fluorescent Probes

Jinguo Li*, Jianfei Ma

School of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 11th, 2024; accepted: May. 24th, 2024; published: May. 31st, 2024

Abstract

In this experiment, 3-tert butyl-5-bromosalicylic aldehyde and maleic acid dihydrazide were selected as reactants, anhydrous ethanol was used as the solvent, and a small amount of acetic acid was added as the catalyst. The fluorescent probe G1 was successfully prepared by ethanol reflux

*通讯作者。

文章引用: 李金国, 麻建飞. 酰肼类荧光探针的设计合成及其性质研究[J]. 自然科学, 2024, 12(3): 635-647.

DOI: 10.12677/ojns.2024.123074

method at 60°C. The purity of the probe was confirmed to be high through ^1H NMR detection. Further solvent effect experiments showed that the fluorescence probe had the best solubility in DMSO (dimethyl sulfoxide) compared to other solvents. Therefore, further property investigations were conducted using DMSO as the solvent and the fluorescent probe as the solute. Firstly, through the cation full scan experiment, it was found that Zn^{2+} , Cu^{2+} , and Fe^{3+} cations can induce a special response of the fluorescent probe. Subsequently, titration experiments, anti-interference experiments, moisture content tests, and time response experiments were conducted on these three cations, and corresponding working change curves were obtained. Then, the coordination ratios of the fluorescent probe to these three cations were determined through Job plot experiments. Finally, by measuring the response of a series of phenolic substances, it was found that the fluorescent probe has a special recognition effect on phenolic substances, indicating that it can be applied to the detection of phenolic substances in specific situations.

Keywords

Acyl Hydrazone Compounds, Fluorescent Probe, Detection of Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , Identification of Phenols

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在生命科学领域不断取得突破的今天, 有机合成领域的研究重点已经从单纯的物质合成转向了更加注重化合物的生物活性。科学家们正致力于设计并合成能够满足医药、农业等领域需求的具有特定生物功能的有机化合物。这一转变吸引了众多科学家的关注, 他们将目光投向了能够带来实际应用成果的生物活性化合物。回顾历史, 1864年, H. Schiff [1]首次使用氨基化合物和羰基化合物进行脱水缩合, 得到了一类新型化合物[2] [3] [4] [5] [6], 从而定义了含有 $\text{C}=\text{N}$ 基团的化合物为 Schiff 碱。酰肼类化合物是 Schiff 碱的一种, 但在其被发现后的近 70 年里, 并未引起科研人员过多的关注。直到 1931 年[7] [8] [9], 大量水杨醛及其衍生物, 包括吡咯醛、邻氨基苯甲醛等 Schiff 碱化合物的合成, 以及对其金属配合物的深入研究, 才开始吸引众多化学工作者的注意。

在许多生物化学反应中, Schiff 碱的生成扮演着重要角色。Schiff 碱含有多种官能团, 可以与金属离子形成稳定的金属配合物, 这些配合物在多个领域有着广泛的应用, 如抗菌[10]、抗癌[11]等。近年来, Schiff 碱因其独特的结构和生理活性, 以及良好的配位化学性能, 受到了广泛的关注。酰肼键是酰胺类化合物特有的化学键, 由酰肼类化合物与相应的醛或酮缩合而成, 是 Schiff 碱的一种。酰肼类化合物具有稳定的性质, 不易发生水解, 这得益于次氨基的孤对电子与羰基、亚氨基的共轭作用。作为一种有机合成物, 酰肼不仅可以用于鉴别和分离提纯醛和酮, 还可以作为羰基试剂。此外, 酰肼类化合物还能作为金属离子的传感器, 用于识别特定离子。在农业[12]和医学领域[13], 其应用范围包括杀虫、除草、抗肿瘤、抑菌治疗等多方面[14] [15] [16] [17] [18]。随着有机合成技术的不断进步, 科学家们已经成功合成了大量的酰肼类化合物, 并对其进行了详细的研究。这些研究不仅有助于我们深入了解酰肼类化合物的结构和性质, 还为开发新的药物和农药提供了重要的理论基础。在未来, 酰肼类化合物在生命科学[19]、材料科学[20]等领域有望发挥更大的作用。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

全部实验所用原料购自安耐吉, 其余药品及试剂为分析纯, 实验室所用水均为二次蒸馏水, 实验仪器见表 1。

Table 1. Experimental drugs and instruments

表 1. 实验药品与仪器

测试内容	仪器及型号
熔点	熔点测试仪北京泰克设备有限公司的 X-4 显微
紫外光谱	日本日立 U-3900H 双光束二波长分光光度计
荧光光谱	日本日立 F-7000 型荧光分光光度计
$^1\text{H NMR}$	德国 Bruker 公司 AVANCE 系列 DRX-400 核磁共振仪
实验药品	冰醋酸, 浓盐酸, 无水乙醇, 无水甲醇, DMSO, 3-叔丁基水杨醛, 液溴, 无水硫酸镁, 二氯甲烷, 硫代硫酸钠。以及各种金属离子的氯化盐(ZnCl_2 , CuCl_2 , FeCl_3 , KCl , MnCl_2 , CoCl_2 , CrCl_3 , CdCl_2 , MgCl_2 , CaCl_2 , NaCl , BaCl_2 , AlCl_3 , HgCl_2)

