

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 植物學科

(鄉土)教材獎

052102

探討重金屬離子對臺灣羽苔之生理影響

學校名稱：國立新竹女子高級中學

作者： 高二 許茹茵 高二 韓夢凡 高二 楊翔安	指導老師： 許庭嘉
---	------------------

關鍵詞：蘚苔、重金屬、光合色素

摘要

竹科為新竹帶來不計其數的好處，卻也造成環境汙染，重金屬汙染就包含其中。重金屬若未經處理就流放到土壤、水質等，影響生態環境。蘚苔是方便取得的生物監測指標，因此本研究以臺灣羽苔作為模式生物，探討不同重金屬種類、濃度對其葉綠體個數、光合色素含量、光反應速率及細胞壁厚度的影響。根據實驗結果我們發現低濃度的鋅、銅離子對臺灣羽苔的葉綠體個數、光合色素含量、光反應速率皆有提升，並且找到鋅離子、銅離子對臺灣羽苔有正向影響的濃度區間，而鋇離子、高濃度的鋅銅離子則對植物有相反的影響。細胞壁的部分，低濃度鋅離子會造成細胞壁增厚，而在高濃度時變薄；銅、鋇離子增厚程度則與離子濃度呈正相關。

壹、前言

一、研究動機

新竹身為台灣的科技城，科學園區帶來了無數的好處，但同時也會產出許多汙染物，其中就包含重金屬元素，若是排放水沒有經過妥善處理，重金屬元素可能會隨著水流放到各地，汙染土壤和飲用水，破壞土質、生態環境與人類健康。蘚苔因作為原始植物，缺少像維管束等運輸系統，也因體積小，較不易排除所吸收的物質，進而影響其生理運作，是方便取得又容易觀察的生物監測指標。因此我們想藉此機會研究施加重金屬離子對蘚苔的顯微觀察（葉綠體個數、細胞壁厚度）、光合色素含量、光反應速率等是否有影響。

作品與教材相關性：

高中選修生物二第二章植物體的組成層次、第三章植物的營養與生殖

二、研究目的

(一)探討重金屬離子對蘚苔形態之影響

1. 葉綠體數目
2. 細胞壁厚度

(二)探討不同重金屬離子對蘚苔光合色素含量之影響

(三)探討不同重金屬離子對蘚苔光反應速率之影響

三、文獻回顧

(一)蘚苔作為模式生物

蘚苔為無維管束植物，有很高的金屬累積能力，同處於汙染環境中，蘚苔植物體內的重金屬含量會高於維管束植物。且蘚苔植物會將重金屬離子累積在細胞內、外部及細胞間隙中，影響其他養分離子的儲存。苔類具有假根、莖狀枝、單層細胞構成的擬葉，易藉由觀察擬葉細胞型態變化得知環境對其影響。常用於生物監測的蘚苔種類包括木苔、羽苔與泥炭苔等(Mahapatra *et al.*, 2019)。

(二)微量元素對蘚苔的影響

微量元素為植物生長之必須元素，但其需要量十分微小，故稱微量元素，若缺乏微量元素或吸收過量都會對植物產生不同的負面影響：

1. 鋅：

鋅為植物生理作用的輔酶，與生長激素合成和醣類代謝有關。若缺乏鋅會導致葉片變小、產生黃斑。另一方面，過量的鋅會使植物葉尖發黃、植株生長受阻、根呈刺鐵絲狀。

2. 銅：

銅是參與電子傳遞鏈的酵素的一部分，如葉綠體中的質體藍素(plastocyanin)或粒線體中的細胞色素 c 氧化酶(cytochrome c oxidase)，可促進植物之蛋白質利用。另一方面，過量的銅對植物具有毒性，因為它會與各種酶結合，從而改變或阻斷酶的原始功能，這會導致活性氧(ROS)的產生和積累，進而破壞膜並導致氧化還原電位的破壞(Antreich *et al.*, 2016)。

(三)重金屬對蘚苔的影響

重金屬在植物組織中累積過量，會引起各種生理上的改變，如蒸散作用、



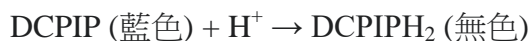
光合作用和光合電子傳遞、葉綠素的合成以及細胞膜完整性等。

圖一、重金屬對植物的影響

(圖片來源：研究者繪製)

(四)Hill 反應

二氯酚靛基酚(DCPIP)在光合作用系統中，因還原反應褪色。二氯酚靛基酚比鐵氧還蛋白有較高電子親合能，可被光合作用電子傳遞鏈還原，取代光合作用中最終電子接受者 NADP^+ 。當二氯酚靛基酚因還原反應而脫褪色時，可由分光光度計測量到其吸光值上升。



貳、研究設備與器材

一、實驗植物

臺灣羽苔(*Plagiochila taiwanensis*)，

為葉苔目齒萼苔亞目羽苔科羽苔屬



圖二、臺灣羽苔照片

(圖片來源：研究者拍攝)

二、實驗藥品

表一、實驗藥材 (取用量詳見研究過程)

名稱	重量 (數量)	規格
六水合硝酸鋅	34.31mg	分子量：297
五水合硫酸銅	75.77mg	分子量：250
二水合氯化鋇	171.53mg	分子量：244
95%酒精	3 瓶	500ml
0.05%二氯酚靛基酚(DCPIP)	10ml	
0.5M 蔗糖溶液	60ml	

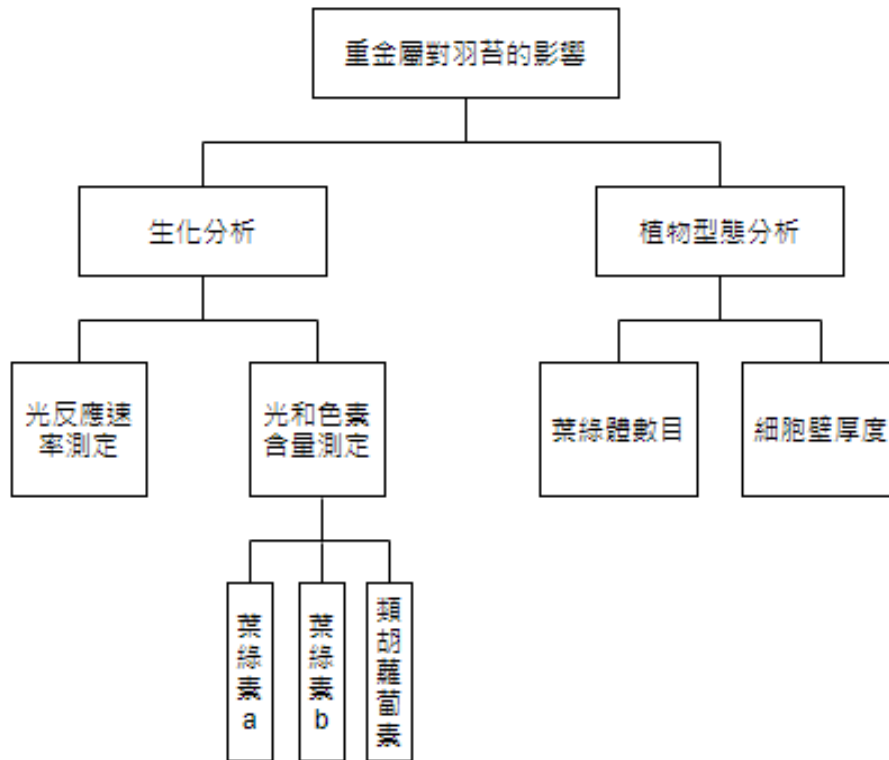
三、實驗設備與器材

表二、實驗設備與器材

名稱	圖片	數量	規格
分光光度計		一台	MT-200
電子秤 (量土)		一台	DHW-1.5kg
電子秤 (量藥、蘇苔)		一台	HT-224 R (220gx0.0001g)
烘箱		一台	KS-21
離心機		一台	DSC-200T
台和全能培養土		四包	25 公升
塑膠箱		30 個	31.5*20*13
量筒(量萃取液體積)		30 個	10ml
燒杯		30 個	50ml
紗布		數塊	
研鉢		兩個	
塑膠離心管		30 個	
容量瓶		三個	100ml

參、研究過程與方法

研究架構圖



圖三、實驗流程架構圖

一、採集蘚苔

(一)採集地點：學校教學大樓間草地

(二)採集方法：

- 1.將蘚苔挖起，並將附著的土清除
- 2.將蘚苔種入裝好 250g 培養土的塑膠箱中

(三)照顧方法：

- 1.每隔 2 天澆水 100ml
- 2.種植在半日照處

二、施加重金屬離子

(一)實驗組

- 1.依下表用電子秤取相應克數的含重金屬離子鹽類倒入容量瓶中，加蒸餾水至 100ml

表三、不同濃度含金屬離子溶液秤取毫克數

	300 μ M	750 μ M	1500 μ M
六水合硝酸鋅(分子量:297)	8.59	11.72	14
五水合硫酸銅(分子量:250)	21.47	29.3	35
二水合氯化鋇(分子量:244)	42.93	58.6	70

2.利用連續稀釋法，取步驟一配置出的溶液 2.5ml 加入量筒，加入蒸餾水至 250ml

3.將步驟二配置出的溶液均勻澆在塑膠箱中的蘚苔上

(二)對照組

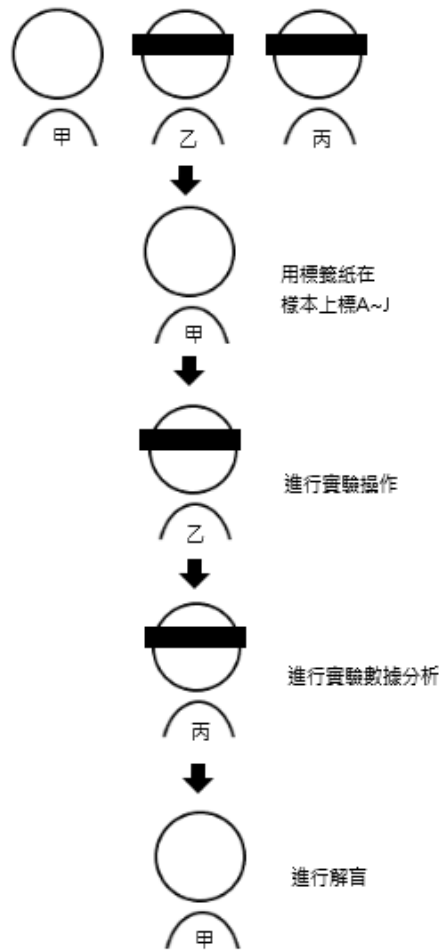
1.用量筒量取 250ml 蒸餾水均勻澆在塑膠箱中的蘚苔上



圖四、羽苔種植情形

三、應變變因測量方法（取三重複實驗，共 30 盆）

(一)盲法試驗



圖五、盲法試驗流程圖

(二)光合色素含量（每兩週做一次，共測試五週。實驗步驟參考 Sumanta *et al.*(2014)）

1.萃取光合色素

- (1)採集各變因新鮮蕨苔樣本，用清水仔細洗淨並擠乾
- (2)將新鮮葉片用烘箱烘乾 30 分鐘至 1 小時，取 0.5g 至研鉢中，剪至粉狀
- (3)用量筒取 95% 乙醇 10ml 加入研鉢中，研磨混和並浸泡 50 分鐘
- (4)將研鉢中的汁液用雙層紗布過濾
- (5)倒入離心管，用離心機轉速 2500rpm 離心 3 分鐘
- (6)以量筒測量並記錄萃取液體積
- (7)將液體分裝到比色管中

2.光合色素定量

- (1)利用分光光度計測量光合色素萃取液在波長 470nm、649nm、

664nm 下的吸光度

(2)以 95%乙醇為空白對照

(3)利用公式計算光合色素含量(以下為參考文獻之公式)

葉綠素 a 含量 $C_a = (13.36D_{664} - 5.19D_{649}) \times V / (1000 \times W)$ mg/g

葉綠素 b 含量 $C_b = (27.43D_{649} - 8.12D_{664}) \times V / (1000 \times W)$ mg/g

類胡蘿蔔素含量 $C_{x+c} = [(1000D_{470} - 2.13C_a - 97.63C_b) / 209] \times V / (1000 \times W)$ mg/g

