

验“金”试纸——基于色彩美学的科普实验设计

方子安, 温钱钱, 王逸迪, 欧阳红霞, 王琦, 李秋平*

南昌大学抚州医学院, 江西 抚州 344000

摘要: 试纸——通常指的是经过化学处理以后可对特定对象产生颜色变化的一类纸基产品, 是人们进行快速检测分析的好帮手。本实验在玻璃纤维滤纸表面改性的基础上, 设计了一种基于稀土配合物荧光传感特性的重金属离子检测试纸, 充分展示了其在检测水中是否含有重金属离子方面的有效性与便捷性。创新设计的验“金”试纸在检测水源重金属离子污染方面大有用途, 充分凸显了化学在促进生态文明建设方面大有可为。试纸的制作过程简单、安全与环保, 所得验“金”试纸实用、易用与好用, 实验过程既能科普试纸的一般制作与检验原理, 又能激发学生进行科学探索与应用实践的兴趣, 并在试纸使用的过程中传播生态文明的理念。本实验简单、易重复、门槛低、绿色环保且安全, 实验过程具有独特的色彩美学, 令人印象深刻, 既适合在公众场所开展科普实验, 又适合在小学高年级、中学和各本科院校的实验教学中开展和普及。

关键词: 试纸; 金属离子检测; 传感; 稀土元素; 科普实验

中图分类号: G64; O6

The Test Paper for Metal Ion: A Popular Science Experiment Based on Color Aesthetics

Zian Fang, Qianqian Wen, Yidi Wang, Hongxia Ouyang, Qi Wang, Qiuping Li *

Fuzhou Medical College of Nanchang University, Fuzhou 344000, Jiangxi Province, China.

Abstract: Test paper, a type of paper product chemically treated to produce color changes in response to specific substances, serves as a valuable tool for rapid detection and analysis. This experiment, based on the surface modification of glass fiber filter paper, introduces a heavy metal ion detection test paper designed with the fluorescence sensing characteristics of rare earth complexes. The test paper demonstrates its effectiveness and convenience in detecting heavy metal ions in water sources. The innovative test paper proves highly useful in addressing heavy metal ion contamination in water, emphasizing the significant role of chemistry in advancing ecological civilization. The simplified, safe, and environmentally friendly process of creating the test paper yields a practical and user-friendly product. This experiment not only educates on the general production and testing principles of test papers but also sparks students' interest in scientific exploration and application. The experiment, characterized by its simplicity, repeatability, low entry barrier, environmental friendliness, and safety, possesses a unique color aesthetic, leaving a lasting impression. It is suitable for conducting popular science experiments in public places and promoting awareness in experimental teaching across various educational levels.

Key Words: Test paper; Metal ion detection; Sensing; Rare earth element; Popular science experiment

收稿: 2023-10-10; 录用: 2024-01-05; 网络发表: 2024-03-11

*通讯作者, Email: liqiuping@yeah.net

基金资助: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ218108); 南昌大学抚州医学院校级科研项目(FYKJ202303)

1 引言

习近平总书记在二十届中共中央政治局第三次集体学习时指出：要加强国家科普能力建设，深入实施全民科学素质提升行动，线上线下多渠道传播科学知识、展示科技成就；要在教育“双减”中做好科学教育加法，激发青少年好奇心、想象力、探求欲，培育具备科学家潜质、愿意献身科学研究事业的青少年群体。为深入贯彻习近平总书记的讲话精神，全面落实党中央、国务院《关于进一步减轻义务教育阶段学生作业负担和校外培训负担的意见》《关于新时代进一步加强科学技术普及工作的意见》《全民科学素质行动规划纲要(2021–2035年)》部署要求，2023年5月26日教育部等十八部门发布《关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》，要求“学校应创造条件丰富内容，拓展科学实践活动；鼓励高校和科研院所主动对接中小学，引领科学教育发展；推动大学与中学联合教研，实现教学内容、教学方法等更好衔接”。协助中小学丰富科普实验内容和完善科学教育体系，推进新时代全民科学素质的提升已经成为了科技工作者们的历史使命和时代担当。化学作为一门中心的学科和实用的学科，其影响与应用渗透到了我们生活的方方面面，是挖掘科普实验的天然宝库。然而从专业的角度来看，大部分化学实验通常都具有一定的危险性，且对实验人员的专业要求较高，这就使得化学科普的实施面临着诸多困难^[1]。因此，开发与设计安全、绿色、环保、易重复、低成本且具有很好教育意义的化学科普实验就成为了化学教育工作者们义不容辞的任务^[2–6]。