2.2. 荧光探针的制备与表征

2.2.1. 3-叔丁基 5-溴水杨醛的合成

称取 3-叔丁基水杨醛, 溶解在 CH_2Cl_2 , 冰浴搅拌, 将液溴注入到 CH_2Cl_2 , 用恒压漏斗将其注入到醛中, 滴加 4 小时左右。反应结束后加入饱和硫代硫酸钠溶液, 继续反应 1 小时, 然后进行分液、萃取操作, 用无水硫酸镁进行除水步骤, 抽滤, 用旋转蒸发器挥发溶剂。烘干得到黄色絮状产物, 产率约 20%。分子式: $\text{C}_{11}\text{H}_{13}\text{BrO}_2$, 摩尔质量: 257.13 g/mol。反应路线如图 1 所示。

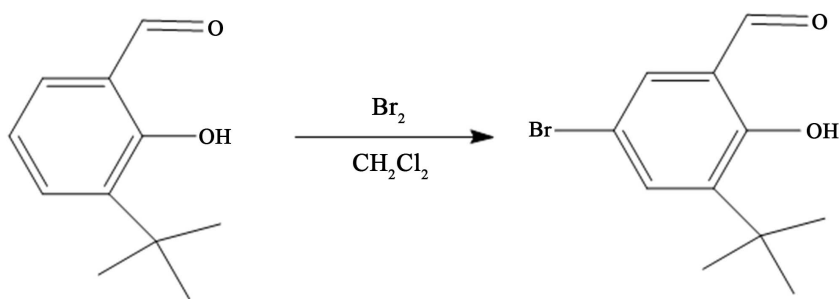


Figure 1. Synthesis reaction formula of 3-tert butyl 5-bromosalicylic aldehyde

图 1. 3-叔丁基 5-溴水杨醛的合成反应式

2.2.2. 荧光传感器 G1 的合成与表征

首先, 将 0.257 克(1 mmol)的 3-叔丁基-5-溴水杨醛溶解在无水乙醇中, 加热至完全溶解。随后, 将 0.264 克(2 mmol)的马来酸二酰肼也溶解在乙醇中, 然后将这两个溶液混合在一起, 并加热回流 8 小时, 以促进反应的进行。待反应完成后, 将混合物冷却至室温, 并进行抽滤, 以分离出固体产物(荧光探针 G1 的合成方案如图 2 所示)。最后, 使用旋转蒸发器将滤液中的溶剂蒸发, 得到纯净的产物。烘干得到 0.03 g 黄色絮状固体, 分子式: $\text{C}_{25}\text{H}_{30}\text{Br}_2\text{N}_4\text{O}_4$, 摩尔质量: 610.35 g/mol。图 3 为 G1 的氢谱。

