

## 黑暗中的蓝色精灵 ——化学发光梯度科普实验

于博荣\*, 张慧姣, 张新瑜, 李晓影, 陈姝明, 韩占刚\*

河北师范大学化学与材料科学学院, 化学国家级实验教学示范中心(河北师范大学), 石家庄 050024

**摘要:** 鲁米诺(3-氨基-苯二甲酰肼)作为一种化学发光试剂, 在碱性水溶液中可被氧化剂氧化, 产生激发态分子, 当激发态分子回到基态时会以蓝光的形式释放能量, 该现象明显且富有观赏性。基于此, 本工作选用日常生活中的爆炸盐和84消毒液, 分别用于替代实验室中的碱性试剂和氧化剂, 促进化学发光科普实验的生活化。面对不同知识储备人群, 有针对性地进行梯度科普教育: (1) 对低龄儿童及青少年, 设计并开展了系列趣味实验活动, 如“蓝色雨”“蓝色火焰”等, 传递化学之趣, 寓教于乐, 在拓展化学知识的同时体验化学实验的乐趣; (2) 对有专业知识背景的本科生, 设计了利用化学发光分析仪对爆炸盐中过氧化物的含量进行测定, 从解决实际问题入手, 激发学习兴趣, 加强实验操作技能的训练并提高逻辑思维能力; (3) 对社会普通大众, 通过生活实际中的化学实验过程, 有利于帮助他们走出化学发光的认知误区, 透过现象看本质, 提升大众理性思维和科学素质。

**关键词:** 鲁米诺; 爆炸盐; 化学发光; 梯度科普

**中图分类号:** G64; O6

## The Blue Elf in the Dark: Gradient Science Popularization Experiments on Chemiluminescence

Borong Yu\*, Huijiao Zhang, Xinyu Zhang, Xiaoying Li, Shuming Chen, Zhangang Han\*

National Experimental Chemistry Teaching Center, College of Chemistry and Materials Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China.

**Abstract:** Luminol (3-Aminophthalhydrazide) serves as a chemiluminescent reagent that, when oxidized by an oxidant in an alkaline aqueous solution, generates excited state molecules. Upon returning to the ground state, these molecules emit energy in the form of visible blue light, which is both striking and aesthetically appealing. This work enhances the outreach of chemiluminescence experiments by substituting laboratory alkaline reagents and oxidants with everyday items like explosive salts and disinfectants (e.g., 84 disinfectant). Targeted gradient science popularization efforts are tailored for different levels of scientific knowledge: (1) Engaging young children and adolescents with entertaining experiments such as “Blue Rain” and “Blue Flame” to foster interest in chemistry through enjoyable educational activities. (2) Designing experiments for undergraduate students with a strong scientific background to utilize chemiluminescence analyzers for measuring peroxide content in explosive salts, thereby enhancing practical problem-solving skills, experimental proficiency, and logical reasoning. (3) Educating the general public through everyday chemical experiments to dispel misconceptions about chemiluminescence, promoting a deeper understanding of scientific principles and improving rational thinking and scientific literacy.

**Key Words:** Luminol; Explosive salt; Chemiluminescence; Gradient science popularization

收稿: 2024-03-29; 录用: 2024-07-02; 网络发表: 2024-08-27

\*通讯作者, Emails: yuborong@hebtu.edu.cn (于博荣); hanzg116@126.com (韩占刚)

基金资助: 河北省高等教育教学改革研究与实践项目(2023GJJG122); 河北师范大学教学改革研究与实践项目(2023XJJG075, 2023XJJG006); 河北省研究生教育教学改革研究项目(YJG2024044); 河北师范大学研究生教育教学改革研究项目(XYJG202319)

