

認識「植物色素」——跨領域之探究 與實作教學

陳怡妉^{1*} 陳姿君² 許銘傑² 郭恆妙³ 卓采億³ 洪振方²

¹ 國立高雄師範大學 物理學系

² 國立高雄師範大學 科學教育與環境教育研究所

³ 健茂生物科技植化素研究所

壹、前言

顏色讓世界變得五彩繽紛，然而顏色在不同的領域中，有著不同的認知，在文學中一個青色就可以形容青山綠水、青天白日、青絲白髮，就有綠色、藍色及黑色等不同的顏色呈現。而在中醫裡用到顏色來對應身體的五臟：青（綠）、赤（紅）、黃、白、黑，對應肝、心、脾、肺、腎等（馬元臺 & 張隱庵，1986）。在自然界，紅色、黃色代表果實成熟了，譬如紅蘋果、黃香蕉等，而綠色是尚未熟成的果實，代表著酸澀等味道，例如：青木瓜、青芒果等。

自然科學中指出植物的顏色來自葉綠素、花青素、胡蘿蔔素，葉黃素等都是植化色素的呈現（蔡尚恬 & 蔡振章，2004）。從物理學介紹植物的顏色是光照射到植物的反射光，刺激眼睛的視網膜，再傳遞到大腦，是光反射到眼睛看見的顏色。顏色讓我們的生活充滿著繽紛，為了讓學生更了解大自然的顏色變化的巧妙，設計了一跨領域並結合理論的探究與實作的教學，引導讓學生從觀察、實作中引導其思考、發問與找答案的科學教育課程。

課程裡準備了紫色甘藍菜、菠菜、火龍果等各種蔬果。課堂上讓學生自己準備果皮，並指導萃取蔬果色素的方法，觀察在不同溶劑中色素萃取的速度，並帶入水溶性與油溶性的色素分別。在花青素中加入檸檬汁、小蘇打、肥皂水等，探討酸鹼度對植物色素的影響。最後加入光照射在色素上的實驗以及用不同顏色的光照在蔬果上的變化，並發揮學生的創作力探討色素及光照等在生活上的運用。

從實驗動手做上引起學生的參與的興趣外，同時增加學生對於蔬果色素（植化素）的營養及生理功效的一些介紹，在飲食上能多攝取含葉綠素、葉黃素與花青素的蔬菜，讓學生了解植化素色素存在果皮及蔬菜中，同時傳遞食安的重要、有機耕種、環境永續及減碳等的觀念。了解環保的重要性，可從學校開始，亦是跨領域教學中重要的目標。

*為本文通訊作者

貳、光與植物色素

植物的顏色來自於植物的植物色素：如葉綠素、花青素、胡蘿蔔素，葉黃素（如表 1）都是植化素，會隨著溫度及日照時間的改變，讓四季有了不同的自然繽紛色彩(翁儷芯，2012)。

表 1. 植物色素表

植物色素	光合色素 (葉綠體內)	葉綠素
		類胡蘿蔔(carotenoid)(Saini et al., 2022)
		(1) 葉黃素類(xanthophylls): 葉黃素、玉米黃素、 β -隱黃素和蝦紅素…等 (2) 胡蘿蔔素類(carotenes): α -胡蘿蔔素、 β -胡蘿蔔素、 γ -胡蘿蔔素和茄紅素…等
	非光合色素	花青素

(一) 葉綠素(Chlorophyll)

葉綠素是地球上最豐富的植物色素，是一種光合色素，葉綠素分為 a、b、c、d 四種。葉綠素是光合色素，能通過光合作用將空氣中的二氧化碳轉換成能量，加上水轉化為葡萄糖，並從土壤中獲取養分來製造新葉子和其他植物部分。葉綠素 a 會選擇性吸收陽光中 430nm 及 660nm 的光波，葉綠素 b 吸光的波長位置是 435nm 及 643nm，葉綠素 c 與 d 則存在於藻類中(蔡尚恬 & 蔡振章，2004)。640-660nm 是紅光區，430-435nm 是紫藍光區，葉綠素將光線中的藍紫紅都吸收掉了，把剩下的光反射給我們看到，所以我們看到的葉子是綠色。

葉綠素存在葉綠體 (如圖 1)的類囊體膜中，葉綠素不溶於水，不會在細胞中流動。當葉子缺乏水分或是太強的陽光照射時，葉綠素就會被破壞。所以當光線太強烈時，其他葉綠體內的色素，如類胡蘿蔔素就會起保護作用(Lucia, Massimiliano, & Marco, 2017)。

葉綠素吸收二氧化碳行光合作用的過程產生氧氣，將其釋放到空氣中的特性，是近年來提倡減碳計畫及淨零排放等環保議題中最重要角色之一。而葉綠素在動物實驗中已被證明每天三餐前服用 100mg 的葉綠素，可以有效抑制黃麴毒素肝癌的發生，更有其特殊的肝臟保健的功效(Egner et al., 2001)。

