

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生物科

第三名

030318

“番”天覆地~難逃“塑”命？塑膠微粒暴露對
番茄生長的影響

學校名稱：嘉義縣立永慶高級中學(附設國中)

作者： 國二 楊子瑩 國二 陳泳蓁 國二 賴衣絨	指導老師： 張珮珊 李雅婷
---	-----------------------------

關鍵詞：塑膠微粒、番茄、水耕

摘要

塑膠微粒(microplastics, MPs)是泛用塑膠製品而衍生的問題之一，且塑膠微粒會透過食物鏈的傳遞而導致人類的健康風險，作為食物鏈起點的生產者，是探討塑膠微粒健康風險的著眼點。基於聚苯乙烯(polystyrene, PS)類塑膠日益擴增的需求，加上小番茄為家鄉重要作物，以及想要窺探塑膠微粒在根部分布的情況，因此，我們利用水耕種植來探討 PS 塑膠微粒對小番茄的影響。研究結果顯示 PS 奈米塑膠微粒(nanoplastics, NPs)的暴露會對小番茄產生影響，包含降低其根部含水量、使其更容易遭受蟲害、植株葉片提早黃化枯萎、減少其根系中促植物生長細菌-木糖氧化無色桿菌(*Achromobacter xylosoxidans*)菌數，以及大量 NPs 累積於根部表面而影響小番茄對水分的利用等。不過 NPs 的暴露在植株乾鮮重、莖長度、開花與果實等生長參數並無顯著影響。

壹、研究動機與背景

一、塑膠微粒對環境的影響

塑膠是近一百多年的新興材料，基於塑膠製品具有便宜和耐用等特性，被廣泛應用於生活中，且因應塑膠製品大量的需求，每年有相當可觀的塑膠原料或其產品被製造，我們組員之一的家長就是在台灣塑料大廠工作。這些塑膠產品雖然方便，但因為塑膠難以被快速分解的特性，因而衍生了許多環境與生態問題，例如海中生物可能會因誤食塑膠導致消化道阻塞或內部臟器撕裂，珊瑚礁因被塑膠覆蓋導致缺氧窒息等(聯合國環境署，2021)。此外，這些累積的塑膠垃圾經過風吹、日曬、雨淋或海浪翻攪等應力作用後，會產生數目更為龐大的塑膠微粒(microplastics, MPs)。塑膠微粒是指粒徑尺寸小於 5 毫米(mm)的塑膠碎片和粒子，若尺寸小於 0.1 微米(100 nm)，通常被稱為奈米塑膠微粒(nanoplastics, NPs) (朱柏青，2020)。許多環境調查研究發現塑膠微粒存在於我們生活的陸、海、空環境中(聯合國環境署，2021)，這些塑膠微粒來源多元，影響也非常廣泛，包含之前洗面乳中添加的塑膠微珠，這些使用後的塑膠微粒會被沖掉而進入水域或陸域環境。塑膠地膜(plastic mulch)是土壤中塑膠微粒的一大來源(聯合國環境署，2021)，這些塑膠微粒可能改變土壤的物理和化學特性，如影響保水力或酸鹼值等，或影響土壤整體健康和肥沃程度，進而影響植物生長(方儉，2023)，而種植在含塑膠微粒土壤的農作物，最終成為人類的食物，因此其對人類健康的影響值得關注。

