

## 照亮生命科學的地球微光(三)

### 生物螢光

文／鄭明倫 · 圖／Wikimedia Commons (WC)、鄭明倫、林偉爵

#### 摘要

有別於生物（化學）發光(bioluminescence)，生物螢光(biofluorescence)是一種光致發光(Photoluminescence)現象：當一個螢光源(fluorophore)吸收較高能量的光波，瞬間將其轉換為較低能量的光散發出去，一旦發光源移開，螢光也隨之消失。若移開發光源仍能持續發出螢光，則稱為磷光現象(phosphorescence)，蓋其螢光源在能量吸收、傳遞和發散速率較慢。不同螢光源對不同波長的光的吸收有選擇性，因此發光源本身的光和螢光源的結構與環境都會影響到螢光的有無、發散出的色光與強度。除了生物，一些礦物也能發出螢光。

螢光生物的種類和類別遠多於發光生物，特別是在海洋中，大部分的海生動物都能發出螢光，但是必須在攝影鏡頭前加上濾鏡濾除過剩的藍光才能看到。除了水母、珊瑚、海葵等等無脊椎動物，許多魚類甚至海龜也都能發出生物螢光。海水的吸光能力很強且具有高度選擇性，紅光的穿透力很低，大洋中藍光最強，因此在數億年的演化中，藍光最能激發明顯的生物螢光，而許多海生動物也看得到這些螢光，因此海底世界實際上是色彩繽紛，只是在海水中人類肉眼所見充斥著藍光因而看不到這些螢光。陸地上會發出螢光的生物較少，但是跟海生動物不同的是牠們主要靠紫外光(UV)激發螢光。目前已知有一些植物、真菌、蛙、鳥、節肢動物能發出螢光。

生物螢光的功能目前還在新興研究階段，不同類群的生物螢光有不同的功能。例如水母、珊瑚、海綿這些沒有眼睛的動物多半都具有生物螢光，顯然其最初的作用並非用於溝通，而可能像是遠古海洋環境中的防曬乳：動物在早期演化階段便演化出螢光蛋白，吸收強烈的太陽輻射而將其轉換為較低能量的光釋放出來，以避免強光的傷害。後續的演化過程中，這些螢光蛋白基因普遍承繼至各類動物身上而保留下來。等到眼睛演化出來後，螢光的功能乃逐漸轉變為種內和種間的溝通，例如求偶、辨識、低光度下的可見度、隱蔽、偽裝、警示、誘引等等。但是螢光也未必都具有明確的行為生態功能，也許只是某些蛋白質的特性而已。

關鍵詞：生物螢光、光致發光、海生、藍光、UV 光、功能

本期介紹常與生物（化學）發光混淆的生物螢光(biofluorescence)。不同於前者，螢光生物本身並非發光源，而是吸收發光源發散出來的高能量光（例如紫外光(UV)或藍光），瞬間將其轉換為較低能量的光（如綠、黃、橙、紅光）發散出去，屬於「光致發光」的物理現象。能吸光致光的物質稱為螢光源(fluorophore)，有的是小分子，有些則是較大的蛋白質分子。不同的螢光源對不同光波有選擇性，且其進入激發態/退回基態的速率和轉換能量的效率受到本身結構與周遭環境的影響。因此，照射不同能量位階的光會決定螢光的有無，或產生不同光色和強度的螢光，而一旦移開光源，螢光也隨之消失。除了生物，一些礦物也能產生螢光（圖 1）（參見館訊 135 期「螢光礦物」）。若移開光源仍然會持續發光，則稱為磷光現象(phosphorescence)，這是因為其能量轉換和釋放過程較緩慢的緣故。磷光多半見於礦物（如夜明珠的主成分螢石）或人造物，生物中並未發現真正的磷光現象。