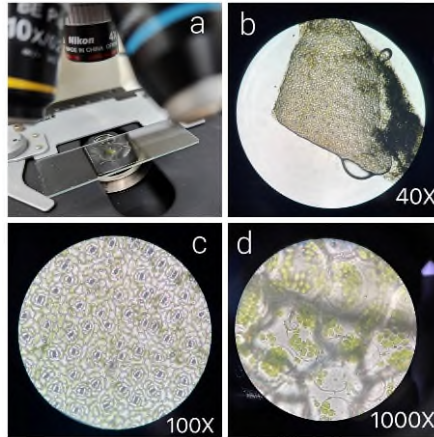


圖 1:在光學顯微鏡下觀察植物葉片：
(1a) 從一片葉片上取下一小角薄片放在載玻片上；
(1b) 用 40 倍鏡觀察到密密麻麻的葉片細胞；
(1c) 100 倍下觀察到顆粒狀的綠色葉綠體；
(1d) 1000 倍下清楚看到顆粒狀的綠色葉綠體。

(二) 類胡蘿蔔素

類胡蘿蔔素是一類光合色素，與葉綠素一起貯存在葉綠體內及雜色體中(劉玉山 & 張永達，2009)。類胡蘿蔔素一般吸收藍光，最高吸光的波長是 466nm 與 497nm，吸收光能用於光合作用，保護葉綠素不受光氧化損害(Armstrong & Hearst, 1996)。胡蘿蔔素偏橘紅，是蔬果中呈現橘紅色的主要來源，類胡蘿蔔素 (葉黃素與玉米黃質)顯然是直接吸收有害的藍色與近紫外光線，胡蘿蔔素結構高度不飽和，容易被氧化成為葉黃素，葉黃素在植物中的含量約是胡蘿蔔素的二倍，所吸收能量可以轉移給葉綠素，幫助葉綠素取得光合作用所需的能量。值得注意的是，胡蘿蔔素類比葉綠素穩定，不會因受到照光而分解(Armstrong & Hearst, 1996)。

類胡蘿蔔素是一類由植物、藻類和光合細菌合成的 1200 多種天然色素，類胡蘿蔔素是一大家族，是紅色、黃色和橙色的四萜類色素，分成：不含氧原子的胡蘿蔔素類 (只包含碳、氫原子) 及含氧原子的葉黃素類兩大類。在蔬果及全穀物中呈現紅色、橙色及黃色，是一種抗氧化劑，對人類健康很重要(Polyakov, Focsan, Gao, & Kispert, 2023; Yabuzaki, 2017)。

類胡蘿蔔素能降低疾病風險，如第二型糖尿病、心臟病及某些癌症如肺癌(吸菸者除外)、前列腺癌和維護眼部及視覺健康，但盡量從飲食蔬菜中獲取，在食用補充劑時注意劑量的問題。 α -和 β -胡蘿蔔素以及 β -隱黃質能夠轉化為維生素 A，葉黃素和玉米黃素會吸收進入眼睛的有害藍光，可能對眼部有保護作用(Abar et al., 2016; Black, Boehm, Edge, & Truscott, 2020; Dulińska-Litewka et al., 2021; Johnson, 2002; Saini & Keum, 2018; Saini et al., 2022)。

(三) 花青素

花青素是一水溶性的植物色素，在 500-600nm 有最大吸收波長，但與光合作用無關，存在植物表皮細胞的液胞中，不會干擾葉肉組織裡的葉綠體進行光合作用。紅色至紫藍色的葉菜類、穀類、根莖類和塊莖類是含有大量花青素的食用蔬菜，是一種類黃酮。

花青素的顏色會隨著酸鹼值而變，遇酸變紅，遇鹼變藍（如圖 2），可作為天然的酸鹼指示劑來使用。花青素普遍存在於許多成熟果實中，蘋果成熟時，表皮含有豐富的花青素取代了葉綠素，吸收藍光、藍綠光、綠光，在 550nm 有最大吸收帶，呈現紅色，葡萄表皮則呈紫色，反射部分紫光(Merzlyak & Chivkunova,2000)。