葉綠素總量 = $C_a + C_b$

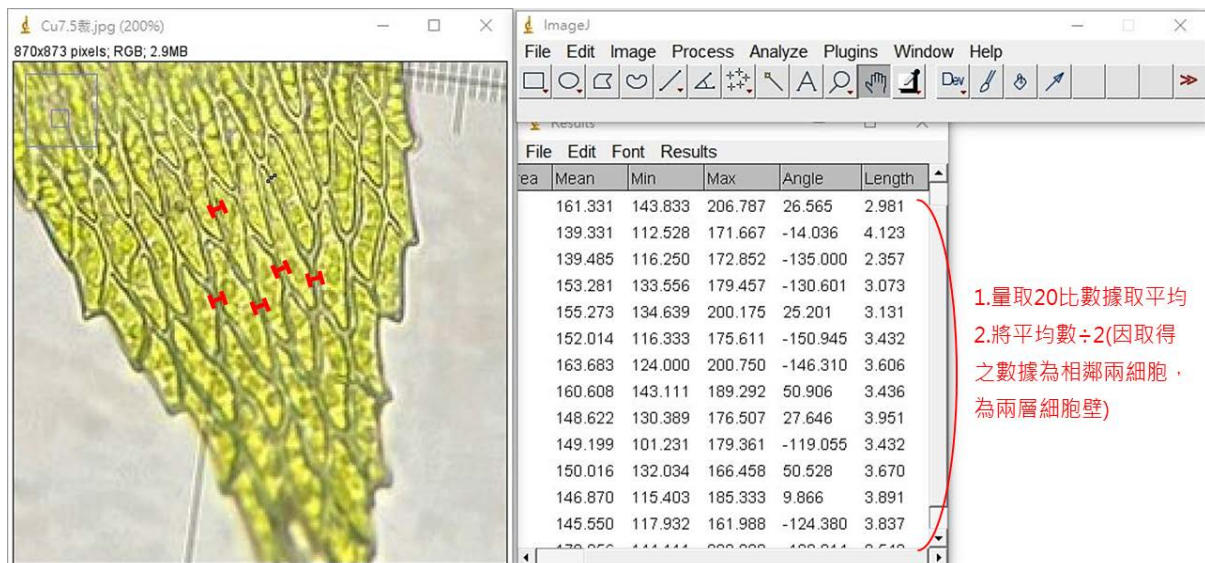
D_x = 萃取液在 Xnm 的吸光值

(三) 觀察顯微構造變化 (第三週測試)

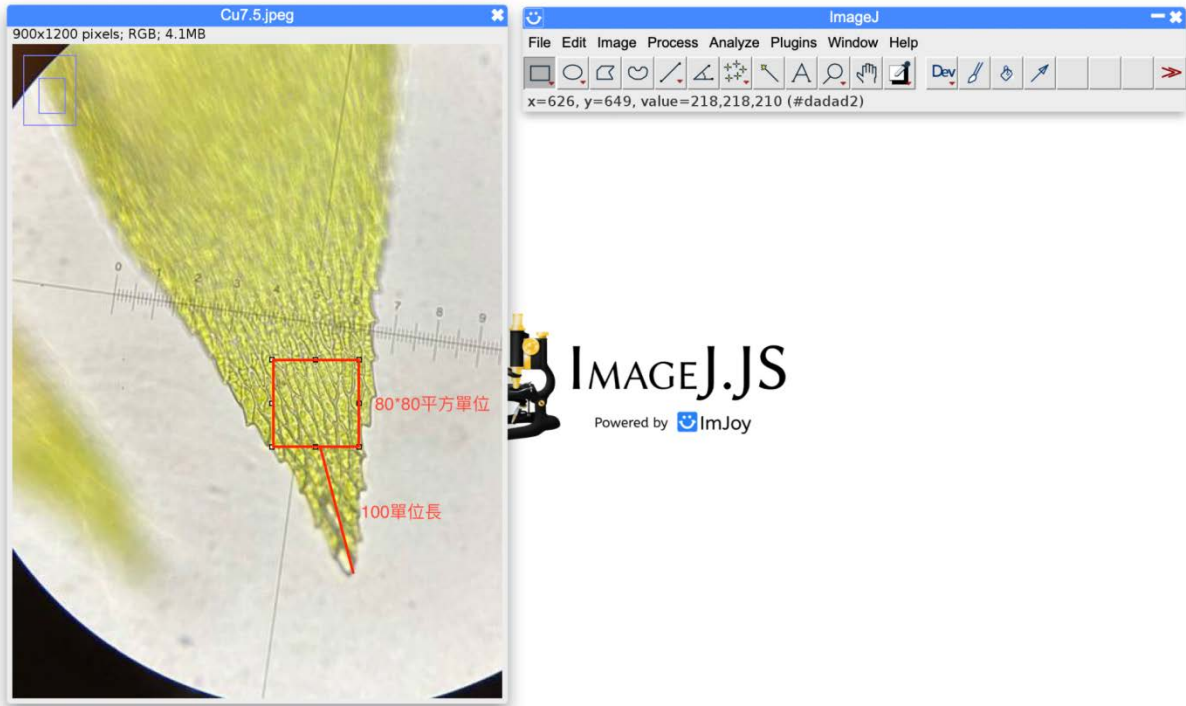
- 1.取各組實驗組和對照組蘚苔的數片葉子作為樣本
- 2.將樣本葉片清洗乾淨後製成水埋玻片
- 3.將水埋玻片置於顯微鏡下觀察，觀察葉尖的變化及葉綠體數量並拍照
- 4.利用 imagej 分析：

(1)細胞壁厚度測量：取照片葉片處測量細胞壁厚度

(2)單位面積所含葉綠體數量：取照片葉尖處之 50*50 像素，分析葉綠體個數



圖六、細胞壁厚度測量實驗操作圖



圖七、單位面積所含葉綠體數量實驗操作圖

(四) 光反應速率 (第五週測試)

1. 備置葉綠體懸浮液

- (1) 取 5g 新鮮羽苔加入 10ml 0.5M 蔗糖溶液研磨
- (2) 以雙層紗布過濾汁液
- (3) 將濾液以 1000rpm 離心 5 分鐘取沉澱
- (4) 將 5ml 0.5M 蔗糖溶液加入沉澱物中，以玻棒輕攪至沉澱物均勻懸浮

2、Hill 反應檢測

試管		A	B
內容物	0.5M 蔗糖溶液	3ml	
	懸浮液	1ml	
	0.05%DCPIP 液	0.5ml	
處理		照光	遮光

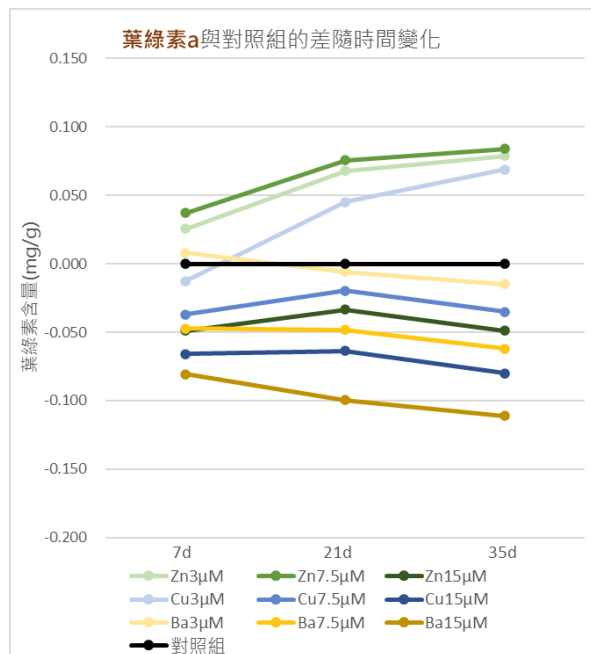
靜置 30 分鐘後，以 3000rpm 離心 3 分鐘，
用分光光度計測量在 596nm 的吸光值

肆、研究結果

一、羽苔體內光合色素含量（將鋅離子簡寫為 Zn，銅、鋇以此類推）

（一）光合色素含量隨天數(d)之變化

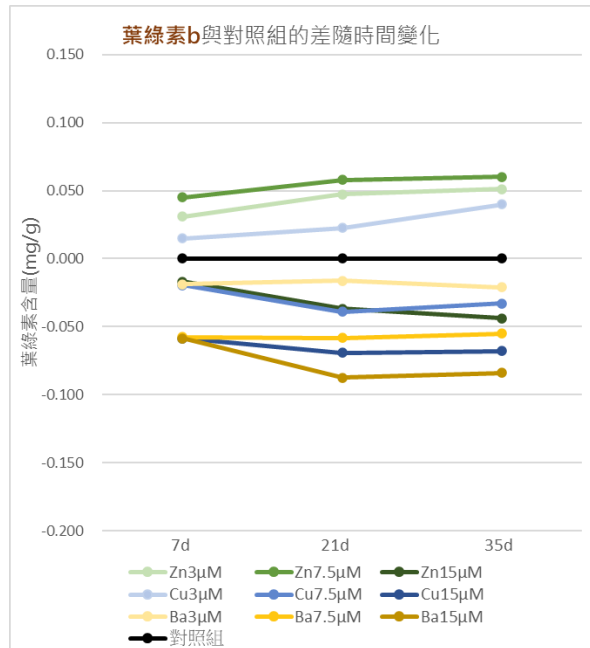
1. 葉綠素 a：根據圖七可看出，施加 Zn7.5 μ M、Zn3 μ M 葉綠素 a 含量大於對照組且與對照組差距隨時間變大。Cu7.5 μ M、Zn15 μ M、Cu15 μ M 小於對照組但在 7d-21d 差距變小，在 21d-35d 差距又變大。Ba7.5 μ M、Ba15 μ M 小於對照組且差距隨時間變大。Cu3 μ M 葉綠素 a 含量在 7d 小於對照組，在 21d、35d 又大於對照組，且在 35d 的差距大於 21d。Ba3 μ M 葉綠素 a 含量在 7d 大於對照組，在 21d、35d 又小於對照組，且在 35d 的差距大於 21d。



圖八、葉綠素 a 與對照組差隨天數(d)變化

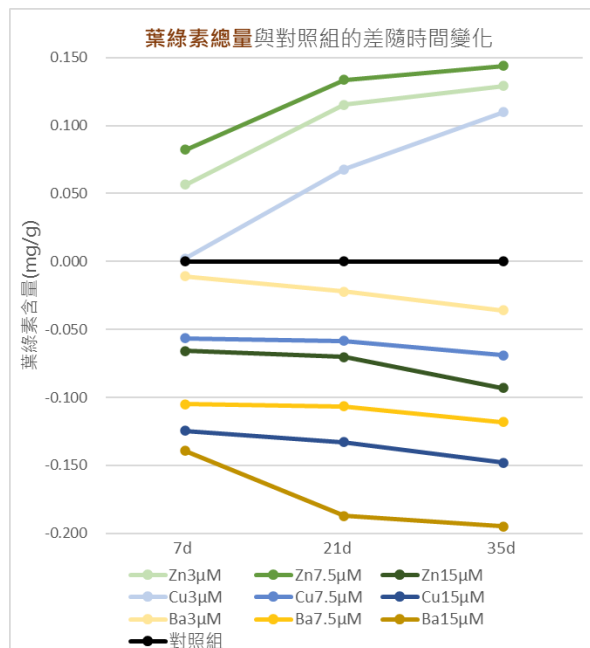
2. 葉綠素 b：根據圖四可看出，Zn7.5 μ M、Zn3 μ M、Cu3 μ M 葉綠素 b 含量大於對照組且與對照組差距隨時間變大。Zn15 μ M 小於對照組且差距隨時間變大。Cu7.5 μ M、Cu15 μ M、Ba15 μ M 小於對照組但在 7d-21d 差距變大，在 21d-35d 差距變小。Ba3 μ M 小於對照組但在 7d-21d 差距變小，在

21d-35d 差距變大。Ba7.5 μ M 小於對照組，但在 7d-21d 差距持平，在 21d-35d 差距變小。



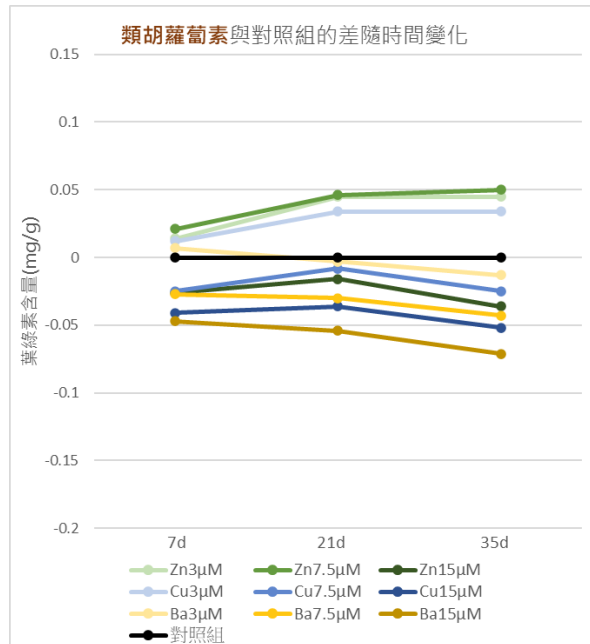
圖九、葉綠素 b 與對照組差隨天數(d)變化

3. 葉綠素總量：根據圖五可看出，Zn7.5 μ M、Zn3 μ M、Cu3 μ M 葉綠素總量大於對照組且差距隨時間變大。Ba3 μ M、Cu7.5 μ M、Zn15 μ M、Ba7.5 μ M、Cu15 μ M、Ba15 μ M 小於對照組且差距隨時間變大。



圖十、葉綠素總量與對照組差隨天數(d)變化

4. 類胡蘿蔔素：根據圖六可看出，Zn7.5 μ M 類胡蘿蔔素含量大於對照組且與對照組差距隨時間變大。Zn3 μ M、Cu3 μ M 含量大於對照組，且在 7d-21d 差距上升，在 21d-35d 差距持平。Cu7.5 μ M、Zn15 μ M、Cu15 μ M 小於對照組但在 7d-21d 差距變小，在 21d-35d 差距又變大。Ba7.5 μ M、Ba15 μ M 小於對照組且差距隨時間變大。Ba3 μ M 類胡蘿蔔素含量在 7d 大於對照組，在 21d、35d 又小於對照組，且在 35d 的差距大於 21d。