## 1 引言

在某些化学反应过程中，体系中的某种物质可以吸收反应过程中释放的能量，从而实现由低能级状态(基态)跃迁至高能级状态(激发态)的转变，但高能级状态很不稳定，其很快会弛豫到较低能级状态，在这个过程中能量以光的形式辐射出来<sup>[1]</sup>。在化学反应中产生的能量以光辐射的形式释放出来的现象称为化学发光。鲁米诺(3-氨基-苯二甲酰肼)在碱性水溶液中会被氧化剂氧化为激发态的3-氨基邻苯二甲酸盐，当其回到基态时以蓝色可见光的形式释放能量。鲁米诺体系是一种较为常见的强化学发光体系，在实际生活中被广泛应用于刑事侦查<sup>[2]</sup>、生物工程<sup>[3]</sup>、环境分析<sup>[4]</sup>等领域。

在生活中，不少人对一些化学发光现象存在一定程度的认识盲区或误区(认为荧光海岸、萤火虫、荧光棒等化学发光现象是“荧光”)。为深入贯彻落实《全民科学素质行动规划纲要(2021–2035年)》《关于新时代进一步加强科学技术普及工作的意见》以及《关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》等文件精神<sup>[5,6]</sup>，发挥化学资源优势，促进化学科普教育工作，提高大众对“化学发光”科学的了解，让化学发光分析方法走进大众视野，提高公众的化学素养，我们针对鲁米诺发光体系设计了一系列梯度科普实验，以满足不同知识储备群体需求<sup>[7]</sup>。具体包括：(1) 科普实验用品生活化，用生活中常见日用品代替实验室化学试剂，增强实验的推广性。如用爆炸盐代替实验室中的碱性药品，用84消毒液代替实验室中的氧化剂，用3%医用过氧化氢代替实验室危化品30%过氧化氢<sup>[8]</sup>。(2) 科普实验内容层次化，多形式地设计了不同具有观赏性的趣味实验。面向幼儿园小朋友、小学生群体，开展了“发光的‘水晶宝宝’”和“让画‘活’起来”的活动；面向初高中生群体，在初步认识鲁米诺发光原理的基础上，合理结合中学化学知识，设计稀、浓84消毒液对比实验，观察到“蓝色雨”“蓝色火焰”的神奇现象，激发青少年深入讨论和了解化学发光的原理、影响因素；面向本科生，利用流动注射化学发光分析仪，设计了对实际生活常见物品爆炸盐中过氧化物的定量测定实验；面向社会大众，通过有趣的化学实验现象和科学讲解，帮助其走出化学发光的认识盲区 and 误区。(3) 科普过程实践化，把从以“展示”为主要的传统模式向以“实践”为主要的模式进行转变，提升受众群体参与度，增加互动性，有效聚焦实践背后的科学问题，借助化学发光科普实验，促进培养和提升大众群体的理性思维和科学素质<sup>[9]</sup>。

## 2 实验部分

### 2.1 实验原理

鲁米诺，化学名称为3-氨基-苯二甲酰肼。在碱性水溶液中，鲁米诺被氧化剂氧化为激发态的3-氨基邻苯二甲酸盐，在激发态分子回到基态的过程中发出最大发射波长为425 nm的蓝色可见光，过程如图1所示。鲁米诺发光体系为直接发光体系，直接发光为最简单的化学发光。

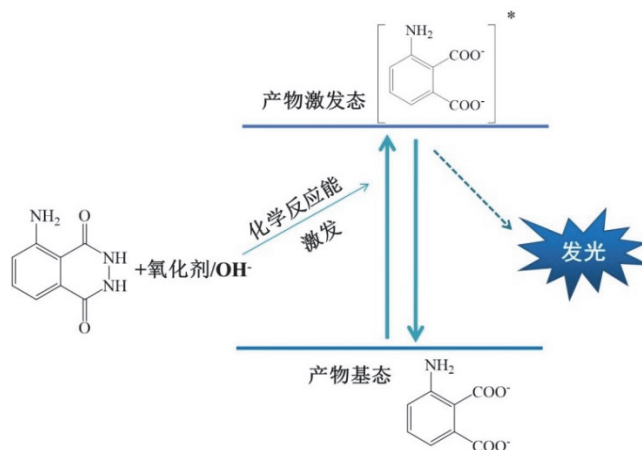


图1 鲁米诺化学发光体系反应过程示意图

爆炸盐中主要成分为过氧碳酸钠, 爆炸盐溶于水后会分解为碳酸钠和过氧化氢<sup>[10]</sup>, 反应方程式为 $2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2 = 2\text{Na}_2\text{CO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}_2$ 。所以, 爆炸盐分解后产生的碳酸钠可为鲁米诺的发光提供碱性环境; 过氧化氢和所使用的84消毒液(有效成分次氯酸钠 $\text{NaClO}$ )均可作为化学发光反应过程所需的氧化剂。

