DOI：10.19789/j.1004-9398.2024.06.010
文献引用：马骁，朱紫尚，张子涵，等.一种可推广的梯度科普实验设计：基于天然紫胶红色素酸碱变色原理[J].首都师范大学学报（自然科学版），2024，45（6）：89-96. MA X，ZHU Z S，ZHANG Z H，et al. A generalizable gradient popular science experiment design：based on the principle of acid-base discoloration of natural lac red pigment[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2024，45（6）：89-96.

一种可推广的梯度科普实验设计：基于天然紫胶红色素酸碱变色原理*

马　骁#，朱紫尚#，张子涵#，郭长彬**
（首都师范大学化学系，北京　100048）

摘要：为了设计一种绿色、安全且可推广的梯度科普实验，本文以天然紫胶红色素为研究对象，首先利用实验室常用试剂和家庭常用物品分别从中药材紫草茸中提取了紫胶红色素，对应命名为实验法和家庭法；其次对2种方法提取的紫胶红色素变色原理进行了验证；最后尝试面向不同年龄段的公众进行科普。实验法通过盐析法从紫胶中有效提取紫胶红色素，并初步验证了变色是基于紫胶红色素的酸碱电离平衡，可作为一种酸碱指示剂，具有强染色着色能力；其溶液在不同酸碱度下变色现象明显，酸碱度由低到高增加时，溶液颜色变化为黄色、橙黄色、橙色、橙红色、浅紫色到紫色。家庭法以实验法为基础，利用生活中具有类似物理化学性质的常见物品替代相应试剂，从中药材紫草茸中提取紫胶红色素，并验证变色反应。科普实验结果表明，利用天然紫胶红色素酸碱变色原理和染色剂，可以实现不同层次受众群的梯度科普实验。

关键词：紫胶红色素；酸碱指示剂；梯度科普；天然色素；染色剂
中图分类号：O629　　**文献标志码**：A

A generalizable gradient popular science experiment design：based on the principle of acid-base discoloration of natural lac red pigment*

MA Xiao#，ZHU Zishang#，ZHANG Zihan#，GUO Changbin**
（Department of Chemistry，Capital Normal University，Beijing　100048）

Abstract：In order to design a green，safe and generalizable gradient science popularization experiment，this study takes the natural pigment lac red pigment as the research object. Firstly，the lac red pigment was extracted from the Chinese medicinal material comfrey mushroom using the common reagents in the laboratory and substances in the family，which named laboratory method and home method，respectively. Secondly，the discoloration principle of lac red pigment extracted by two methods was verified. Finally，the science popularization was tried for the public of different ages. The laboratory method was to effectively extract lac red pigment from lac by salting out method，and preliminarily verified that the discoloration of lac red pigment was due to the acid-base ionization balance of lac red pigment. And the discoloration phenomenon of lac red pigment solution at different pH is obvious，and

收稿日期：2023-04-06
* 2022年度首都师范大学本科生科学研究与创业行动项目（318）；获得第三届全国大学生化学实验创新设计大赛“微瑞杯”华北赛区二等奖
# 第一作者，按姓氏笔画排序
** 通信作者：guocb@cnu.edu.cn

when the pH increases from low to high, the color of the solution changes to yellow, orange-yellow, orange, orange-red, light purple to purple. It can be used as an acid-base indicator with strong dyeing and coloring ability. Based on laboratory method, the home method used common substances with similar physical and chemical properties to replace the corresponding reagents, extracts lac red pigment from Chinese medicinal material comfrey, and verifies the discoloration reaction of lac red pigment. Therefore, the use of natural lac red pigment acid-base discoloration principle and dyeing agent can achieve gradient science popularization experiments for different levels of audiences.

Keywords: lac red pigment; acid-base indicator; gradient popular science; natural pigment; coloring agent

CLC: O629 **DC**: A

0 引 言

科普实验在科学普及和提升全民科学素养方面具有重要意义,同时也是学校教育有关中小学生综合素质培养的重要补充。因此设计一种绿色、安全且可推广的梯度科普实验对青少年的科学启蒙、全民科学普及和科学素养的提升具有重要意义。绿色是为了保证设计的实验对环境没有危害,不会造成资源浪费,符合绿色化学的要求;安全是保证实验不会损伤人体健康,同时不涉及复杂、有危险的操作;可推广是让缺少相关基础知识的大众参与,填补知识空白;梯度是针对不同层次的大众进行不同程度地科普。