试纸是人们按照一定的化验分析目的发明制备出来的便捷检测工具。与其他化验分析方法相比，试纸法具有以下优点：① 制备简单，价格便宜；② 携带方便，操作简单，不需要专业人员的指导便可独立操作；③ 检测速度快且结果明显，通俗易懂，具有较好的灵活性和时效性^[7]。正是由于以上特点，人们对各种检测试纸的研究与开发从未中断过，前有鼎鼎大名的pH试纸、验孕试纸等已被广泛应用，近年来又有甲醛检测试纸、氯离子检测试纸、新冠病毒核酸检测试纸等不断面世^[8–11]。特别是近年来因新冠疫情的防控需求，核酸检测试纸成为了人们使用频次最高的专业检测工具，在这个过程中不分男女老少、内行外行都能深刻地感受到试纸的独特魅力。

近几十年来，随着重工业的快速发展，金属电镀、采矿、化工等工业规模的不断扩大，重金属离子废液泄露或超标排放到自然环境中的事件时有发生。 Hg^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 等重金属离子的排放不但会严重污染自然环境，还有可能通过生物富集后经食物链进入人体，从而严重危害人民群众的生命健康^[12–14]。因此如何快速地对水质环境中的重金属离子进行检测，是环境治理中的一个重要课题。目前水质中重金属离子的检测方法主要有原子吸收光谱法、原子荧光光谱法、电感耦合等离子体法和电化学分析法等^[15,16]，这些方法虽然灵敏度高、准确性好，但大多需要大型仪器，且需要在实验室经专业检测人员对样品进行复杂的前处理和分析，分析成本高，难以满足现场快速检测的社会需求。

基于以上背景，为了让更多的人了解与走近试纸，感受试纸的独特魅力与威力，也为了让更多的人了解重金属离子引起的环境污染与治理问题，我们设计了一个题为“验金试纸”的实验。在这个实验中，我们选用了近年来非常热门的稀土荧光探针材料作为重金属离子的传感材料^[17–20]，选用了稳定性优异的玻璃纤维滤纸为载体，经过非常简单的表面改性与螯合即可制备一款可以快速检测重金属离子的试纸。为了展示该试纸的功能，我们还设计了利用其对水中常见金属离子进行传感检测的实验。同时，为了进一步增强实验的趣味性与实用性，我们还设计了从不同自然水体中采样与检测重金属离子的实践环节。通过本实验，学生能够充分地了解试纸的制作方法与稀土荧光探针材料的传感机理，亲身感受“金”试纸在检测重金属离子污染方面的便捷与实用特性。通过在实验中融入“金”试纸在环境保护方面的应用实践，可激发学生的学习兴趣与学以致用思维意识，推动学生积极思考个人的专业学习与生态文明建设、国家发展之间的关系，充分发挥专业教育的思政育人效果。

2 实验部分

2.1 实验原理

传统的pH试纸是通过将纸基材料浸泡在相应的指示剂溶液中，通过简单的物理吸附实现指示剂

在纸张表面的负载来制备的，本实验则是采用化学键合的方法来实现稀土荧光探针材料在试纸表面的沉降。图1展示了试纸的制备流程与原理，借助硅烷偶联剂分子的桥连作用，可以方便地将稀土配合物通过化学键组装到玻璃纤维纸的表面。组装的过程分为两个步骤：首先，将预活化处理的玻璃纤维纸与氨基邻菲罗啉(螯合剂)、异氰酸丙基三乙氧基硅烷(硅烷偶联剂)超声一锅煮，此时硅烷偶联剂一方面通过硅氧(Si-O-Si)在玻璃纤维表面落地生根，另一方面又通过异氰酸酯(-NCO)与氨基(-NH₂)的加成反应将螯合剂(邻菲罗啉)桥接到玻璃纤维纸上；随后，将上述处理好的玻璃纤维纸浸泡入预先制备好的稀土配合物溶液([Eu(TTA₃)(H₂O)₂])中，通过邻菲罗啉与稀土铕的进一步螯合即可将稀土配合物分子桥接到玻璃纤维纸上。