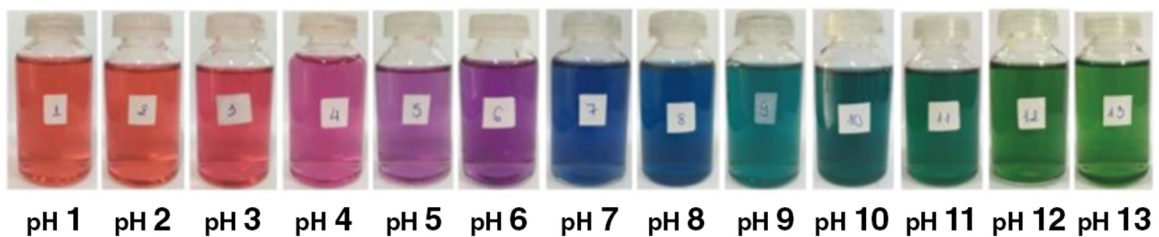


圖 2: 紫甘藍菜花青素提取液酸鹼值變化（截取自(Vo, Dang, & Chen, 2019)）

花青素除了可作為天然著色劑外，一些富含花青素的花、水果和蔬菜在傳統醫學上多被用作治療各種疾病的藥物。近二十多年來，花青素的藥用價值被廣泛研究，目前已鑑定出超過 600 多種花青素，花青素具有抗糖尿病、抗癌、抗發炎、抗菌和抗肥胖作用，以及預防心血管疾病（CVD）等的生理功效(Ghosh & Konishi, 2007; He & Giusti, 2010; Khoo, Azlan, Tang, & Lim, 2017; Vo et al., 2019)。

由於花青素很容易被水萃取出來，紫紅色高麗菜或是甘藍菜含有豐富的花青素，可以用來做一教學實驗，讓學生一起動手做一利用花青素的顏色會隨著酸鹼值改變，提高學生上課的參與感與興趣。

(四) 植物的顏色變化

葉子內含有葉綠素與胡蘿蔔素，葉子會吸收紅光、藍光和藍綠光，剩下的光線反射，所以葉子呈現綠色。到了秋冬季節，溫度變低及日照縮短等因素，葉綠素無法及時合成，葉綠素降解速度加快後，類胡蘿蔔素（葉黃素、胡蘿蔔素）顯示出來的原因，讓葉子呈現了黃色和橙色。而當葉子的糖度越高時，部分植物在陽光作用下，將葉內的葡萄糖和葉黃素逐漸生成花青素，讓葉子呈現紅色，溫差越大，葉綠素降得越低，葉片的顏色變得越紅。

然而植物液胞內的細胞液中酸鹼值也會影響花青素呈現出來的顏色，當細胞液為鹼性時，花青素呈藍紫色，當細胞液呈酸性時，花青素呈紅色(岡山高中，2020)。另外一個例

子常出現在成熟的蔬果中，一般植物中，雜色體和葉綠體則廣泛分佈於能夠受到陽光照射的植物細胞裡，並能進行適當的轉換，例如當陽光下生長的蕃茄由綠轉紅時，細胞內的葉綠體便轉換成雜色體，也代表了番茄熟了(劉玉山 & 張永達，2009)。

光與顏色的自然科學與物理原理，植物色素因為吸收與反射不同的光的波段（如圖3），讓大自然充滿了繽紛的色彩。葉綠素（吸收紅光、藍光）呈現綠色，胡蘿蔔素、葉黃素（吸收藍光、藍綠光）呈現黃色，花青素（吸收藍光、藍綠光、綠光）呈現紅色，而除了光源會影響顏色外，光的強度及植物的酸鹼度也都會影響著顏色。

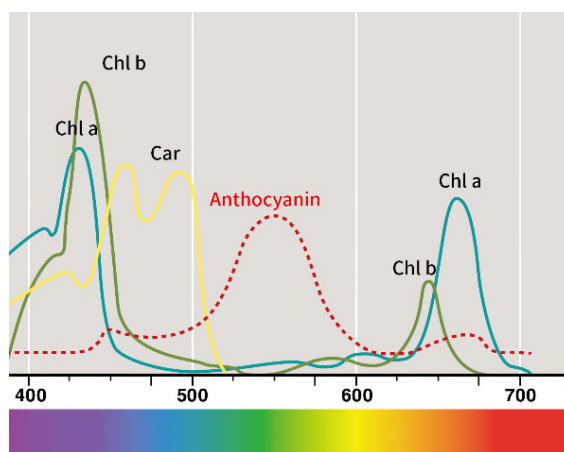


圖 3: 葉綠素、類胡蘿蔔素及花青素吸收光譜

參、植物色素實作課程設計

綠色的葉子，紅色的花，還有各種顏色的蔬果等，香蕉、芒果由綠變黃代表了熟成的過程。因應科學教育推廣的時間不等，設計三個小時的實作課程，課程帶入自然科學、化學與物理等，讓學生學習植物的顏色來自於葉綠素、葉黃素、類胡蘿蔔素及花青素等植物色素，而植物的顏色更是光的物理現象。蔬果跟樹葉一樣，當果實成熟時，葉綠素退場，就由綠轉黃，所以香蕉、芒果就從綠色轉變成黃色。這些變化，都與植物裡的色素組成有密切的關係，本探究與實作課程，從植物顏色變化的原理教起，並用生活中的一些植物及蔬果作一些實作的實驗，讓學生從實作中體驗在植物中的顏色變化。