二、塑膠微粒的暴露途徑與人類健康風險

塑膠微粒或奈米塑膠微粒，主要可以透過吸入、攝入或直接穿透皮膚等三種方式進入人體內。研究估計人體每年會吸入大約 121,000 顆塑膠微粒，而這些吸入的塑膠微粒對人體會有不同的影響，稍大一點的塑膠微粒可能沉積在氣管、支氣管或是留滯在肺泡區；粒徑較小一點或可溶性較高的塑膠微粒則可能激活 T 細胞或被巨噬細胞吞噬，並且送到淋巴結累積，或透過循環系統運送到其他器官。較小的奈米塑膠微粒則能穿透皮膚進入人體。飲食是塑膠微粒進入人體的主要方式，研究推估人體每年約攝入 52,000 顆塑膠微粒，2019 年科學家於人類糞便檢體中首度檢出塑膠微粒的存在(Schwabl et al., 2019)，而塑膠微粒只要粒徑夠小，就有可能穿透細胞膜，進入循環系統後就有機會累積在體內其他器官，因此繼人類糞便發現塑膠微粒後，科學家在胎盤中也發現了塑膠微粒(聯合國環境署，2021)。2024 年的一篇研究在人類動脈斑塊中發現塑膠微粒，且這些檢出塑膠微粒的受試者，罹患心臟病、中風或死亡的風險是未檢出塑膠微粒患者的 4.5 倍(陳亭瑋，2024；原文獻 Marfella et al., 2024)。今年(2025)一篇屍檢研究更在人類大腦中偵測到塑膠微粒的存在，其濃度甚至比肝臟和腎臟高。而且學者更發現，12 個罹患失智症患者的大腦檢體中，塑膠微粒含量比健康大腦還高出 3 到 5 倍(曹可芝，2025；原文獻 Nihart et al., 2025)。

三、塑膠微粒於生物體間的傳遞-食物鏈

雖然透過飲食攝入是塑膠微粒進入人體的主要方式，不過一般人並不會直接吃塑膠或塑膠微粒，那人體每年約攝入 52,000 顆塑膠微粒的來源極有可能是透過食物鏈傳遞而得到的。研究顯示萵苣(lettuce)會從土壤中吸收塑膠微粒，並累積在根和葉中，而昆蟲幼蟲吃了含有塑膠微粒的萵苣後，在昆蟲糞便中即發現這些塑膠微粒，而排空的腸道中仍有塑膠微粒的殘留。研究進一步將這些昆蟲幼蟲餵食魚類，塑膠微粒也會轉移至魚類體內，且主要累積在肝臟中

(Monikh et al., 2022)。而另一篇探討塑膠微粒在脊椎動物轉移的研究也證實，塑膠微粒不僅會藉由蝌蚪轉移至魚類，再由魚類轉移至老鼠體內累積，也導致老鼠防禦天敵的社會聚集行為異常，對動物的生存產生負面影響(da Costa Araujo & Malafaia 2022)。因此，當我們吃了含有塑膠微粒的食物，如稻米、魚類或是番茄等水果，這些食物中的塑膠微粒是否會持續累積在人體內並危害健康，是極為重要的研究課題。

四、塑膠微粒對植物生長的影響

既然透過食物鏈的傳遞是導致體內塑膠微粒累積的主要原因，那瞭解塑膠微粒對生產者的影響是我們可以著手的研究方向，我們組員之一的家中就是從事農作物的生產，其中也包含縣內最重要的經濟作物-玉女小番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)。玉女小番茄分類上屬於雙子葉植物綱(Dicotyledons)，茄目(Solanales)，茄科(Solanaceae)，番茄屬(*Lycopersicon*)。在亞洲蔬菜研究發展中心(亞蔬)分類中，玉女小番茄是種苗亞蔬 25 號。玉女小番茄在台灣南部的播種期是 9 月，小番茄幼苗定植後 20~30 天第一花序開始開花結果，定植後的 50~90 天是採收期，若從種子播種到第一次採收則約需要 110~120 天，也就是 12 月份即有機會開始採收，可以陸續生產採收至隔年的 4~5 月(陳正次，2013)。

我們觀察到小番茄在田間種植時，土壤上方都會蓋著黑色的塑膠膜，其主要功能是抑制雜草生長，保持土壤含水的穩定，防止土壤被侵蝕。當小番茄採收後，對於土壤上方黑色塑膠膜的處理方式，多為直接碾碎埋進土裡，而這些破碎的塑膠膜將來就成了土壤中的塑膠微粒，因此，我們好奇這些土壤中的塑膠微粒對小番茄的影響，而當我們享用家鄉盛產的小番茄時，是否也會間接攝入這些塑膠微粒？雖然還尚未有研究證實攝入這些塑膠微粒會直接影響到人體的健康，但是確實有研究顯示，塑膠微粒會直接影響到植物的生長。