图2展示了验“金”试纸的传感机理，稀土配合物负载的玻璃纤维在365 nm紫外光的照射下会发射出强烈的红光(来自于Eu³⁺离子的612 nm特征发射)；当将试纸浸泡在含有一定浓度的重金属离子(Mⁿ⁺，过渡金属离子)溶液中后，由于常见的重金属离子也都具有强烈的配位意愿，会与Eu³⁺离子展开竞争性螯合，抢占了其在试纸上的位置，由于Mⁿ⁺离子桥接的试纸在紫外光照射下无红色荧光发射特征，将会产生非常明显的荧光猝灭现象。验“金”试纸遇上重金属离子所产生的这种荧光“开-关”现象，无疑就赋予了它可检测溶液中是否具有有一定浓度的重金属离子的本领，因此该试纸可用于各类环境水体中重金属污染的快速筛查检测。

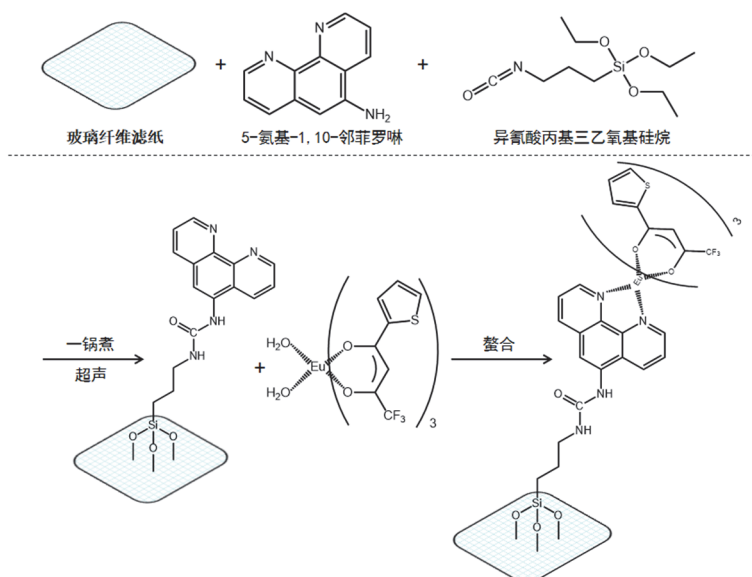


图1 验“金”试纸的制备路线与原理

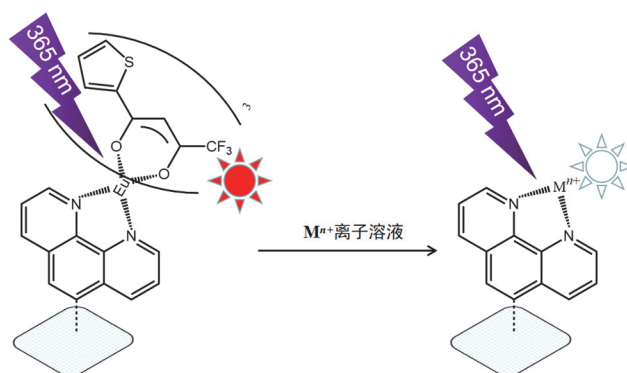


图2 验“金”试纸的传感机理

2.2 实验仪器、试剂和材料

5-氨基-1,10-邻菲罗啉(Phen-NH₂, 97%, AR)、异氰酸丙基三乙氧基硅烷(ICPTES, 95%, AR)、2-噻吩甲酰三氟丙酮(TTA, 98%, AR)与六水合三氯化铈(99.9%, AR)均购自上海阿拉丁生化科技有限公司; NaCl、NaOH、CaCl₂、CuSO₄·5H₂O、KCl、LiCl、FeCl₃·6H₂O、CoCl₂·6H₂O、Hg(NO₃)₂和无水乙醇等试剂来自上海国药集团化学试剂有限公司, 纯度皆为分析纯; 去离子水(自制); 超细玻璃纤维滤膜则购自潍坊聚凯电子科技有限公司。此外, 还有取自本地不同自然水体的水样3份。