一、教學活動設計

- (一) 教學主題:植物的顏色與變化是物理也是自然科學。
- (二) 生活教學:認識植物色素: 為什麼葉子是綠色的，香蕉是黃色的，綠色跟紫色甘藍菜的差別。

- (三) 探討議題:葉綠素、花青素萃取的方式及差異，花青素酸鹼值的變化。
- (四) 實作活動: (1) 從菠菜及紫甘藍菜萃取色素。
- (2) 在花青素溶液中加入小蘇打水及檸檬汁。
- (3) 試著觀察用不同顏色的光照射著葉綠素及花青素溶液。
- (五) 學習評量: (1) 設計幾個簡單的問題讓學生於課後填寫，以便了解學習成果。
- (2) 回家作業: 紀錄一週你有吃到什麼含有葉綠素及花青素的蔬菜。

二、探究與實作課程流程

課程名稱	認識植物顏色
領域	自然、生物、物理、化學
授課對象	科普教育推廣
課程時間	3 小時
教學目標	本探究與實作課程，從植物顏色及其變化的原理教起，並用生活中的一些植物及蔬果作一些實作的實驗，讓學生從實作中體驗在植物中的顏色變化。並讓學生了解蔬果的顏色除了是天然色素外，更有其營養價值。在探究實作中，學習從不同角度認識蔬菜果等。 從有趣的實作，讓學生能多在日常中多吃蔬果，並讓學生試著發揮創意，運用提取的色素於日常中。每天的飲食中，蔬菜的攝取量都嚴重不足，很多學生都排斥吃蔬菜，藉由植物的色素的實作，讓學生學習蔬果的顏色奧秘，甚至於讓蔬菜藉由學習培養出吃蔬菜的習慣。
實作材料	(1). 菠菜、紫甘藍菜、檸檬汁、小蘇打粉、肥皂水。 (2). 2 支四色手電筒（白光、藍光、紅光、綠光）。 (3). (3) 酒精、油、濾紙、寬口玻璃瓶、量杯、燒杯、試管、手套等。
評量方式	搶答與獎勵、實作評量、報告評量
教學流程（一） 50 分鐘	課程(一) 講述基本原理（約 20 分鐘） 一、植物色素介紹 (1). 介紹葉綠素、葉黃素、胡蘿蔔素及花青素。 (2). 增加互動式教學: 詢問喜歡吃那些蔬果。 (3). 查看學生帶來的蔬菜水果有哪些。

葉子是綠色的，主要因為含有葉綠素，並且有葉黃素及胡蘿蔔素，然而當日照溫度的變化下，葉綠素退去，由葉黃素、胡蘿蔔素或是花青素等接手，讓樹葉改變了顏色。常聽說吃菠菜及胡蘿蔔能保護眼睛，菠菜主要含有葉綠素、葉黃素及胡蘿蔔素，是綠色蔬菜中含有的植物色素。

探究與實作：萃取葉綠素、葉黃素、類胡蘿蔔素（30 分鐘）

二、影片觀看及講解

觀看葉綠素萃取影片 <https://youtu.be/znyT-5CiVXs>

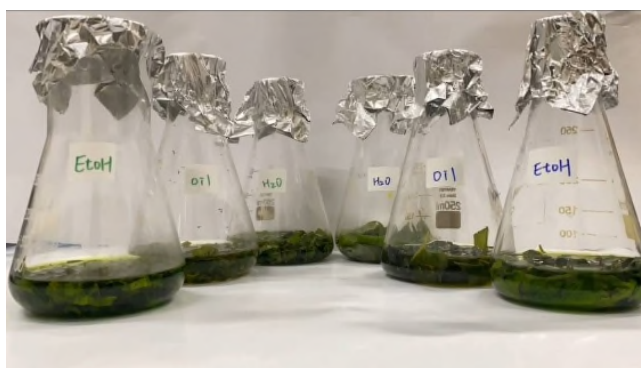


圖 4: 葉綠素萃取(水萃、油萃、酒精萃)



圖 5: 葉綠素用酒精才能萃出(油與水幾乎無萃出)

