

五彩斑斓的秘密——物质显色机理

张驰, 徐艺, 郭小鹏, 揭子安, 李玲*

湖北大学化学化工学院, 武汉 430062

摘要: 物质颜色与化学结构的关系密不可分。通过科普物质显色机理, 能够有效改善大众对化学的认识。本科普实验选择我国传统植物染作为载体, 设计了提取天然色素、模拟非物质文化遗产——香云纱过乌工艺、显色法鉴定铁元素等分层实验活动。通过互动实验体现化学的趣、美以及科学性; 同时也展示传统文化魅力, 促进科学与文化的融合传播。

关键词: 色彩; 中国古代植物染; 配位化合物; 科普实验

中图分类号: G64; O6

The Vibrant Secrets: Mechanism of Coloration in Materials

Chi Zhang, Yi Xu, Xiaopeng Guo, Zian Jie, Ling Li*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China.

Abstract: The color of materials is intrinsically linked to their chemical structures. By exploring the mechanism behind material coloration, we can enhance the public's perception of chemistry. This article uses traditional Chinese plant dyeing as a focal point to design layered experimental activities, including the extraction of natural pigments, the simulation of the intangible cultural heritage process of Xiangyunsha dyeing, and the colorimetric identification of iron elements. These interactive experiments showcase the beauty, intrigue, and scientific foundation of chemistry, while simultaneously highlighting the allure of traditional culture, fostering the fusion and dissemination of science and heritage.

Key Words: Coloration; Traditional Chinese plant dyeing; Coordination compounds; Popularization of science

人类对色彩的感知往往更加强烈, 因而基于色彩的实验非常适合向公众进行化学科普。以色彩为载体进行化学科普, 对科学原理进行可视化呈现, 可以加强带入感, 纠正一些对化学的偏见和误解。

物质的显色机理在化学学科的相关专业教材和学术著作中多有涉及。这种方式虽然清晰地阐释了科学原理, 但是对于普通公众而言难免晦涩难懂。近些年, 以“色彩”为主题的科普论文和网络短视频层出不穷。受限于文章篇幅或视频时长, 该种科普方式往往聚焦于某一类物质(如天然色素^[1-4])的显色原理。此外, 化学工作者们还尝试了一些创意十足的科普活动。例如, 北京大学化学国家级实验教学示范中心开发了一款以“颜色背后的化学”为主题的用于科普的实物展架^[5]。南方科技大学化学系举办了十周年校庆系列展“蓝晒×生命”科普艺术展^[6]。这些实物展览从艺术、哲学、科学相融合的角度, 极大地激发了公众对化学的兴趣。

我国传统植物染有着悠久的历史。古代科学巨著《天工开物》中写道“霄汉之间云霞异色, 阎

浮之内花叶殊形。天垂象而圣人则之，以五彩彰施于五色”^[7]。早在先秦时期，人们就开始从御寒蔽体的织物上，尝试用不同的色彩和图案来表达爱好与思想。染料植物种类繁多，分布广袤。正因如此，我国传统植物染工艺体系的发展还具有明显的区域差异。这不仅美化了人们的生活，也诞生了形形色色的文化瑰宝，孕育了灿烂的丝绸文化。但这些传统染色技艺中所涉及的“显色”原理对非化学专业的人来说，却相对陌生。因此，本科普活动以中华传统植物染为载体，设计分层实验，让古代匠人的智慧和传统文化的魅力通过化学原理得以传播。

实验通过从日常中常见的瓜果、蔬菜、花草中提取天然色素，既可以拉近化学与生活的距离，也可以启发人们思考其背后的科学原理，能够更加辩证地认识古人朴素的生产实践，增强文化认同。在此基础上，以极具区域特色的中国传统面料——香云纱为例，科普香云纱染整过程中的过乌原理^[8]。该实验既可以深化人们对“微观结构决定宏观性质”这一化学学科的底层逻辑的认识，也能体现颜色在分析化学中的重要作用。为了达到更好的科普效果，让更广泛的群体能够深刻地理解中华优秀传统文化，我们还进行了梯度科普方案的设计。对于中小学生，实验过程中五彩斑斓的颜色，有利于激发他们对化学世界的兴趣，改变对传统化学学科的固有印象。而对于有一定化学基础知识的人群，则重在启发他们思考不同物质的显色原理，实现实践与专业理论相结合。此外，通过本实验科普，希望受众能更多地关注中华优秀传统文化，增强民族自豪感。