無論是種類或類群數量，螢光生物遠多於發光生物。很早以前水族館就知道要用偏藍光或帶有 UV 的燈具輔助白光照明，讓海水缸顯得色彩繽紛，單純的白光反而沒有這樣的功能。近十年來生物學家更訝異地發現生物螢光的普遍程度幾乎涵蓋各類淺海動物，不只珊瑚、水母，甚至為數眾多的魚類類群也能發出各種不同程度與光色的螢光（圖 2、3）。海水有很強的選擇性吸光能力，陽光進到大洋中，其紅光很快就被吸收殆盡，而藍光則可穿透數百米（圖 4）。因此在人眼看來，海洋幾乎是單純的藍綠色調環境，深度越深則越藍。太陽下反射紅光的紅蘋果在海水中不再是紅的，因為沒有紅光。然而這也讓生物學家感到不解，何以在單調的色光背景下有五顏六色的生物螢光？而這樣的現象為何長久以來都沒被注意？過去的水下攝影多半是帶著強力的白光燈源，五顏六色的魚在人眼看來就如同陽光底下所見，但這並非牠們在同類眼中的面貌。近年來科學家帶著藍光燈下海，只要在攝影設備加上黃色濾鏡濾除過剩的藍光，繽紛的生物螢光便現形了。若使用 UV 光源，由於人眼原本就看不到 UV 光，因此在近距離裸眼便可見被激發的螢光，但不那麼鮮明。換句話說，在海水環境中，藍光激發的生物螢光是最普遍且效能最好的。在數億年的演化歷史中，藍光環境形塑了海生生物的各種適應，利用藍光激發螢光便是其一。從視覺來說，人眼是適應陸地上的日光與月光環境的，因此在海中靠裸眼無法看到這些螢光現象，但許多海生動物都看得到。

一如生物發光，陸地上的螢光生物類群也遠不如海生生物。但與海生生物不同的是，陸上的生物螢光幾乎都是 UV 而非藍光所激發。這意味著白天大太陽底下有強烈 UV 光時，或許有許多生物正散發著螢光，不過由於背景光線太強所以人眼看不到。而晚上 UV 光微弱或全無，無法激發螢光，所以自然狀態下陸地上的生物螢光難得一見。可是只要夜間拿著 UV 光手電筒（如驗鈔筆）到林子裡走一趟，就會發現能發出螢光的生物也還不少，例如所有蠍子在 UV 光下都能發出

藍綠色螢光（圖 5），某些蜘蛛也是。21 世紀初期動物學家發現許多鳥（如鸚鵡）的鳥羽能散發螢光，近年在南美洲甚至發現一種早已被命名的樹蛙能在 UV 光下發出藍綠色螢光。作者自己也發現真菌、樹脂（以及其經過千萬年轉變而成的琥珀）、植物的某些部位、某些毛蟲甚至蟲吐的絲也有生物螢光，某些昆蟲身上的某些部位也有明顯的螢光（圖 6-8）。或許陸地的生物螢光現象比想像中的還要普遍。

生物螢光到底有什麼作用？目前有些科學假說，各自適用於不同類群的生物。像水母、珊瑚、海綿這類沒有眼睛的動物，反而有極高比例具有生物螢光，因此最初的螢光應非用於溝通。科學家推測是在遠古的環境缺乏現今大氣層結構的保護，來自天空的輻射非常強烈，於是，海生動物演化出螢光蛋白可能類似護身符，將高能量的光轉化為低能量的光放出，以保護自己。等到眼睛在演化登場，不論是用於同種或異種間，螢光才逐漸轉為溝通的作用：同種可用於求偶展示與辨識，異種間則是欺敵、警戒或偽裝（融入背景）（圖 9）。至於陸生生物的螢光功能，多半圍繞在 UV 光的視覺上，例如鳥類和多數的節肢動物都看得見 UV 光，因此 UV 激發的螢光可能有其功能，例如在鸚鵡的例子，科學家推測螢光本身可能並非訊號(signal)，而是能增加背景的反差使鄰近羽毛的訊號更加被凸顯。某些跳蛛（蠅虎）身上特定的斑紋具有螢光，是重要的求偶展示訊號。科學家也推測在微弱的光線下，樹蛙所發出的螢光可能可以增加牠們的可見度。蠍子的螢光則被認為是蠍子偵測自身是否曝露、躲藏地點是否隱密的訊號。但也有科學家認為，多數昆蟲身上的螢光可能並無行為生態上的功能，而只是某些蛋白質的特性。例如著名的節肢動物彈性蛋白(resilin)在 UV 光下便能發出藍色螢光（圖 10），這也是初步尋找節肢動物彈性蛋白的有效方法。還有許多其他的長鏈蛋白也具有螢光性，所以昆蟲身上或多或少都具有螢光現象，特別是在骨化較低的節間，而多數昆蟲的眼睛也都能發出螢光。（待續）