食品加工行业使用的色素分为人工合成色素与天然色素2类[1]。前者主要是以苯和甲苯等芳香化合物为原料,通过有机反应合成[2];后者是一种天然产物,主要从植物、动物或微生物等中提取。与人工合成色素相比,天然色素无副作用和安全性高,因此开发和应用天然色素是近年来的热门话题[3]。目前常用的天然色素绝大部分都是来源于植物体内。白晓菲等[4]探究了花青素的变色效果,将其作为酸碱指示剂进行滴定实验,表明花青素在pH 1~14有明显的颜色变化,不同pH下区分度高,用作酸碱指示剂的效果与传统酚酞指示剂的效果相当,但花青素结构的不稳定性限制了其应用;Xiang等[5]研究了姜黄素的变色机理,表明随着pH值增大,其颜色从黄色变为橙红色,且姜黄素对还原剂的稳定性较好、着色性较强,但其耐光性、耐热性和耐铁离子性较差;梅梅等[6]关于紫草素的实验结果表明,紫草素在pH 5~9时呈玫瑰色,在pH 10~12时表现为蓝色到深蓝色的急剧变化,但其易受温度、光照等因素的影响而发生聚合,且在碱性条件下易降解。目前作为酸碱指示剂应用的天然色素多来源于植物,具有酸碱变化比较灵敏、着色能力较强等特点,同时会受光照、温度等因素的影响,甚至会出现降解[7]。与源于植物的天然色素相比,源于动物的天然色素不仅具有色素着色能力强、酸碱指示变化明显外,还具有对光、热等因素不敏感,且在酸性条件下稳定性强的特点。因此,本文以提取自紫胶虫的分泌物——紫胶红色素为研究对象,利用实验室常用试剂和家庭常用物品提取紫胶红色素,对应命名为实验法和家庭法,分析变色原理,并设计成科普小实验对公众进行梯度科普。

1 实验原理

1.1 紫胶红色素的化学结构

紫胶红色素在原胶中约占1.5%~3.0%,主要存在于紫胶虫体内,一般认为紫胶红色素在紫胶中可能以溶解于水的钠盐或钾盐存在,因此在紫胶加工过程中几乎完全被水洗出,紫胶红色素是水萃取物中最主要的物质。紫胶红色素呈酸性,是一种蒽醌衍生物,由紫胶色酸A、紫胶色酸B、紫胶色酸C、紫胶色酸D和紫胶色酸E共5种紫胶色酸组分混合组成[8],结构式如图1所示。张弘[9]通过超高压液相-质谱分离法检测了精制紫胶红色素样品,表明紫胶红色素中紫胶色酸A的相对含量最高为63.1%,其次是紫胶色酸B为23.5%,最后含有少量的紫胶色酸C、紫胶色酸D和紫胶色酸E,含量分别为8.8%、0.5%和2.2%。

1.2 提取原理

紫胶红色素在水中的溶解度较小,25 ℃时溶解度约为300 mg/L[10],由于紫胶红色素含有多个羧基和酚羟基,因此,在碱性环境下可转变为盐来增加溶解度,紫胶红色素盐析原理示意如图2所示。紫

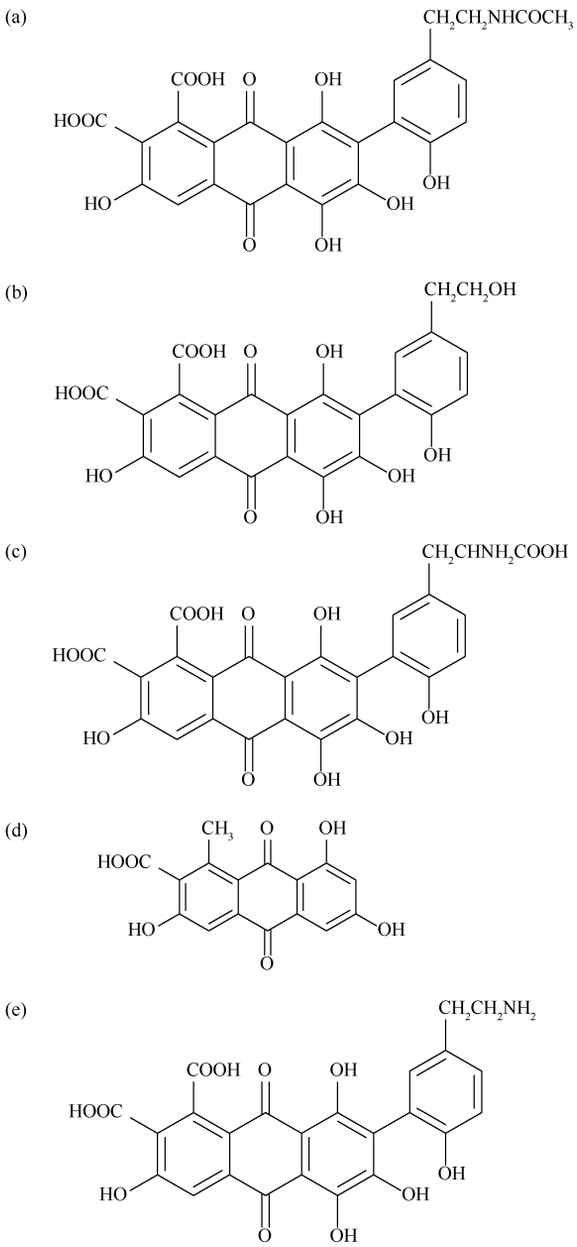


图 1　5种紫胶色酸的结构式

(a)紫胶色酸 A;(b)紫胶色酸 B;(c)紫胶色酸 C;(d)紫胶色酸 D;(e)紫胶色酸 E

胶原胶中的紫胶树脂对于紫胶红色素的包裹作用极强,水很难接触并溶解紫胶内部包裹的紫胶红色素。以NaCl为盐析剂加入到紫胶碱性水溶液中,增加电解质浓度可沉淀紫胶树脂,从而分离紫胶树脂与紫胶红色素。