	葉綠素中含有葉黃素嗎？小小實作檢查看看 觀看影片：https://www.youtube.com/watch?v=o-uWkIf8ba0 觀看影片並認識「濾紙色層分析法」 https://youtu.be/infEFNAHzdE?si=9B31B4yTjyLMs1Pw 問答時間（約 10 分鐘） (1). 為什麼說吃菠菜也可以保護眼睛？菠菜含有葉黃素嗎？ (2). 除了菠菜，還有哪些食物含有葉黃素？
教學流程（二） 50 分鐘	課程(二) 認識多變的花青素（15 分鐘） 除了葉綠素、葉黃素與類胡蘿蔔素外，另外一個變化萬千的色素就是花青素。不同於葉綠素、葉黃素及類胡蘿蔔素，花青素屬於水溶性的天然植物色素，用水就可以輕易萃取出來。花青素隨著環境的酸鹼值不同，可以呈現從紅色、粉色、紫色、藍色及綠色的變化。利用這些變化，可以做成各種不同的顏色的蛋糕、飲料及料理等。譬如蝶豆花萃出來的色素作成的紫色炒飯及漸層變色的飲料等，甚至可以當成一種天然的酸鹼度指示劑。 花青素是一個超級抗氧化物，在醫學研究中，花青素對於眼睛、糖尿病、肥胖、心血管疾病、癌症等有預防及治療的生理功效，但值得需要在課堂上呼籲的，植物色素幾乎都集中在蔬果及穀物的表層皮上，有農藥殘留的問題，可以帶出環境永續及食安等的重要性，讓學生明白環保跟我們息息相關。利用課堂上提取天然色素的動手實作，讓學生可以未來應用到食材中，代替平常食用的化學色素。 探究與實作：萃出花青素及酸鹼變化（35 分鐘） 一、學習花青素提取及變色實驗 花青素酸鹼值變化由紅到紫到藍到青的變化（如圖 2）作為學習參考，讓學生來動手做做看。

二、實驗材料:

● 紫甘藍汁製備:

選用紫甘藍作為試驗材料，取適量紫甘藍與五倍的水混合後，加熱至 60 度約五分鐘左右，得到紅紫色甘藍汁，倒出至燒杯備用。

● 檸檬酸水溶液:

取 1g 檸檬酸，加入 50ml 的水，混合至溶解，及配置得檸檬酸水溶液。

● 碳酸氫鈉水溶液:

取 1g 碳酸氫鈉，加入 50ml 的水，混合至溶解，及配置得碳酸氫鈉水溶液。

三、實驗方法:

將新鮮紫甘藍汁，各別取 2ml 分裝置五個試管中。

- (1). 將其中兩支試管分別以 1:1 及 1:10 比例，加入事先準備好的碳酸氫鈉水溶液，混合均勻。
- (2). 另外再將剩下兩支試管分別以 1:1 及 1:10 比例，加入事先準備好的檸檬酸水溶液混合均勻，觀察其四支試管顏色變化並與紫甘藍原汁進行比較。

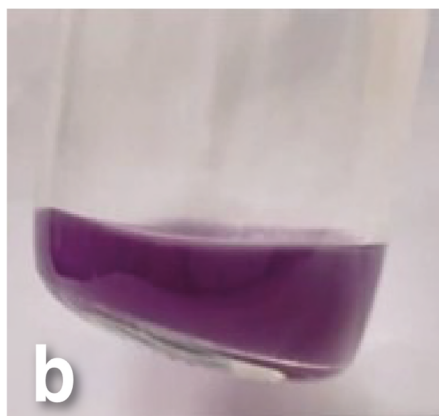


圖 6: a、b 紅紫甘藍菜及其萃取液

觀看花青素萃取影片: <https://youtu.be/sSiiBblVmuU>

四、實作時的成果（見圖 7）。

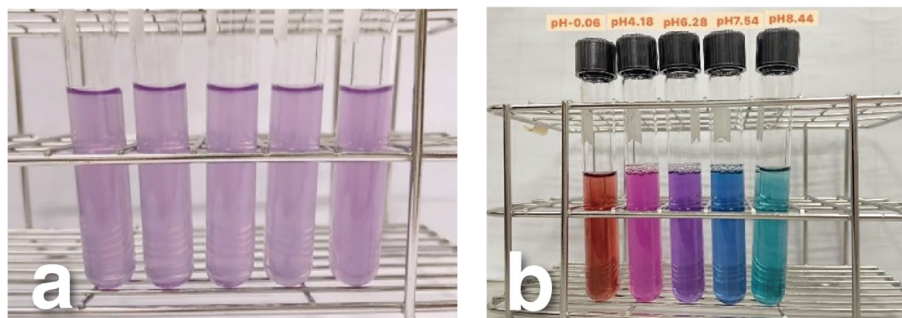


圖 7: a、b 紫色甘藍菜色素提取及酸鹼值變化

（由左到右加入 1:1 及 1:10 檸檬酸水、水、1:10 及 1:1 碳酸氫鈉水）

實作時除了可以用紫甘藍菜外，並可以同時讓學生觀察黑豆、桑葚、藍莓、藏紅花等來做水萃及用油萃來試試看。

- 準備八個試管，四個加入熱水的試管，一旁擺放四個加入油的試管
- 浸泡 10 分鐘。
- 觀察油與水兩邊的試管中顏色的變化。
- 讓學生在紅紫甘藍汁試管中分別加入一些如：肥皂水、洗髮精、檸檬汁等，並觀察顏色的變化。
- 課程中，藉由觀察花青素此水溶性色素的溶解狀況，可以發現水溶性在油中無法萃取出色素來。