## 2.2 实验试剂和材料

本实验所用主要试剂和材料见表1。

表1 实验所用试剂\*

主要试剂	规格	生产厂家
鲁米诺	B.R.	上海源叶生物科技有限公司
高锰酸钾( $\text{KMnO}_4$ )	A.R.	上海化学试剂有限公司
硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	A.R.	天津市永大化学试剂有限公司
氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )	A.R.	天津市大茂化学试剂厂
碳酸氢钠( $\text{NaHCO}_3$ )	A.R.	天津市永大化学试剂有限公司
溴化钾( $\text{KBr}$ )	A.R.	天津市科密欧化学试剂有限公司
硝酸铬( $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )	A.R.	上海化学试剂有限公司
乙二胺四乙酸二钠(EDTA)	A.R.	天津市永大化学试剂有限公司
3%医用过氧化氢	100 mL	山东德州利兴康消毒用品店

\*生活用品花生油、84消毒液、“水晶宝宝”、爆炸盐从超市购买

## 2.3 实验仪器

本实验所用主要仪器见表2。

表2 实验所用仪器

仪器	型号	公司
电子分析天平	AR224CN	奥豪斯仪器(常州)有限公司
电子天平	JMA5001	诸暨市超泽衡器设备有限公司
流动注射化学发光分析仪	IFFM-E	西安瑞迈分析仪器有限公司

## 2.4 实验步骤和现象

### 2.4.1 发光的“水晶宝宝”

称取3.0 g爆炸盐溶于20 mL热水中, 加入0.0100 g鲁米诺用玻璃棒搅拌使其混合均匀, 配制成鲁米诺混合溶液。将“水晶宝宝”用鲁米诺溶液浸泡3–4 h。将浸泡好的“水晶宝宝”转移至许愿瓶中, 放到黑暗环境, 将稀释后的84消毒液加入许愿瓶内, 会观察到“水晶宝宝”发光现象(如图2所示)。



图2 发光的“水晶宝宝”展示过程

### 2.4.2 让画“活”起来

让小朋友发挥想象力在卡纸上画出森林中的花、草、树、昆虫等生物，用儿童剪刀裁剪下来并粘贴到白色卡纸上。取一装有适量鲁米诺溶液的离心管，在离心管两侧粘上双面胶，一侧粘上昆虫剪纸，另一侧粘贴在白色卡纸上。离心管有溶液的部分靠近昆虫剪纸的尾巴处。最后将布置好的白色卡纸转移至暗处，让小朋友用滴管向离心管内加入稀释好的84消毒液，可以明显看见溶液发光。如图3所示，从卡纸正面看，就像是昆虫在发光。



图3 “活”起来的画

### 2.4.3 “蓝色雨”“蓝色火焰”

在鲁米诺溶液中加入等体积的花生油，采用油层可减缓液滴在溶液中的下降速度，同时爆炸盐产生的气泡可将鲁米诺溶液带入到油层，使84消毒液与鲁米诺溶液在油层发生反应，使实验现象更明显。