1 实验部分

1.1 实验原理

1.1.1 “草木之花，染为文章”——天然色素

在大自然中存在着种类众多的天然色素(图1)^[2]，是传统植物染的广泛来源。在我们日常生活中的瓜果蔬菜里也可以提取到很多天然色素。例如，成熟番茄中的番茄红素；橘子中的 β -胡萝卜素；紫甘蓝中的花青素；薯蓣中的缩合单宁酸。这些色素分子的显色是基于从HOMO到LUMO的电子跃迁。分子结构中单双键交替越多，共轭体系越大，电子发生 $\pi-\pi^*$ 跃迁所需要的能量就越小，对可见光就会发生不同的吸收。未被吸收的光经过大脑的主观感知，就成为了我们眼睛看到的不同颜色。

当这些色素的微观结构发生时，其宏观显示的颜色往往也会随之发生变化。最具代表性的就是例子就是从紫甘蓝中提取出的花青素。向其中分别加入家庭中常见的柠檬酸(除垢剂)、小苏打(洁牙粉)等，可以观察到水溶液在不同pH下的颜色变化。其科学原理正是溶液pH使得花青素的结构发生转化，进而改变了对可见光的吸收(图2)^[3]。

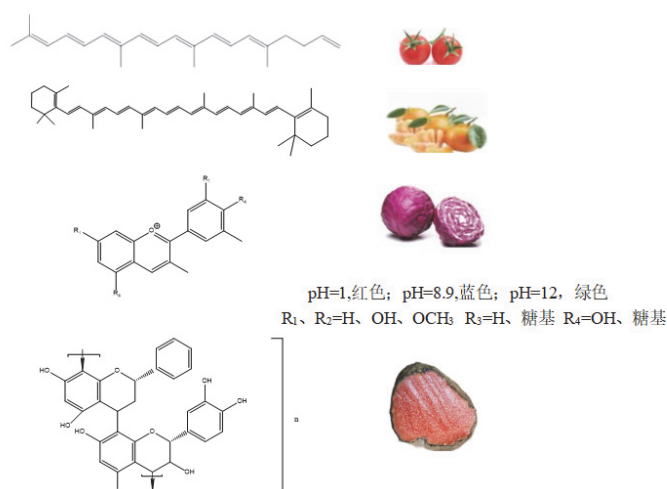


图1 天然色素结构

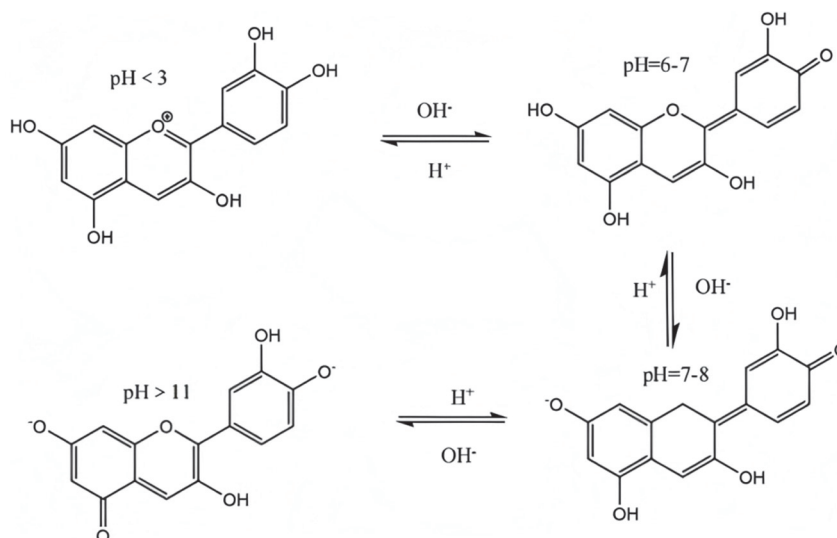


图2 花青素变色原理

1.1.2 “随方制象，各有所宜”——双面异色的香云纱

在香云纱的传统染整工艺中，从薯蓣中提取出的天然色素对布料进行染色是第一道工序。接着，需要使用河泥对布料进行单面涂抹，从而使得布料一面保持棕色，而另一面乌黑发亮。这种颜色上的变化同样是基于物质微观结构的改变。使用河泥涂抹后，薯蓣色素缩合单宁先与 Fe^{2+} 形成浅色溶解态(缩合单宁- $\text{Fe}(\text{II})$ 配合物)。该络合物进一步被空气氧化形成黑色沉淀态缩合单宁- $\text{Fe}(\text{III})$ 配合物。然而，如果薯蓣色素与 Fe^{3+} 直接接触则会生成土黄色沉淀^[9]。

