

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX201803007

www.dxhx.pku.edu.cn

色彩斑斓的自然，五颜六色的化学

兰泉，郑媛，查正根，汪红蕾，李婉，刘晓虹，朱平平*

化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学)，合肥 230026

摘要：通过介绍菠菜中色素的提取分离及紫甘蓝中花青素的提取两个实验，揭示大自然色彩背后的化学奥秘，并介绍了两个实验作为科普实验项目在化学科普活动中展示和互动的效果及特点。

关键词：自然；色彩；色素；化学实验；科普

中图分类号：G64；O6

Colorful Nature, Colorful Chemistry

LAN Quan, ZHENG Yuan, ZHA Zhenggen, WANG Honglei, LI Wan, LIU Xiaohong, ZHU Pingping *

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, P. R. China.

Abstract: In this paper, two experiments on the extraction and separation of pigment in spinach and the extraction of anthocyanins in purple cabbage were introduced to reveal the chemical mystery behind the color of nature. The display effect and the characteristics of the two experiments as the popular science experiment project in chemical science popularization activities were also introduced.

Key Words: Nature; Color; Pigment; Chemical experiment; Science popularization

春天，小树抽出绿绿的嫩芽；夏天，姹紫嫣红的花儿竞相开放；秋天，层林尽染，叠翠流金；冬天，红梅朵朵绽枝新。一年四季，大自然都不缺少色彩的点缀。在色彩斑斓的自然背后有着“五颜六色”的化学知识——植物色素^[1]。植物色素包括脂溶性的叶绿体色素和水溶性的细胞液色素，前者存在于叶绿体，与光合作用有关，如叶绿素^[2,3]；后者存在于液泡中，特别是与花朵的颜色有关，如花青素^[4]属黄酮类物质。

提起色素，人们很容易想到红心鸭蛋、辣椒粉事件中的主角——苏丹红^[5]。由于用苏丹红染色后的食品颜色非常鲜艳且不易褪色，能引起人们强烈的食欲，一些不法食品企业把苏丹红添加到食品中^[6]。苏丹红为人工合成的亲脂性偶氮化合物，作为一种染料在工业上应用广泛，因其对人体健康具有潜在危险性，我国及欧美等国家严格限制其作为色素在食品中进行添加^[7]。正是因为某些人受利益驱使，滥用化学知识，更增加了公众对化学的误解与恐惧。

以大众餐桌常见的两种蔬菜——菠菜和紫甘蓝为实验对象，提取菠菜中的色素并分离和提取紫甘蓝中花青素，分别展示了脂溶性植物色素及水溶性植物色素的提取及分离方法，在揭示大自然色彩背后的化学奥秘的同时，体现出生活中处处有化学，拉近了公众与化学的距离，对改变公众“谈化色变”的局面起到积极的作用。

收稿：2018-03-02；录用：2018-03-19；网络发表：2018-03-29

*通讯作者，Email: zhupp@ustc.edu.cn

基金资助：中国科学院 2018 年度科普项目(cx2060000001)

1 菠菜中色素的提取和分离

1.1 实验原理

植物绿叶中含有多种天然色素，最常见的有胡萝卜素(橙色)(图 1)、叶绿素(绿色)和叶黄素(黄色)(图 2)。

叶绿素有两种结构相似的形式，即叶绿素 a ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$)和叶绿素 b ($C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$)，其差别仅是 a 中一个甲基被 b 中的甲酰基所取代。它们都是吡咯衍生物与金属镁的络合物，是植物进行光合作用所必需的催化剂。植物中叶绿素 a 的含量通常是 b 的 3 倍。尽管叶绿素分子中含有一些极性基团，但大的烷基结构使它易溶于醚、石油醚等一些非极性的溶剂。

胡萝卜素($C_{40}H_{56}$)是具有长链结构的共轭多烯。它有三种异构体，即 α -、 β -和 γ -胡萝卜素，其中 β -异构体含量最多，也最重要。生长期较长的绿色植物中，异构体中 β -体的含量多达 99%。 β -异构体具有维生素 A 的生理活性，其结构是两分子维生素 A 在链端失去两分子水结合而成。在生物体内， β -体受酶催化氧化即形成维生素 A。目前 β -体已可进行工业生产，可作为维生素 A 使用，也可作为食品工业中的色素。