中学知识点已经涉及，反应物浓度不同，反应的速率和现象也可能不同。因此我们通过观察，对比使用稀释前的84消毒液和稀释后的不同现象。

方案一：在一个细长的透明容器内，加入三分之一的鲁米诺溶液、三分之一的花生油，滴加稀释的84消毒液。反应平缓，如同雨滴滴落，如图4A所示。

方案二：在一个细长的透明容器内，加入三分之一的鲁米诺溶液、三分之一的花生油，滴加未稀释的84消毒液。反应剧烈，如同火焰燃烧，如图4B所示。

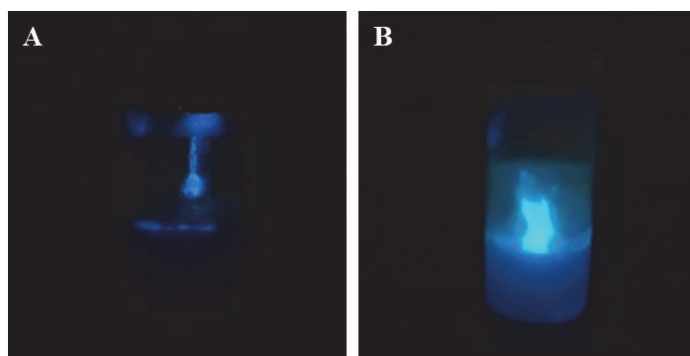


图4 “蓝色雨”“蓝色火焰”实验现象

### 2.4.4 爆炸盐中过氧化物含量的测定

在碱性溶液中，Cr(III)可以催化鲁米诺-过氧化氢，产生最大波长为425 nm的化学发光反应。发光强度与过氧化氢浓度在 $10^{-5}$ – $10^{-6}$  mol·L<sup>-1</sup>范围内呈线性关系。利用化学发光分析仪(如图5所示)对“爆炸盐中过氧化物含量”进行测定。

#### (1) 医用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的测定<sup>[11]</sup>。

采用氧化还原滴定法标定出医用过氧化氢的浓度，表3为标定结果。用吸量管吸取10.00 mL质量分数3%医用过氧化氢置于250 mL容量瓶中，加蒸馏水稀释至刻度，摇匀备用。准确移取25.00 mL溶液置于250 mL锥形瓶中，加入10 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液，用KMnO<sub>4</sub>标准溶液滴定至终点。

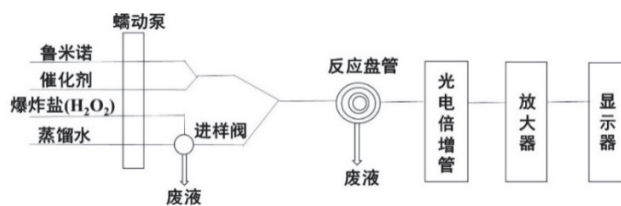


图5 流动注射化学发光分析仪示意图

表3 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的测定

项目	1	2	3
KMnO <sub>4</sub> 的浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	0.02763	0.02763	0.02763
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 的体积/mL	25.00	25.00	25.00
KMnO <sub>4</sub> 的体积/mL	10.00	10.01	9.98
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 物质的量浓度/(mol·L <sup>-1</sup> ) 测量值	0.02763	0.02766	0.02758
平均值		0.02762	
偏差 /(mol·L <sup>-1</sup> )	0.00001	0.00004	0.00004
平均偏差/(mol·L <sup>-1</sup> )		0.00003	
相对平均偏差/%		0.1	

根据实验数据计算未经稀释的医用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的物质的量浓度，公式如下：

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}_2\text{的含量} &= c \times F \\ &= 0.02762 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \times (250 \text{ mL}/10 \text{ mL}) = 0.69 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \end{aligned}$$

式中， $c$ 为质量分数3%医用过氧化氢稀释后的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>物质的量浓度； $F$ 为稀释倍数。计算得到未经稀释的医用双氧水中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的含量为0.69 mol·L<sup>-1</sup>。

(2) 系列H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>标准溶液的配制。

将3%医用过氧化氢(0.69 mol·L<sup>-1</sup>)加水稀释成 $7.0 \times 10^{-5}$  mol·L<sup>-1</sup>的标准溶液。准确移取 $7 \times 10^{-5}$  mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>标准溶液2.0、4.0、6.0、8.0 mL分别置于50 mL容量瓶中，并加入5.0 mL EDTA ( $1.0 \times 10^{-2}$  mol·L<sup>-1</sup>)，加水稀释至刻度，摇匀，此系列标准溶液中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的浓度分别为2.8、5.6、8.4、11.2 μmol·L<sup>-1</sup>。