配位化合物是由中心原子或离子和几个配体分子或离子以配位键相结合而形成的复杂化合物。在中国古代植物染中，加入金属盐与染料分子发生化学反应，从而让色素以配位化合物的形式附着在纤维上是一种常见的改色、固色的方法^[10]。大多数过渡金属离子具有未充满的 d 原子轨道，在配体的负电场作用下发生能级分裂，产生一定的能量差。因此，在选择性吸收某一波长的光后，电子从低能级 d 轨道跃迁到高能级 d 轨道(例如三草酸合铁^{III}酸钾 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$)。除此之外，在配位化合物中还存在从配体到金属(例如硫氰化铁^{III} $\text{Fe}(\text{SCN})_3$)；从金属到配体(例如三邻菲罗啉合铁(III)离子 $[\text{Fe}(\text{phen})_3]^{2+}$)；从金属到金属(例如普鲁士蓝 $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$)的多种形式的电荷迁移，从而使得配位化合物具有丰富的颜色(图3)。

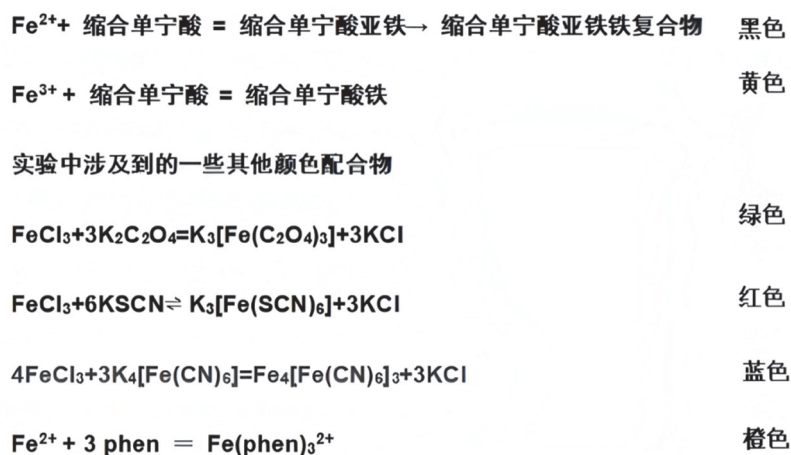


图3 配位化合物的生成

1.1.3 “师法自然，天人合一”——化学中的颜色应用

人们对自然的认识、对客观规律的运用发掘出了丰富的色彩，孕育了灿烂的中华文明。而这些绚丽的颜色也伴随着社会的发展，被化学家们赋予了新的价值，成为了化学学科的标志之一。物质间相互接触所产生的特征颜色，被广泛地用于物质鉴定、医药分析、环境监测等多个领域。

在破解香云纱染色的科学原理过程中，为了分析所使用的河泥以及面料中乌黑色沉淀物中的铁的存在形态，可以通过邻二氮菲分光光度法对铁元素含量进行测定(图4)。利用的就是邻二氮菲与亚铁离子所生成的配合物具有特征的橘黄色。

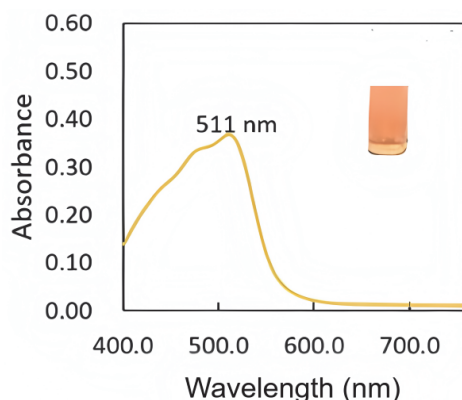


图4 Fe(II)-邻二氮菲紫外可见吸收光谱^[2]

1.2 试剂与材料

本实验所用试剂见表1；居家实验材料为市售番茄、橙子、紫甘蓝、薯蓣、菠菜等。

表1 实验所用试剂

仪器	型号	公司
紫外可见分光光度计	UV-3600	日本岛津
紫外灯	3535-9z	中山市中山极固照明
电子天平	JJ124BF	常熟市双杰测试仪器厂
水浴恒温振荡器	THZ-82A	上海新诺仪器集团有限公司
高速离心机	TGL-16C	上海安亭科学仪器厂