課程(三)

實作課：光照葉綠素、花青素（30 分鐘）

本實驗設計：先利用四色光手電筒（藍光、紅光、綠光及白光）來照射上兩節課提取的葉綠素液體及花青素液體等，進一步觀察用光照射植物色素的物理現象，並做一些應用探討。

教學流程 (三)

50 分鐘

一、實驗材料

(四色)手電筒、課堂上從菠菜葉萃取的葉綠素萃取液及從黑豆萃取的花青素萃取液

二、實作方法

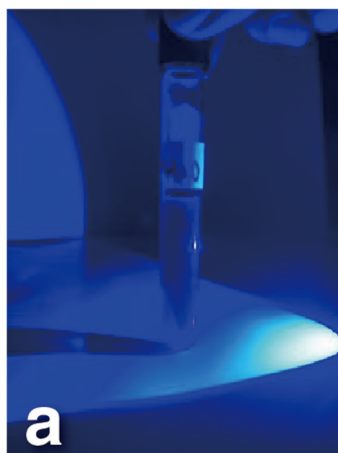
- 將葉綠素萃取液、花青素萃取液都分別裝入玻璃試管 (如圖 8 及圖 9)
- 關燈後拿出手電筒用白光分別照射萃取液試管。
- 不同的試管讓學生猜哪一個葉綠素、花青素



圖 8：葉綠素液



圖 9：花青素液



a



b

圖 10：a、b 哪一支是花青素萃取液？
(用藍光照射葉綠素及花青素萃取液)

三、觀看影片

觀看樹葉為什麼會變色影片 (11:00 開始):

https://www.youtube.com/watch?v=AGa3HtlkG_Q

網路上有傳說，用綠光照射天然橄欖油會發出紅光（如圖 11），可以用來辨識橄欖油的真偽，這原理是什麼呢？

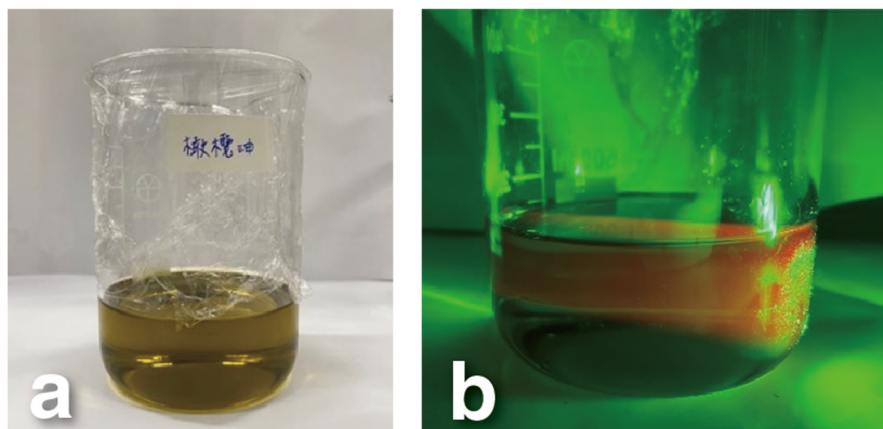


圖 11: a、b 冷壓橄欖油 與 用綠燈照橄欖油觀察

討論、評量(獎勵)與回家作業 (20 分鐘)

四、學習評量與回答問題

- (1). 看到樹葉是綠色的，是光的透射還是反射？
- (2). 花青素是水溶性還是油溶性的？
- (3). 酸性的花青素會偏紅色還是藍色？
- (4). 用強光或藍光或紫外線照葉綠素萃取液時會看到綠或藍或紅色？

五、回家作業

- (1). 用燈照照看家裡的橄欖油，觀察並拍照，並試著說明。
- (2). 拍照並記錄一週所吃含葉綠素的食物。

場地需求

一般教室即可

肆、討論

在課堂中學生從家中帶來紅龍果皮來萃取花青素，但其實火龍果的色素不是花青素，也不是類胡蘿蔔素，是一種較特殊的植物色素，為水溶性的黃色及紅色色素（如圖 12），稱為甜菜素（betalain），甜菜素是一種特殊的水溶性色素，與花青素在結構上不同(Li, Meng, Zhu, & Li, 2019)，但對溫度的安定性較差，加熱容易褪色，存在於甜菜及一些仙人掌果實中，如火龍果、菠菜、山莧等都屬於石竹目，含有高濃度的甜菜鹼，而不是花青素，許多研究中表示火龍果中並無花青素(Pucker & Brockington, 2022)，這兩種色素並不存在於同一植物中(Zhao, Zhang, Long, Wang, & Yang, 2022)。