1.3　变色原理

紫胶红色素在不同pH下呈现不同颜色,因此可用作简单的酸碱指示剂。紫胶色酸A在紫胶红色素中含量最多,不同pH时其颜色反应如图3所示。紫胶色酸A的蒽醌母环上含有多个酚羟基和羧基,在未电离时溶液的颜色为黄色;随着pH增加羟基和羧基逐步电离,溶液颜色变为橙红色;当羧基和羟基完全电离后,溶液颜色变为紫红色。羧基和羟基电离过程伴随颜色变化的实质是共轭体系逐步变大,电子从最高占据分子轨道(highest occupied molecular orbital,HOMO)向最低未占分子轨道(lowest unoccupied molecular orbital,LUMO)跃迁的能量差变小,对应化合物吸收的波长变大,所观察到的颜色是其互补色。另外,紫胶红色素的蒽醌母环上的3,4位都含有羟基,可以作为多齿配体与Fe^{3+}络合,形成环状紫色螯合物[11]。

2　实验部分

2.1　仪器

使用青岛聚创世纪公司生产的JC-UT2000型紫外-可见分光光度计测量溶液吸光度,最大吸收波长为800 nm;使用法国赛多利斯斯泰帝生物技术股份有限公司生产的Sartorius赛多利斯PB-10型酸度计测量溶液pH;使用美国奥豪斯仪器有限公司生产的AR3130型电子天平称样品质量;使用德国艾卡公司生产的集热式磁力搅拌器搅拌溶液;使用郑州长城科工贸有限公司生产的SHB-B95型循环水式多用真空泵抽滤。

