

楓葉變紅了

天然色素的 顏色化學

春夏秋冬交替，大自然就像一個魔法師，
上演著一幕幕多采多姿的美景。
主導這些顏色變化的，
就是自然界豐富的天然色素與有趣的顏色化學，
它們同時也是維繫植物生長的光合作用所需要的催化劑。

■ 蔡尚恬 蔡振章

自然界的天然色素

在四季分明的地區，大自然就像一個魔法師，上演著一幕幕的美景，把整個空間裝扮得格外生動美麗。

每年三、四月百花盛開，樹梢長出粉紅色細嫩的新芽，告訴人們春天到了。到了夏天，大地布滿了綠油油的樹葉，一片欣欣向榮的景色。當秋天來臨時，大地又像一張畫布，任憑大自然揮灑，樹葉一下子由綠轉黃、變金黃、變紅，滿山遍野五彩繽紛，構成了美麗的秋天景色。進入冬天後，落葉樹張著光禿禿的樹幹，寒帶植物也帶著青翠的綠色樹枝，頂著皚皚白雪，伴隨著聖誕與新年節慶的到來。

這些多采多姿的顏色變化，背後的魔法師就是自然界豐富的自然色素。同時，這些天然色素也是維繫植物生長的光合作用所需要的催化劑。

植物體內含有許多色素，各有不同的功能，主要的

植物色素有葉綠素、葉黃素、胡蘿蔔素和花青素等。葉子的色素存在於細胞質內的色粒中，分為綠色粒，呈綠色或黃色；無色粒，不呈現顏色；與雜色粒，呈紅色或黃色，等三種。隨著細胞的成長，色粒會分裂而增多，或分化變色。

葉綠素

葉綠素是一個巨大分子，其基本單位是普菲林環，結構與血紅素有些類似，但以鎂離子為中心離子，是葉子進行光合作用時，吸取光能的主要發色團，共有葉綠素 a、b、c 與 d 四種。葉綠素 a 及 b 存在於高等植物與藻類及藍細菌的葉綠體中，葉綠素 a 會選擇性吸收太陽光內 430 及 660 奈米波長的光波，吸收後剩下的光線經由反射便呈現藍綠色。而葉綠素 b，最高吸光的波長位置是 435 及 643 奈米。葉綠素 c 與 d 則存在於藻類中。

一個葉綠細胞中可含百個以上的葉綠體，葉綠體的



<http://ardi.idv.tw/Play/E7%A6%8F%E5%A3%BD%E5%B1%B1/福壽山-楓葉25.JPG>

楓葉



<http://cc.hps.jp.edu.tw/00075/相片簿/頁面一楓葉一.jpg.htm>

楓葉

外層稱為囊膜，內有蛋白類的細胞間質叫基質，基質內有葉綠餅，葉綠餅是由多層的葉綠層所疊成，葉綠層內含有綠色的葉綠素及其他色素。葉綠素不溶於水，不會在細胞內流動。

在充足陽光與溫暖的環境下，植物可以用氧、氮、鎂、水、醣類等成分合成葉綠素，鐵、錳、鋅等微量元素則有助於葉綠素的合成。合成葉綠素的最適溫度，隨著植物種類而異，小麥的最適生成溫度在攝氏26~30度之間，馬鈴薯的最適生成溫度在攝氏11~19度之間。葉綠素並不穩定，葉子內各組織缺乏水分，或受到強烈陽光照射時，葉綠素便會被破壞。

胡蘿蔔素類

胡蘿蔔素與葉黃素通稱為胡蘿蔔素類，貯存在葉綠體及雜色粒內。胡蘿蔔素是碳氫化合物，不含氧原子，

分為 α 胡蘿蔔素和 β 胡蘿蔔素。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。胡蘿蔔素類為脂溶性，不溶於水，但可被有機溶劑萃取出來。

胡蘿蔔素類是一種助吸光素，可以吸收藍、紫部分的可見光中的能量，最高吸光的波長是466與497奈米，吸收後剩下的光線呈紅及黃色。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。