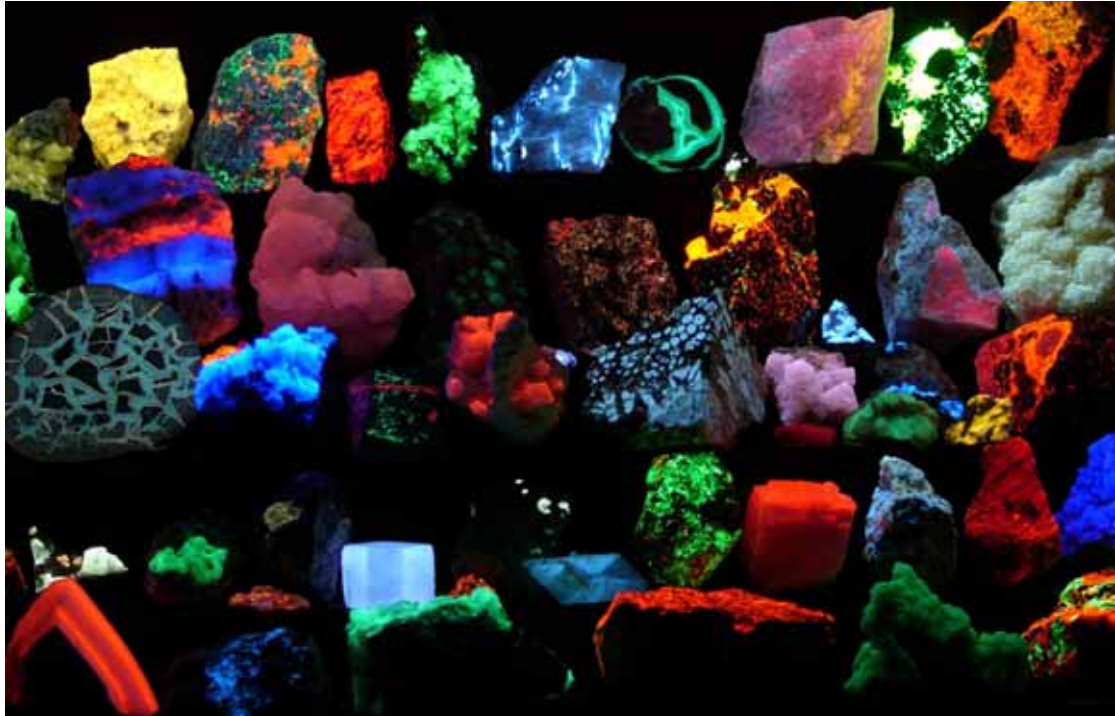


圖 1. 紫外光照射下發出各色螢光的礦物(Hannes Grobe/AWI, WC)



圖 2. 呈現各色螢光的珊瑚(Tiia Monto, WC)

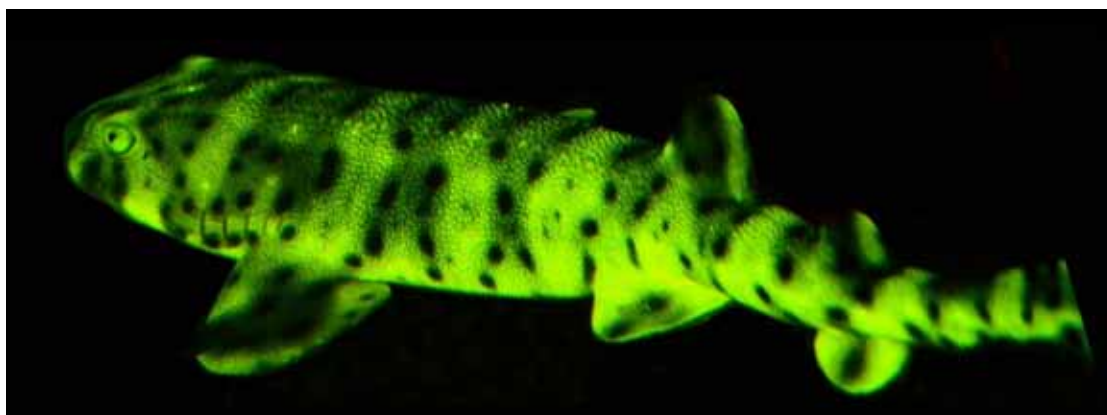


圖 3. 呈現綠色螢光的東太平洋網紋絨毛鯊(Sparks, J. S 等, WC)