玻璃仪器若干、矿泉水瓶若干、镊子、鼓风干燥箱、分析天平、超声波清洗器(KQ-50B, 昆山市超声仪器有限公司, 40 kHz, 50 W)、三用紫外分析仪(254/365 nm, 杭州齐威仪器有限公司)、荧光光谱仪(FLS1000, 英国Edinburgh Instruments公司)。

2.3 实验步骤/方法/现象

2.3.1 验“金”试纸的制备

(1) 玻璃纤维滤纸的预处理。

将剪裁好的玻璃纤维滤纸(6 cm × 8 cm)浸泡在25%的NaOH溶液中约30 min, 然后用去离子水冲洗至中性, 置于鼓风干燥箱中干燥后待用, 记作FG (表示Fiberglass)。

(2) 一锅法制备Phen负载的玻璃纤维滤纸。

称取0.20 g (1.02 mmol) Phen-NH₂置于250 mL烧杯中, 加入50 mL无水乙醇, 搅拌溶解; 接着往烧杯中加入1.7 mL (6.87 mmol) ICPTES, 搅拌溶解; 将预处理的玻璃纤维滤纸(FG)浸泡其中, 然后将烧杯转移至超声波清洗器中超声反应1 h; 随后取出玻璃纤维纸, 用无水乙醇涮洗3次, 置于鼓风干燥箱中干燥后即得到Phen负载的玻璃纤维滤纸, 记作FG-Phen。

(3) 稀土配合物负载玻璃纤维滤纸的制备。

称取1.33 g (6 mmol) TTA置于250 mL烧杯中, 加入30 mL无水乙醇使其溶解, 接着加入3 mL 1 mol·L⁻¹ NaOH溶液, 搅拌, 反应5 min后再加入0.73 g (2 mmol) EuCl₃·6H₂O, 搅拌, 继续反应30 min (此步骤可在超声处理FG的过程中开展); 随后将FG-Phen浸入其中, 并将烧杯转移至超声波清洗器中超声反应1 h; 反应完后取出玻璃纤维滤纸, 用无水乙醇涮洗3次, 置于鼓风干燥箱中干燥后即得到稀土配合物负载的玻璃纤维滤纸, 记作FG-Phen-Eu (TTA)₃。

2.3.2 荧光传感实验及现象

(1) 试纸的发光现象测试。

将FG-Phen和FG-Phen-Eu (TTA)₃置于三用紫外分析仪中, 打开365 nm紫外灯, 观察FG-Phen和FG-Phen-Eu(TTA)₃的发光现象, 结果如图3所示, 经表面处理的玻璃纤维纸仍能保持良好的纸张形状, 在自然光照下FG-Phen和FG-Phen-Eu(TTA)₃外观无明显区别, 但将它们置于365 nm的紫外分析仪中时FG-Phen无荧光现象, 而FG-Phen-Eu(TTA)₃则发出靓丽的红色荧光。FG-Phen-Eu(TTA)₃的红色荧光来自于试纸表面负载的Phen-Eu(TTA)₃配合物中Eu³⁺离子的荧光发射现象, 在条件允许时也可以用荧光仪测试FG-Phen-Eu(TTA)₃在365 nm紫外光激发下的荧光发射谱图。如图4所示, 在365 nm的波长激发下, FG-Phen-Eu(TTA)₃的最强发射光谱出现在了612 nm, 所以FG-Phen-Eu(TTA)₃在在365 nm波长的紫外灯照射下显示出强烈的红色荧光, 该处的荧光发射来自于Eu³⁺离子的⁵D₀ → ⁷F₂跃迁发射。