花青素

花青素屬於類黃酮，不同於其他色素，花青素是水溶性，存在於表皮細胞的液胞中，但不與細胞膜相接觸，與光合作用無關，也不會干擾葉肉組織中葉綠體進

行的光合作用。有趣的是，花青素的顏色會隨著酸鹼值而變，遇酸變紅，遇鹼變藍，顏色範圍從紅色、粉紅色、紫色到藍色，是一種天然的酸鹼指示劑。

花青素普遍存在於許多成熟果實中，果實顏色視其酸鹼值而定。例如，蘋果成熟時，表皮含有豐富的花青素，吸收藍光、藍綠光、綠光，而呈現紅色。相對地，葡萄表皮則呈紫色。

花青素很容易被水萃取出來，我們可以在家裡進行一個簡單有趣的實驗。紫紅色高麗菜含有豐富的花青素，常用於生菜沙拉、餐桌上裝飾或做德國泡菜。到市場買回半個，切碎後裝入五百毫升玻璃杯內，加滿煮沸的蒸餾水，蓋上蓋子，讓其自然冷卻後，倒出藍紫色液體，即得花青素萃取液。取出約二毫升花青素萃取液，滴入幾滴稀鹽酸，即變為鮮紅色；再滴入幾滴檸檬水，便呈紅紫色；滴入一些鹼性的肥皂水，又變成藍色。

另外，可以取一張白紙或濾紙剪成紙條，浸入花青素萃取液中，將之晾乾後，便是一張酸鹼試紙，滴上洗髮精或其他酸鹼試液，由所顯示的顏色，即可大約得知試液的酸鹼值程度。



楓葉

推動，其中的關鍵性角色是發色團結構。分子內有許多電子軌域，各個電子軌域有不同且不連續的能量，有如樓梯一樣，電子裝填的原則是先填滿低能階電子軌域之後，再進駐高能階電子軌域。

依此規則，發色團結構的電子組態稱為基態，其中最高能量的電子軌域稱為「最高裝填軌域」。當發色團電子吸收光線，最高裝填軌域上的電子獲得光子能量，跳到高能階的「最低未裝填軌域」，稱為激態電子。

葉綠素分子發色團為高度共軛雙鍵結構，將葉綠素的電子由「最高裝填軌域」，激發到高能階的「最低未裝填軌域」所需能量很低，僅相當於紅色光波的光子能量，因此可以吸收太陽光的紅色光而呈現綠色。

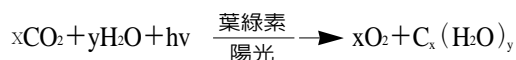
當這個電子由高能階的電子軌域跳回到低能階的電子軌域時，即將這些能量釋放出來，轉移到水分子進行光水解作用，亦稱為光反應，促使水分子分解產生 H^+ 、氧及電子，合成腺核三磷酸（ATP）與（還原型）菸鹼醯胺腺嘌呤二核酸磷酸（NADPH）。在葉綠素基質中進行暗反應，將二氧化碳固定化後，經由酵素催化，與光水解作用產生的 ATP 與 NADPH 反應，合成碳水化合物。

胡蘿蔔素是一種助吸光素，具有共軛雙鍵發色團結構，其激發能量高低隨著共軛雙鍵數目而定，共軛雙鍵結構越多，電子便越容易被激發，所需的光子能量也就比較低。 C_{40} 胡蘿蔔素具有 11 個雙鍵，其吸收光波長增加到 466 與 497 奈米，相當於藍綠色光波的光子能量，可以把「最高裝填軌域」電子激發到高能階的「最低未裝填軌域」，該能量高於葉綠素芳香烴發色團結構的光子能

植物色素	吸 收 光 線		呈色
	顏色	波長 (nm)	
葉綠素	紅光、藍光	640~660；420~430	綠色
胡蘿蔔素、葉黃素	藍光、藍綠光	466；497	黃色
花青素	藍光、藍綠光、綠光	500	紅色