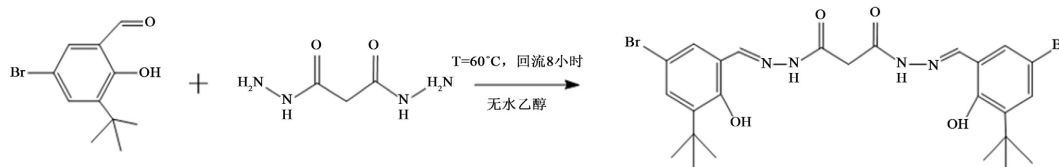


Figure 2. Synthesis scheme of fluorescent probe G1

图 2. 荧光探针 G1 的合成方案

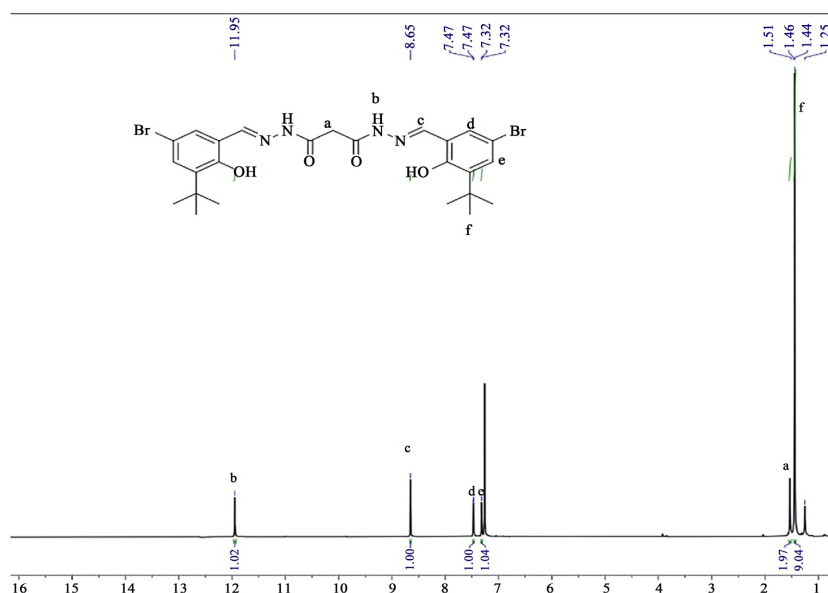


Figure 3. ¹H NMR spectrum of fluorescent probe G1

图 3. 荧光探针 G1 的核磁氢谱图

3. 结果与探讨

3.1. 荧光识别性能研究

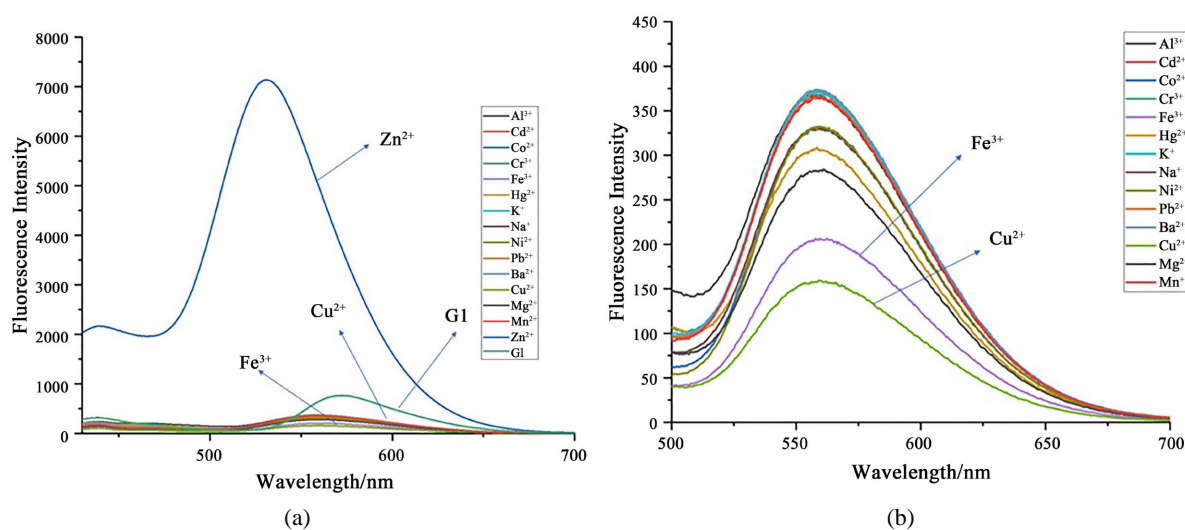


Figure 4. Fluorescence emission spectra of different metal ions added to fluorescent probe G1 in DMSO system

图 4. DMSO 体系下向荧光探针 G1 中加入不同的金属离子的荧光发射光谱图

为了研究荧光探针 G1 对金属离子是否有特异性识别能力, 在 DMSO 溶液体系中进行了荧光光谱的研究。向荧光探针 G1 溶液加入不同的金属离子, 滴定浓度为 1.0×10^{-3} mol/L。如图 4 所示, 在室温条件下, 在 359 nm 的激发条件下, 测得配体在 570 nm 处出现发射峰, 此时荧光较弱。向 G1 溶液中加入 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 后, 荧光发射峰基本被淬平, 而在 G1 溶液中加入 Zn^{2+} 后荧光发射峰大幅度开启, 加入其他阳离子后溶液的荧光强度未发生明显的增强。

将配置的 G1 溶液置于紫外灯下, 溶液呈淡黄色荧光; 另配制相同的 G1 溶液分别加入 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Zn^{2+} , 可观察到 G1 溶液在加入 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 后黄色荧光明显消失, 在加入 Cu^{2+} 后荧光慢慢消失, 在加入 Fe^{3+} 后荧光消失的速度较快, 而在加入 Zn^{2+} 后黄色荧光明显增强, 综合配体的全扫图(见图 4), 裸眼识别基本符合实验数据(见图 5), 所以 G1 可以对这三种离子进行荧光识别。



Figure 5. Bare eye view of fluorescent probe G1 on cations
图 5. 荧光探针 G1 对阳离子的裸眼图

3.2. 含水体系研究

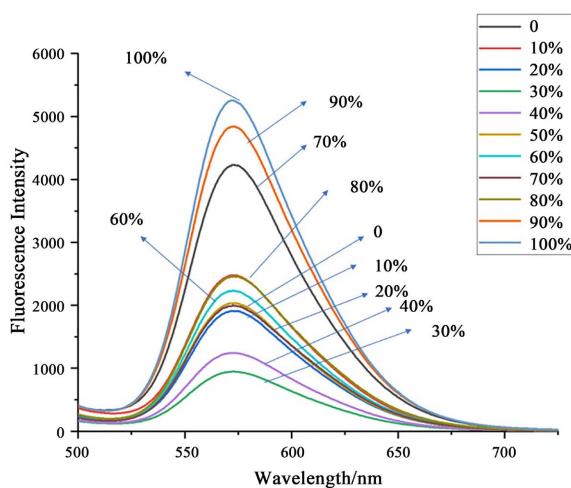


Figure 6. Fluorescence spectrum of fluorescence probe G1 at different moisture contents in DMSO solution
图 6. 在 DMSO 溶液中不同含水率下荧光探针 G1 的荧光光谱图

在 DMSO 溶液中, 将水和溶液作为共溶剂, 研究对荧光探针 G1 的影响。实验结果如图 6, 随着含水率的增加, 荧光探针 G1 在 560 nm 的荧光强度逐渐降低, 荧光发射强度明显减弱, 当含水率为 30% 时

达最低。随后随着含水率的增加, 荧光强度不断升高, 荧光发射强度明显增强。

3.3. 荧光抗干扰性能研究

通过在 DMSO 体系中做竞争实验, 研究荧光探针 G1 检测 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 的抗干扰能力。如图 7 所示, 在 359 nm 的激发条件下, 向荧光探针 G1 与 Cu^{2+} 的混合溶液中加入其他干扰离子, 发现 Fe^{3+} 的存在会导致 G1 荧光发生淬灭, 而其他金属粒子的存在不会影响荧光探针 G1 对 Cu^{2+} 的检测; 如图 8 所示, 在 359 nm 的激发条件下, 向荧光探针 G1 与 Fe^{3+} 的混合溶液中加入其他干扰离子, 发现 Cu^{2+} 的存在会导致 G1 荧光发生淬灭, 而其他金属粒子的存在不会影响荧光探针 G1 对 Fe^{3+} 的检测; 同样, 如图 9 所示, 在 359 nm 的激发条件下, 向荧光探针 G1 与 Zn^{2+} 的混合溶液中加入其他干扰离子, 发现 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 的存在会导致 G1 荧光发生淬灭, 而其他金属粒子的存在不会影响荧光探针 G1 对 Zn^{2+} 的检测。通过三组实验, G1 与这三种阳离子配置成的溶液在加入其他阳离子金属盐后荧光强度基本无明显变化。其中, 配体加入后 Zn^{2+} 的溶液荧光强度增加, 在加入 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 后的溶液有较为明显的淬灭, 但在其溶液中加入其他金属阳离子盐时, 荧光强度并没有较为明显的变化, 说明配体在对这三种金属离子进行检测时, 其他金属粒子的存在对检测结果不会产生较大的影响。综上所述, 该配体的抗干扰能力较为良好。