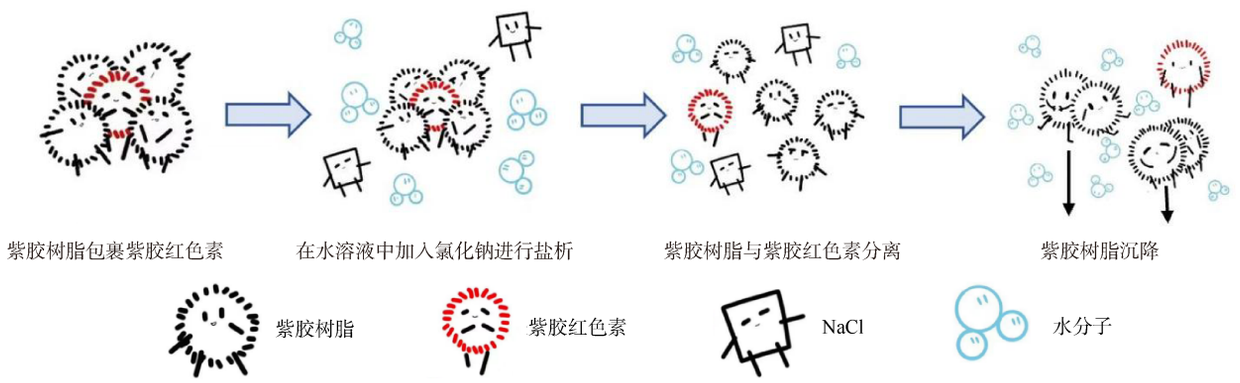


图 2　紫胶红色素盐析原理示意

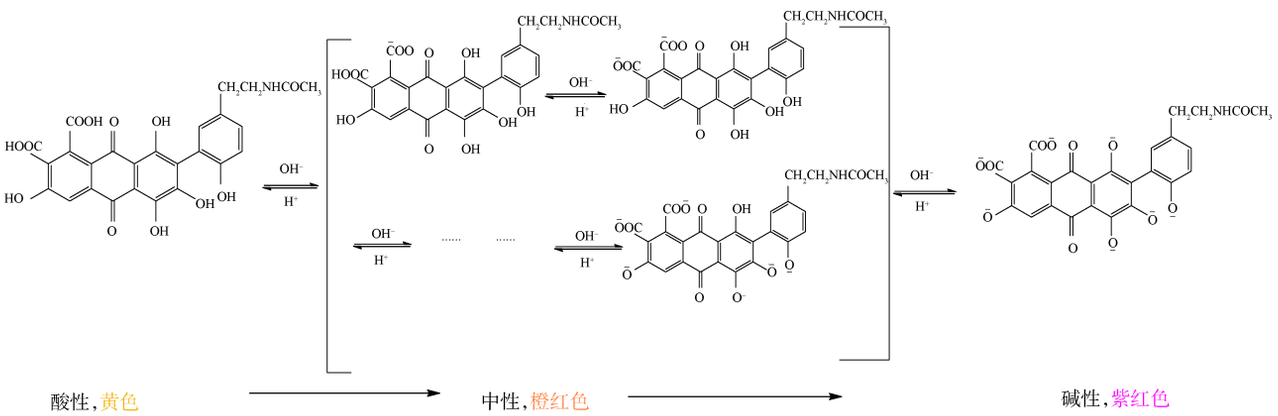


图3　紫胶色酸A作为酸碱指示剂的变色原理示意

2.2　原料与试剂

无水Na_2CO_3购自中国医药集团有限公司;36.0%HCl溶液、分析纯NaCl固体、分析纯NaOH固体购自北京市通广精细化工公司;分析纯$FeCl_3$固体购自北京化工厂;紫胶红色素固体购自梯希爱(上海)化工贸易有限公司;硅胶(200~300目)购自青岛海洋化工厂分厂;食用碱(苏打)、食盐、威猛先生洁厕灵、柠檬汁和菠菜汁均购自生活超市。实验法用水为超纯水,家庭法用水为购自屈臣氏的饮用纯净水。

2.3　配制标准溶液

分别配制0.1 mol/L的HCl(pH 1)和NaOH(pH 13)标准溶液,逐步稀释得到pH 3~11的标准溶液;称取0.01 g紫胶红色素,加入适量水溶解,转移至100 mL容量瓶定容,振荡摇匀,得到100 mg/L紫胶红色素溶液,备用。

2.4　吸光度检测

取3 mL上述不同酸碱度的标准溶液置于试管中,分别滴加3滴100 mg/L紫胶红色素溶液,摇匀,观察并拍照记录颜色变化情况;取1 mL上述溶液测量吸光度,扫描波长为200~800 nm。

2.5　实验法

称取1.99 g Na_2CO_3置于烧杯中,加入适量水溶解,转移至100 mL容量瓶定容,振荡摇匀,得到0.188 mol/L Na_2CO_3溶液;称取20.00 g碾碎的紫草茸,分数次加入上述Na_2CO_3溶液中,搅拌并在样品部分溶解后静置1 h;称取10.00 g硅胶,均匀铺在滤纸上,使用布氏漏斗抽滤,将滤液转移至100 mL茄形瓶中;加入9.64 g NaCl后搅拌,搅拌温度为25 ℃、搅拌速度为400 r/min、搅拌时间为25 min;再次抽滤,收集滤液(约120 mL)[12-14],待用。

取3 mL pH 1、pH 4、pH 7、pH 9、pH 11和pH 13的标准溶液置于不同试管中,分别滴加1滴上述滤液,观察并拍照记录颜色变化情况。

2.6　家庭法

家庭法提取紫胶红色素流程如图4所示。称取2.00 g食用碱搅拌溶于100 mL H_2O中,命名为苏打溶液;称取20.00 g紫草茸固体分多次加入上述苏打溶液中,搅拌,室温静置1 h;蒸笼布过滤,收集滤液;向滤液中加入10.00 g食盐,搅拌25 min;再次蒸笼布过滤,收集滤液,待用。

选取生活中不同pH的物品,如菠菜汁、洁厕灵溶液(洁厕灵和H_2O按1∶2的体积比稀释)、柠檬汁、10和20 g/L食用碱溶液,进行变色实验。分别取2 mL上述溶液加入5支试管中,均滴加2滴上述滤液,观察并拍照记录颜色变化情况。

2.7　梯度科普

不同年龄段人群对天然紫胶红色素的知识储备不同,因此本文划分了小学生、中学生和其他3种人群进行科普。每种人群的科普活动均包括理论科普和实践活动2个方面,具体设计如图5所示。