科學家以美國南瓜(*Cucurbita pepo* L.)為研究對象，探討美國南瓜暴露於不同種類(PE、PVC、PP、PET)塑膠微粒的生長情況，結果指出這些塑膠微粒的暴露會導致美國南瓜的根與莖重量減少，PVC 塑膠微粒也顯著影響葉子的大小，而 PET 塑膠微粒則會降低根部含水量(Colzi et al.,2022)。近期探討塑膠微粒對番茄影響的相關研究則選用 PVC 塑膠微粒(Changmai et al., 2024) 與 HDPE 奈米塑膠微粒(Hao et al., 2025)。研究顯示土壤中的 PVC 塑膠微粒會影響植物生長，包含植株高度、葉面積、莖直徑、植株乾鮮重下降以及根的長度增加等(Changmai et al., 2024)。而土壤中的 HDPE 奈米塑膠微粒則會導致幼苗發育不良、降低植株早期結果期(Day-43)的水分利用效率(Hao et al., 2025)。上述這些研究中並沒有探討聚苯乙烯(PS)塑膠微粒的影響，不過 PS 是一種優良的包裝材料，一次性餐具、食品容器等 PS 產品皆因為其便利性和價格而廣受歡迎，隨著 PS 市場需求擴大，未來可能會有更多 PS 塑膠微粒產生(Grand View Research, 2023)。因此，我們想要探討 PS 塑膠微粒對小番茄生長的影響。

貳、研究目的

本研究主要探討 PS 奈米塑膠微粒的暴露對小番茄生長的影響。

待答問題如下：

一、奈米塑膠微粒(NPs)的暴露對小番茄根、莖、葉生長與開花結果有何影響？

預期結果一：

奈米塑膠微粒(NPs)的暴露確實會對小番茄的生長造成一定影響，包含 NPs 暴露組小番茄植株可能較為矮小，其根、莖、葉重量可能也較對照組輕，開花數量也較少，而導致果實數量較少、重量也較對照組輕。

二、奈米塑膠微粒(NPs)的暴露對水耕種植環境有何影響？

預期結果二：

奈米塑膠微粒(NPs)的暴露會影響水分的吸收，導致 NPs 暴露組的水耕種植缸水量變化較對照組小，而 NPs 也可能會影響植株根部附近的微生物相。

參、實驗材料

一、實驗植物

本研究所選用的植物為小女番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)，購買自學校附近之嘉華育苗公司。我們選定小女番茄是因為其抗病性較高(如表一)，比較好種植，不過小女番茄和其他小番茄一樣，仍有嚴重的蟲害問題，例如銀葉粉蝨(*Bemisia argentifolii*)，番茄斑潛蠅(*Liriomyza bryoniae*)等。

表一、小番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)品系的比較。

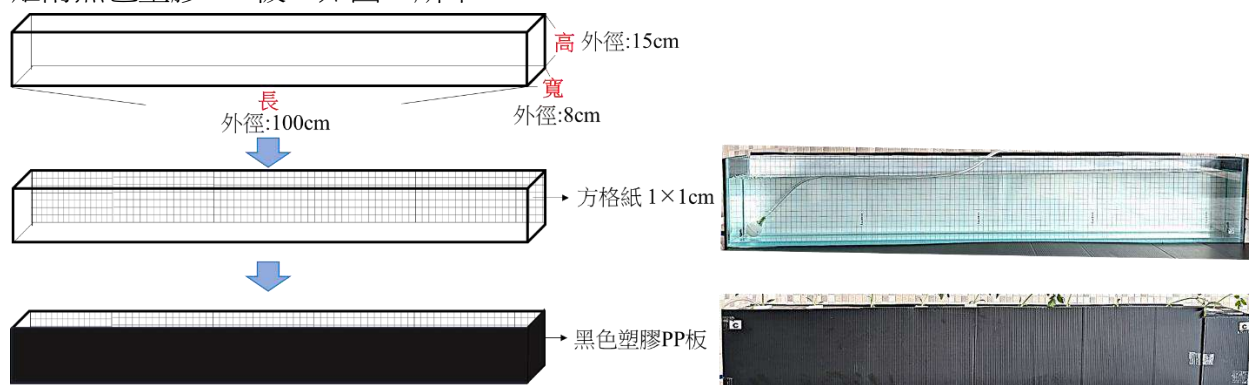
	玉女小番茄	小女番茄
果重(公克)	18	22
糖度	10	8
質地	皮薄多汁	肉後口感佳，果硬
抗病性	耐萎凋病 (Race1)	耐番茄捲葉病毒(TYLCV) 番茄嵌紋病毒(ToMV0、1、2) 耐萎凋病(Race1、2、3)
儲運性	中	強
播種到採收	90	85