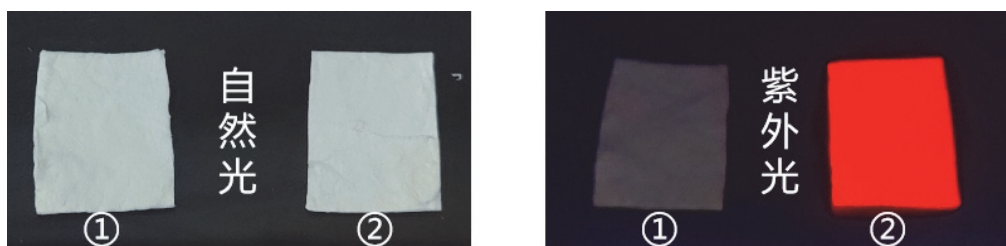
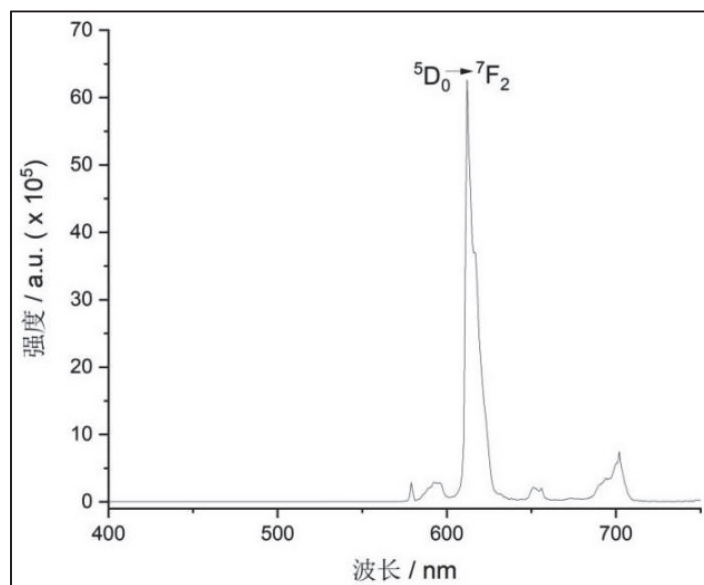


图3 FG-Phen (①)和FG-Phen-Eu(TTA)₃ (②)在自然光和365 nm紫外光下的发光现象

图4 FG-Phen-Eu(TTA)₃在365 nm波长激发下的荧光发射谱图

(2) 试纸的传感性能测试。

利用试纸制备的空闲时间,分别配制 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 和 Hg^{2+} 8种金属离子溶液各一份,并分别取20 mL置于烧杯中;将剪成相同尺寸($1.5\text{ cm}\times 1\text{ cm}$)的FG-Phen-Eu(TTA)₃ (后续都叫试纸)试纸分别浸入上述溶液以及对照样纯水中10 min,取出试纸并依次排好,观察试纸的变化情况,随后转移到三用紫外分析仪中,观察它们在365 nm紫外灯下的发光情况。如图5所示,经含 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Hg^{2+} 离子的溶液以及纯水浸泡的试纸在浸泡前后无明显变化,而经 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 浸泡后的试纸则浸染了相应离子的颜色,尤其是经 Fe^{3+} 离子溶液浸泡的试纸呈较为明显的砖红色;当将试纸暴露在365 nm波长的紫外光下时,经含 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 离子的溶液及纯水浸泡的试纸仍然能发出靓丽的红色荧光,而经含 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 和 Hg^{2+} 四种过渡金属离子溶液浸泡的试纸则发生了明显的荧光猝灭。根据配位化学的原理,产生上述光学现象的原因可能是 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 和 Hg^{2+} 四种过渡金属离子与试纸表面负载的稀土配合物展开竞争性配位,最终抢占了Phen和TTA分子的结合位点,从而让 Eu^{3+} 从试纸表面脱落并去配位,使得相应的试纸丧失了在外紫外灯下发射红色荧光的能力。由于绝大部分过渡金属离子都有很强的配位能力,因此我们推测该试纸在判断溶液中是否含有过渡金属离子方面具有一定的应用价值,有望成为重金属离子的广谱检测试纸,具有实际应用的潜力。为了进一步探索试纸对 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 和 Hg^{2+} 离子的检测限度,我们将试纸浸在稀释的上述金属离子溶液中,通过观察其荧光猝灭现象(图6)发现在比色法条件下,试纸对 Fe^{3+} 的检测限达到 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, Cu^{2+} 和 Hg^{2+} 检测浓度则能达到 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