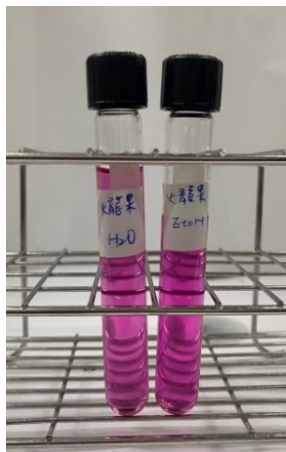


圖 12: 火龍果甜菜素萃取液

另外一個在光照葉綠素萃取液或橄欖油的實作中，發現用白光或是紫光等照射葉綠素萃取液時，萃取液會呈現紅色的特殊現象，是為葉綠素的螢光現象。葉綠素在照光後一段時間，會放出波長為 735nm 與 700nm 的紅色螢光稱為葉綠素螢光 (Chlorophyll fluorescence)。主要原理是：植物中的葉綠素分子吸收的光能除了啟動了光合作用外，尚會有一些剩餘的能量（約 1% 的陽光）會被重新利用，然後發出更長波長的紅光。近年來環保的重視及碳費的徵收，植物吸收二氧化碳的能力再次被重視，而葉綠素螢光是植物只發生在行光合作用時才會發出的紅光，作為了科學家觀測植物吸收二氧化碳的一種指標。美國太空總署(NASA)於 2014/7/1 發射了一個新的衛星主要觀察世界各國二氧化碳的排放情形，該衛星也搭載了偵測螢光的設備，讓全世界可以透過該設備拍攝到一點一點暗紅色的螢光，代表著地球上植物進行光合作用的狀況(NASA Goddard,2013; Hand, 2014)。

除此之外，學生亦在找資料的過程中提出，有學校利用葉綠素的特色，發明了一個環保的葉綠素電池的發明，提供了一個太陽能電池以外的一個綠能的啟發。這些關於跨領域的一些看似平凡的原理探究，能激發更多的創新出來。

伍、結語

跨領域的科學教育推廣，除了讓學生認識到身邊看起來的一些稀鬆平常的事物，卻有著豐富的物理、化學及自然科學原理，透過學習體會到簡單的原理，卻可以發展到太空的運用，更希望透過有趣的教學跟半強迫性的拍照記錄作業，讓學生在飲食上能多攝取一些蔬菜。而收到學生反饋最多的是學生回家用雷射筆去照射家裡的橄欖油，沒觀察到紅色螢光，需要特別告知初榨橄欖油富含葉綠素比較能有螢光反應。將觀察結果拍到群組中，學生反應家裡人特別感到有趣。而課堂中學生曾問起太空中如何觀察葉綠素的螢光，而近年來環境變遷的議題與碳稅的開徵，如何從有趣的螢光現象，進而學習到衛星觀測到的光合作用與溫室效應的科普教學，可做為未來教學的內容。

致謝

感謝高師大物理系柯景元教授及利見興教授的指導，及研究團隊邱思源、王碩宏、董元銘研究生提供各種物理實作建議。謝謝健茂生物科技媒體部及研發團隊，特別是陽日中圖片的繪製等協助，及謝甫宜老師的教具上的協助。

參考文獻

- 馬元臺、張隱庵(1986)：黃帝內經素問靈樞合編。台聯國風出版社。
- 蔡尚恬、蔡振章(2004)：天然色素的顏色化學。科學發展(381)，54-59。
- 科技大觀園。(2012, April 16). 71. 葉綠素電池 [Video] YouTube. <https://youtu.be/Xq7JYmib1Tg?si=6jkDFkmckZ9CH2VO>
- 翁儷芯(2012)：葉漸紅，自然而然的。2023年7月12日，取自 <https://www.moa.gov.tw/ws.php?id=2446694&print=Y>
- 劉玉山、張永達(2009)：植物色質體的發育與演化。2023年7月12日，取自 <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1123>
- Abar, L., Vieira, A. R., Aune, D., Stevens, C., Vingeliene, S., Navarro Rosenblatt, D. A., Chan, D., Greenwood, D. C., & Norat, T. (2016). Blood concentrations of carotenoids and retinol and lung cancer risk: an update of the WCRF-AICR systematic review of published prospective studies. *Cancer Med*, 5(8), 2069-2083. doi:10.1002/cam4.676
- Armstrong, G. A., & Hearst, J. E. (1996). Carotenoids 2: Genetics and molecular biology of carotenoid pigment biosynthesis. *Faseb j*, 10(2), 228-237. doi:10.1096/fasebj.10.2.8641556
- Black, H. S., Boehm, F., Edge, R., & Truscott, T. G. (2020). The Benefits and Risks of Certain Dietary Carotenoids that Exhibit both Anti- and Pro-Oxidative Mechanisms-A Comprehensive Review. *Antioxidants (Basel)*, 9(3). doi:10.3390/antiox9030264
- Dulińska-Litewka, J., Hałubiec, P., Łazarczyk, A., Szafrński, O., Sharoni, Y., McCubrey, J. A., Gąsioriewicz, B., & Bohn, T. (2021). Recent Progress in Discovering the Role of Carotenoids and Metabolites in Prostatic Physiology and Pathology-A Review-Part II: Carotenoids in the Human Studies. *Antioxidants (Basel)*, 10(2). doi:10.3390/antiox10020319
- Egner, P. A., Wang, J. B., Zhu, Y. R., Zhang, B. C., Wu, Y., Zhang, Q. N., Qian, G. S., Kuang,