二、實驗器材

我們參考在地水耕蔬菜農場的建議，設計實驗水耕種植缸、植株定植平台與規劃整體水耕種植的打氣系統。

(一) 蕃茄水耕種植缸設計與製作

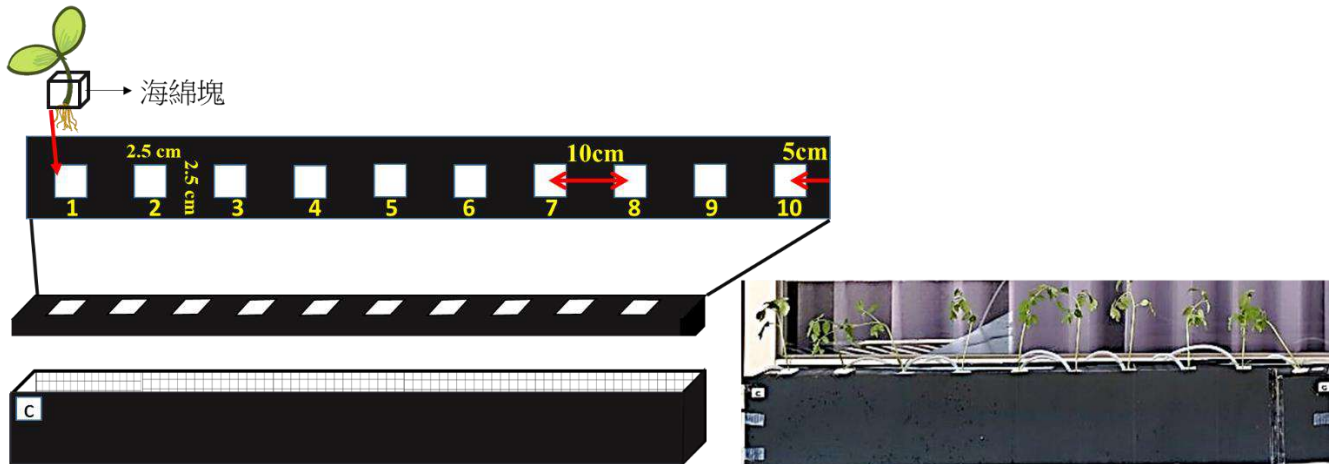
本實驗小番茄水耕種植需同時定植兩組，即對照組 C 與實驗組 T (塑膠微粒暴露組)，因此委託玻璃工廠根據本實驗所繪製的設計稿(L*W*H=100*8*15 cm³)，製作兩個一字水耕種植缸，我們再將水耕種植缸的外層後部貼上最小方格為長寬各 1 公分的方格紙，最後再將外層貼附黑色塑膠 PP 板，如圖一所示。