1.3 实验仪器

本实验所用仪器见表2。

表2 实验所用仪器

主要试剂	规格	生产厂家
FeCl ₂	纯度99.5%	上海麦克林生化科技股份有限公司.
K ₄ [Fe(CN) ₆]-3H ₂ O	纯度≥ 99.5%	国药集团化学试剂有限公司
C ₁₂ H ₈ N ₂ ·xH ₂ O	纯度99%	国药集团化学试剂有限公司
K ₂ C ₂ O ₄ ·H ₂ O	纯度99.8%	上海阿拉丁生化科技有限公司
FeCl ₃ ·6H ₂ O	纯度99%	上海阿拉丁生化科技有限公司
KSCN	纯度99%	上海阿拉丁生化科技有限公司

1.4 实验步骤

1.4.1 提取天然色素

(1) 居家条件下提取番茄、橙子、紫甘蓝中的色素。具体步骤为：将瓜果洗净、晾干、切碎，倒入温水中。充分碾压后，静置1 h。用双层纱布过滤，得到三种提取液。然后向两份花青素提取液中，分别加入少量的柠檬酸除垢剂、小苏打洁牙粉后，观察颜色的变化(图5)。



图5 居家实验提取天然色素

(2) 实验室中，取新鲜薯蓣块茎约5 g，去皮切成小块，装入烧杯中，加入一定量蒸馏水没过薯蓣。随后将烧杯置于水浴锅中，60 °C恒温2 h。过滤除去上清液中残渣，收集滤液(图6)。

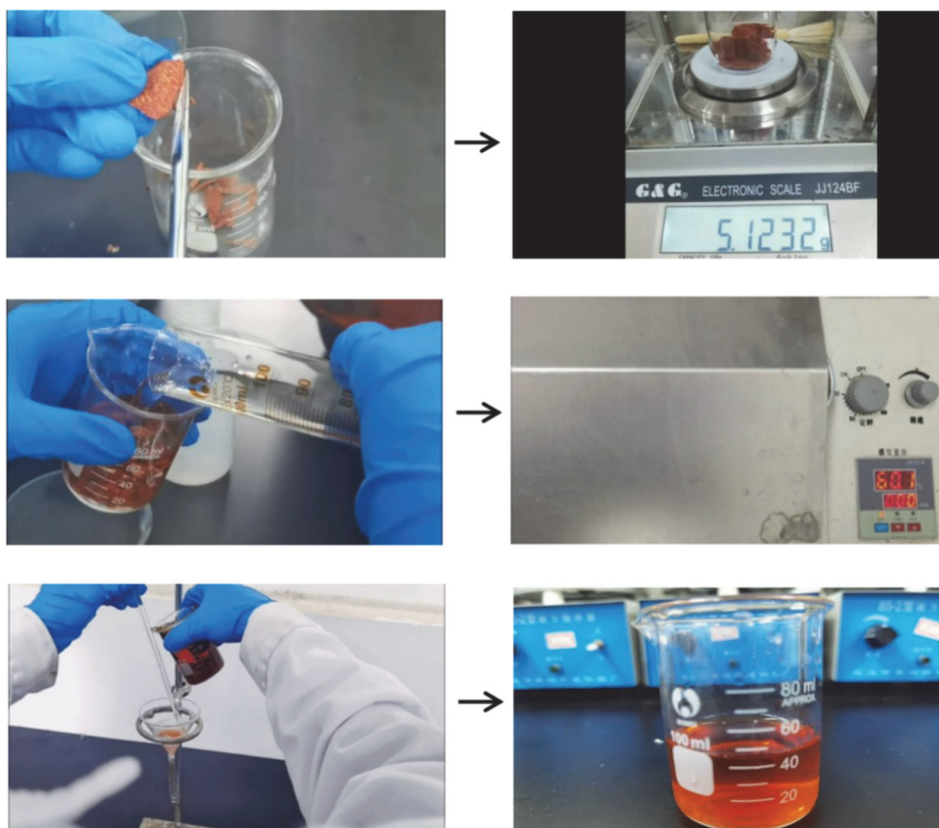


图6 薯蓣色素的提取过程

1.4.2 制备多彩配合物

(1) 以体积比5:1的用量,向薯蓣液中加入 $0.16\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 FeCl_2 溶液,出现可溶性黑色溶液(①组);加入等浓度的 FeCl_3 溶液,出现深土黄色沉淀(②组)。静置一段时间后,如图7所示,①组开始生成可溶性的单宁酸- $\text{Fe}(\text{II})$,随着在空气中的逐渐氧化,最后生成黑色沉淀。②组始终为土黄色,无新沉淀生成。