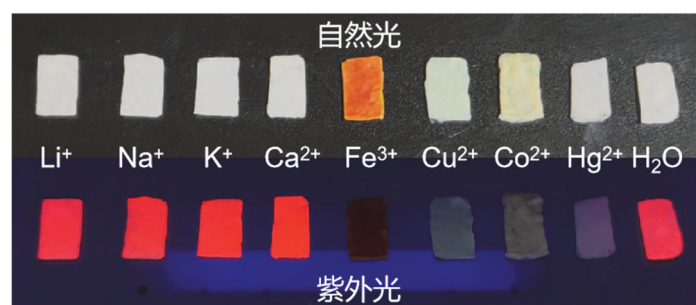


图5 试纸浸泡后分别在自然光和365 nm波长激发下的发光现象

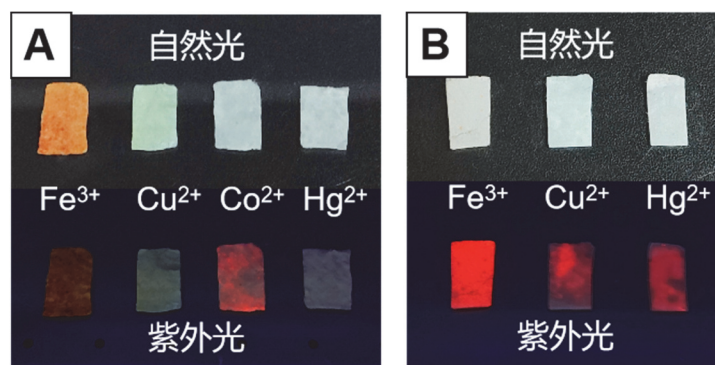


图6 试纸分别在 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (A)和 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (B)的相应离子溶液中浸泡处理后在自然光和365 nm波长激发下的发光现象

(3) 自然水体的检测实验。

为了进一步验证试纸的实用价值，我们采集了本地冬泳基地水域、工业园区附近水域以及一森林公园湖泊的水样。取3个50 mL烧杯，分别加入以上三种不同水源的水样，另取1个50 mL烧杯接自来水做对比，将试纸试纸分别浸入上述溶液10 min，取出试纸并依次排好，观察试纸的变化情况，随后转移到三用紫外分析仪中，观察它们在365 nm紫外灯下的发光情况。结果如图7所示，令人惊讶的是，采自冬泳基地水域和工业园区附近水域的水样未让试纸荧光猝灭，反而是取自森林公园湖泊的水样让试纸产生了明显的荧光猝灭。为了弄清采自森林公园湖泊的水样导致试纸荧光猝灭的真相，我们将该公园水样送交专业测试机构进行ICP盲扫进行全元素检测分析。如表1所示，除自然水体中常见的Ca、Na和K等金属元素外，该处水体中还存在多达19种的金属离子，其中绝大部分为过渡金属离子，其中不乏 Ba^{2+} 、 Au^{+} 、 Cu^{2+} 和 Hg^{2+} 等重金属离子。虽然这些过渡金属离子含量都不是很高，但是我们推测正是由于这些丰富的金属离子与试纸表面负载的稀土配合物展开竞争性配位，才导致其荧光猝灭的。这一结果表明，我们设计的验金试纸在快速筛选自然水体是否存在金属离子污染方面有一定的实用价值。

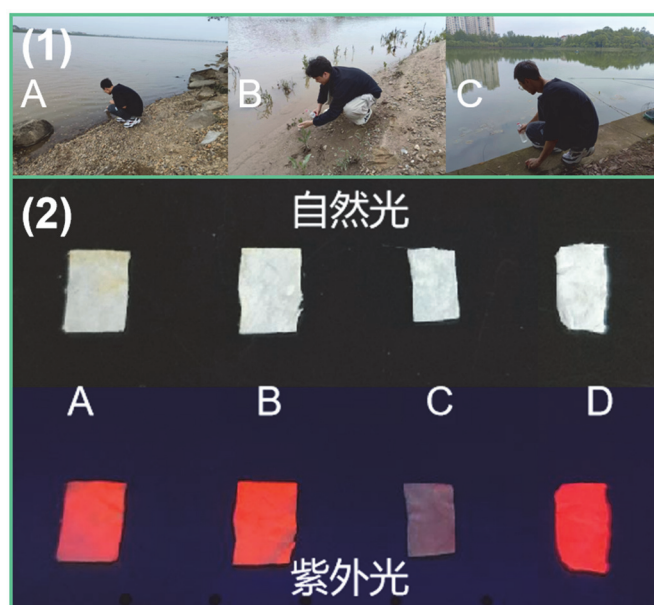


图7 (1) 自然水样现场采样照片，A为冬泳基地水域，B为工业园区附近水域，C为森林公园湖泊水域；(2) 试纸经A、B和C处水样浸泡处理后在自然光和紫外灯下的发光现象，D则为经空白对照水样浸泡的试纸