圖十一、類胡蘿蔔素與對照組差值隨天數(d)變化

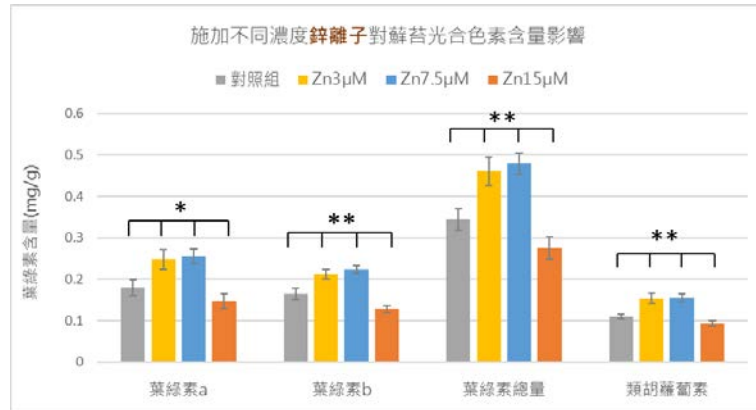
綜上可知鋅離子在 0-7.5 μ M 時對羽苔有正向影響，在 15 μ M 則否；銅離子在 0-3 μ M 正向影響，在 7.5-15 μ M 則否；鋇離子則有負面影響。且從圖中能看出金屬離子的正向影響隨時間趨近飽和。以及葉綠素 b 的含量與對照組的差距在 21d-35d 大致上變化不大。

(二) 相同金屬離子不同濃度間之比較

由於種植 7 天、21 天、35 天的結果相差不大，故取差異最顯著的 21 天來說明實驗結果。

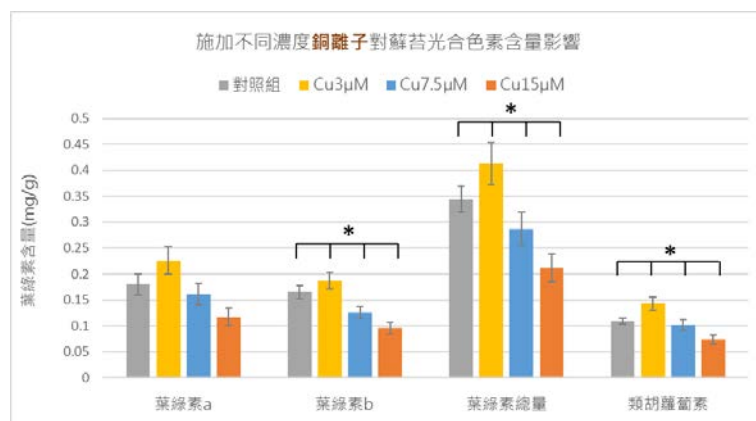
- 根據圖七可看出施加 Zn3 μ M 的羽苔（葉綠素 a：0.261, 葉綠素 b：0.226, 總葉綠素：0.487, 類胡蘿蔔素：0.158mg/g）與施加 Zn7.5 μ M（葉綠素 a：0.273, 葉綠素 b：0.24, 總葉綠素：0.513, 類胡蘿蔔素：0.165mg/g）的光合色素（葉綠素 a、b、總及類胡蘿蔔素）含量均高於對照組（葉綠素 a：0.236, 葉綠素 b：0.195, 總葉綠素：0.43, 類胡蘿蔔素：0.144mg/g），其

中 Zn7.5 μ M 的葉綠素 a、b 含量及總量高於 Zn3 μ M，而類胡蘿蔔素則相當。Zn15 μ M（葉綠素 a：0.186，葉綠素 b：0.178，總葉綠素：0.364，類胡蘿蔔素：0.118mg/g）的光合色素含量則低於對照組。根據單因子變異數分析(oweway ANOVA)，對照組、Zn3 μ M、Zn7.5 μ M、Zn15 μ M 的光合色素含量皆有顯著差異。



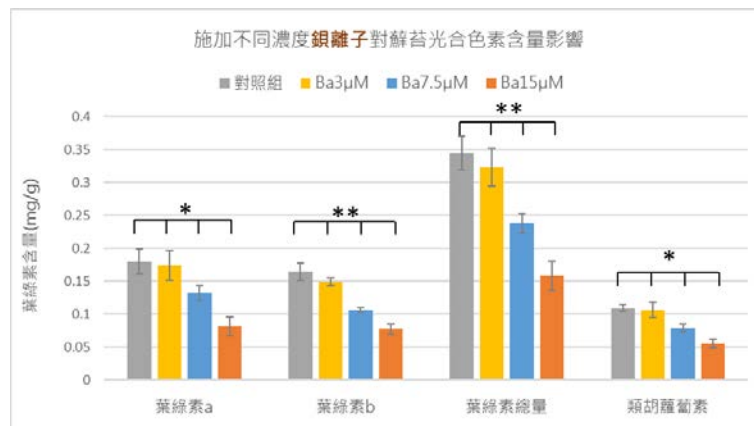
圖十二、施加不同濃度鋅離子 21 天後對蘚苔光合色素含量影響

- 根據圖八可看出施加 Cu3 μ M 的羽苔（葉綠素 a：0.223，葉綠素 b：0.21，總葉綠素：0.433，類胡蘿蔔素：0.156mg/g）的光合色素（葉綠素 a、b、總及類胡蘿蔔素）含量高於對照組（葉綠素 a：0.236，葉綠素 b：0.195，總葉綠素：0.43，類胡蘿蔔素：0.144mg/g），Cu7.5 μ M（葉綠素 a：0.198，葉綠素 b：0.175，總葉綠素：0.374，類胡蘿蔔素：0.119mg/g）、Cu15 μ M（葉綠素 a：0.17，葉綠素 b：0.136，總葉綠素：0.306，類胡蘿蔔素：0.103mg/g）則低於對照組，其中 Cu15 μ M 又低於 Cu7.5 μ M。根據單因子變異數分析，對照組、Cu3 μ M、Cu7.5 μ M、Cu15 μ M 葉綠素 a 含量無顯著差異，其餘三者則有。



圖十三、施加不同濃度銅離子 21 天後對蘚苔光合色素含量影響

3. 根據圖九可看出施加 Ba3 μ M 的羽苔（葉綠素 a：0.243, 葉綠素 b：0.176, 總葉綠素：0.419, 類胡蘿蔔素：0.151mg/g）、Ba7.5 μ M（葉綠素 a：0.188, 葉綠素 b：0.137, 總葉綠素：0.325, 類胡蘿蔔素：0.117mg/g）、Ba15 μ M（葉綠素 a：0.155, 葉綠素 b：0.136, 總葉綠素：0.291, 類胡蘿蔔素：0.097mg/g）的光合色素（葉綠素 a、b、總及類胡蘿蔔素）含量皆低於對照組（葉綠素 a：0.236, 葉綠素 b：0.195, 總葉綠素：0.43, 類胡蘿蔔素：0.144mg/g），其中含量隨金屬離子施加濃度增高而降低。根據單因子變異數分析，對照組、Ba3 μ M、Ba7.5 μ M、Ba15 μ M 的光合色素含量皆有顯著差異。



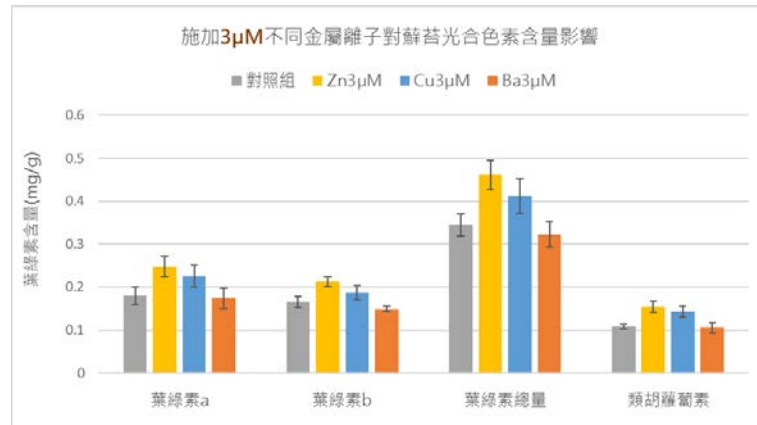
圖十四、施加不同濃度鋇離子 21 天後對蘚苔光合色素含量影響
綜上可知，臺灣羽苔所需的 Zn²⁺濃度介在 7.5-15 μ M 間，而 Cu²⁺則介於 3-7.5 μ M。而鋇離子以及高濃度的鋅、銅離子皆對羽苔有負面影響。

(三) 相同濃度不同金屬離子間之比較

由於種植 7 天、21 天、35 天的結果相差不大，故取差異最顯著的 21 天來說明實驗結果。

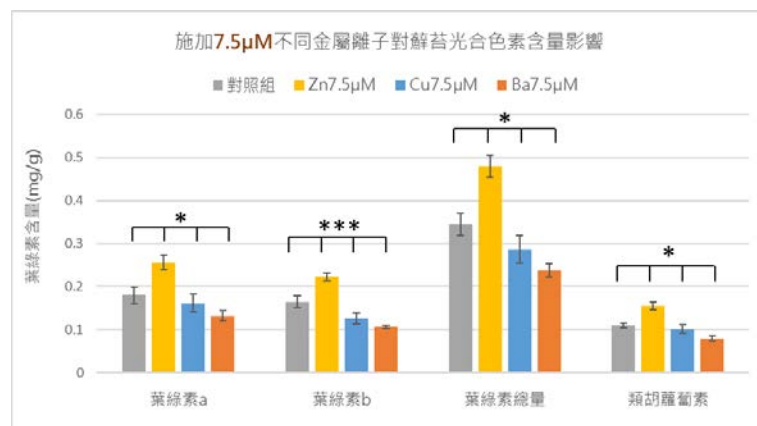
1. 根據圖十可看出施加 Zn3 μ M 的羽苔（葉綠素 a：0.261, 葉綠素 b：0.226, 總葉綠素：0.487, 類胡蘿蔔素：0.158mg/g）及施加 Cu3 μ M 的羽苔（葉綠素 a：0.223, 葉綠素 b：0.21, 總葉綠素：0.433, 類胡蘿蔔素：0.156mg/g）光合色素（葉綠素 a、b、總及類胡蘿蔔素）含量均高於對照組（葉綠素 a：0.236, 葉綠素 b：0.195, 總葉綠素：0.43, 類胡蘿蔔素：0.144mg/g），其中 Zn3 μ M 又高於 Cu3 μ M，而施加 Ba3 μ M 的羽苔（葉綠素 a：0.243, 葉綠素 b：0.176, 總葉綠素：0.419, 類胡蘿蔔素：0.151mg/g）則低於對照

組。然而根據單因子變異數分析，鋅、銅、鋇及對照組的光合色素含量皆無顯著差異。



圖十五、施加 3 μM 不同金屬離子 21 天後對蘚苔光合色素含量影響

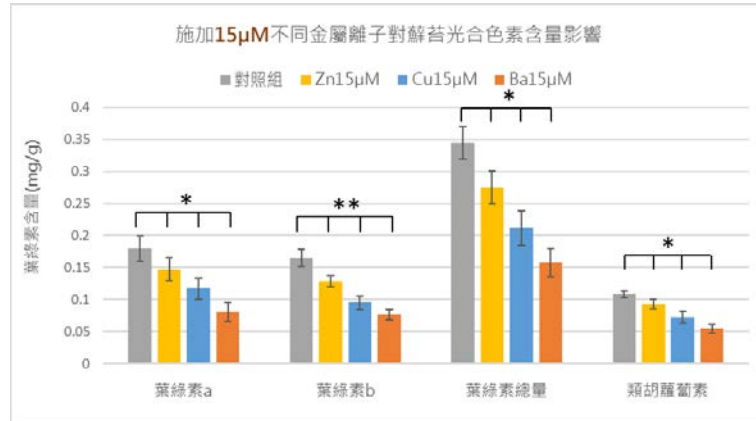
2. 根據圖十一可看出施加 Zn 7.5 μM 的羽苔（葉綠素 a : 0.273, 葉綠素 b : 0.24, 總葉綠素 : 0.513, 類胡蘿蔔素 : 0.165 mg/g），其體內的光合色素（葉綠素 a、b、總及類胡蘿蔔素）含量高於對照組（葉綠素 a : 0.236, 葉綠素 b : 0.195, 總葉綠素 : 0.43, 類胡蘿蔔素 : 0.144 mg/g），而施加 Cu 7.5 μM（葉綠素 a : 0.198, 葉綠素 b : 0.175, 總葉綠素 : 0.374, 類胡蘿蔔素 : 0.119 mg/g）及 Ba 7.5 μM（葉綠素 a : 0.188, 葉綠素 b : 0.137, 總葉綠素 : 0.325, 類胡蘿蔔素 : 0.117 mg/g）的組別則低於對照組，其中又以 Ba 7.5 μM 的光合色素含量較低。根據單因子變異數分析，鋅、銅、鋇及對照組的光合色素含量皆有顯著差異。