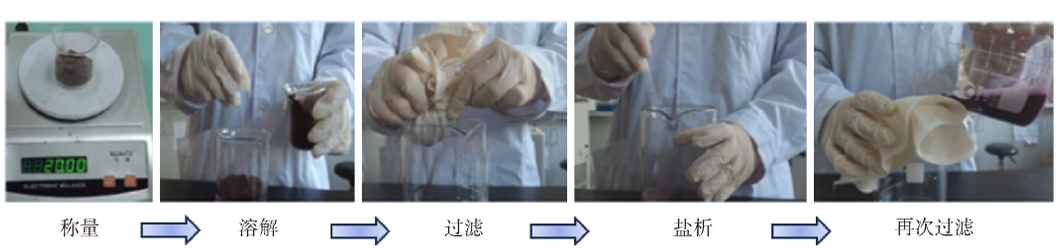


图4　家庭法提取紫胶红色素流程

(1)面向小学生人群时:主要讲解紫胶红色素的来源及家庭法提取操作;现场提供家庭法提取的紫胶红色素溶液,引导小学生在成人监护下利用现有的色素溶液进行染色实验。(2)面向中学生人群时:因初高中学生具备了有关有机物结构的化学知识,因此基于紫胶红色素作为酸碱指示剂的变色原理,讲解紫胶红色素在参加质子传递的过程中,在不同pH下分子结构会发生改变而引起颜色反应[15],分子电离程度的改变引起颜色变化,且颜色变化是可逆的;现场设计探究实验,让学生利用家庭法提取紫胶红色素溶液,探究生活常用物品的酸碱性。(3)面向其他人群时:科普天然色素(如紫胶红色素、胭脂素)和人工色素的区别和优缺点;现场按照家庭法制备紫胶红色素溶液,利用生活中常见的物品进行实验,制作彩色衣服。

3　实验结果

3.1　颜色反应

不同pH下紫胶红色素溶液的变色现象和紫外-可见吸收光谱如图6所示。可知,酸碱度由低到高增加时,溶液颜色变化顺序为黄色、橙黄色、橙色、橙红色、浅紫色到紫色。紫胶红色素溶液的最大吸收峰出现在300 nm附近。酸性条件下,紫胶红色素的最大吸收波长出现在较短波长波段;碱性条件下,最大吸收波长出现在长波波段。

3.2　方法对比

不同方法制取的紫胶红色素溶液在不同pH条件下的颜色变化如图7所示。酸碱度由低到高增加时,实验法制取的溶液颜色变化由黄色逐渐变为紫色,由浅至深,这是由于反应中Na_2CO_3过量,使紫胶红色素溶液显碱性。家庭法制取的溶液添加菠菜