(3) 爆炸盐溶液的配制。

用电子分析天平称取0.5015 g爆炸盐固体，加水溶解，将溶液转移至50 mL容量瓶中，定容、摇匀。将其稀释10<sup>3</sup>倍，取已稀释好的溶液7 mL置于50 mL容量瓶中，并加入5.0 mL EDTA ( $1.0 \times 10^{-2}$  mol·L<sup>-1</sup>)，加水稀释至刻度，摇匀。

(4) 鲁米诺溶液的配制。

鲁米诺储备液的配制：准确称取0.1771 g鲁米诺，用2 mL 1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH稀释，转移至1000 mL容量瓶中，加水定容。

鲁米诺工作液的配制：量取250 mL鲁米诺储备液于1000 mL烧杯中，加入100 mL  $1.0 \times 10^{-2}$  mol·L<sup>-1</sup> EDTA、8.4 g NaHCO<sub>3</sub>、60.0 g KBr和500 mL水，用1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH调节溶液pH至12，转移至1000 mL容量瓶中，定容。

(5) 催化剂的配制。

准确称取0.7696 g Cr(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O，溶于少量水中，加几滴HCl，转移至1000 mL容量瓶中，加水定容，摇匀。将其稀释配制成 $1.0 \times 10^{-4}$  mol·L<sup>-1</sup>的溶液。

(6) 过氧化物含量的测定。

对系列H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>标准溶液进行发光强度的测定，测量结果如图6A所示；据此绘制标准曲线，如图6B所示。然后将爆炸盐溶液的发光强度代入标准曲线，得到稀释后的溶液浓度；根据稀释倍数关系，再计算出爆炸盐中过氧化物含量。

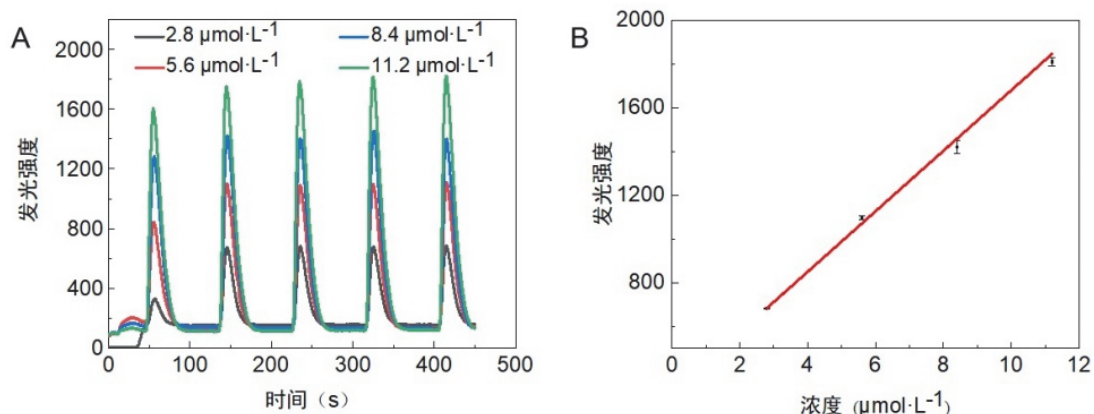


图6 化学发光分析仪测量H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>标准溶液发光强度与时间的曲线(A)及发光强度与过氧化氢浓度的标准曲线(B)