表1 森林公园湖泊水域水样送检结果

元素	含量/(mg·L ⁻¹)	元素	含量/(mg·L ⁻¹)	元素	含量/(mg·L ⁻¹)	元素	含量/(mg·L ⁻¹)
Ca	13.709	Mg	1.614	Ga	0.286	Cu	0.020
Na	4.588	Ge	1.399	Sm	0.172	Sb	0.015
W	3.293	Ta	1.324	Sr	0.053	Au	0.011
Ir	2.299	Hf	1.233	Al	0.025	Mo	0.010
K	2.117	Rh	0.939	Fe	0.024	Hg	0.005
Mn	1.767	Ti	0.556	Ba	0.021	-	-

当然,考虑到实验课程的时限问题,利用ICP测试自然水样的部分可以设置为课后探索环节。另外,如果自然水样不能产生猝灭效果,也可以在检测结果明确后往自然水样中主动添加Cu²⁺、Hg²⁺等离子,验证当自然水体中出现Cu²⁺、Hg²⁺等重金属污染物后是否会导致试纸的荧光猝灭。

3 科普展示和互动方案

本实验可面向小学四年级及以上的学生开展科普展示,展示活动可在科普场馆、教室、公园等场所进行。

同时,因应科普展示的要求,可对实验器材与材料进行以下简化处理:玻璃纤维滤纸事先预处理;烘干步骤可以省略;用于实验的金属离子可缩减为Na⁺、Ca²⁺、Fe³⁺和Cu²⁺等中小学生较为熟悉的几种,事先配成1 mmol·L⁻¹的溶液;Eu(TTA)₃·H₂O的乙醇溶液事先配好;Phen-NH₂和ICPTES也先按照比例混合配成乙醇溶液;紫外分析仪用验钞的紫外光手电筒代替;自然水体就地取材;缩短试纸制作时间。

3.1 试纸的制作展示与互动方案

(1) 教师介绍实验过程,强调安全注意事项,特别是提示学生在实验过程中全程佩戴好一次性乳胶手套,以防玻璃纤维引起皮肤不适。

(2) 教师展示与介绍实验用器材,介绍试纸的制作方法。

互动一:让学生用紫外光手电筒分别照射玻璃纤维滤纸、Eu(TTA)₃·H₂O的乙醇溶液、Phen-NH₂和ICPTES的混合溶液,观察并记录各物质的颜色。

(3) 教师指导学生代表制作试纸。

互动二:指导学生代表取1个烧杯,倒入Phen-NH₂和ICPTES的混合溶液,放入一块5 cm × 5 cm的玻璃纤维滤纸,然后将烧杯转入超声器中超声处理30 min。

在超声处理过程中,教师可带领学生去周边现场取一些自然水样和自来水,同时科普保护水资源的重要性。

互动三:指导学生安全取水样,并做好标记。

互动四:指导学生代表将玻璃纤维滤纸从烧杯中取出,并用无水乙醇充分洗涤,用紫外光手电筒照射玻璃纤维滤纸,观察颜色变化并做好记录。

互动五:指导学生代表取两个烧杯,分别倒入50 mL Eu(TTA)₃·H₂O的乙醇溶液,分别放入刚处理的玻璃纤维滤纸和空白玻璃纤维滤纸,将烧杯做好标记,然后将烧杯转入超声器中超声处理30 min。

在超声处理的过程中,教师可通过提问与讲解的方式向学生科普重金属离子的概念、危害及污染现状。

互动六:同互动四。

通过对比,学生会发现空白试纸在Eu(TTA)₃·H₂O的乙醇溶液中直接浸泡后在紫外光下不显色,而经Phen-NH₂和ICPTES的混合溶液、Eu(TTA)₃·H₂O的乙醇溶液先后处理的玻璃纤维滤纸在紫外光下显鲜艳的红色。