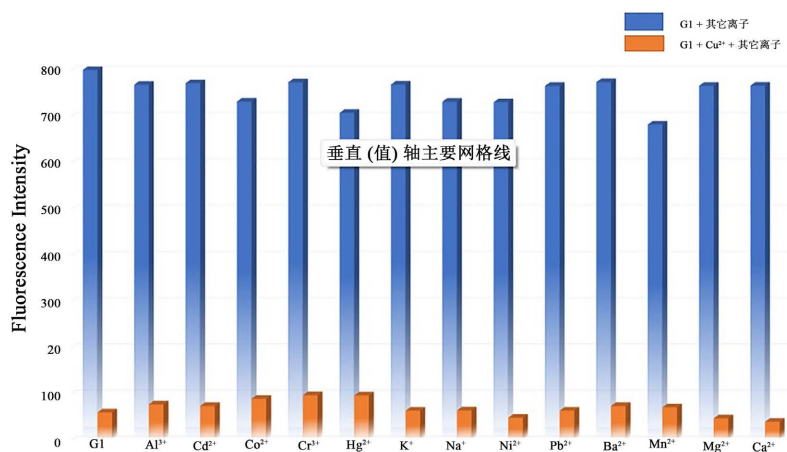


Figure 7. Fluorescence spectra of Cu^{2+} present and absent in fluorescent probe G1 in DMSO solution

图 7. DMSO 溶液中荧光探针 G1 中存在和不存在 Cu^{2+} 的荧光光谱图

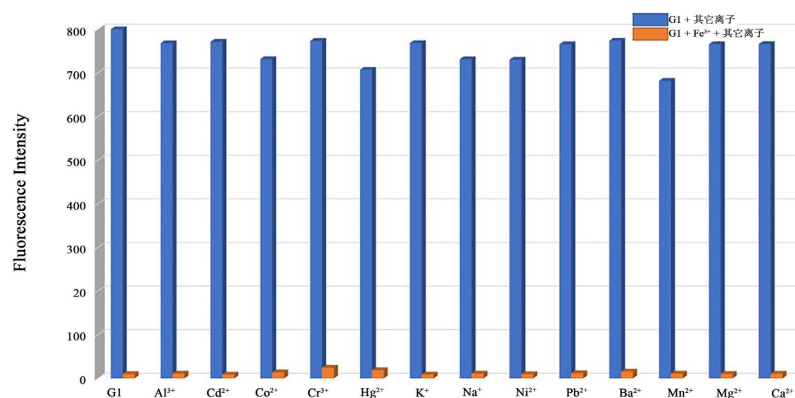


Figure 8. Fluorescence spectra of Fe^{3+} present and absent in fluorescent probe G1 in DMSO solution

图 8. DMSO 溶液中荧光探针 G1 中存在和不存在 Fe^{3+} 的荧光光谱图

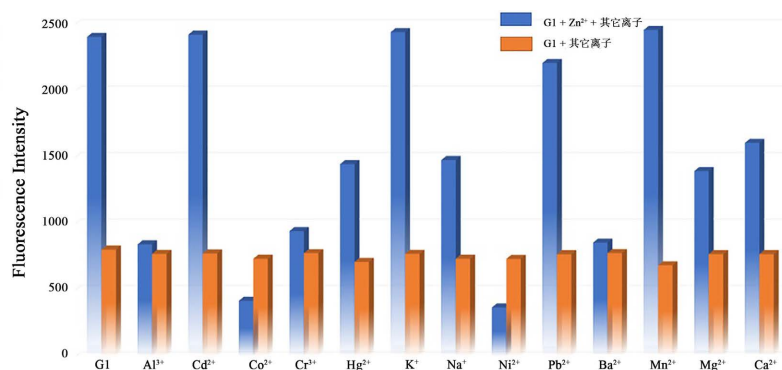


Figure 9. Fluorescence spectra of Zn^{2+} present and absent in fluorescent probe G1 in DMSO solution

图 9. DMSO 溶液中荧光探针 G1 中存在和不存在 Zn^{2+} 的荧光光谱图

3.4. 荧光探针 G1 的滴定

图 10 是在室温下, G1 对 Cu^{2+} 的紫外滴定光谱图。可以测得 G1 在 310 nm 处出现了一个强的吸收峰, 随着向 G1 的溶液中逐渐加入等量的 Cu^{2+} , 可以看到吸收峰逐渐上升, 直至吸光度不再发生变化。同时在 386 nm 处出现了等吸收点, 说明 Cu^{2+} 与 G1 发生了配位作用。