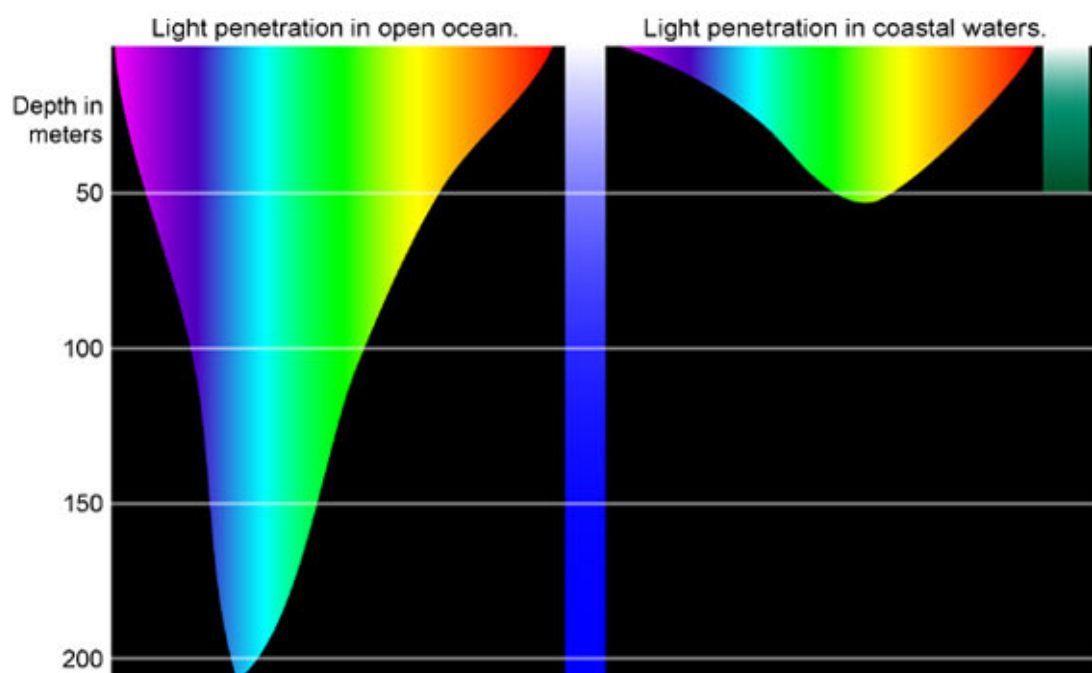


圖 4. 不同波長的光能穿透大洋(左)和沿海海水的深度示意圖，淺海有許多粒子使海水混濁，綠光的穿透力最強，大洋則是藍光(NOAA, WC)



圖 5. 博物館的蠍子標本即使經過十多年，在 UV 光下(395nm)仍能發出明亮的螢光(鄭明倫攝)



圖 6. 蓬萊茶斑蛾的幼蟲在白光下呈現黃色和暗色斑紋(上)，在 UV 光(395nm)下則發出明亮的藍綠色螢光(鄭明倫攝)