圖一、水耕種植缸設計與實品。本圖片由作者親自製作。

(二) 蕃茄定植平台

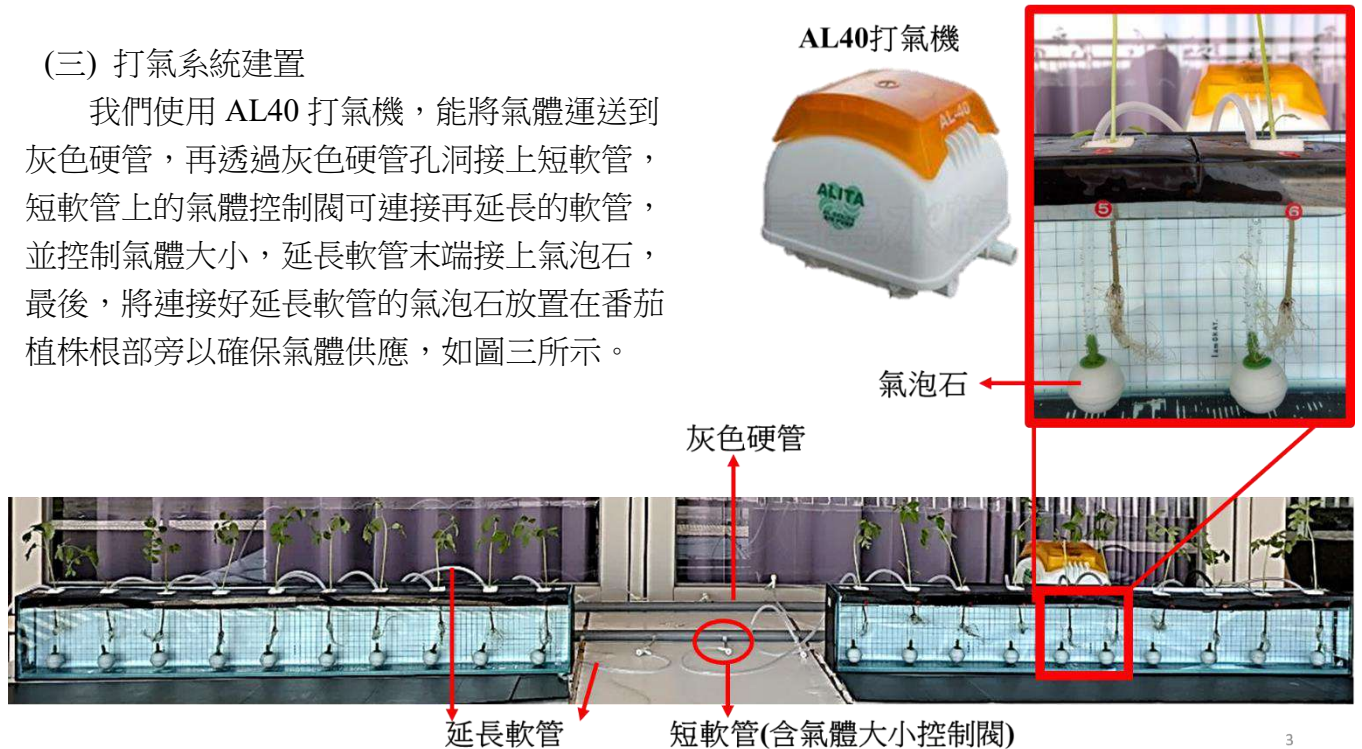
番茄定植平台是由保麗龍板製成，預計植物與植物的間距為 10 公分，因此在保麗龍板上切割 10 個長寬均為 2.5cm 的定植方格，再將外層貼一層黑膠帶以阻擋光線，然後以海綿塊固定好小番茄幼苗植株，最後將包裹植株幼苗的海綿塊放進切割好的定植方格中，如圖二所示。



圖二、蕃茄定植平台設計與實品。本圖片由作者親自拍攝與製作。

(三) 打氣系統建置

我們使用 AL40 打氣機，能將氣體運送到灰色硬管，再透過灰色硬管孔洞接上短軟管，短軟管上的氣體控制閥可連接再延長的軟管，並控制氣體大小，延長軟管末端接上氣泡石，最後，將連接好延長軟管的氣泡石放置在番茄植株根部旁以確保氣體供應，如圖三所示。



圖三、打氣系統建置與實況。本圖片由作者親自拍攝與製作。

(四) 奈米塑膠微粒 (nanoplastics, NPs)