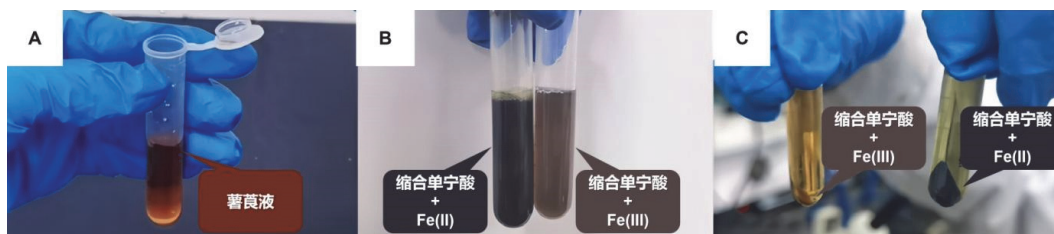


图7 薯蓣色素(A)以及其色素分别与 Fe^{2+} 离子(B)、 Fe^{3+} 离子(C)的配位显色

(2) 配制 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 FeCl_3 溶液与 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 溶液,取2 mL FeCl_3 溶液于5 mL聚乙烯(PE)管中,缓慢滴入3 mL $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 溶液,振荡,溶液呈绿色(图8A)。

(3) 配制 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 FeCl_3 溶液与 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KSCN ($\text{pH} = 6.90$)溶液,向5 mL PE管中加入3 mL去离子水,加入1 mL FeCl_3 ($\text{pH} = 1.88$)溶液,滴入3滴 KSCN 溶液,振荡,溶液呈血红色(图8B)。

(4) 配制 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 FeCl_3 溶液与 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液,向5 mL PE管中加入3 mL去离子水,加入1 mL FeCl_3 溶液,缓慢滴入3滴 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液,振荡,溶液中迅速产生大量蓝色沉淀,离心后取上层清液备用(图8C)。

(5) 3 mL蒸馏水于PE管,加入1 mL浓度为 $27.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ FeCl_2 溶液,加入0.5 mL的 HCl 溶液,加入醋酸-醋酸钠缓冲溶液调节 pH 至4-5,滴入几滴0.5%的邻二氮菲溶液,振荡,溶液呈橙色(图8D)。

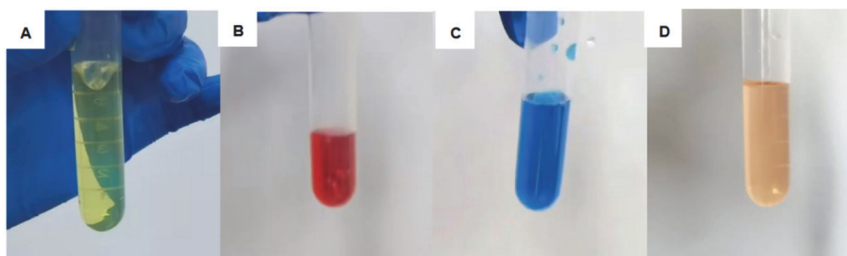


图8 多种配合物的颜色

(A) $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$; (B) $[\text{Fe}(\text{SCN})_3]$; (C) $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$; (D) $[\text{Fe}(\text{phen})_3]^{2+}$

1.4.3 显色法测铁

将上述1.4.2小节(1)中薯蓣与 Fe^{2+} (①)、 Fe^{3+} (②)的两组溶液离心,取得上清液与沉淀备用。在分光光度计上,用1 cm比色皿,以空白溶液为参比,在400-760 nm波长范围内,绘制吸收曲线(图9)。结果表明,①号溶液在450、650 nm多处吸收,且在整个可见光区具有较宽的吸收,因此呈现黑色;②号溶液的最大吸收峰为495 nm,溶液呈现它的互补色——土黄色。