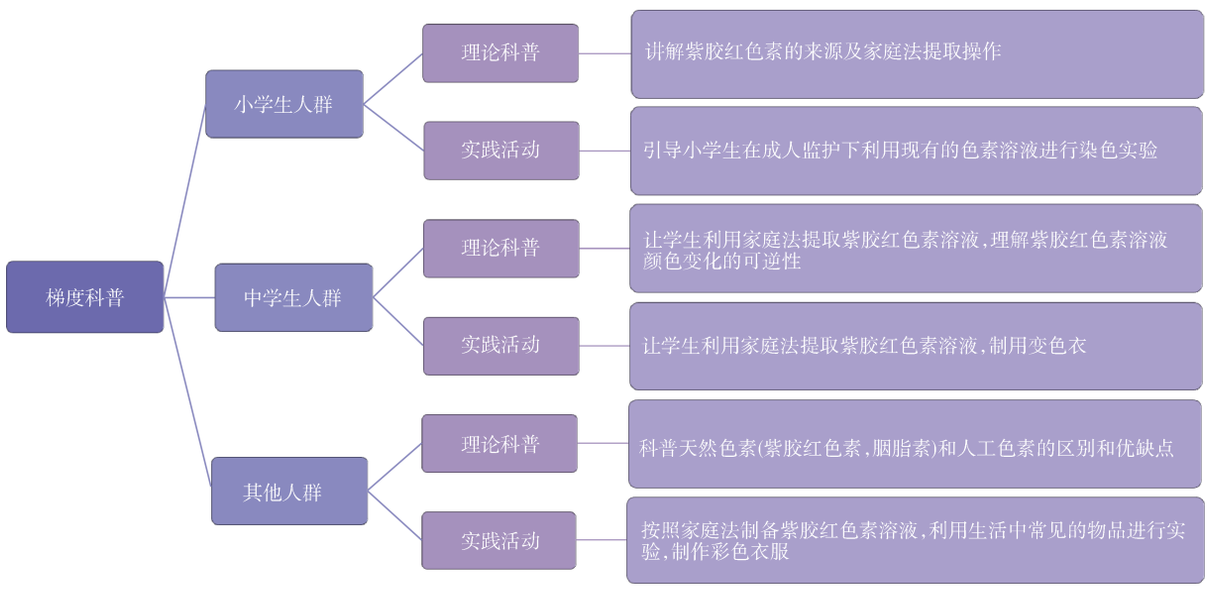


图5　不同人群梯度科普实验设计

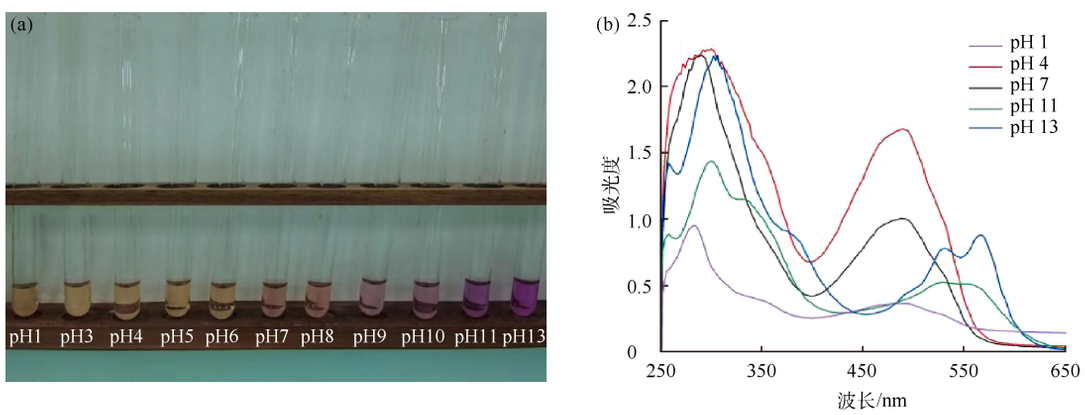


图6　不同pH时紫胶红色素溶液的变化
(a)颜色变化;(b)吸收光谱

汁、洁厕灵、柠檬汁、10和20 g/L食用碱溶液后,颜色分别呈黑色、绿色、橙黄色、紫色和紫红色;其中添加20 g/L食用碱溶液放置一段时间后,溶液由紫红色褪色至无色。

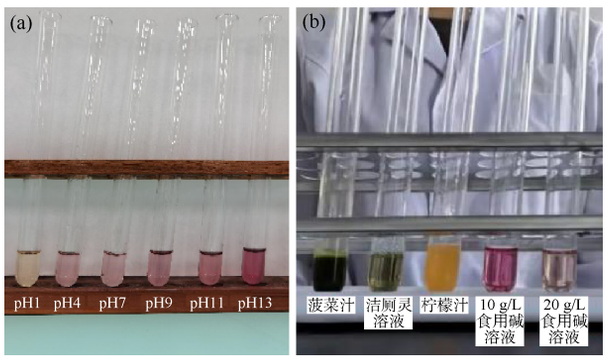


图7　不同方法制取的紫胶红色素溶液的变色现象
(a)实验法;(b)家庭法

4　科普互动

4.1　面向小学生人群

在保证实验安全的前提下,小学生们首先以色素溶液作画,然后利用洁厕灵和菠菜汁在布袋进行绘画,相关作品如图8所示。实验人员预先准备碱性条件下的紫胶红色素溶液、柠檬汁和洁厕灵。小学生发挥自主能动性,进行绘画。其中紫色为碱性条件下紫胶红色素溶液,橙色为酸性条件下紫胶红色素溶液,即向碱性条件下紫胶红色素溶液加入柠檬汁;蓝色为洁厕灵溶液;绿色为混合洁厕灵和碱性条件下紫胶红色素溶液。

4.2　面向中学生人群

学生利用家庭法提取紫胶红色素溶液,以生活常用物品实现紫胶红色素溶液的颜色变化,相关作品如图9所示。首先,向白色短袖倒上家庭法提取的紫胶红色素溶液,短袖变为紫色;之后,在紫色部分倒入柠檬汁,可以观察到紫色部分变为橙黄色;最后,向橙黄色部分倒入食用碱溶液,可观察到紫色复原。

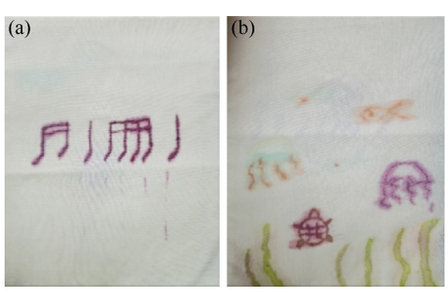


图8　小学生人群科普互动部分作品展示
(a)作品一;(b)作品二

4.3　面向其他人群

其他人群科普互动作品展示如图10所示。紫胶红色素在不同pH下,不同颜色的溶液对白色旧衣服进行染色的效果,其中绿色为与洁厕灵混合的紫胶红色素溶液。

5　结果与讨论

5.1　变色机理对比

部分常见指示剂变色原理:酚酞分子的变色原理有多种解释,在此只以从无色三苯甲醇类羧酸根离子型一步直接到红色的醌式离子机理[16-17]进行对比,酚酞分子羧基结构单元发生电离后,产生相应的羧酸根离子型异构体,并随介质中碱性的增强发生进一步的结构变化;甲基橙分子在中性或碱性溶液中以磺酸钠盐的形式存在,在酸性溶液中转化为磺酸,与分子内的碱性二甲胺基形成对二甲胺基苯基偶氮苯磺酸的内盐形式,成为一个含有对位醌式结构的共轭体系,颜色随之改变[18-19]。