圖十六、施加 7.5 μM 不同金屬離子 21 天後對蘚苔光合色素含量影響

3. 根據圖十二可看出 Zn 15 μM（葉綠素 a : 0.186, 葉綠素 b : 0.178, 總葉綠素 : 0.364, 類胡蘿蔔素 : 0.118 mg/g）、Cu 15 μM（葉綠素 a : 0.17, 葉綠

素 b : 0.136, 總葉綠素 : 0.306, 類胡蘿蔔素 : 0.103mg/g) 、Ba15 μ M (葉綠素 a : 0.155, 葉綠素 b : 0.136, 總葉綠素 : 0.291, 類胡蘿蔔素 : 0.097mg/g) 的光合色素 (葉綠素 a、b、總及類胡蘿蔔素) 含量均低於對照組 (葉綠素 a : 0.236, 葉綠素 b : 0.195, 總葉綠素 : 0.43, 類胡蘿蔔素 : 0.144mg/g) , 其中光合色素含量 : Ba15 μ M < Cu15 μ M < Zn15 μ M 。根據單因子變異數分析, 鋅、銅、鋇及對照組的光合色素含量皆有顯著差異。



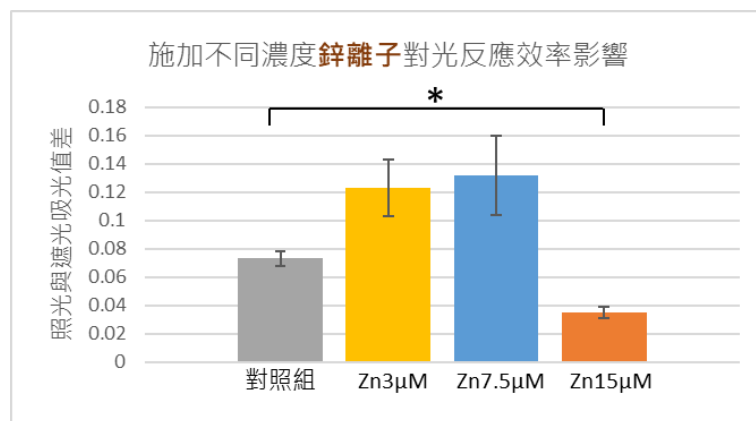
圖十七、施加 15 μ M 不同金屬離子 21 天後對蘚苔光合色素含量影響
綜上可知, 對羽苔的正向影響 : 鋅>銅, 負面影響 : 鋇>銅>鋅。

二、光反應速率 (種植 35 天)

相同時間內遮光組與照光組知吸光值差距越大代表其光反應速率越大。

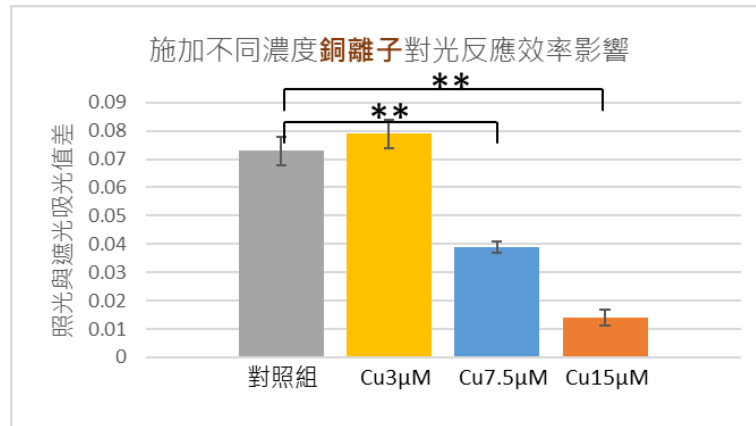
(一) 相同金屬離子不同濃度間之比較

1. 根據圖十三可看出施加 Zn3 μ M (0.123A)與 Zn7.5 μ M (0.132A) 的吸光值差均高於對照組, 其中 Zn7.5 μ M 高於 Zn3 μ M, 而 Zn15 μ M (0.035A)則低於對照組 (0.073A)。根據獨立樣本 t 檢定分析(Two-Sample t Test), 僅 Zn15 μ M 與對照組吸光值差有顯著差異。



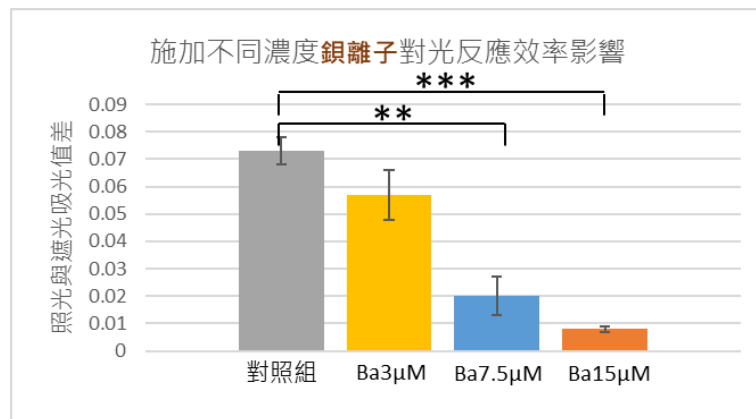
圖十八、施加不同濃度鋅離子對光反應效率影響

2. 根據圖十四可看出施加 $\text{Cu}3\mu\text{M}$ (0.079A)的吸光值差高於對照組 (0.073A)，而 $\text{Cu}7.5\mu\text{M}$ (0.039A)和 $\text{Cu}15\mu\text{M}$ (0.014A)則低於對照組，其中 $\text{Cu}7.5\mu\text{M}$ 高於 $\text{Cu}15\mu\text{M}$ 。根據獨立樣本 t 檢定分析(Two-Sample t Test)， $\text{Cu}7.5\mu\text{M}$ 與對照組、 $\text{Cu}15\mu\text{M}$ 與對照組吸光值差有顯著差異。



圖十九、施加不同濃度銅離子對光反應效率影響

3. 根據圖十五可看出施加 $\text{Ba}3\mu\text{M}$ (0.057A)、 $\text{Ba}7.5\mu\text{M}$ (0.02A)、 $\text{Ba}15\mu\text{M}$ (0.008A) 的吸光值差均低於對照組 (0.073A)，其中 $\text{Ba}15\mu\text{M} < \text{Ba}7.5\mu\text{M} < \text{Ba}3\mu\text{M}$ 。根據獨立樣本 t 檢定分析(Two-Sample t Test)， $\text{Ba}7.5\mu\text{M}$ 與對照組、 $\text{Ba}15\mu\text{M}$ 與對照組吸光值差有顯著差異。



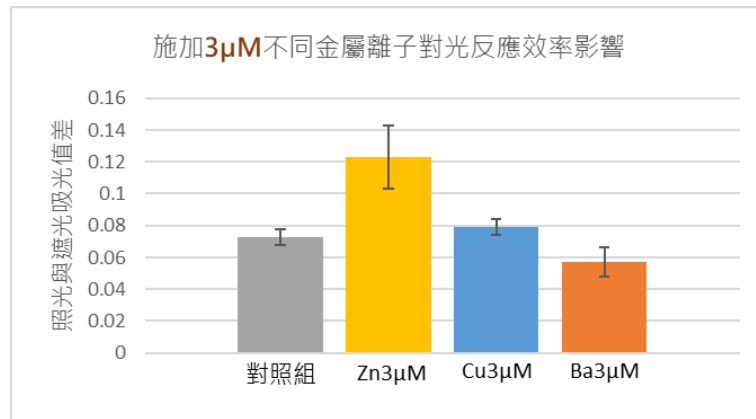
圖二十、施加不同濃度鋇離子對光反應效率影響

綜上可知，對羽苔有正向影響的鋅離子濃度上限介於 $7.5\text{-}15\mu\text{M}$ 之間，銅在 $3\text{-}7.5\mu\text{M}$ 。而鋇離子以及高濃度的鋅、銅離子皆有負面影響。

(二) 相同濃度不同金屬離子間之比較

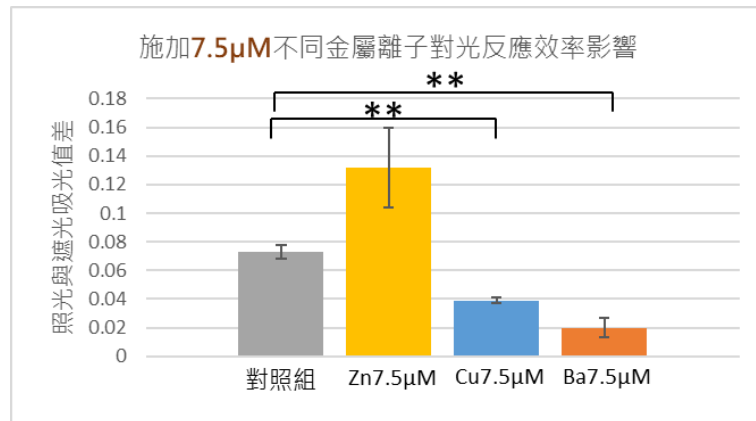
1. 根據圖十六可看出施加 $\text{Zn}3\mu\text{M}$ (0.123A) 與 $\text{Cu}3\mu\text{M}$ (0.079A) 的吸光值差均高於對照組 (0.073A)，其中 $\text{Zn}3\mu\text{M}$ 高於 $\text{Cu}3\mu\text{M}$ ，而 $\text{Ba}3\mu\text{M}$ (0.057A) 則略低於對照組。根據獨立樣本 t 檢定分析(Two-Sample t Test)， $\text{Zn}3\mu\text{M}$

與對照組、Cu3 μ M 與對照組、Ba3 μ M 與對照組吸光值差皆無顯著差異。



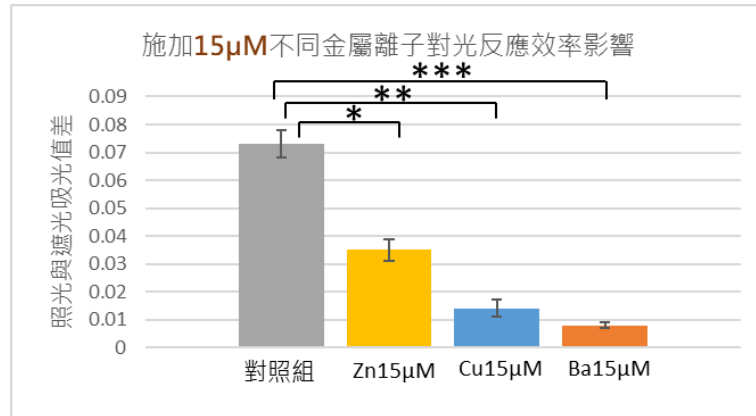
圖二十一、施加 3 μ M 不同金屬離子對光反應效率影響

- 根據圖十七可看出施加 Zn7.5 μ M (0.132A) 的吸光值差高於對照組 (0.073A)，而 Cu7.5 μ M (0.039A) 和 Ba7.5 μ M (0.02A) 則低於對照組，其中 Cu7.5 μ M 高於 Ba7.5 μ M。根據獨立樣本 t 檢定分析(Two-Sample t Test)，Cu7.5 μ M 與對照組、Ba7.5 μ M 與對照組吸光值差皆有顯著差異。



圖二十二、施加 7.5 μ M 不同金屬離子對光反應效率影響

- 根據圖十八可看出施加 Zn15 μ M (0.035A)、Cu15 μ M (0.014A)、Ba15 μ M (0.008A) 的吸光值差均低於對照組 (0.073A)，其中 Ba15 μ M < Cu15 μ M < Zn15 μ M。根據獨立樣本 t 檢定分析(Two-Sample t Test)，Zn15 μ M 與對照組、Cu15 μ M 與對照組、Ba15 μ M 與對照組吸光值差皆有顯著差異。



圖二十三、施加 15μM 不同金屬離子對光反應效率影響

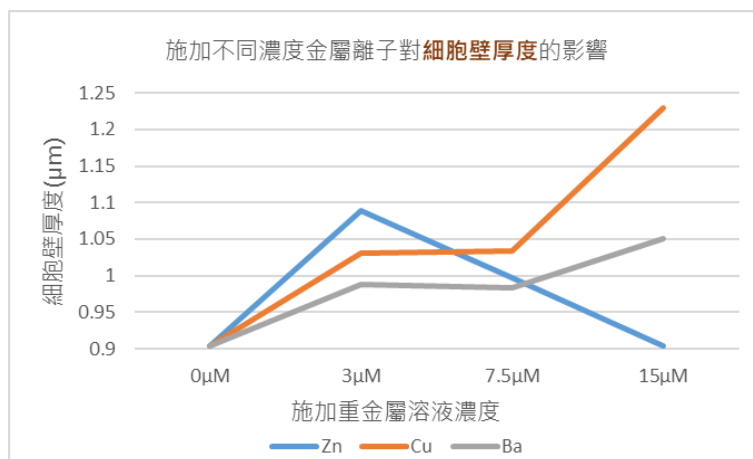
綜上可知，對羽苔的正向影響：鋅>銅，負面影響：鋇>銅>鋅。

三、觀察顯微構造之變化（種植 21 天）

（一）細胞壁厚度測量

根據圖十九可看出施加 Zn 離子的羽苔細胞壁厚度在 0μM 至 3μM 間上升，而在 3μM 至 15μM 之間呈下降趨勢；施加 Cu 離子的在 0μM 至 3μM 間上升，3μM 至 7.5μM 之間幾乎沒變化，且在 15μM 時上升；而施加 Ba 離子的在 0μM 至 3μM 間上升，3μM 至 7.5μM 之間微幅下降，且也在 15μM 時上升。