- S. Y., Gange, S. J., Jacobson, L. P., Helzlsouer, K. J., Bailey, G. S., Groopman, J. D., & Kensler, T. W. (2001). Chlorophyllin intervention reduces aflatoxin-DNA adducts in individuals at high risk for liver cancer. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 98(25), 14601-14606. doi:10.1073/pnas.251536898
- Ghosh, D., & Konishi, T. (2007). Anthocyanins and anthocyanin-rich extracts: role in diabetes and eye function. *Asia Pac J Clin Nutr*, 16(2), 200-208.
- Hand, E. (2014). Remote sensing. Carbon-mapping satellite will monitor plants' faint glow. *Science*, 344(6189), 1211-1212. doi:10.1126/science.344.6189.1211
- He, J., & Giusti, M. M. (2010). Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties. *Annu Rev Food Sci Technol*, 1, 163-187. doi:10.1146/annurev.food.080708.100754
- Johnson, E. J. (2002). The role of carotenoids in human health. *Nutr Clin Care*, 5(2), 56-65. doi:10.1046/j.1523-5408.2002.00004.x
- Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., & Lim, S. M. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food Nutr Res*, 61(1), 1361779. doi:10.1080/16546628.2017.1361779
- Li, G., Meng, X., Zhu, M., & Li, Z. (2019). Research Progress of Betalain in Response to Adverse Stresses and Evolutionary Relationship Compared with Anthocyanin. *Molecules*, 24(17). doi:10.3390/molecules24173078
- Lucia, G., Massimiliano, T., & Marco, L. (2017). How Does Chloroplast Protect Chlorophyll Against Excessive Light? In J.-L. Eduardo, Z. Leila Queiroz, & Q. Maria Isabel (Eds.), *Chlorophyll* (pp. Ch. 3). Rijeka: IntechOpen.
- Merzlyak, M. N., & Chivkunova, O. B. (2000). Light-stress-induced pigment changes and evidence for anthocyanin photoprotection in apples. *J Photochem Photobiol B*, 55(2-3), 155-163. doi:10.1016/s1011-1344(00)00042-7
- NASA Goddard. (2013, July 25). NASA | *Seeing Photosynthesis from Space* [Video] YouTube. <https://youtu.be/1XilneV3cJI?si=0jeEnRPprAneT-1N>
- Polyakov, N. E., Focsan, A. L., Gao, Y., & Kispert, L. D. (2023). The Endless World of Carotenoids-Structural, Chemical and Biological Aspects of Some Rare Carotenoids. *Int J Mol Sci*, 24(12). doi:10.3390/ijms24129885
- Pucker, B., & Brockington, S. F. (2022). The evidence for anthocyanins in the betalain-pigmented genus *Hylocereus* is weak. *BMC Genomics*, 23(1), 739. doi:10.1186/s12864-022-08947-1
- Saini, R. K., & Keum, Y. S. (2018). Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chem*, 240, 90-103. doi:10.1016/j.foodchem.2017.07.099
- Saini, R. K., Prasad, P., Lokesh, V., Shang, X., Shin, J., Keum, Y. S., & Lee, J. H. (2022). Carotenoids: Dietary Sources, Extraction, Encapsulation, Bioavailability, and Health Benefits-A Review of Recent Advancements. *Antioxidants (Basel)*, 11(4). doi:10.3390/antiox11040795
- Vo, T. V., Dang, T. H., & Chen, B. H. (2019). Synthesis of Intelligent pH Indicative Films from Chitosan/Poly(vinyl alcohol)/Anthocyanin Extracted from Red Cabbage. *Polymers (Basel)*, 11(7). doi:10.3390/polym11071088
- Yabuzaki, J. (2017). Carotenoids Database: structures, chemical fingerprints and distribution among organisms. *Database (Oxford)*, 2017(1). doi:10.1093/database/bax004
- Zhao, X., Zhang, Y., Long, T., Wang, S., & Yang, J. (2022). Regulation Mechanism of Plant Pigments Biosynthesis: Anthocyanins, Carotenoids, and Betalains. *Metabolites*, 12(9). doi:10.3390/metabo12090871