紫胶红变色原理:pH 1时,溶液对470 nm的蓝光吸收最多,使得溶液呈现吸收光的互补色光的颜色,即黄色;pH 13时,紫胶红色素在可见光区出现双吸收峰,最大吸收波长分别为530和566 nm,溶液吸收黄绿色光后呈紫色。酸性条件下最大吸收波长比碱性条件下的最大吸收波长短,这是因为在碱性条件下生成的羧基负离子和酚羟基负离子都增大了共轭体系[20],HOMO和LUMO之间能级差变小,电子发生跃迁所需能量减小,吸收波长红移,吸收光颜色由蓝色向绿色过渡,使得溶液颜色由黄色向紫色过渡。可以根据该部分内容通过不同颜色的溶液与相应的紫外-可见吸收光的最大吸收波长向大众科普物质有颜色或溶液显色的原因。

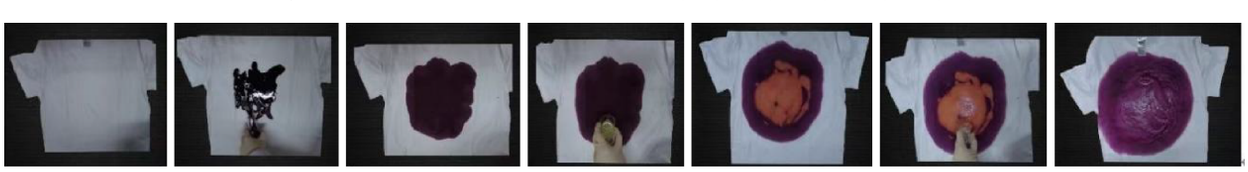


图9　中学生人群科普互动作品展示



图10　其他人群科普互动作品展示

5.2　方法对比

实验法与家庭法颜色反应不同的原因主要是:实验法使用的是成品紫胶红色素,其中紫胶色酸A的含量为85.0%,而家庭法提取的紫胶色酸A含量较低,导致同一酸碱度下呈现的颜色不同;菠菜中含有草酸,其研磨成菠菜汁后溶液呈酸性,理论上溶液会呈黄色,但是由于菠菜汁内含Fe^{3+},会优先与紫胶红色素络合形成环状紫色螯合物,且菠菜中富含多种色素,最终使溶液呈黑色;紫胶红色素在酸性条件下为黄色,洁厕灵自身颜色为蓝色,二者颜色叠加后溶液最终呈绿色;食用碱溶液在滴加2滴紫胶红色素后,溶液先呈紫红色再褪至无色,这是由于紫胶红色素结构中的羧基和酚羟基被中和成盐,使得颜色从酸性条件下的黄色变成紫红色甚至无色。

5.3　科普优势

本科普实验安全、绿色、有趣、易操作,以生活中常见材料提取中药材紫草茸中的紫胶红色素,公众可走进化学,体会生活中的化学之美。以简单易上手的实验,提高了中小学生学习化学的兴趣;以有深度的实验操作,加深了初高中学生对化学的理解。初高中生结合所学教材对酸碱指示剂变色的现象进行解释,酚酞和甲基橙在pH改变时,不仅涉及酸碱电离平衡,同时分子结构也发生了改变,最终表现为颜色改变。相比之下,紫胶红色素的变色原理就只涉及酸碱电离平衡,该部分内容对于高中生可以很好地接受,因此适合作为指示剂面向高中生科普。对于其他人群则是通过展示并制作由紫胶红色素染色的彩色衣,让大众近距离接触天然色素的应用,并结合科普小视频、PPT等形式介绍天然色素和人工色素的区别,促进大众对色素等化学知识的普及,消除对色素的误解。

6　结束语

本文通过2种方法提取了紫胶红色素并探究了紫胶色酸A变色的原理,同时针对不同人群设计了一种绿色、安全、可推广的梯度科普实验。该实验可居家进行,适合各类人群参加,引导大众发现生活中的化学,通过常见色素所具有的染色功能和酸碱指示作用,拉近生活与化学的距离。本科普实验在科普展示和科普互动中还存在一些不足,由于疫情原因本实验中的互动环节只是在小部分公众中进行了实际推广;并且设计的互动环节展示方面还存在美感欠佳;该实验还可设计更有趣、更有美感的互动环节以达到更好的推广效果。

参 考 文 献

[1] 沈东瑞.探析天然色素在食品中的应用[J].食品安全导刊,2019,252(27):54.

[2] 郭美娟,刘晓光,史国华,等.食品中人工食用色素安全性[J].食品工业,2020,41(3):332-336.

[3] 汪文秀.人工合成色素对人体的危害及天然色素的应用前景[J].食品安全导刊,2019,250(25):72-73.

[4] 白晓菲,梁东明,张艳红,等.紫甘蓝色素提取工艺优化及其酸碱指示剂性质[J].食品工业,2022,43(4):67-71.

[5] XIANG H, SUN-WATERHOUSE D, CUI C, et al. Modification of soy protein isolate by glutaminase for nanocomplexation with curcumin [J]. Food Chemistry, 2018,268(6):504-512.