叶黄素($C_{40}H_{56}O_2$)是胡萝卜素的羟基衍生物，它在绿叶中的含量通常是胡萝卜素的两倍。与胡萝卜素相比，叶黄素较易溶于醇，在石油醚中溶解度较小。

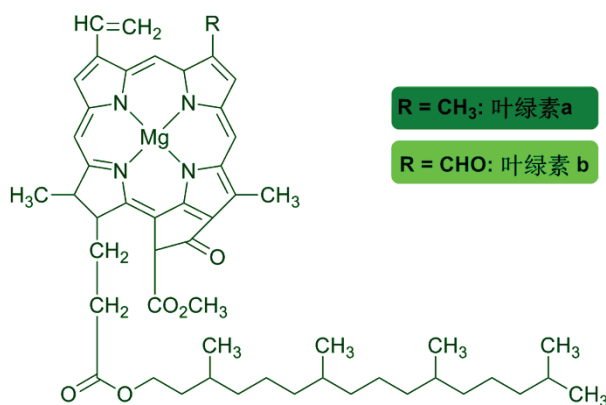


图 1 叶绿素的化学结构

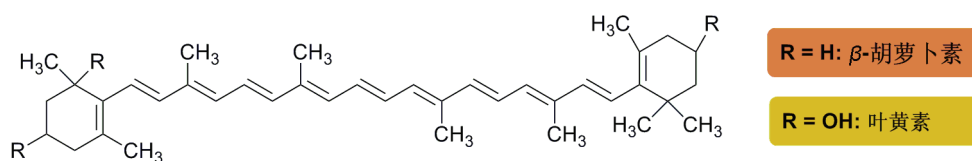


图 2 胡萝卜素与叶黄素的化学结构

色谱法分离的基本原理，是利用混合物各组分在固定相和流动相中分配平衡常数的差异。简单地说，当流动相流经固定相时，由于固定相对各组分的吸附或溶解性能的不同，使吸附力较弱或溶解度较小的组分在固定相中移动速度较快，在反复平衡过程中导致各组分在固定相中形成了分离的“色带”，从而得到了分离。