在选定实验条件下，H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>标准溶液浓度与发光强度呈线性关系，标准曲线方程为 $y = 132.42x + 325.33$ ，相关系数 $R^2 = 0.998$ 。测出来的稀释后样品发光强度为1291.67，即浓度为7.298 μmol·L<sup>-1</sup>。经如下公式计算得到，爆炸盐中过氧化物的质量分数为17.68%。

$$\begin{aligned} \text{爆炸盐中过氧化物质量分数} &= \frac{m_{\text{过氧化物}}}{m_{\text{实际重量}}} = \frac{c \cdot V \cdot M_{\text{过氧化氢}}}{m_{\text{实际重量}}} \times F \times 100\% \\ &= \frac{7.298 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 50.00 \text{ mL} \times 34.01 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{0.5015 \text{ g}} \times \\ &\quad \frac{50.00 \text{ mL} \times 1000}{7.00 \text{ mL}} \times 100\% = 17.68\% \end{aligned}$$

### 3 科普展示和互动方案

#### 3.1 科普地点及对象

本科普实验展示方式多样，对实验地点和装置等条件要求低，具有很高的实践性。根据实验参与人员的年龄、受教育程度及科普的预期效果，将参与人员划分为幼儿园小朋友和小学生群体、初中生、本科生、社会大众四个群体，并设计了不同的方案梯度科普化学发光。

#### 3.2 梯度科普内容与展示

##### 3.2.1 幼儿园小朋友和小学生群体

科普实验地点：通风效果好的地方

展示对象：幼儿园小朋友

展示内容：“发光的‘水晶宝宝’”“让画‘活’起来”

互动形式：观看视频+志愿者讲解+动手实验

科普展示与互动(图7)：

(1) 观看视频：播放萤火虫趣味小动画，结合视频讲解化学发光知识；

(2) 互动方案：让小朋友们亲自动手做趣味实验，发挥想象在卡纸上作画，激发小朋友们的兴趣与好奇心；

(3) 现场实验：将稀释的84消毒液倒入许愿瓶中，观察现象；将小朋友们画好的画粘贴好，在离心管内装好鲁米诺溶液，滴加稀释的84消毒液，观察现象；

(4) 实验体会：认识化学发光，感受化学之趣。



图7 向小朋友们科普“化学发光”的现场互动照片

### 3.2.2 初高中生群体

科普实验地点：教室

科普对象：初高中生

展示内容：“蓝色雨”“蓝色火焰”