本實驗暴露用的塑膠微粒是聚苯乙烯奈米塑膠微粒(PS -NPs)，粒徑大小介於 0.05-0.1 μ m 之間，濃度為 5%w/v，購自尚博生物科技有限公司。

(五) 其他實驗器材

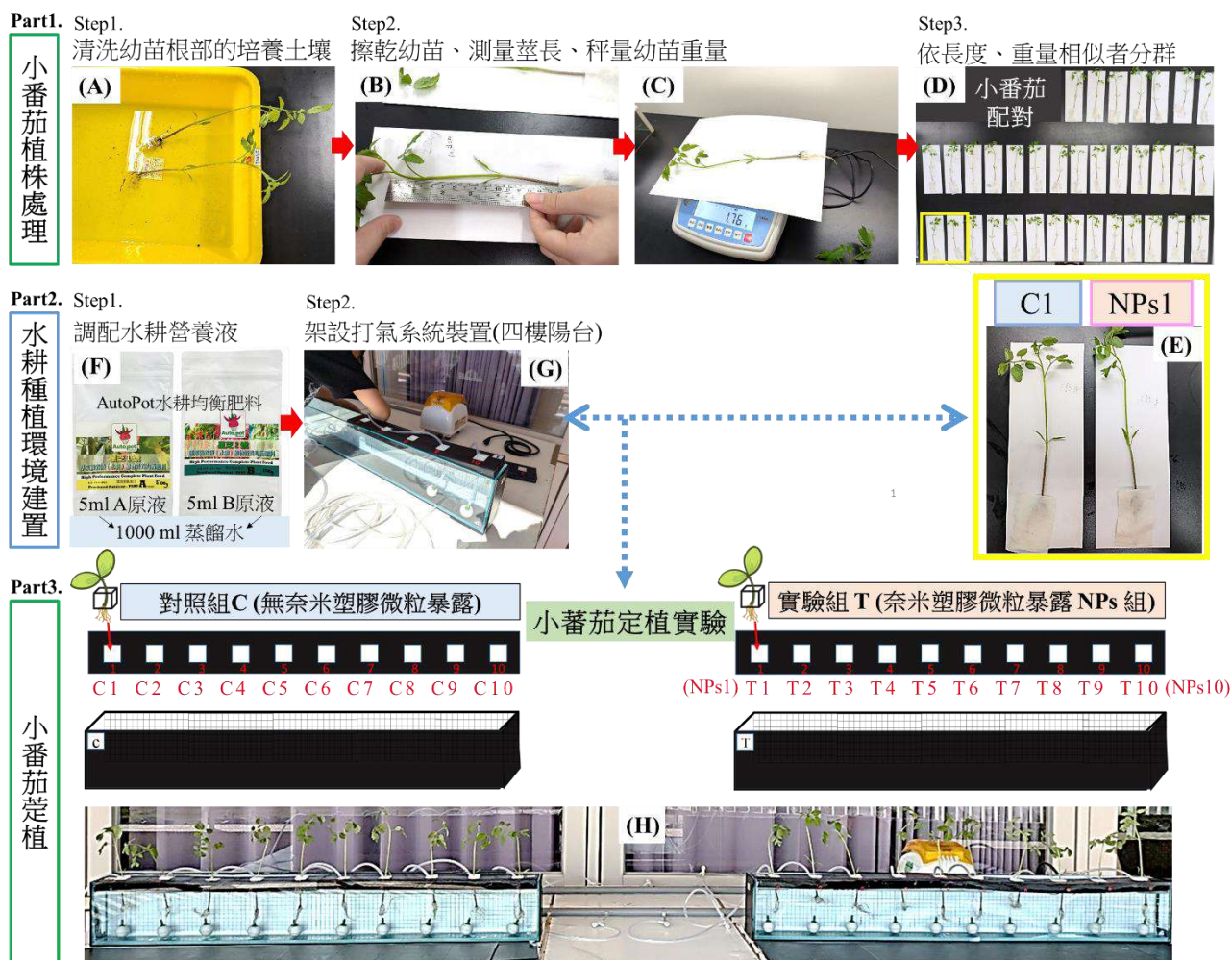
表二、實驗器材清單

植物水耕種殖用具			
1.	玻璃缸	2.	海棉塊
3.	黑膠帶	4.	氣泡石
5.	AL40 打氣機	6.	輪座式延長線
7.	血清瓶 500ml×3	8.	鐵尺 30cm×3
9.	黑色珍珠板×2	10.	長尾夾
11.	燒杯 500ml	12.	角架×3
13.	軟尺	14.	蒸餾水×8(箱)
15.	pH 試紙	16.	隱形膠帶
17.	奇異筆*3	18.	電子秤
19.	打氣管(5mm)	20.	塑膠圍籬網
21.	鐵絲	22.	白色珍珠板×6
23.	燒杯 250ml	24.	方形小木棍×2
25.	保麗龍板	26.	編號貼紙×40
27.	透明膠帶	28.	字母貼紙×2
29.	量筒 500ml /1000ml	30.	水桶×2
其他實驗器材			
31.	烘箱	32.	廚房紙巾
33.	針線	34.	棉線
35.	剪刀	36.	酒精