利用邻二氮菲分光光度法进一步确定薯蓣色素与 Fe^{2+} 最后形成黑色沉淀过程中 Fe^{2+} 价态与含量的变化。实验分为两步完成。首先对铁标准曲线进行测量,取用一定量的 FeCl_2 溶液($27.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)于100 mL烧杯中,加水定容至50 mL,配制得到浓度分别为1.00、2.00、4.00、8.00 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的系列待测液。向待测液中依次加入1 mL盐酸羟胺、5 mL醋酸-醋酸钠缓冲液,调节 pH 至4-5,加2 mL邻二氮菲溶液(0.5%)。放置10 min,以水为空白参比,测510 nm处的吸光度。以吸光度为纵坐标,铁含量($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)为横坐标,绘制标准曲线(图10)。

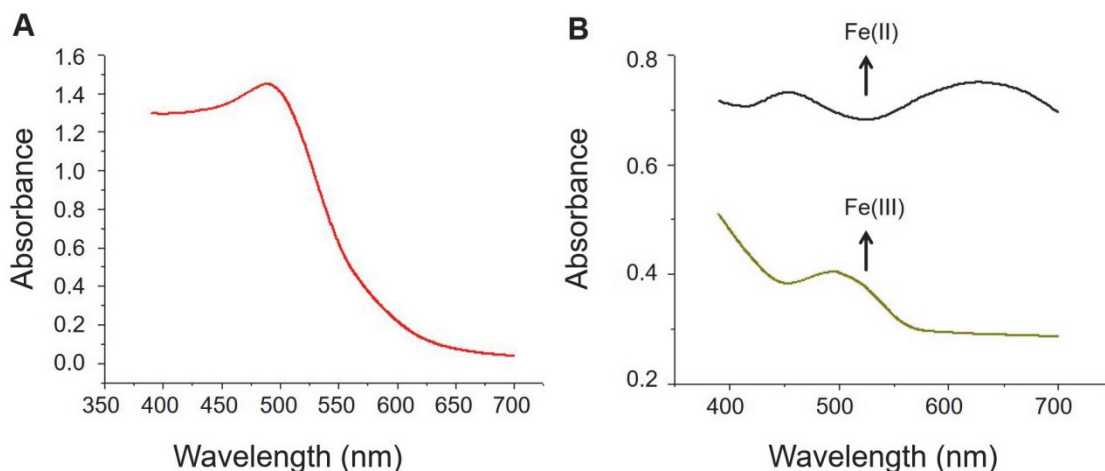


图9 薯蓣色素(A)、薯蓣色素分别与Fe²⁺离子、Fe³⁺离子(B)的吸收曲线

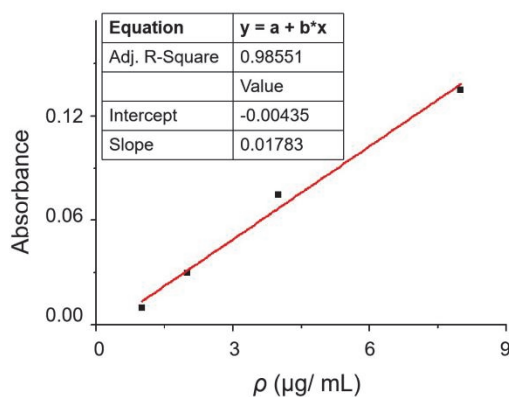


图10 不同含量铁标准液的吸光度曲线

分别取样品上清液0.4 mL、加入0.1 mL邻二氮菲和0.5 mL HCl, 以及取样品上清液0.4 mL, 加入0.1 mL邻二氮菲和0.5 mL盐酸羟胺, 然后分别测定510 nm下吸光度。代入线性方程获得样品中亚铁、总铁的对应含量, 三价铁含量用总铁含量减去亚铁含量(图11)。结论: 产品中二价铁、三价铁含量之比约为1:2, 符合文献数据^[9]。据此可以推测香云纱的过乌工艺原理为: 由缩合单宁酸与二价铁反应形成可溶性物质, 再被氧化为三价铁络合物。