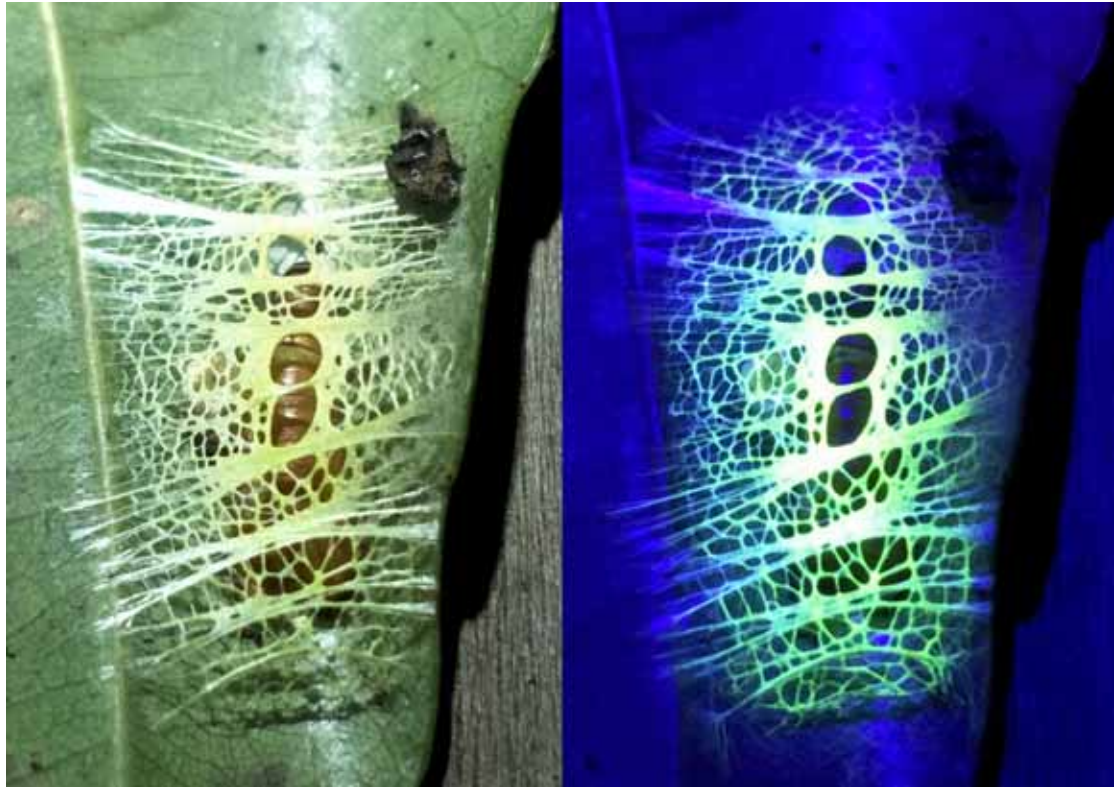


圖 7. 某種巢蛾類的蛹的繭巢在白光下為淺黃綠色(上)，在 UV 光(395nm)下則發出明亮的藍綠色螢光(鄭明倫攝)





圖 8. 原產於馬來西亞的扁竹節蟲的雌蟲標本在 UV 光下(395nm)發出螢光，但右側的兩種竹節蟲則無(林偉爵攝)