光合作用

植物進行光合作用，產生碳水化合物，才得以生長、開花與結果，同時提供了動物維持生存的基本食物。因此，光合作用是地球上的生物得以延續的主要方法。光合作用的奧秘在於葉綠素的電子傳遞與能量轉換機制，其反應簡式是



光合作用產物是氧氣與以醣類為主的 $C_x(H_2O)_y$ 碳水化合物，全反應是一吸熱反應，將能轉換成化學能，以碳水化合物方式儲存能量。

光合作用是依賴著一連串的电荷與能量轉移反應所

量。也因為如此，胡蘿蔔素可以將所吸收的高能光子傳遞給葉綠素光子，由於胡蘿蔔素可以吸收葉綠素吸收不到的光波長，而使得光合作用的色光光譜變寬。

光合作用所需的二氧化碳與水分子，從植物的下表皮進入葉肉細胞的葉綠體進行光合作用，光合作用的產品氧氣則以氣態方式經過下表皮組織擴散到大氣中，碳水化合物產物則經過葉柄基部，運輸到樹木各部位。

顏色	吸 收 光 波			物質呈色
	波 長 (nm)	頻 率 (s ⁻¹)	光子能量 (J · photon ⁻¹)	
紫色光	425	7.1 x 10 ¹⁴	4.7 x 10 ⁻¹⁹	黃色
藍色光	475	6.3 x 10 ¹⁴	4.2 x 10 ⁻¹⁹	橙色
藍綠光	500	6.0 x 10 ¹⁴	4.0 x 10 ⁻¹⁹	紅色
綠色光	525	5.7 x 10 ¹⁴	3.8 x 10 ⁻¹⁹	紫紅色
黃色光	575	5.2 x 10 ¹⁴	3.4 x 10 ⁻¹⁹	紫色
橙色光	625	4.8 x 10 ¹⁴	3.2 x 10 ⁻¹⁹	藍色
紅色光	700	4.3 x 10 ¹⁴	2.8 x 10 ⁻¹⁹	藍綠色

賞楓季節

秋天裡可以看到許多變色的植物，五角楓、銀杏等植物的葉子，到了深秋變成金黃色，而葉子變成紅色的有野漆樹、烏桕、槭樹、爬牆虎、欖仁樹等，秋天賞楓已經蔚為國民旅遊的風潮。

有賞楓經驗的人都知道，要觀賞到滿山楓紅的景色，事前需要詳細周密的行程規劃，包括選擇賞楓景點與安排恰當的時間，即使如此，還需要氣溫的配合，也就要些許的運氣，必須在天時與地利的配合下，才能演出一個完美的賞楓行程。完美賞楓困難度這麼高的原因，係因為楓葉變紅乃是一個精密的化學反應。



楓葉

賞楓首先需要認識楓樹，我們到各大賞楓勝地觀賞的楓樹多是青楓。另外一種楓香樹與青楓長得很像，葉子大都呈現黃葉或綠葉，不如青楓紅得漂亮，我們可以由一些特徵予以分辨。

「青楓」亦稱為「槭樹」，槭樹大多生長在溫帶地區，屬於槭樹科槭樹屬。「楓香」是亞熱帶落葉喬木，屬於金縷梅科楓香屬，在台灣生長在低海拔至一千五百公尺的高度。就葉子而言，楓香葉是交互排列，葉形呈三裂的掌狀，就像把拇指和小指彎下比出「三」的手勢一樣，葉緣平滑。槭葉是兩兩對生，葉形呈五裂的掌狀，就像手掌張開一樣，葉緣呈鋸齒狀。就果實而言，楓香樹的果實像圓形有刺的蒴果；槭樹果實則呈八字型的翅膀。