而比較不同金屬離子間的差異，施加金屬濃度在 3μM 下，羽苔細胞壁厚度為鋅>銅>鋇，施加金屬濃度 7.5μM 時厚度為銅>鋅>鋇，15μM 時厚度則為銅>鋇>鋅；施加三種金屬細胞壁厚度皆較沒施加的大，Zn15 則是接近沒施加的厚度。

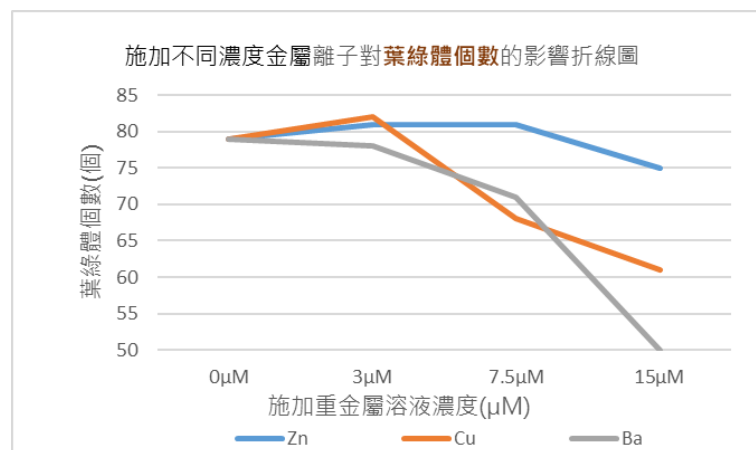


圖二十四、施加不同濃度金屬離子 21 天後對細胞壁厚度的影響

（二）單位面積所含葉綠體數量（以對照組為 0μM）

根據圖二十可看出施加鋅離子的羽苔葉綠體個數從 0 μ M (79 個) 開始至 3 μ M (81 個) 上升，到 7.5 μ M (81 個) 時幾乎沒變化，而至 15 μ M (75 個) 時下降；施加銅離子的在 0 μ M (79 個) 至 3 μ M (82 個) 間上升，3 μ M 至 7.5 μ M (68 個) 至 15 μ M (61 個) 時下降，且下降幅度隨施加金屬濃度增大而趨緩；施加鋇離子的隨濃度上升而下降 (79 \rightarrow 78 \rightarrow 71 \rightarrow 50 個)，且下降幅度漸遽。

而比較不同金屬離子間的差異，施加金屬濃度在 3 μ M 下，羽苔葉綠體個數為銅>鋅>鋇，施加金屬濃度 7.5 μ M 時個數為鋅>鋇>銅，15 μ M 時厚度則為鋅>銅>鋇。



圖二十五、施加不同濃度金屬離子 21 天後對葉綠體個數的影響

伍、討論

一、光合色素含量 (種植天數以 d 表示, Zn3 表示施加 3 μ M 鋅離子的羽苔, 以此類推)

(一) 金屬離子影響

鋅和銅屬於微量元素，在低濃度下對羽苔的光合色素含量有正向的影響，其中又以鋅的正向影響較大。然而，鋅、銅、鋇三者較高濃度下皆對羽苔的光合色素含量有負面影響，其中，負面影響：鋇>銅>鋅。我們發現臺灣羽苔所需的 Zn^{2+} 濃度介在 7.5-15 μ M 間，而 Cu^{2+} 則介於 3-7.5 μ M。然而，Mahapatra *et al.*(2019)的研究指出，蘚苔的品種會影響到對金屬離子的耐受度，故此數值不一定適用於其他品種的蘚苔。Tsonev *et al.*(2012)、Abbasifar *et al.*(2020)、Wang *et al.*(2019)及 Shakya *et al.*(2008) 的研究指出，鋅離子可以作為葉綠素合成酶 (Chlorophyll synthase)、鎂螯合酶(Mg-chelatase)、原葉綠素還原酶 (Protochlorophyllide reductase)的輔因子幫助提升葉綠素、類胡蘿蔔素的合成，

然而過高的濃度則會破壞類囊體膜的結構完整性，造成葉綠素的降解，Antreich *et al.*(2016)、Chettri *et al.*(1998)、Drouin *et al.*(1973)及 Yruela(2005)的研究也指出銅離子可以作為 5-氨基酮戊酸脫水酶(5-aminolevulinic acid dehydratase, ALAD)的輔因子，催化葉綠素前體的合成，而過高的濃度則會膽色素原氧化酶(Porphobilinogen oxidase)及亞鐵螯合酶(Ferrochelatase)等酵素運作進而導致葉綠素含量降低。Shakya *et al.*(2008)的研究指出鋅相較於銅對於葉綠素的損害較小。Arundhati *et al.*(2016)的研究也指出鋇會造成細胞中的葉綠體聚集，阻擋光進入細胞、降低葉綠體利用二氧化碳的效率，進而導致葉綠素的生成減少。

(二) 光合色素含量隨週次之變化

施加 Zn3 μ M、Zn7.5 μ M 及 Cu3 μ M 的羽苔之光合色素含量與對照組之差大致為正且隨時間上升，而上升有趨緩的趨勢推測應是趨近飽和。施加 Zn15 μ M、Cu7.5 μ M、Cu15 μ M、Ba3 μ M、Ba7.5 μ M、Ba15 μ M 之光合色素含量與對照組之差大致為負且隨時間下降。且施加低濃度鋅、銅離子之羽苔光合色素含量隨時間上升，施加鋇以及高濃度的鋅、銅離子之羽苔光合色素含量隨時間下降之結果與前項呼應。

二、光反應速率

鋅和銅屬於微量元素，在我們的低濃度處理下對羽苔，對其光反應速率有正向的影響，其中又以鋅的正向影響較大。然而，鋅、銅、鋇三者較高濃度下皆對羽苔的光反應速率有負面影響，其中，負面影響：鋇>銅>鋅。此結果與光合色素含量呼應，能更進一步支持我們的實驗結果。

根據林玟娟與張永達(2009)的文章中說明植物光反應在葉綠體囊狀膜上進行，其上嵌有由色素和蛋白質形成的複合體。其中有兩種主要的色素蛋白質複合體：光系統 I (photosystem I, PSI)、光系統 II (photosystem II, PSII)是由光合色素和蛋白質組成，可以幫助吸收光能。PSI 核心由十一條多肽鏈組成，其中兩條最大的多肽鏈結合兩個葉綠素 a 分子，此為 PSI 的反應中心。PSII 核心由兩條多肽鏈聚合成雙體 (dimer)，雙體內有四個葉綠素 a 分子，此雙體為 PSII 的反應中心。另外，PSII 的輔助系統內也含有大量葉綠素 a、b 及胡蘿蔔素等幫助光反應進行。

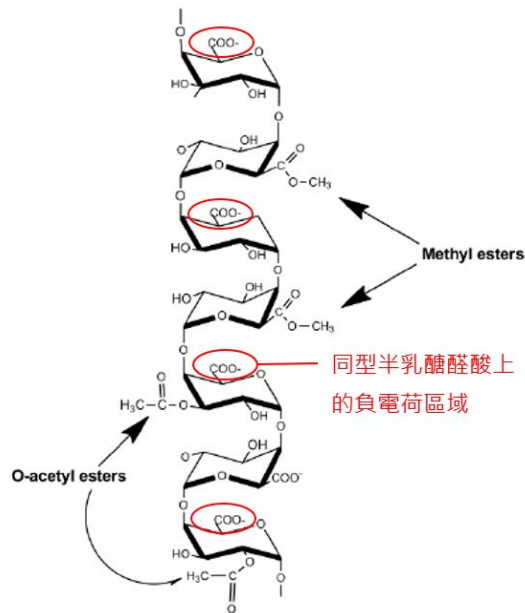
從我們的實驗數據顯示，光合色素含量增加的羽苔，其 DCPIP 褪色的效率同時也較佳，呼應光反應速率與光合色素含量相關，論光合色素含量較高時，光反應速率也隨之提升，又光反應速率的提升能為光合色素的合成提供更多能量，造成光合色素含量的提升，形成正向循環。

三、觀察顯微構造之變化

(一)細胞壁厚度測量

施加鋅離子的羽苔細胞壁厚度在 0 μ M 至 3 μ M 間上升，而在 3 μ M 至 15 μ M 之間下降；而施加銅離子與鋇離子的羽苔細胞壁厚度大致隨濃度增加而有上升趨勢。Roberts *et al.*(2012)的研究說明蘚苔的細胞壁成分包含纖維素、果膠（包括同型半乳糖醛酸(homogalacturonan)、半乳糖聚糖(β -1,4-galactan)和阿拉伯聚糖(α -1,5-arabinan)）與多種聚合物，在 Konno *et al.*(2010)的研究結果顯示銅離子會與同型半乳糖醛酸中的負電荷區域緊密結合，導致蘚苔之原絲體細胞壁增厚，與我們研究中觀察到葉尖細胞壁增厚相呼應，推測葉尖細胞壁亦具有此種聚合物與部分吸收之重金屬離子結合，使細胞壁厚度隨銅離子與鋇離子濃度上升而增厚。

而依 Chen *et al.*(2015)的研究推測，因低濃度鋅離子為各種修飾細胞壁酵素（包括果膠甲基酯酶(pectin methylesterases, PME)）、擴展蛋白(expansin)）的組成元素，可促使酶作用而讓細胞壁增厚。然而高濃度鋅離子則會抑制這些酵素，進而使細胞壁分泌減少或變形。



圖二十六、同型半乳糖醛酸聚合物與負電荷區

(圖片來源：參考文獻)

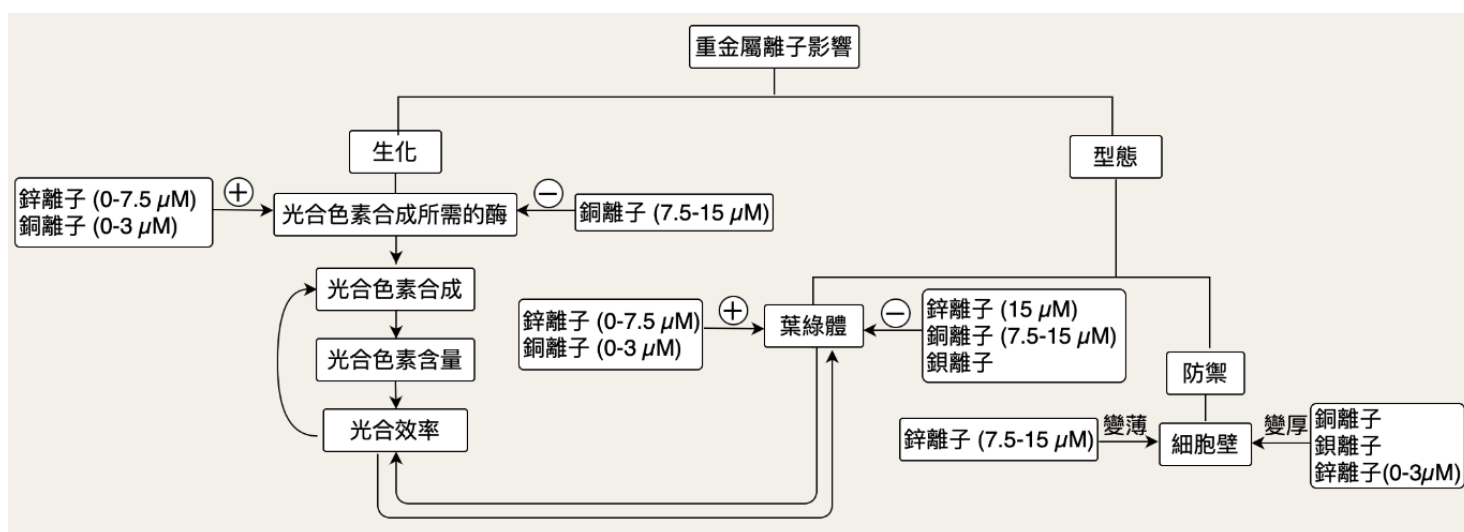
(二) 單位面積所含葉綠體數量

施加鋅離子的羽苔葉綠體個數從 $0\mu\text{M}$ 開始至 $3\mu\text{M}$ 上升，到 $7.5\mu\text{M}$ 時幾乎沒變化，而至 $15\mu\text{M}$ 時下降；施加銅離子的在 $0\mu\text{M}$ 至 $3\mu\text{M}$ 間上升， $3\mu\text{M}$ 至 $15\mu\text{M}$ 時下降；施加鋇離子的隨濃度上升而下降。此結果與光合色素定量、光反應速率結果吻合，能更進一步支持我們的實驗數據。施加低濃度鋅、銅離子的羽苔葉綠體數目之所以增加，應是因光合作用速率的提升促進組成葉綠體之分子的合成，造成葉綠體的生成。而在 Maresca *et al.*(2022)的研究結果中指出，葉綠體的超微結構變化與蘚苔吸收的重金屬濃度有關，過量重金屬與活性氧會造成生物膜脂質過氧化、類囊體損傷，隨有害物質濃度增加更出現葉綠體變形、類囊體分界不明顯等損害，造成葉綠體數目減少。