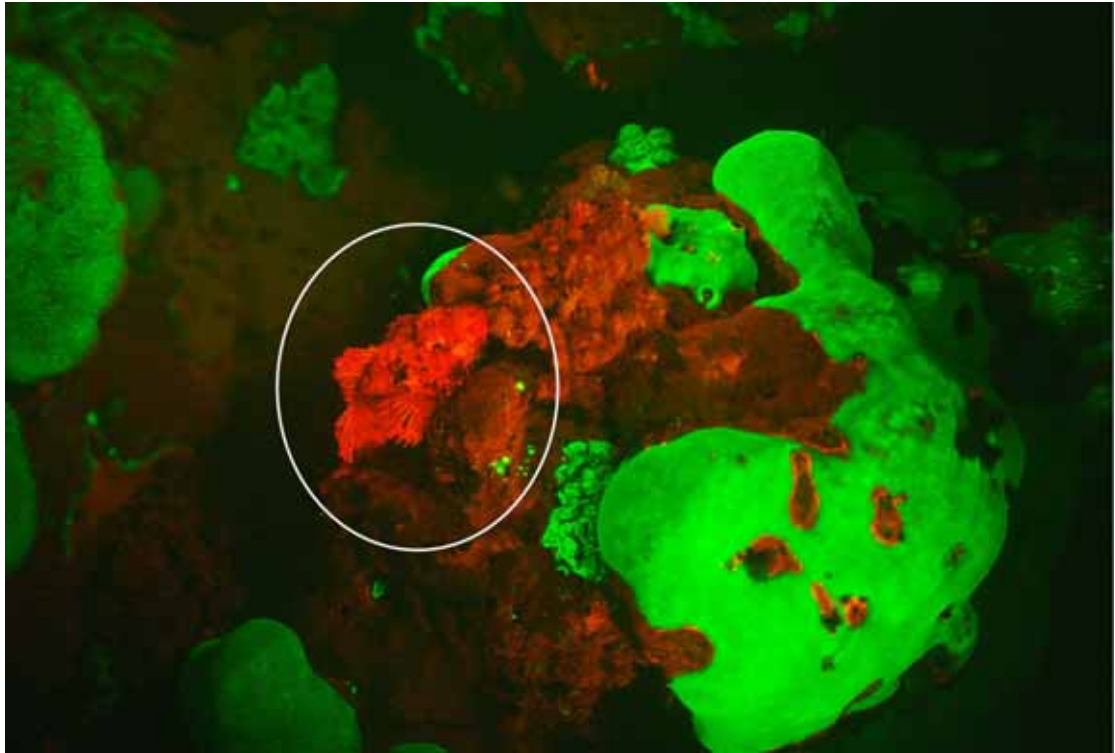


圖 9. 一隻鮎魚(石狗公)被藍光激發的紅色螢光與背景的藻類螢光融為一體 (Sparks, J. S. 等, WC)

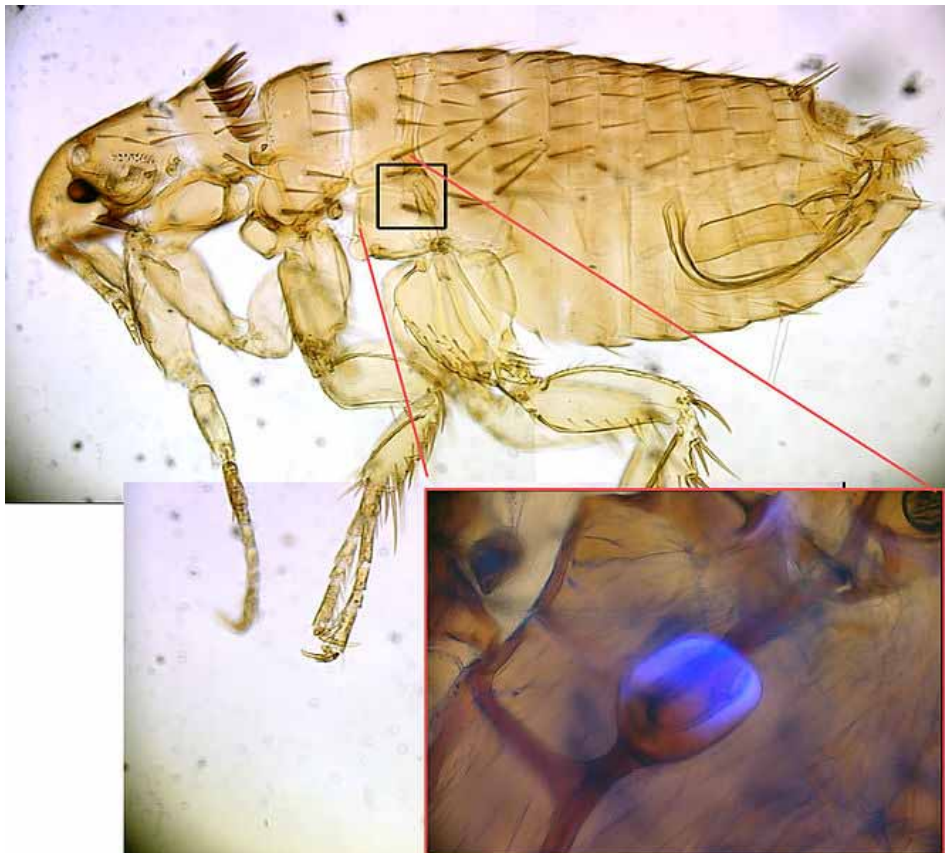


圖 10. 跳蚤的後足基節關節具有彈性與耐用性極佳的節肢彈性蛋白墊(resilin pad)，在 UV 光下會發出藍色螢光(CSIRO, WC)。