在驚嘆楓葉變紅的大自然美景時，讓我們來探討有趣的顏色化學。植物體內主要的色素有葉綠素、葉黃素、胡蘿蔔素和花青素，葉子變色主要由植物體內色素的變化所主導。春、夏季日照長，光合作用特別活躍，葉片行光合作用除合成醣類外，也加速葉綠素的分解，夜晚時，葉綠素又開始合成。由於葉綠素持續不停地分解與再生，因此，葉子含有豐富的葉綠素。當葉子內同時含有葉綠素與胡蘿蔔素時，葉子會吸收紅光、藍光、藍綠光，剩下的光線反射，葉子便呈現綠色。

進入秋天後，日照時間縮短，夜間漸長，因應日照時間的變化，落葉樹種會在葉柄基部產生離層素，葉子因而脫落，卻也阻止養分的運輸。同時，溫度降低後，葉綠素合成的速率會變慢。葉內水分減少的結果，葉綠素在低溫發生分解，但葉綠素合成的速率卻來不及補充，因此葉綠素含量逐漸降低。此外，胡蘿蔔素遠比葉綠素穩定，即使葉綠素消失了，胡蘿蔔素仍可存於葉子中，葉片中的葉黃素、胡蘿蔔素等逐漸主宰樹葉顏色，導致葉片呈現黃色。

由於植物輸送養料的能力減弱，葡萄糖就被留在葉子裡，於是甜度越來越高。有些植物會將葉子內的葡萄糖和葉黃素在陽光作用下，逐漸生成花青素。

到了深秋，葉子的葉綠素不斷減少，葉子的綠色褪去，而花青素卻不斷增加，紅色增強，於是就變成鮮紅可愛的樹葉了。日光愈強，植物產生的花青素就愈多，溫差越大，葉綠素降得越低，葉片的顏色變得越紅。研



<http://member.mine.ku.edu.tw/www/ghk/tour2002/kyotopic018.htm>

楓葉

究發現，楓樹缺氮養分時，楓葉會更紅，更早變紅。因此，楓葉變紅的程度與日照、氣溫、乾旱、污染、氮元素有關。

另外，紅色楓葉有遮光劑的作用，使得落葉時間延後，楓樹因而可以吸收更多的營養，因此，楓葉變紅的現象可以看成楓樹對自然界環境變化反應的結果。葉綠素與花青素相對含量與生成速率，也可以解釋植物的嫩芽和新葉呈現紅色的原因。葉綠素的生成速率高於花青素時，植物的嫩芽和新葉便綠得快。當花青素的生成速率高於葉綠素時，植物的的嫩芽和新葉就呈現紅色。等到葉綠素色素增加後，葉子就變回綠色。

台灣的賞楓景點大多呈點狀或帶狀分布，整片楓樹純林只有在南投奧萬大、苗栗馬拉邦山、石門水庫等少數地區才可看到。賞楓必須選在秋冬交替，氣候由暖乍寒，頭兩波寒流來襲後的三、四天，是楓葉轉紅的時候，但這兩波寒流間隔最好約半個月到三周時間，若間隔太近，樹葉還來不及轉紅；若間隔太長，在第二波寒流到來之前，就已落葉歸根。

賞楓最好位置是北風吹得到樹的區域，例如稜線

上，至於懸崖邊、空曠地等位於山谷、低窪地區的楓樹，通常還來不及轉紅，葉片就飄落了！。平地的楓葉因為日夜溫差太小，沒有辦法變紅。不過，你可以剪下一片楓葉，在家裡把它浸在砂糖水中，過些時候，糖分變成花青素，楓葉就變紅了。

師法自然

一年四季，一幕幕美麗的大自然景致，都蘊含著自然的奧秘，在有趣的顏色化學背後，亦與地球萬物賴以生存的植物光合作用息息相關。科學家師法自然界的光合作用，發明了光觸媒，藉著光的能量催化許多有用的人造光合作用化學反應，包括太陽能電池、空氣淨化、有毒物質分解等，展現出人類智慧與大自然奧秘的結晶。 □

蔡尚恬
中興大學昆蟲系

蔡振章
高雄大學應用化學系