陸、結論

圖二十七、結論架構圖

(圖片來源：研究者繪製)



一、微量元素之正面影響：鋅和銅為植物生長所需之微量元素，在達到植物對該離子所需的飽和濃度前會對植物生長有正面影響，超過飽和濃度後則會有負面影響。根據本實驗，臺灣羽苔對鋅離子所需的飽和濃度落在 7.5-15 μM 之間；對銅離子的飽和濃度落在 3-7.5 μM 之間。

二、重金屬離子對葉綠體影響：低濃度鋅離子與銅離子因光合作用速率的提升促進組成葉綠體之分子的合成，造成葉綠體的生成，使植物葉綠體數目增加。鋇離子及高濃度的鋅、銅離子則有相反的效果。

三、重金屬離子對細胞壁影響：低濃度鋅離子可助於合成各種修飾細胞壁酵素，而高濃度鋅離子則會抑制這些酵素，使細胞壁變薄。銅離子與鋇離子會與細胞壁內的陰離子結合位點結合而導致蘚苔細胞壁增厚，增厚程度與離子濃度呈正相關。

柒、未來展望

一、可延伸探討之層面

本研究是針對重金屬對於羽苔的光合色素含量與葉綠體個數之影響。因實驗室資源有限及實驗安全考量，我們選擇了工業所產生重金屬其中三種：鋅、銅、鋇，然而實際上工業污染的狀況不僅如此。此外，金屬對於不同種蘚苔生理變化略有不同（例如蘚苔對於銅、鉛等重金屬之耐受度較一般蘚苔大），蘚苔的生理變化也不僅限於本研究，諸如假根、原絲體、配子體、孢子等，未來更可多方探討。

二、發展與應用

未來我們可藉由檢測蘚苔的生理變化與生長狀況監測工業區鄰近土壤汙染程度，更可利用蘚苔易吸附與囤積重金屬的特性，探討蘚苔是否能除去環境中的重金屬汙染，作為淨化土質與水質的天然材料。

捌、參考文獻資料

- 一、Brown, D. H., & Wells, J. M. (1990). Physiological effects of heavy metals on the moss *Rhytidiadelphus squarrosus*. *Annals of Botany*, 66(6), 641-647.
- 二、Chang, Y. P., Yeoh, L. Y., Chee, S. Y., & Lim, T. M. (2017, April). Looking for a substituent of spinach (*Spinacia oleracea*) chloroplasts. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1828, No. 1, p. 020015). AIP Publishing LLC.
- 三、Chen, Y. E., Cui, J. M., Yang, J. C., Zhang, Z. W., Yuan, M., Song, C., ... & Yuan, S. (2015). Biomonitoring heavy metal contaminations by moss visible parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 296, 201-209.
- 四、Shakya, K., Chettri, M. K., & Sawidis, T. (2008). Impact of heavy metals (copper, zinc, and lead) on the chlorophyll content of some mosses. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 54, 412-421.
- 五、Salemaa, M., Derome, J., Helmisaari, H. S., Nieminen, T., & Vanha-Majamaa, I. (2004). Element accumulation in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy metal and sulfur deposition in Finland. *Science of the Total Environment*, 324(1-3), 141-160.
- 六、Fernandez, J. A., Vazquez, M. D., Lopez, J., & Carballeira, A. (2006). Modelling the extra and intracellular uptake and discharge of heavy metals in *Fontinalis antipyretica* transplanted along a heavy metal and pH contamination gradient. *Environmental Pollution*, 139(1), 21-31.
- 七、Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting?. *Plant science*, 180(2), 169-181.
- 八、Sassmann, S., Weidinger, M., Adlassnig, W., Hofhansl, F., Bock, B., & Lang, I. (2015). Zinc and copper uptake in *Physcomitrella patens*: Limitations and effects on growth and morphology. *Environmental and experimental botany*, 118, 12-20.
- 九、Goyal, D., Yadav, A., Prasad, M., Singh, T. B., Shrivastav, P., Ali, A., ... & Mishra, S. (2020). Effect of heavy metals on plant growth: an overview. *Contaminants in agriculture: sources, impacts and management*, 79-101.
- 十、Tsonev, T., & Cebola Lidon, F. J. (2012). Zinc in plants-an overview. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 24(4).
- 十一、Abbasifar, A., Shahrabadi, F., & ValizadehKaji, B. (2020). Effects of green synthesized zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant. *Journal of Plant Nutrition*, 43(8), 1104-1118.
- 十二、Arundhathi, A., Marisamy, K., Duraipandian, M., Sevugaperumal, R., & Ramasubramanian, V. (2016). Comparison of the Metal Toxicity due to Aluminum and

Barium on the Growth Attributes of *Vigna trilobata* (L.) Verde. *Bioengineering and Bioscience*, 4(4), 64-69.

十三、Richfield, D. (2023). Chlorophyll. Wikimedia.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorophyll>

十四、Chettri, M. K., Cook, C. M., Vardaka, E., Sawidis, T., & Lanaras, T. (1998). The effect of Cu, Zn and Pb on the chlorophyll content of the lichens *Cladonia convoluta* and *Cladonia rangiformis*. *Environmental and Experimental Botany*, 39(1), 1-10.

十五、Yruela, I. (2005). Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 145-156.

十六、Antreich, S., Sassmann, S., & Lang, I. (2016). Limited accumulation of copper in heavy metal adapted mosses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 101, 141-148.

十七、Yruela, I. (2013). Transition metals in plant photosynthesis. *Metallomics*, 5(9), 1090-1109.

十八、Saxena, D. K., & Saiful-Arfeen, M. (2009). Effect of Cu and Cd on oxidative enzymes and chlorophyll content of moss *Racomitrium crispulum*. *Taiwania*, 54(4), 365-374.

十九、Molas, J. (2002). Changes of chloroplast ultrastructure and total chlorophyll concentration in cabbage leaves caused by excess of organic Ni (II) complexes. *Environmental and Experimental Botany*, 47(2), 115-126.

二十、Konno, H., Nakashima, S., & Katoh, K. (2010). Metal-tolerant moss *Scopelophila cataractae* accumulates copper in the cell wall pectin of the protonema. *Journal of plant physiology*, 167(5), 358-364.

二十一、Maresca, V., Bellini, E., Landi, S., Capasso, G., Cianciullo, P., Carraturo, F., ... & Basile, A. (2022). Biological responses to heavy metal stress in the moss *Leptodictyum riparium* (Hedw.) Warnst. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 229, 113078.

二十二、Petschinger, K., Adlassnig, W., Sabovljevic, M. S., & Lang, I. (2021). Lamina cell shape and cell wall thickness are useful indicators for metal tolerance—An example in bryophytes.

二十三、Roberts, A. W., Roberts, E. M., & Haigler, C. H. (2012). Moss cell walls: structure and biosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 3, 166.

二十四、Chen, Q., Liang, X., Li, W., Jiang, H., Luo, Y., & Zheng, J. (2015). Zinc-induced changes in anatomy, antioxidative capability, and photosynthetic capacity of mesophyll cells in the leaves of maize seedlings. *Frontiers in plant science*, 6, 1148. doi: 10.3389/fpls.2015.01148

二十五、Ochoa-Villarreal, M., Aispuro-Hernández, E., Vargas-Arispuro, I., & Martínez-Téllez, M. Á. (2012). Plant cell wall polymers: function, structure and biological activity of their derivatives. *Polymerization*, 4, 63-86.

二十六、林玟娟, & 張永達. (2009, August 11). 光反應 - 上. 科學 Online.

<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=3725>


二十七、林浩潭. (n.d.). 重金屬及微量元素對作物之影響. 行政院農委會農業藥物毒物試驗所 <https://www.tactri.gov.tw/Uploads/Item/a0b68bd1-112b-4fe7-a2ce-5fde3a2662f9.pdf>

二十八、Sumanta, N., Haque, C. I., Nishika, J., & Suprakash, R. (2014). Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Res J Chem Sci*, 2231, 606X.

【評語】 052102

1. 本研究以臺灣羽苔作為模式生物，探討不同重金屬種類、濃度對其葉綠體個數、光合色素含量、光反應速率及細胞壁厚度的影響。
2. 本研究探討不同濃度的各種重金屬對光合色素含量及光反應速率的影響，是成果相當豐富的作品。可惜缺乏與相關研究的比較，沒有詳細陳述本作品創新之處。
3. 本研究以生理觀察結果為主，對結果解釋可強化。

作品海報



探討重金屬離子對臺灣羽苔之生理影響



摘要

本研究以臺灣羽苔作為實驗生物，探討不同重金屬種類、濃度對其葉綠體個數、光合色素含量、光反應速率及細胞壁厚度的影響。根據實驗結果我們發現低濃度的鋅、銅離子對臺灣羽苔的葉綠體個數、光合色素含量、光反應速率皆有提升，並且找到鋅離子、銅離子對臺灣羽苔有正向影響的濃度區間，而鋇離子、高濃度的鋅銅離子則對植物有相反的影響。細胞壁的部分，低濃度鋅離子會造成細胞壁增厚，而在高濃度較低濃度時薄；銅、鋇離子增厚程度則與離子濃度呈正相關。

壹、前言

一、研究動機

竹科排放重金屬，會汙染土質

蘚苔無維管束，易堆積吸收物

蘚苔植物易觀察且方便取得

研究施加重金屬對蘚苔的顯微形態及光合色素、光反應速率影響

二、研究目的

(一)探討重金屬離子對蘚苔形態之影響

- 1.葉綠體數目
- 2.細胞壁厚度

(二)探討不同重金屬離子對蘚苔光合色素含量之影響

(三)探討不同重金屬離子對蘚苔光反應速率之影響

貳、研究設備

一、實驗生物：臺灣羽苔(*Plagiochila taiwanensis*)

二、實驗材料：六水合硝酸鋅、五水合硫酸銅、二水合氯化鋇、95%乙醇、0.05%二氯酚靛基酚(DCPIP)、0.5M蔗糖溶液

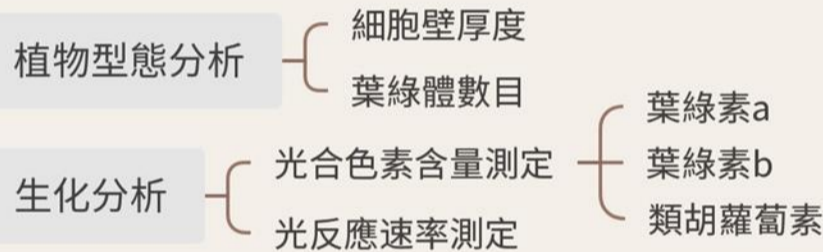
三、實驗設備&軟體：分光光度計、離心機、烘箱、imagej等



臺灣羽苔照片

參、研究過程架構

重金屬對羽苔的影響



一、施加重金屬離子濃度

3 μ M Zn	7.5 μ M Zn	15 μ M Zn
3 μ M Cu	7.5 μ M Cu	15 μ M Cu
3 μ M Ba	7.5 μ M Ba	15 μ M Ba

二、應變變因測量

(一)顯微構造觀察

(1)取數株羽苔製成水埋玻片，以imagej分析葉尖之細胞壁厚度、單位面積所含葉綠體數目

(二)光合色素含量測定

(1)用95%乙醇10ml萃取羽苔光合色素，並以2500rpm離心3分鐘後，量取上清液體積

(2)量測上清液在波長470、649、664nm下的吸光值，並以文獻公式計算各光合色素濃度

(三)光反應速率測定

(1)取5g羽苔+0.5M蔗糖溶液10ml研磨過濾，並以1000rpm離心5分鐘取沉澱製成懸浮液

(2)取懸浮液1ml+0.5M蔗糖溶液3ml+0.05%DCPIP液0.5ml，分別以照光遮光處理靜置30分鐘後，以3000rpm離心3分鐘，並量測在波長596nm下的吸光值，計算其差值

肆、研究結果

一、顯微構造觀察 (將鋅離子簡寫為Zn，銅、鋇以此類推)