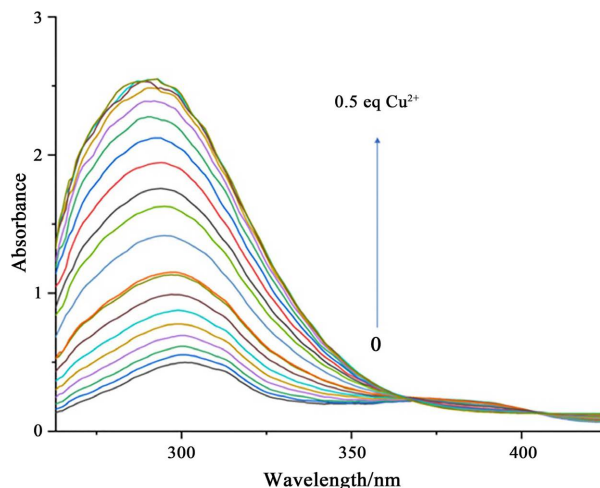


Figure 10. Ultraviolet titration experiment of G1 on Cu^{2+}

图 10. G1 对 Cu^{2+} 的紫外滴定实验

图 11 是在室温下, 激发波长为 359 nm 的条件下, G1 对 Cu^{2+} 的荧光滴定谱图, 随着 Cu^{2+} 的加入, 溶液的荧光强度逐渐减弱, 并发生蓝移, 至 570 nm 处, 到加入 Cu^{2+} 的量为 0.5 eq 时, 荧光强度不再发生变化, 证明 G1 与 Cu^{2+} 的配位比为 2:1。

为了进一步确定荧光探针 G1 与 Cu^{2+} 的结合化学计量比, 本实验做了 Jobs 实验研究。在 DMSO 溶液中, 使荧光探针 G1 与该金属离子的总浓度保持不变, 增加金属离子的摩尔分数, 检测 G1 在金属离子不同的摩尔分数时对应的荧光强度, 由图 12 可证明 G1 与 Cu^{2+} 的配位比为 2:1。

图 13 是在室温下, G1 对 Fe^{3+} 的紫外滴定光谱图。可以测得 G1 在 300 nm 处出现了一个强的吸收峰, 随着向 G1 的溶液中逐渐加入等量的 Fe^{3+} , 可以看到吸收峰逐渐上升, 直至吸光度不再发生变化。同时在 460 nm 处出现了等吸收点, 说明 Fe^{3+} 与 G1 发生了配位作用。

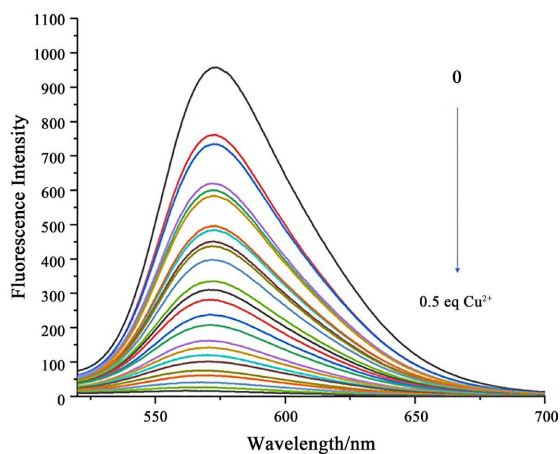


Figure 11. Fluorescence titration experiment of G1 on Cu²⁺
图 11. G1 对 Cu²⁺ 的荧光滴定实验

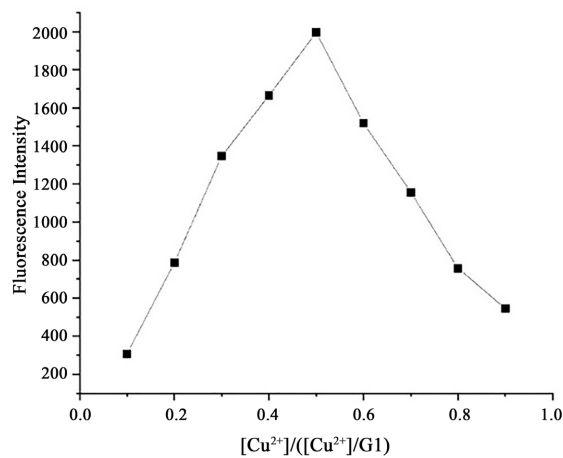


Figure 12. Jobs plot of Cu²⁺ and fluorescent probe G1 in DMSO solution
图 12. 在 DMSO 溶液中 Cu²⁺ 与荧光探针 G1 的 Jobs 图

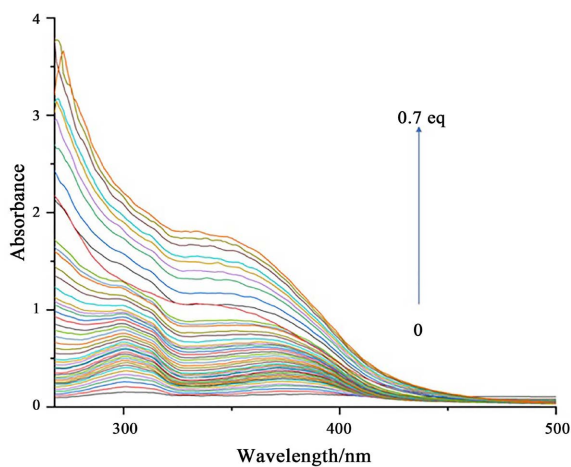


Figure 13. Ultraviolet titration experiment of G1 on Fe³⁺
图 13. G1 对 Fe³⁺ 的紫外滴定实验