37.	玻璃塗抹棒	38.	微量吸管組
39.	酒精燈	40.	LB 培養基(大學研究室提供)

肆、實驗過程與方法

一、實驗設計與流程

(一) 小蕃茄定植實驗



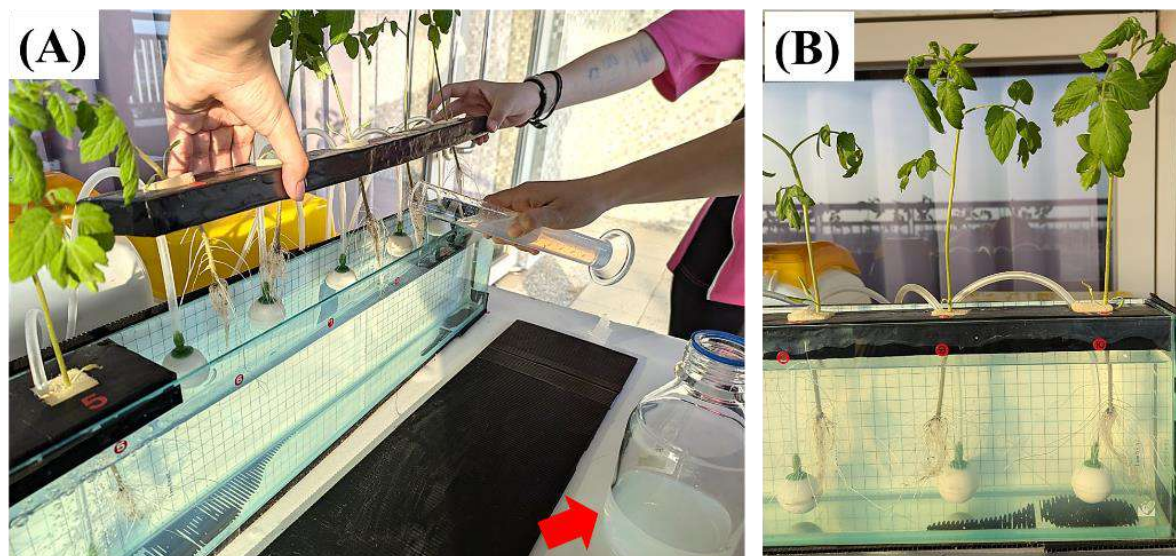
圖四、小番茄定植實驗流程圖。本圖片由作者親自拍攝與製作。

小番茄定植實驗主要分為三部分，第一部分為小番茄植株處理，因為選購自苗場的小番茄原本是種植在土壤中，因此先以清水洗淨小番茄根部的殘土(圖四、A)，以紙巾擦乾幼苗根部後，再測量植株之重量和長度(圖四、BC)，最後再根據長度和重量相似者進行實驗樣本的分群(圖四、D)，如植株重量 1.35g、長度為 10.4cm 為對照組 C1，而植株重量 1.36g、長度為 10.9cm 則作為實驗組 T1(NPs1) (圖四、E)。

第二部分為為水耕種植環境建置，首先進行水耕營養液調配(圖四、F)，參考 AutoPot 水耕均衡肥料比例的調配建議，即每 1000ml 水耕培養液中含 5ml A 原液及 5ml B 原液，調配每一個水耕缸之 8000ml 的水耕培養液。緊接著至四樓陽台的實驗場域架設水耕種植缸，包含倒入培養液並連結打氣裝置系統(圖四、G)。