3.2 试纸的“验金”能力展示与互动方案

(1) 教师展示与介绍水样, 介绍用试纸检验金属离子的方法。

互动七: 让学生用紫外光手电筒分别照射各水样, 观察并记录颜色。

(2) 教师指导学生代表用试纸检验水中是否含过渡金属离子。

互动八: 让学生代表取六个烧杯, 分别倒入50 mL Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 溶液以及自来水和自然水样, 将试纸剪成 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 的块状大小后分别投入其中, 浸泡10 min后取出, 观察它们在紫外光下的颜色变化情况并做好记录。

(3) 教师引导学生讨论试纸的颜色变化情况, 思考试纸的用途, 并引导学生进一步发现日常生活中的试纸应用情况。

4 结语

本实验具有材料易得、操作简单、易重复、时长适中、安全环保等特点, 所设计的验“金”试纸使用前后在紫外灯下的颜色变化非常明显, 具有色彩美学, 令人印象深刻。在实验过程中学生能亲身体试验“金”试纸的制作过程, 亲自见证试纸的验“金”能力, 充分感受稀土元素的荧光之美与传感妙用。实验方案充分体现了学以致用理念, 寓教于乐, 通过亲自制作验“金”试纸并运用其检测环境水样, 能充分地激发学生的学习兴趣与调动学生的学习动力, 同时, 还可在科普过程中传播生态文明的理念。

参 考 文 献

- [1] 王宝玲, 朱博闻, 杨雕, 邓秀君, 蒋蕾, 胡素娟, 李艳妮, 杨艳华. 云南化工, 2023, 50 (5), 139.
- [2] 肖怡婷, 赵瑾瑜, 孟莹, 帅琴, 欧阳磊. 大学化学, 2023, 38 (9), 114.
- [3] 裴强, 吴晋晋, 张芳, 王俊娜, 丁爱祥. 化学教育(中英文), 2022, 43 (12), 56.
- [4] 杨国萍, 王树军, 于金龙, 马麦霞, 彭玉苓. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2021, 21 (4), 112.
- [5] 陶炎. 中国石油和化工, 2016, No. 8, 62.
- [6] 徐新. 科技视界, 2016, No. 11, 308.
- [7] 曹明艳. 食品安全导刊, 2020, No. 24, 158.
- [8] 业思晨, 陈琼, 吴琼友, 刘盛华, 尹军, 原弘. 大学化学, 2022, 37 (7), 132.
- [9] 李志鸿, 高晨, 严玲琳, 李冠华. 广州化工, 2022, 50 (20), 112.
- [10] 武洪东. 现代食品, 2018, No. 14, 109.
- [11] 王锦鹏, 韩宁, 李卫东, 毛志平. 纺织检测与标准, 2016, 2 (4), 12.
- [12] 俞文钰, 郝桐锋, 南海林, 张树林, 张清靖. 现代农业科技, 2023, No. 11, 156.
- [13] 习春红. 粮食加工, 2023, 48 (3), 140.
- [14] 姜练发, 杨海毅. 资源节约与环保, 2023, No. 5, 85.
- [15] 王珏, 王元凤, 徐乃丰, 朱照祥, 李芊芊, 伍晓斌. 上海师范大学学报(自然科学版), 2021, 50 (2), 186.
- [16] 周秀英, 罗欢, 韩晓燕, 尹志华, 张倩. 广东化工, 2020, 47 (15), 151.
- [17] Aulsebrook, M. L.; Graham, B.; Grace, M. R.; Tuck, K. L. *Coord. Chem. Rev.* 2018, 375, 191.
- [18] Cui, Y. J.; Chen, B. L.; Qian, G. D. *Coord. Chem. Rev.* 2014, 273–274, 76.
- [19] Binnemans, K.; Lenaerts, P.; Driesen, K.; Grller-Walrand, C. *J. Mater. Chem.* 2004, 14 (2), 191.
- [20] Li, Q. P.; Zhou, Y. *Rsc. Adv.* 2023, 13 (28), 19429.