本实验从菠菜中提取以上色素，根据其不同的化学特性，利用色谱法对其进行分离鉴定。

1.2 实验步骤

(1) 菠菜中色素的提取。

称取 5 g 干燥的菠菜叶，经剪碎、研磨、超声浸取、抽滤，得到色素提取液。然后经洗涤、干燥、浓缩，得到色素提取液的浓缩液。具体操作流程参照图 3。

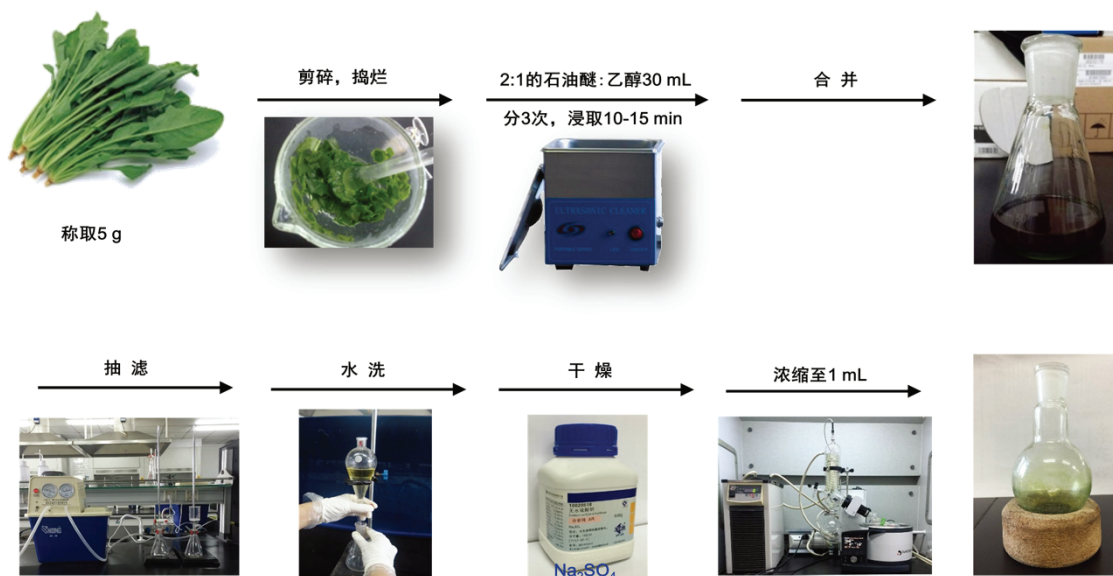


图3 菠菜中色素提取流程示意图

(2) 柱色谱分离。

中性氧化铝(150-160 目)作为吸附剂，湿法装柱，湿法上样，对上述浓缩液进行柱色谱分离。洗脱剂依次为 9 : 1 (体积比)的石油醚-丙酮混合溶剂，体积比为 7 : 3 的石油醚-丙酮混合液，体积比为 3 : 1 : 1 的正丁醇-乙醇-水混合液。具体流程如图 4 所示。

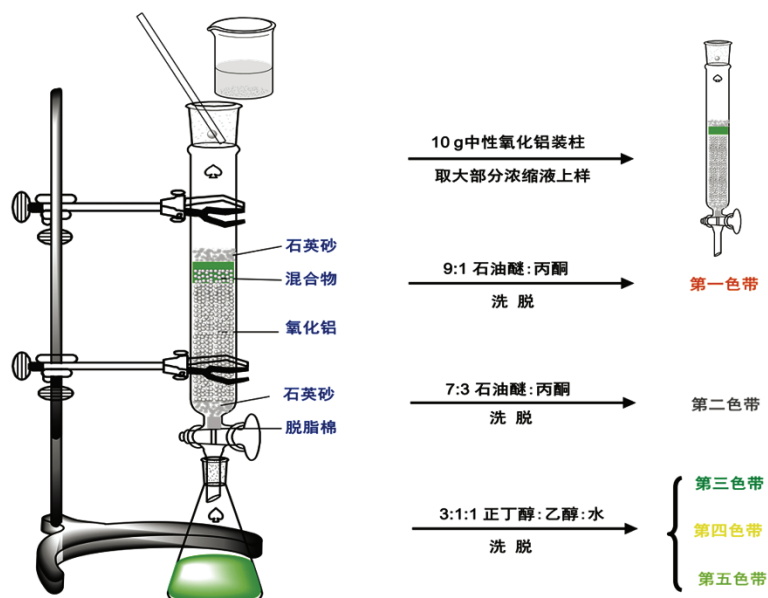


图4 菠菜中色素柱色谱分离示意图

(3) 薄层色谱检测(图 5)。

用体积比为 8 : 2 的石油醚-丙酮混合液作展开剂，展开后计算各样点的 R_f 值，观察各色带样点是否单一，以确定柱中分离是否完全。



图5 薄层色谱示意图

2 紫甘蓝中花青素的提取、变色实验与表征

2.1 实验原理

花青素(Anthocyanidin), 又称花色素, 是自然界一类广泛存在于植物中的水溶性天然色素, 属类黄酮化合物。花青素存在于植物细胞的液泡中, 可由叶绿素转化而来。紫罗兰、牵牛花、月季、紫甘蓝等花朵, 蔬菜的细胞内均含有花青素, 其颜色随酸碱度的不同而改变, 在酸性环境中偏红, 中性环境偏紫, 碱性环境偏蓝(图6)。