图 14 是在室温下, 激发波长为 359 nm 的条件下, G1 对 Fe^{3+} 的荧光滴定谱图, 随着 Fe^{3+} 的加入, 溶液的荧光强度逐渐减弱, 并发生蓝移, 至 570 nm 处, 到加入 Fe^{3+} 的量为 0.5 eq 时, 荧光强度不再发生变化, 证明 G1 与 Fe^{3+} 的配位比为 7:10。

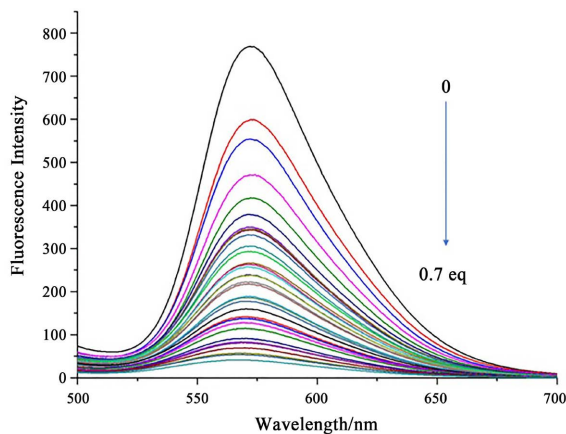


Figure 14. Fluorescence titration experiment of G1 on Fe^{3+}
图 14. G1 对 Fe^{3+} 的荧光滴定实验

为了进一步确定荧光探针 G1 与 Fe^{3+} 的结合化学计量比, 本实验做了 Jobs 实验研究。在 DMSO 溶液中, 使荧光探针 G1 与该金属离子的总浓度保持不变, 增加金属离子的摩尔分数, 检测 G1 在金属离子不同的摩尔分数时对应的荧光强度, 由图 15 可证明 G1 与 Fe^{3+} 的配位比为 7:10。

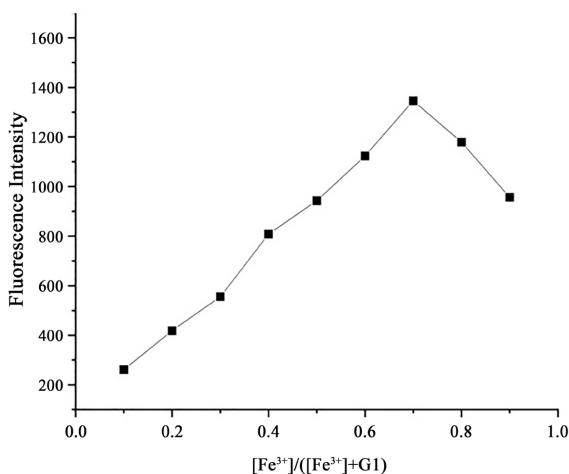


Figure 15. Job's plot of Fe^{3+} and fluorescent probe G1 in DMSO solution
图 15. 在 DMSO 溶液中 Fe^{3+} 与荧光探针 G1 的 Job's 图

由于荧光探针 G1 对 Zn^{2+} 有时间响应且时间过长(12 h 以上), 所以 Zn^{2+} 未作滴定。另外, 为排除 Zn^{2+} 的时间响应, 本实验所做的所有含 Zn^{2+} 实验均使用放置 24 h 以上的 Zn^{2+} 溶液, 以保证排除干扰。

3.5. 检测限及络合常数计算

绘制荧光探针 G1 与 Cu^{2+} 的 Benesi-Hildebrand 曲线图(图 16), 图 16 显示了 G1 与 Cu^{2+} 相互作用的浓

度和吸收强度在 0~10 $\mu\text{mol/L}$ 范围内表现出较好的线性关系, 计算出检测限为 2.4×10^{-5} mol/L。表明荧光探针 G1 具有较低检测限以及较强的络合能力。

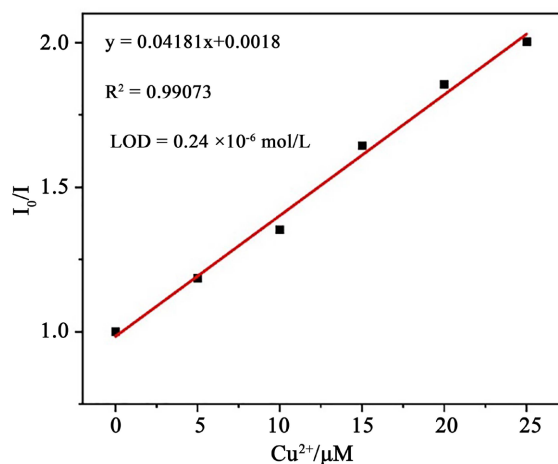


Figure 16. Linear relationship between absorption intensity and Cu^{2+} concentration

图 16. 吸收强度与 Cu^{2+} 浓度之间的线性关系图

图 17 显示了 G1 与 Fe^{3+} 相互作用的浓度和吸收强度在 0~10 $\mu\text{mol/L}$ 范围内表现出较好的线性关系, 计算出检测限为 2.4×10^{-5} mol/L。表明荧光探针 G1 具有较低检测限以及较强的络合能力。

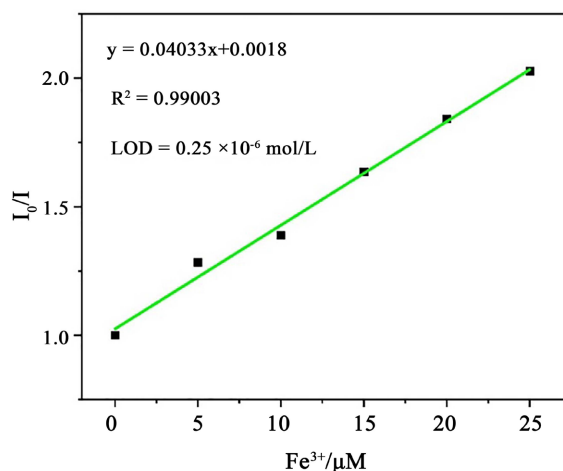


Figure 17. Linear relationship between absorption intensity and Fe^{3+} concentration