[6] 梅梅,杨闻瀚,杜振霞.果汁中天然色素紫胶红的UPLC/TUV定量检测及UPLC-MS/MS结构确证[J].分析测试学报,2011,30(12):1338-1344.

[7] 王纪鹏,虢有婕,韩毅,等.pH敏感性材料在智能食品包装中的应用进展[J].食品工业科技,2023,44(1):48-55.

[8] 刘跃明,卢贵忠.天然紫胶色素的特性及提取技术研究进展[J].云南农业大学学报,2005,20(1):120-123.

[9] 张弘.紫胶红色素提取技术及理化性质研究(摘要)[J].生物质化学工程,2014,48(3):60.

[10] 张弘.紫胶红色素提取技术及理化性质研究[D].南京:中国林业科学研究院,2013:25-26.

[11] 曹铭.紫胶色素提取与性质研究[D].昆明:昆明理工大学,2005:8-9.

[12] MONTRA C. Thermodynamics study of lac dyeing of silk yarn coated with chitosan[J]. Walailak Journal of Science and Technology,2009,6(1):93-107.

[13] 张弘,房桂干,郑华.超声波辅助提取紫胶红色素的研

究[J].食品科学,2010,31(20):116-120.
[14] 伊冠东,刘兰香,雷福厚,等.紫胶色酸A的荧光性质及其在检测中的应用[J].食品科学,2018,39(24):311-316.
[15] 朱泽琛.酚酞的颜色和结构[J].化学工程与装备,2010,167(12):5-6.
[16] 杨丽君,高小茵,仲一卉.甲基橙制备方法的改良[J].云南师范大学学报(自然科学版),2003,23(3):57-59.
[17] 崔文辉,陈强,贾如琰,等.酚酞指示剂变色反应的几种常见机理[J].山东化工,2018,47(23):90-92+96.
[18] 姚松鹤.指示剂的作用原理及滴定中校正指示剂意义[J].高考,2018,305(9):259.
[19] 张丽影,那立艳,王茹,等.无机与分析化学实验课程思政案例设计与探讨[J].广州化工,2021,49(5):181-183.
[20] 卢禁,段宝忠.紫胶中紫胶红色素的化学成分研究[J].沈阳药科大学学报,2022,39(2):134-138.

(责任编辑:王 媛)

(上接第88页)

[8] MILLS J S, MUSTO S, WILLIAMS L, et al. "Selfie" harm: effects on mood and body image in young women [J]. Body Image, 2018, 27: 86-92.
[9] COHEN R, NEWTON-JOHN T, SLATER A. 'Selfie'-objectification: the role of selfies in self-objectification and disordered eating in young women[J]. Computers in Human Behavior, 2018, 79: 68-74.
[10] WICK M R, KEEL P K. Posting edited photos of the self: increasing eating disorder risk or harmless behavior?[J]. International Journal of Eating Disorders, 2020, 53(6): 864-872.
[11] DHIR A, PALLESEN S, TORSHEIM T, et al. Do age and gender differences exist in selfie-related behaviours? [J]. Computers in Human Behavior, 2016, 63: 549-555.
[12] KATZ J E, CROCKER E T. Selfies and photo messaging as visual conversation: reports from the United States, United Kingdom and China[J]. International Journal of Communication, 2015, 9(1): 1861-1872.
[13] QIU L, LU J H, YANG S S, et al. What does your selfie say about you? [J]. Computers in Human Behavior, 2015, 52: 443-449.
[14] 陈宛玉,叶一舵,赵萍华.大学生自拍行为问卷的编制与信效度检验[J].南京医科大学学报(社会科学版),2018,18(5):382-385.
[15] ARUMUGAM B, NAGALINGAM S. Validation of psychometric scale on selfie addition [J]. International Journal of Contemporary Medical Research, 2015, 2(4): 941-946.
[16] 高平. Photoshop人像修图实用技巧[J].数字技术与应用,2022,40(11):37-39.
[17] 张欣.自拍照编辑对大学生自尊的影响:网络社会支持、积极情绪的中介作用[D].南京:南京师范大学,2019:13-14.
[18] 王孟成.潜变量建模与Mplus应用·基础篇[M].重庆:重庆大学出版社,2014:99-100.
[19] AHADZADEH A S, SHARIF S P, ONG F S. Self-schema and self-discrepancy mediate the influence of Instagram usage on body image satisfaction among youth [J]. Computers in Human Behavior, 2017, 68: 8-16.
[20] SUN Q. Selfie editing and consideration of cosmetic surgery among young Chinese women: the role of self-objectification and facial dissatisfaction[J]. Sex Roles, 2021, 84(11): 670-679.
[21] HENDERSON-KING D, HENDERSON-KING E. Acceptance of cosmetic surgery: scale development and validation[J]. Body Image, 2005, 2(2): 137-149.

(责任编辑:兰丽丽)