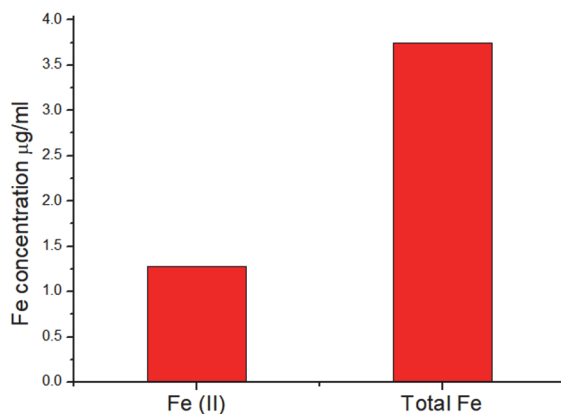


图11 显色法测定香云纱过乌样品中的铁元素价态含量

2 科普展示和互动方案

2.1 展示地点

线下：室外宽阔的场所如公园、广场等。

线上：直播平台抖音、哔哩哔哩等，同时可以录制成视频上传学习。

受到前段时间疫情的波动，网络课堂、网络学习等受到人们广泛关注。利用网络资源，可以充分扩大学习范围，让更多的人参与其中。

2.2 展示对象

依据知识背景主要分为三个部分，即小学及以下儿童、中学生、大学生。市民群众可利用网络资源或线下依据自身背景选择参与。

2.3 展示形式

观众现场实验操作；志愿者讲解与互动。

2.4 互动方案及志愿者讲解

本科普实验遵循逐步深入的递进原则，实现模块化、多样化，可满足不同化学知识储备人群的科普需求。另外，通过利用互联网资源，可实现融合教学。具体方案如下：

(1) 面向幼儿园和小学生：动手实验天然色素的提取。

准备薯蓣、菠菜、萝卜、火龙果等有色瓜果蔬菜，通过机械压榨等方式(可配备榨汁机或者研磨器具)，收集汁液，过滤去除杂质得到包含有其中色素的混合溶液。同时准备一些染布、模具，利用收集得到的不同颜色溶液，让小朋友绘制不同的图案(图12)，在动手中实际体验。

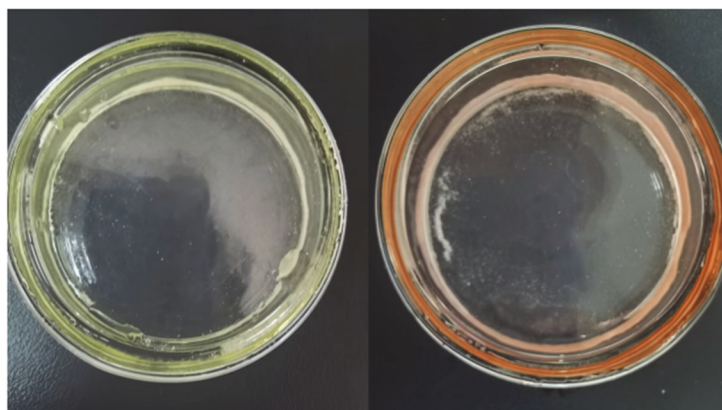


图12 瓜果色素附着在聚丙烯酸钠材料示意图

【提问】小朋友们这里一共有几种颜色呀？为什么不一样的蔬菜水果颜色不同呢？

【解答】不同种类的瓜果颜色不同是因为其中蕴含的化学物质不同。如菠菜汁含有叶绿素、胡萝卜中含有胡萝卜素、薯蓣中也有薯蓣色素。

【提问】小朋友们染布时有没有遇到特别困难的问题呢？

【解答】在染布过程中，植物中提取的天然色素很容易脱落，导致印染效果不佳，原因是色素分子与布料大多数是简单的物理吸附作用，作用力弱因而容易脱落。因此纯植物染料在现代服饰工艺中应用很少，需要一些其他化学结合的色素分子和特殊结合工艺。

(2) 面向中学生：动手实验铁盐配合物的制备、显色法测定铁元素等。

利用小朋友组提取以及预先准备的薯蓣色素溶液，分别加入 FeCl_3 、 FeCl_2 ，观察颜色变化。也可以现场根据所提供的化学试剂合成： Fe(III) 与草酸根配合形成绿色溶液—— $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ ； Fe(III) 与硫氰酸根配合形成红色溶液—— $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{SCN})_6]$ ； Fe(III) 与亚铁氰化钾配合形成蓝色溶液——

$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ，并利用配合物的颜色对铁元素进行鉴定。例如，向菠菜色素提取液中加入硫氰化钾，验证菠菜中含有铁元素的价态。

【提问】生活中，我们常常听说菠菜补铁。通过大家的实验，这个说法正确吗？

【解答】人体需要的是二价铁。我们向菠菜汁中加入硫氰化钾溶液，溶液不变色。向其中一份加入硝酸氧化，溶液变为橙色，这是因为络合物的红色受到了菠菜汁的绿色的影响。这说明菠菜中含有的是二价铁，菠菜可以补铁。但是菠菜中铁的含量较少，对于缺铁性贫血症患者，建议服用补铁剂。