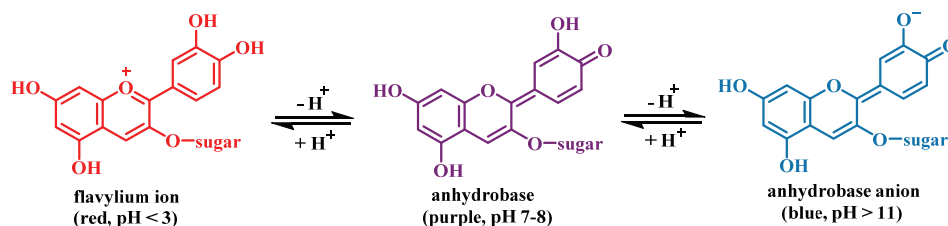


图6 花青素颜色随 pH 改变

2.2 实验步骤

(1) 花青素的提取与变色实验。

花青素的提取与变色实验在厨房就可完成。取一片紫甘蓝的叶子撕碎, 在自来水中浸泡 15 min, 得到紫色的浸提液。将其倒入三个白色陶瓷碗中, 分别向其中两个碗中加入米醋和小苏打, 紫色溶液变为粉色和蓝色(图7)。

(2) 紫甘蓝中花青素的表征。

为确定紫甘蓝中花青素的种类, 进行了如下实验。取新鲜的紫甘蓝叶子一片, 清洗, 切碎, 自然晾干。称取晾干的紫甘蓝 1 g, 用 20 mL 的 50%乙醇水溶液在室温条件下浸取 2 h, 过滤, 得紫色溶液。取 4 支短试管, 分别加入 0.5 mL 水和 50 μL 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 水溶液(试管一)、0.5 mL 水(试管二)、0.5 mL 水和 50 μL pH = 7.4 的磷酸盐水溶液(试管三)、0.5 mL 水和 50 μL 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 水溶液(试管四), 然后各加入 0.1 mL 滤液。分别测试上述 4 种 pH 条件下的紫外-可见吸收光谱(图8)。实验结果表明, 在不同的 pH 下, 紫甘蓝色素的吸收波长及强度会发生一定的改变。花青素的颜色随着 pH 的变化而变化。在酸性溶液中, 更大的共轭体系 flavylium ion 会在 465–550 nm 之间有吸收峰^[8], 取代基不同, 吸收峰的位置不同, 呈现出不同的颜色。随着 pH 的增加, 峰的位置会发生偏移。

经过文献调研^[8,9], 确认该紫甘蓝中的色素结构主要为氯化锦葵色素苷 (Malvin, 图9)。



图7 紫甘蓝中花青素的提取及变色实验

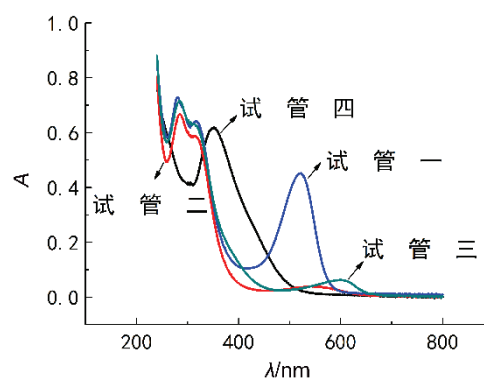


图8 不同 pH 下紫甘蓝色素的紫外-可见吸收光谱

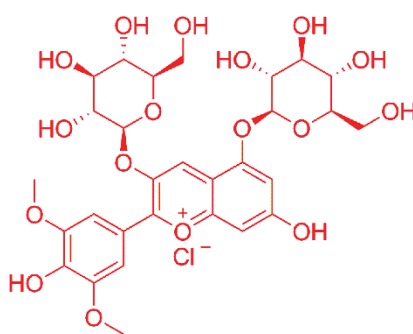


图9 氯化锦葵色素苷(Malvin)

3 科普展示与互动效果

菠菜中色素的提取分离实验及紫甘蓝中花青素的提取实验都可以用于化学科普活动中。当中学生进入到实验室学习实验操作时，可以按照上述实验步骤进行；而在某些开放的场合进行趣味实验的展示与互动时，则可进行简化，以方便开展。

比如菠菜中色素的提取分离，提取过程因为用到较多的实验仪器及试剂，不适宜现场操作，可在实验室完成提取部分，得到色素的提取液。而提取液中色素的薄层色谱分离，操作简单、现象明显，非常适合现场展示与互动。参与者亲自点样展开，展开过程可以通过透明的展缸观察。不同颜色的色素如同跑步比赛一般，虽然从同一起跑线出发，却有快有慢，逐渐分离开来，过程有趣，现象明显。配合色素提取分离实验简洁清晰的展板(图 10 左)，科普活动志愿者可以向参与者进行原理讲解，使参与者在互动的同时了解现象背后的化学知识。现场还可摆放菠菜、胡萝卜、番茄、辣椒等餐桌常见蔬菜(图 10 右)，使参与者了解这些蔬菜中还可以分别提取胡萝卜素、辣椒红素、番茄红素等色素，以及它们相关的更广泛的植物色素知识，使其更加深切地感受到化学无处不在，从而达到良好的科普效果。