图 17. 吸收强度与 Fe^{3+} 浓度之间的线性关系图

3.6. 实际应用

环境中被酚污染的水, 被人体吸收后, 若进入人体内的量超过正常人体解毒功能时, 超出的部分可以蓄积在体内各脏器组织内, 造成慢性中毒, 出现不同程度的头昏、头痛、皮疹、皮肤瘙痒、精神不安、贫血及各种神经系统症状和食欲不振、吞咽困难、流涎、呕吐和腹泻等慢性消化道症状。酚类化合物被吸收后, 在体内经过肝脏的解毒作用, 大部分氧化成苯二酚、苯三酚, 并与硫酸、葡萄糖醛酸结合而失

去毒性。肾脏是它的主要排泄器官。酚在体内代谢迅速, 因此酚污染水体引起的中毒多为急性中毒, 主要表现为出汗、肺水肿、黑尿。所以检测和控制酚类对水体污染是十分重要的。

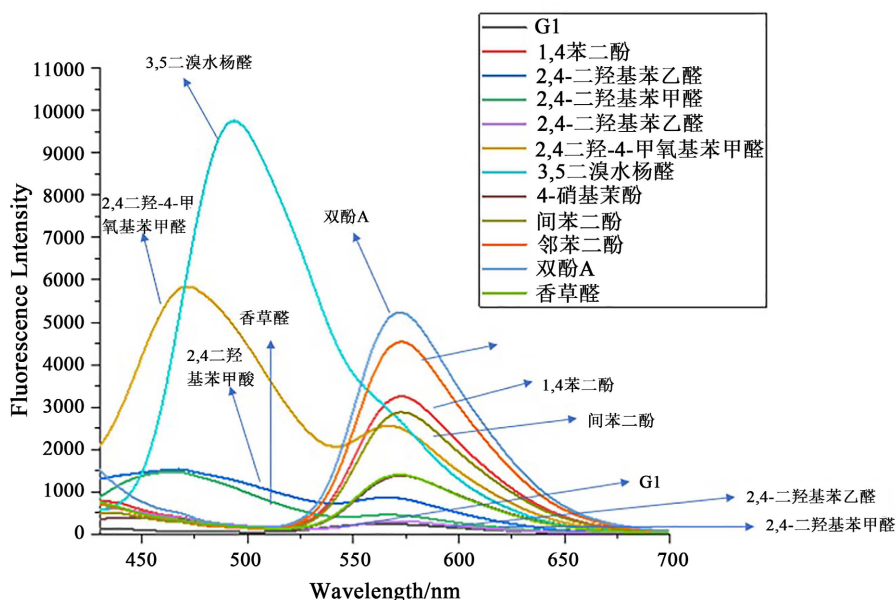


Figure 18. Titration of phenols by fluorescent probe G1

图 18. 荧光探针 G1 对酚类的滴定

在室温下, 在 359 nm 的激发条件下, 测定荧光探针 G1 对酚类的荧光滴定谱图, 加入不同的酚类, 可以看出淬灭和开启情况不一, 于是再对其做裸眼, 发现不同的酚类对配体体现出不同的颜色, 可以作为特定识别应用。在 G1 溶液中加入各种酚类, 溶液颜色会随着酚类的不同而出现各种各样的颜色(图 18), 同时由图 19 可以看出, 不同的酚类都有其特定的荧光强度, 因此我们可以使用配体对酚类进行识别, 根据其特定的颜色和荧光强度就可以简单识别该酚类的种类, 从而达到治理的目的。

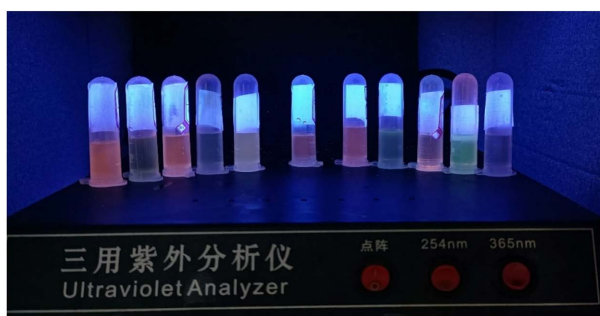


Figure 19. Bare eye image of fluorescence probe G1 for phenolic recognition

图 19. 荧光探针 G1 对酚类识别的裸眼图

4. 结论

酰脲类化合物在合成上具有较大的灵活性, 跟金属离子有很好的配位作用, 是一类很重要的含氮配体。同时酰脲类化合物具有一定的杀菌抑菌、抗病毒及抗肿瘤等生物活性, 在功能材料领域也有着很广

的应用前景, 这些原因使得酰肼及其配合物的研究变得十分广泛, 特别在相应配合物的合成与应用等方面有着很好的发展。研究表明, 大部分酰肼类化合物的配合物与原配体相比, 原有的性质能得到进一步的加强。

综上所述, 本实验通过乙醇回流法合成了配体 G1, 对金属阳离子的荧光传感性质进行了探究, 发现该配体在 DMSO (二甲亚砜) 溶液中对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 有特异性的荧光响应。然后通过荧光滴定对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 这三种离子分别进行滴定, 同时做了竞争, 确定配位比。然后使用 1H NMR 谱图和 Job 图进一步确定配体预期结合方式, 确定了配位比。在探究 G1 的过程中, 还发现在酚类的滴定时可以对酚类特殊响应, 可以应用于一些酚类的识别与鉴别上, 具有较好的识别性能。