(一)細胞壁厚度

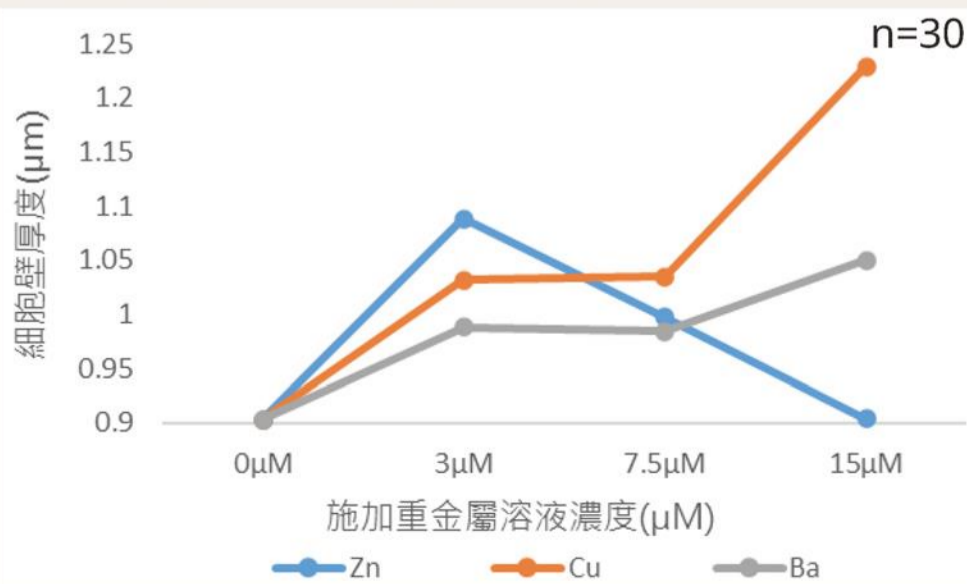
鋅：7.5-15 μ M增加的細胞壁厚度較0-3 μ M少

銅、鋇：隨濃度上升而呈上升趨勢

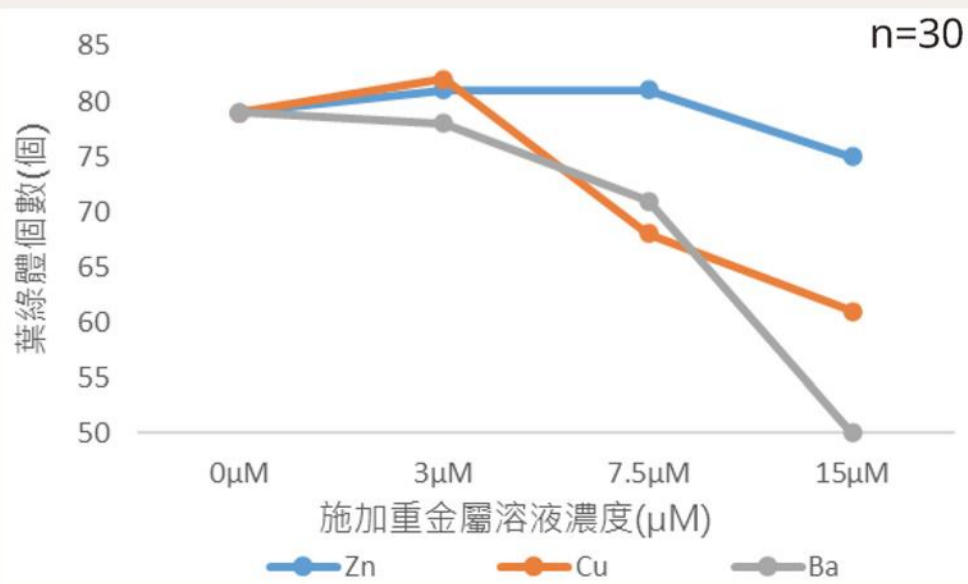
(二)葉綠體個數

鋅、銅：先升後降

鋇：隨濃度上升而下降



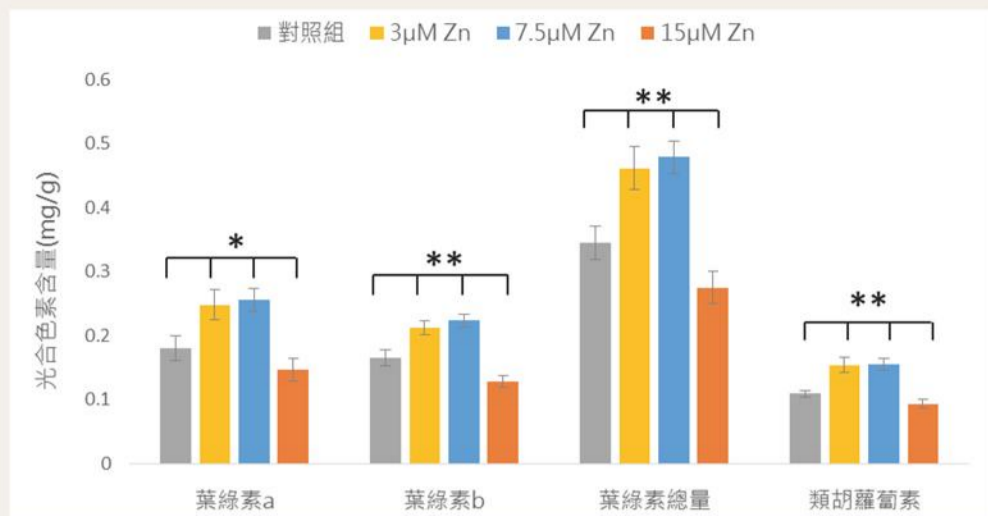
圖一、施加不同濃度金屬離子對細胞壁厚度影響



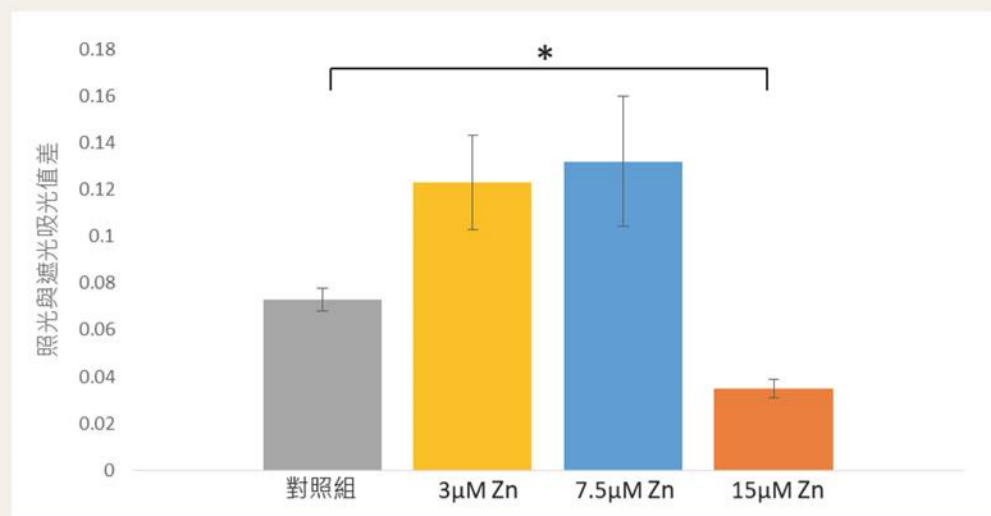
圖二、施加不同濃度金屬離子對葉綠體個數影響

二、施加**鋅離子**之羽苔21天後之光合色素含量及光反應效率 (圖表中* : p<0.05、** : p<0.01、*** p<0.001)