互动形式：志愿者讲解+小组讨论+分组实验+思考讨论

科普展示与互动：

(1) 知识讲解：讲解化学发光的相关知识，掌握最常见的发光试剂——鲁米诺，让其认识化学结构式；

(2) 小组讨论：分子的结构决定性质，根据鲁米诺的化学结构式小组讨论设计出自己心中的卡通形象，提高同学们的参与度，我们从中选取了一组进行展示，如图8所示；

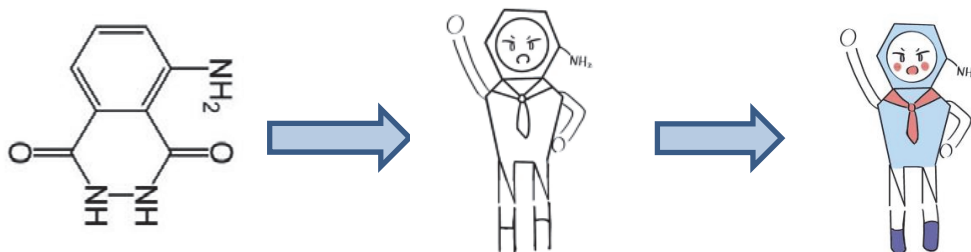


图8 卡通形象衍化过程

(3) 分组实验：按照不同浓度的84消毒液进行分组实验，观察实验现象(如图9所示)；

(4) 思考讨论：思考添加油层的目的及产生不同实验现象的原因。

### 3.2.3 本科生

科普实验地点：实验室

科普对象：专业背景的本科生

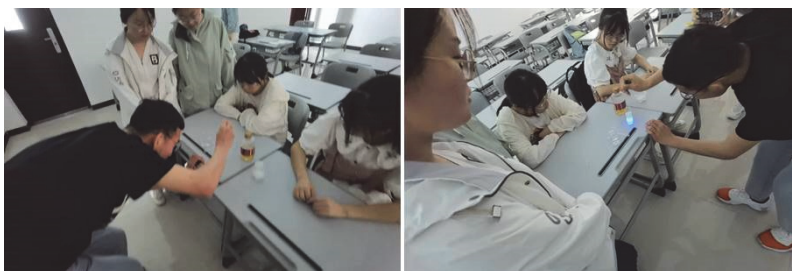


图9 中学生进行“蓝色火焰”实验的现场照片

展示内容：化学发光的原理、化学发光分析仪的使用

互动形式：志愿者讲解+现场实验+思考讨论

科普展示与互动：

(1) 知识讲解：了解化学发光分析法的基本原理，讲解流动注射化学发光分析仪的操作技术。

(2) 现场实验：利用标准曲线法，分析爆炸盐中过氧化物的含量。如图10所示，将流动注射化学发光分析仪中各导管插入到相应的溶液中，启动测量，观察发光强度的变化。

(3) 思考讨论：比较化学发光法与其他分子发光分析法有哪些区别，阐明化学发光分析的基本原理。



图10 本科生实验现场照片

### 3.2.4 社会大众

科普实验地点：线上

科普对象：社会大众

展示内容：化学发光现象、化学发光的认知误区、化学发光的用途

互动形式：观看实验视频(附互动题目+讲解)

科普展示与互动：

(1) 提问：生活中常见的荧光棒、萤火虫发光，属于化学发光还是荧光？

(2) 知识讲解：认识化学发光的概念；“发光的水晶宝宝”“蓝色雨”“蓝色火焰”实验现象展示。

(3) 联系生活：刑事侦查、新冠病毒抗体检测试剂盒等应用化学发光法(如图11所示)。



图11 应用化学发光的实例<sup>[12]</sup>

## 4 结语

利用鲁米诺体系进行的化学发光科普实验,原料安全(可用生活常见易得的用品代替实验室药品)、效果显著(实验发光现象显著,具有一定的观赏性、趣味性)、实践性强。尤其是低龄及中学生开展的科普实验可以很好地进行现场展示,和受众互动效果好;在专业本科生深入学习化学发光时,在实验情境设置上,以解决实际问题入手展开讨论,使理论知识与实践相结合,深刻领会知识在解决专业问题方面展现的魅力。总之,针对不同层次人群的知识储备特点,通过梯度设计系列科普实验内容和活动过程方案,帮助大众了解和正确认识化学发光现象,展示了化学之美、化学之趣,有效促进培养和提升大众群体的理性思维和科学素质。

## 参 考 文 献

- [1] 陈效兰. 鲁米诺化学发光体系的增强研究及其相关应用[博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [2] 吴子良, 黄建业, 彭文生, 廖明庆. 广东公安科技, **2022**, No. 1, 54.
- [3] Ge, S.; Zhao, J.; Wang, S.; Lan, F.; Yan, M.; Yu, J. *Biosens. Bioelectron.* **2018**, *102*, 411.
- [4] Miao, S. S.; Wu, M. S.; Ma, L. Y.; He, X. J.; Yang, H. *Talanta* **2016**, *158*, 142.
- [5] 黄东流, 佟贺丰, 王超英. 科普研究, **2013**, *47* (8), 67.
- [6] 蒋灵斌. 中国科技教育(观察), **2024**, No. 2, 6.
- [7] 李覃, 杨可昕, 杨清林, 朱湘锦, 韩晓乐, 黄涛. 大学化学, **2024**, in press. doi: 10.3866/PKU.DXHX202309059
- [8] 马媛媛, 韩占刚, 张硕, 高一凡, 张霏璇. 大学化学, **2023**, *38* (4), 199.
- [9] 于博荣, 杨莉丽, 张慧姣, 黎梅, 韩占刚. 广州化工, **2021**, *49* (8), 189.
- [10] 艾璐. 化学教学, **2007**, No. 9, 44.
- [11] 申金山, 邢广恩, 段书德. 化学实验(上). 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [12] 化学发光新冠病毒试剂盒研制成功: 采血检测, 22分钟出结果. [2024-03-27]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_5914199](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_5914199)