参考文献

- [1] 刘通, 马伟, 熊乐艳, 郭赞如, 章家立. 氢键增强酰肼动态共价键智能水凝胶的制备及性能[J]. 华东交通大学学报, 2023(3): 1-8.
- [2] 李波潭, 和勇, 田佳乐, 杨子玉, 李壮, 孙琳. 一例酰肼席夫碱单核钴配合物的合成、晶体结构及磁性研究[J]. 化学研究, 2022, 33(6): 483-487.
- [3] 蒋鹏蔚, 丁宁, 刘巨涛, 胡强, 付帅帅, 张鹏辉, 吴尚. 酰肼类超分子化学传感器检测阴阳离子的研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(18): 107-110.
- [4] 李玉凰, 卢泽毅, 袁红梅, 王刚, 张成江. 酰肼键聚合物凝胶的制备及其在硝基咪唑类药物分析中的应用[J]. 应用化学, 2023, 40(1): 100-108.
- [5] 祝典, 张俊, 张倩, 梁舒琪, 熊莺, 姜亦凡, 汪美芳, 魏居媛, 范喜瑞, 冯志君. 2,6-二乙酰吡啶缩合水杨酰肼衍生物的锰和镧配合物的合成、晶体结构及抗肿瘤活性[J]. 无机化学学报, 2022, 38(8): 1499-1511.
- [6] 龙雨, 周滨, 仇干, 王立升. 15 位酰肼类苦参碱衍生物的合成以及抗菌活性研究[J]. 化学研究与应用, 2022, 34(7): 1639-1644.
- [7] 陈柯颖, 莫相全, 于文华, 邝李涵, 李光华, 朱园勤. 基于酰肼键的去氢枞酸基聚乙二醇的合成及胶束的药物缓释性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(6): 145-152.
- [8] 吴绵园, 由君, 喻艳超, 武文菊. 一种基于喹啉酰肼的接力识别 $Cu^{(2+)}$ 和草甘膦的荧光探针及其应用[J]. 有机化学, 2022, 42(8): 2559-2567.
- [9] 冯泳兰, 蒋伍玖, 张复兴, 邝代治. 四个基于间苯二(取代水杨醛酰肼)的有机锡配合物的溶剂热合成、结构和荧光性能[J]. 无机化学学报, 2022, 38(6): 1171-1179.
- [10] 赵亚欣. 酰肼基 COF 膜孔径的调控及其对染料分离性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2022.
- [11] 刘淑芳. 基于酰肼键共价有机骨架的合成、表征及其光催化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [12] 陈丹阳. 基于动态酰肼键制备多功能生物医用水凝胶[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北大学, 2022.
- [13] Li, B., Du, J., Ma, Z., Zhi, Y., Sun, L., Ma, P., Li, M. and Wei, J. (2023) A Spherical Capped Square Antiprismatic Dy(III) Complex Encapsulated Three Acylhydrazone Schiff Base Ligands Behaving Field-Induced Single-Ion Magnet Behaviour. *Journal of Molecular Structure*, **1286**, 21-46. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135516>
- [14] Nikita, B., Hanna, M., Anatol, L., et al. (2023) pH-Sensitive Fluorescent Sensor for Fe(III) and Cu(II) Ions Based on Rhodamine B Acylhydrazone: Sensing Mechanism and Bioimaging in Living Cells. *Microchemical Journal*, **191**, 67-89. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108744>
- [15] Xiang, J., Wen, D., Zhao, J., Xiang, P., et al. (2023) Study of the Metabolic Profiles of "Indazole-3-Carboxamide" and "Isatin Acyl Hydrazone" (OXIZID) Synthetic Cannabinoids in a Human Liver Microsome Model Using UHPLC-QE Orbitrap MS. *Metabolites*, **13**, 145-166. <https://doi.org/10.3390/metabo13040576>
- [16] Shu, Z., Sun, S., Gu, N., Yang, Z., Shang, Y., Yang, Y., et al. (2023) An Amphiphilic Macrocyclic Acylhydrazone Dimer: Facile Synthesis and Dual Channel Detection and Removal of Phthalate Anion. *Analytica Chimica Acta*, **1253**, 243-277. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341093>
- [17] Ma, D., Zhao, J., Huang, Q., Li, G., et al. (2023) Pyrazole Acylhydrazone Schiff Bases as Magnesium Alloy Corrosion Inhibitor: Synthesis, Properties and Mechanism Investigation. *Journal of Molecular Structure*, **1281**, 145-166. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135056>
- [18] Shu, Z., Sun, S., Gu, N., Yang, Z., Shang, Y., Yang, Y., Xia, M., et al. (2023) An Amphiphilic Macrocyclic Acylhy-

drazone Dimer: Facile Synthesis and Dual Channel Detection and Removal of Phthalate Anion. *Analytica Chimica Acta*, **1253**, 45-71. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341093>

- [19] List, B. and Scharf, M.J. (2023) Photocatalytic Radical Addition to *N*-Sulfonyl Hydrazones as a C-H Alkylation Strategy. *Synfacts*, **19**, 211-234. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1753377>
- [20] Ni, Z., Zheng, X., Bai, B., *et al.* (2023) Multi-Stimuli Responsive Property and Photopatterning of an Acylhydrazone Derivative. *Dyes and Pigments*, **212**, 331-344. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111135>