紫甘蓝中花青素的提取及变色实验颜色绚丽、变化多样、视觉冲击力强，深受科普活动参与者的欢迎，是一个很好的互动项目。参与者自己动手，研磨浸泡得到花青素的提取液，而变色实验试剂则选择日常生活中常用的物品如白醋、食用碱，将其配成不同 pH 的溶液，滴入花青素的提取液就可见证神奇的色彩变化了(图 11)。

4 作为科普活动项目的特点

作为科普实验项目，上述色素提取实验已多次在中国科学技术大学科技开放周、科学营、化学年等大型科普活动及中学生参观活动中展示及互动，深受广大参与者的喜爱，并且已初步确定入选 2018 年澳门科技周活动，这主要是因为该项目具有以下特点：



图 10 色素提取分离实验展板及蔬菜展示



图 11 花青素变色实验现场效果图

1) 贴近生活，拉近大众与化学的距离。

菠菜、紫甘蓝等都是大众餐桌上常见的蔬菜，食醋、食用碱也是日常饮食中必不可少的调味品、添加剂。“民以食为天”，选择常见的食材作为实验对象，充分体现了生活中处处有化学。

2) 现象明显、趣味性强，展现化学的神奇。

菠菜色素分离犹如跑步比赛，花青素在不同酸碱条件下颜色绚丽、多变，无不展现出化学的神奇与美丽，能够激发参与者的的好奇心，尤其是激发广大中小学生的学习热情，这在科技周活动中小朋友们的“化学真神奇”“我要好好学习科学知识”“明年我还要来做实验”等留言中得到充分体现。

3) 操作简单，娃娃也能做的化学实验。

花青素的提取及变色实验小朋友在厨房就可实现。几片紫甘蓝叶子、几个玻璃杯、一瓶白醋、一袋食用碱，就可以做神奇的变色魔术了！

4) 引发思考，可扩展为“餐桌上的色彩”化学科普。

这些实验可诱导参与者深入思考，天然色素是不是仅仅是花草树木多彩的原因？餐桌上美味的虾蟹在蒸煮之后变为红色，是否也与色素有关？答案是肯定的——虾蟹甲壳中大部分色素细胞在高温下发生分解，而虾青素(一种类胡萝卜素)没有受到破坏。凡是虾青素多的地方，如背部，就显得红些；而虾青素少的地方，如附肢的下部，就显得淡些；再如蟹的腹部无虾青素存在，尽管经过蒸煮也不出现红色，仍然是白色的。这些色素的相关知识和实验融合，可进一步拓展为“餐桌上的色彩”等化学科普项目。

参 考 文 献

- [1] 杨永清, 何海. 生物学教学, **2012**, 37 (7), 4.
- [2] 史典义, 刘忠香, 金危危. 遗传, **2009**, 31 (7), 698.
- [3] Beale, S. I. *Trends Plant Sci.* **2005**, 10 (7), 309.
- [4] 祝志欣, 鲁迎青. *Chinese Bulletin of Botany* **2016**, 51 (1), 107.
- [5] 孙文汇, 高洪, 刘海峰. 动物医学发展, **2008**, 29 (4), 103.
- [6] 国家质检总局发布-首批检出含苏丹红食品(原料)生产企业名单. 中国酿造, **2005**, No. 6, 19.
- [7] 宋雁, 李宁. 国外医学(卫生学分册), **2005**, 32 (3), 129.
- [8] Galloway, K. R.; Bretz, S. L.; Novak, M. *J. Chem. Educ.* **2015**, 92, 183.
- [9] Garber, K. C. A.; Odendaal, A. Y.; Carlson, E. E. *J. Chem. Educ.* **2013**, 90, 755.