光合色素含量及光反應效率在0-7.5μM上升，15μM以上下降，兩者互相呼應



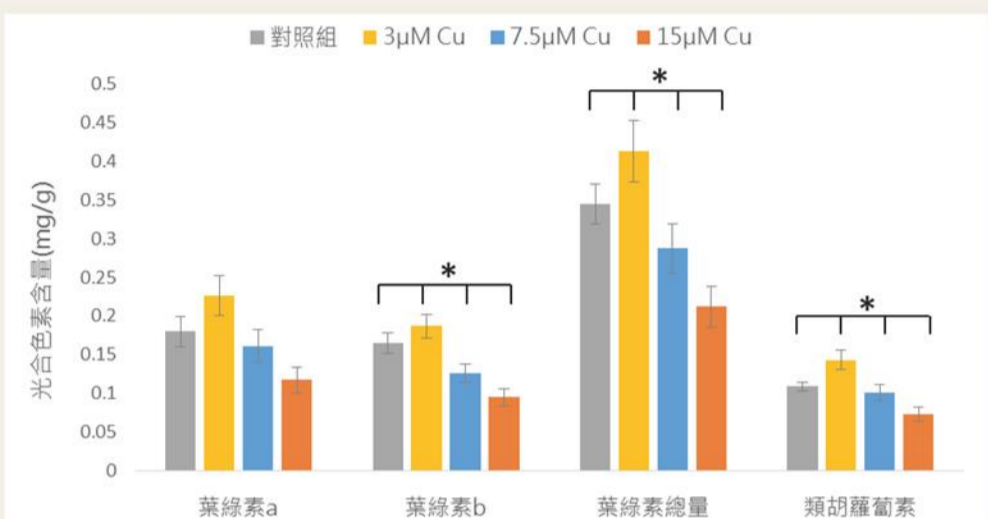
圖三、施加不同濃度鋅離子對光合色素含量影響



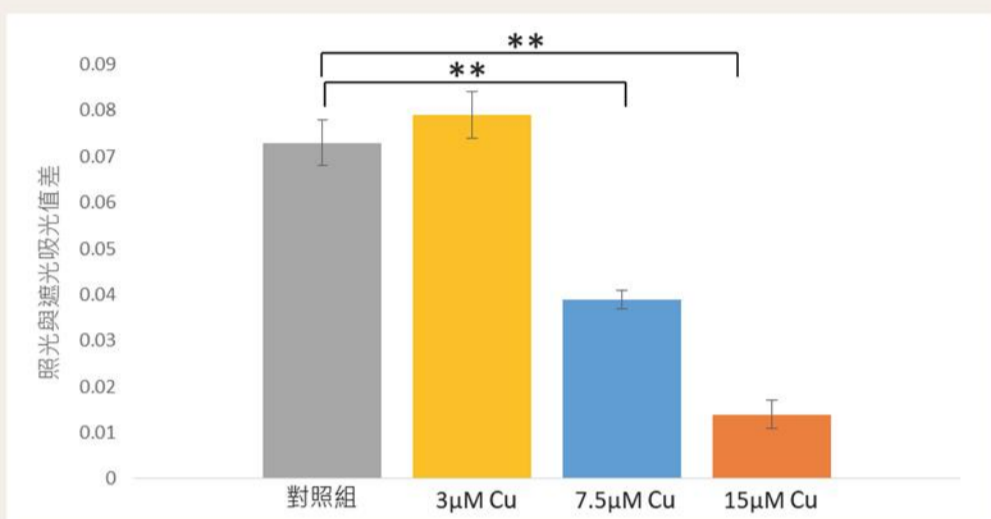
圖四、施加不同濃度鋅離子對光反應效率影響

三、施加**銅離子**之羽苔21天後之光合色素含量及光反應效率

光合色素含量及光反應效率在0-3μM上升，7.5μM以上下降，兩者互相呼應



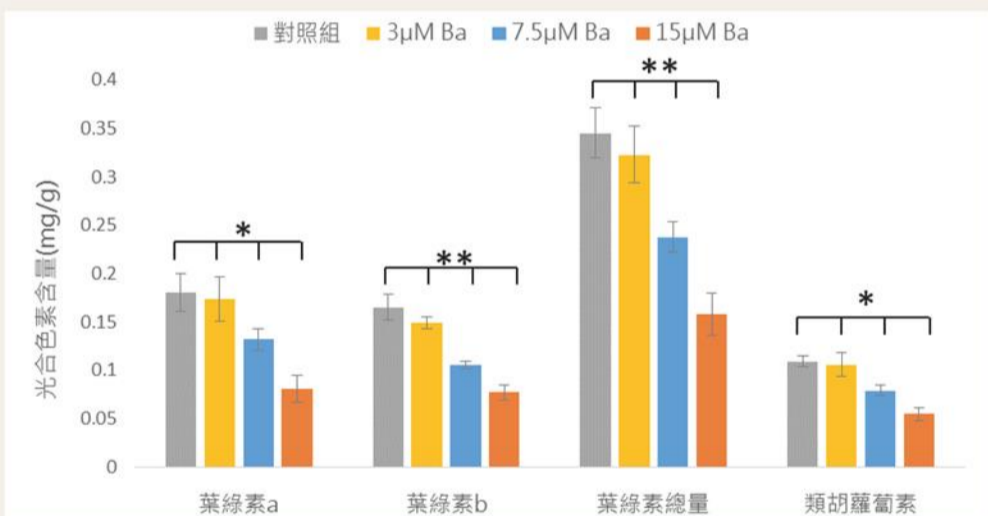
圖五、施加不同濃度銅離子對光合色素含量影響



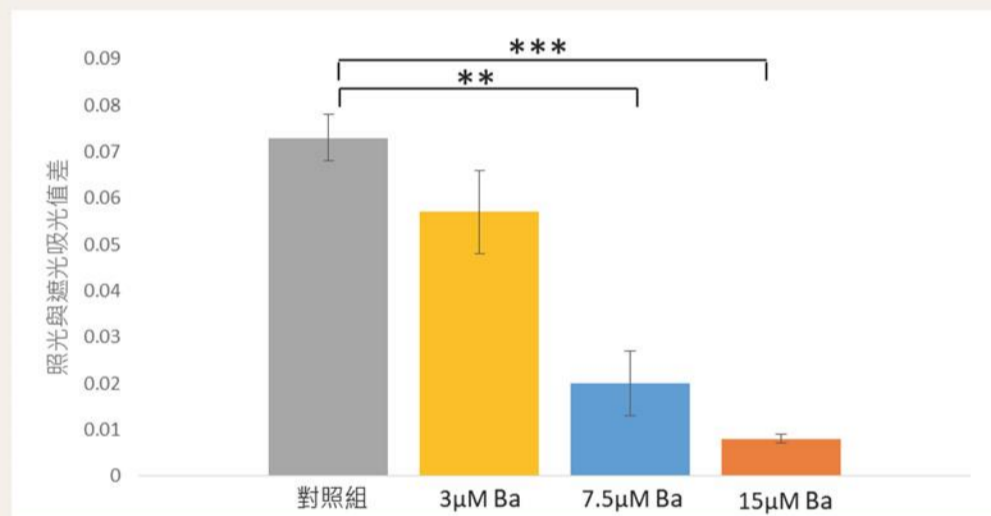
圖六、施加不同濃度銅離子對光反應效率影響

四、施加**鋇離子**之羽苔21天後之光合色素含量及光反應效率

光合色素含量及光反應效率隨濃度增加呈下降趨勢，兩者互相呼應



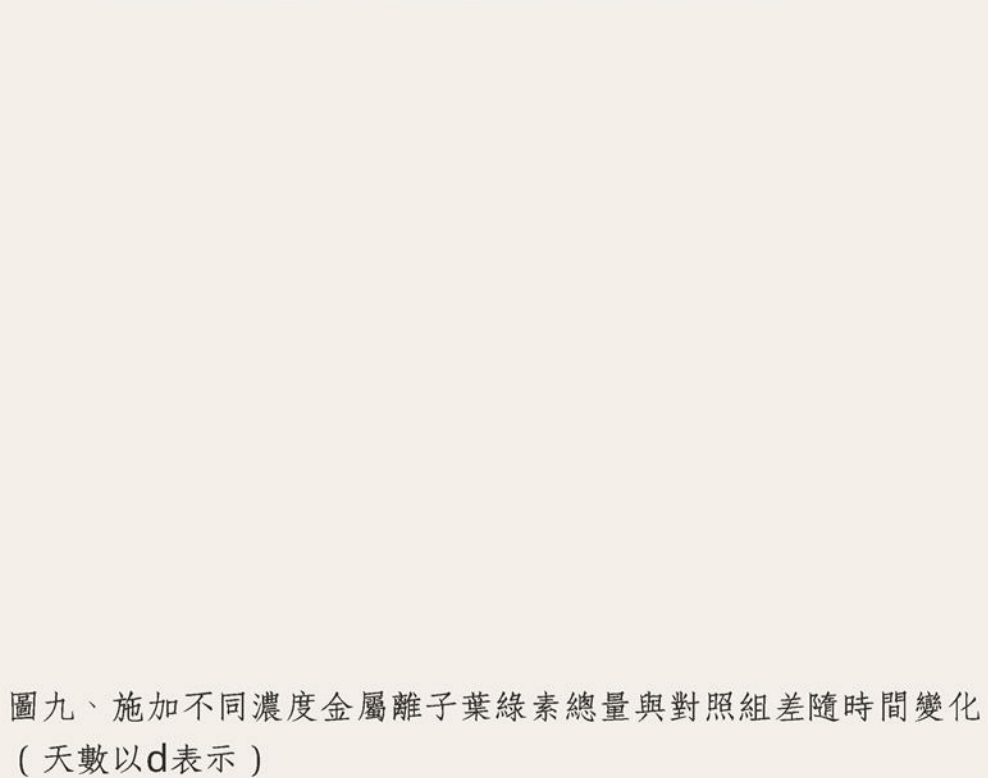
圖七、施加不同濃度鋇離子對光合色素含量影響



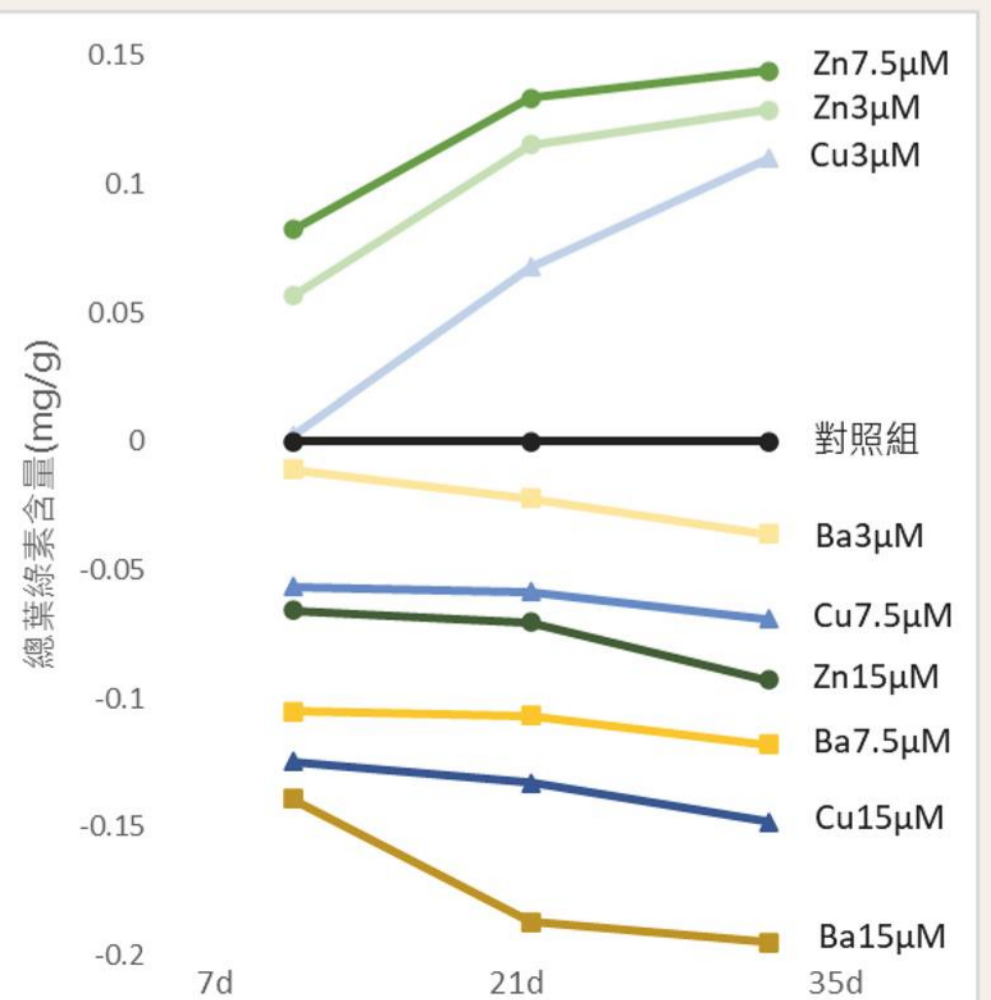
圖八、施加不同濃度鋇離子對光反應效率影響

五、施加不同離子之羽苔光合色素含量隨天數之變化

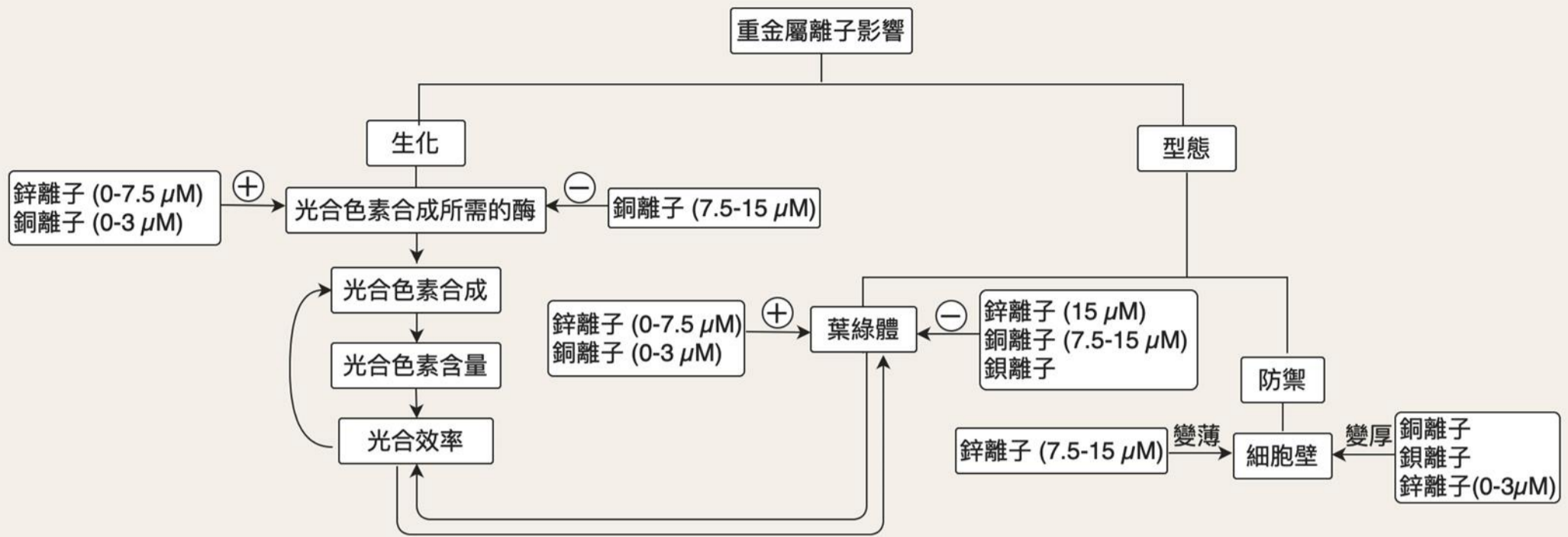
葉綠素含量隨天數之變化大致與前項呼應



圖九、施加不同濃度金屬離子葉綠素總量與對照組差隨時間變化 (天數以d表示)



伍、討論



一、鋅離子之影響

現象：0-7.5 μM 使光合色素含量、光反應速率、葉綠體數目上升，15 μM 則下降

解釋：鋅離子可以作為葉綠素合成酶、鎂螯合酶、原葉綠素還原酶的輔因子幫助提升光合色素合成，然而過高的濃度則會破壞葉綠體，造成光合色素的降解。(Willow, 2003)

二、銅離子之影響

現象：0-3 μM 使光合色素含量、光反應速率、葉綠體數目上升，7.5-15 μM 則下降

解釋：銅離子可以作為5-氨基酮戊酸脫水酶的輔因子，催化葉綠素前體的合成，而過高的濃度則會阻礙膽色素原氧化酶及亞鐵螯合酶等酵素運作，進而導致葉綠素含量降低。(Drouin et al., 1973)

三、銀離子之影響

現象：光合色素含量、光反應速率、葉綠體數目隨濃度上升而下降

解釋：銀離子會造成細胞中的葉綠體聚集，阻擋光進入細胞並降低葉綠體利用二氧化碳的效率，使光合效率變差。(Arundhathi et al., 2016)

四、細胞壁厚度

(一)鋅離子

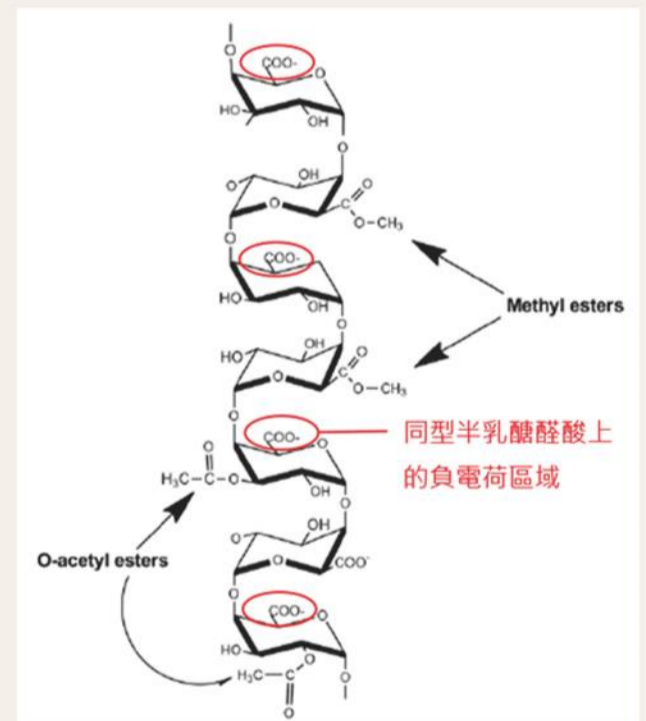
現象：0-3 μM 使細胞壁變厚，而3-15 μM 增加的厚度隨濃度增加而減少(0-15 μM 皆可使細胞壁變厚)

解釋：低濃度鋅離子為修飾細胞壁酵素(果膠甲基酯酶、擴展蛋白等)的組成元素，可促使酶作用而讓細胞壁增厚。然而高濃度鋅離子則會抑制這些酵素，進而使細胞壁分泌減少或變形。(Chen, 2015)

(二)銅、銀離子

現象：細胞壁隨濃度增加而變厚

解釋：金屬離子與同型半乳糖醛酸中的負電荷區域結合，導致細胞壁增厚。(Konno, 2010)



同型半乳糖醛酸與負電荷區域

陸、結論與展望

一、結論

微量元素

微量元素對臺灣羽苔生長有正向影響之濃度上限
鋅：7.5-15 μM ，銅：3-7.5 μM

重金屬對葉綠體

施加低濃度鋅、銅離子可使葉綠體數目增加
銀、高濃度鋅銅離子則有相反效果

重金屬對細胞壁

低濃度鋅離子增加的細胞壁厚度較高濃度多
銅銀離子會與細胞壁內負電荷區結合而導致其增厚

二、展望

延伸探討

汙染之重金屬種類
不同蘚苔種類與構造

未來應用

監測土壤汙染程度
作為重金屬汙染吸附材