(3) 面向大学生：利用隐形墨水绘画等方式科普光学现象导致的颜色(图13)。

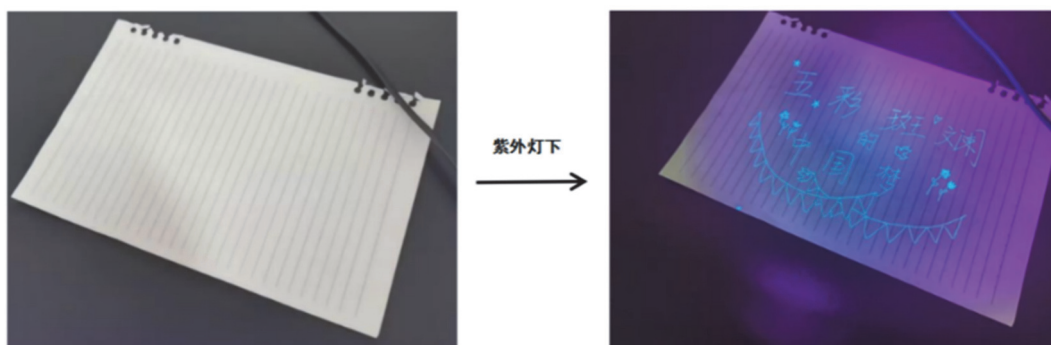


图13 荧光墨水的荧光激发

【提问】简述荧光是怎样产生的？

【回答】物质的分子吸收一定能量后，其电子从基态跃迁到激发态。激发态不稳定，在返回基态过程中可能会伴随光辐射，因而发光。值得提出的是，中间由于振动和内部转换，部分能量会以热能耗散，因此辐射出的光的波长往往更大一些。

(4) 面向社会大众：线上教学参与。

以网络为载体，在进行上述活动时同时进行线上直播，志愿者负责管理与互动。活动结束后，将其内容回放与实验室的操作解析视频分专题模块上传，通过留言形式沟通互动，解答疑惑。

3 结语

本实验以中国传统植物染为切入点，结合天然色素的提取、香云纱过乌工艺模拟实验、显色法鉴定铁的价态等科普受众可以直接参与的实验，让参与者亲身感受色彩背后的科学原理和生产生活中无处不在的化学知识。本实验步骤简单、互动性强，可充分展现“结构决定性能”“性能指导应用”的化学学科思想，在激发科普受众的科学兴趣的同时，也能加强人们的文化认同感，利于大家自觉践行文化传承。

4 特色

本科普项目相比于其他关于颜色的科普实验，具有以下创新点：

(1) 涉及的实验操作简单易行，对于不同年龄、文化层次的观众都可以参与其中。贴近生活，且兼具科学性与趣味性。

(2) 以中华传统植物染作为科普载体，既体现了传统文化中的科学原理，也能促进观众思考文化传承中创新的必要性。

参 考 文 献

- [1] 骆睿昊, 黄雁翀, 崔世勇, 方思敏, 吴红, 李玲玲, 王钰熙, 朱平平, 邵伟. 大学化学, **2019**, *34* (8), 81.
- [2] 荆琪, 张芯瑶, 高青原, 王文云, 冯清, 刘敏, 袁红玲. 大学化学, **2022**, *37* (9), 2205107.
- [3] 郭笑汝, 于小满, 张伊径, 卢忠林. 大学化学, **2023**, *38* (4), 124.
- [4] 郑童育, 李腾, 韩晓宇, 柴喻培, 赵可心, 刘全, 季晓晖. 大学化学, **2024**, *39* (5), 27.
- [5] 马锴果, 贾莉, 马艳子, 高珍, 李维红, 边磊, 黄军, 关玲, 徐烜峰, 赵浩. 大学化学, **2018**, *33* (7), 129.
- [6] 何绮婷, 张皓帆. 大学化学, **2021**, *36* (10), 2107107.
- [7] 宋应星. 天工开物. 钟广言, 注释. 广州: 广东人民出版社, 1976: 111.
- [8] 李哲阳, 马明波, 周文龙. 纺织学报, **2023**, *44* (2), 230.
- [9] 潘媛媛. 非物质文化遗产香云纱染整技艺机理解析及其河泥的微生物强化作用[博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [10] 李明, 李昭胤, 刘梦竹, 罗邵响. 大学化学, **2024**, *39* (5), 258.