第一、二部分之準備工作完成後，隨即進行小番茄定植，實驗分為二組進行，一組為沒有暴露奈米塑膠微粒的對照組 C，以及後續將會暴露奈米塑膠微粒的實驗組 T，也稱 NPs 暴露組。番茄定植平台編號分別為 C1~C10, T1~T10 (NPs 暴露組)，接著將小番茄幼苗植株依序放入平台的定植方格中，最後將定植平台卡進水耕種植缸(圖四、H)，啟動打氣系統後，蓋上黑色 PP 板，完成小番茄定植。

(二) 奈米塑膠微粒(NPs)暴露實驗

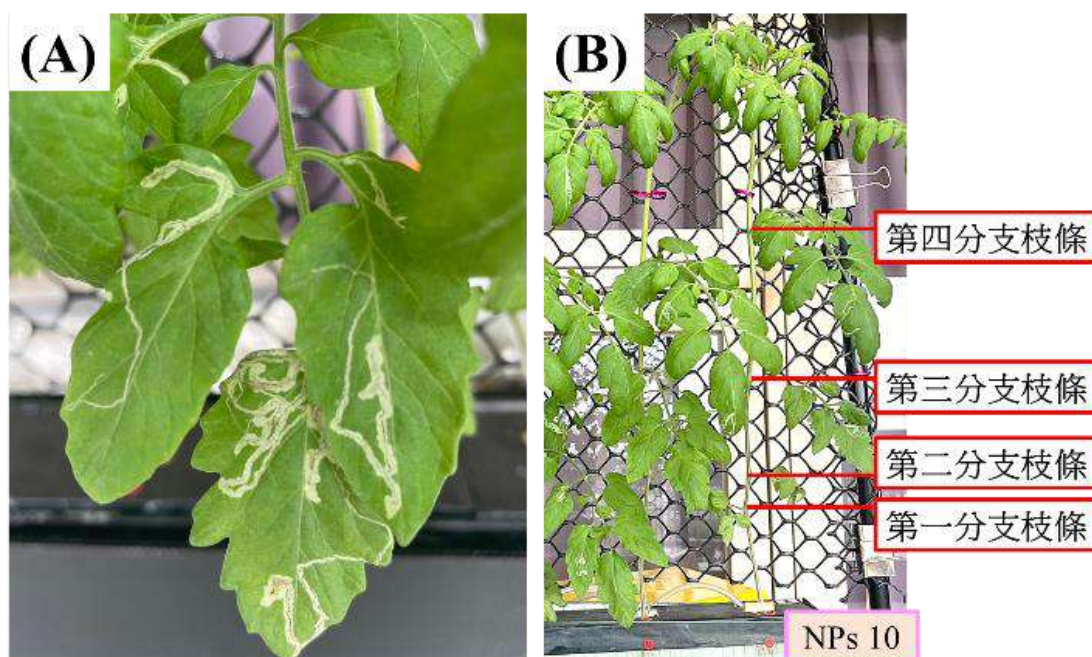


圖五、奈米塑膠微粒(NPs)暴露實驗操作流程。本圖片由作者親自拍攝與製作。

確定 20 株小番茄都穩定生長後，我們於 11 月 07 日(即種植 5 天後)，在實驗組 T 的水耕種植缸加入 PS 奈米塑膠微粒，即為 NPs 暴露組，奈米塑膠微粒原液的濃度為 0.001kg/L(圖五、A 紅色箭頭)，因為前人研究 PS 奈米塑膠微粒對橡葉萵苣(Leaf lettuce)生長影響的暴露濃度為 30mg/L (Xu, Z et al., 2022)，考量到小番茄成熟植株較大，因此以 40mg/L 做為本實驗的暴露濃度，最終在實驗組 T 組的水耕種植缸中加入共 320ml 的 PS 奈米塑膠微粒原液(圖五、A)，而對照組加了等量(320ml)的蒸餾水，圖五 B 顯示加入 PS 奈米塑膠微粒後的水體呈現半透明白色的微混濁狀態。

(三) 小蕃茄植株種植期間生長紀錄

1. 葉片、花、果實的計數

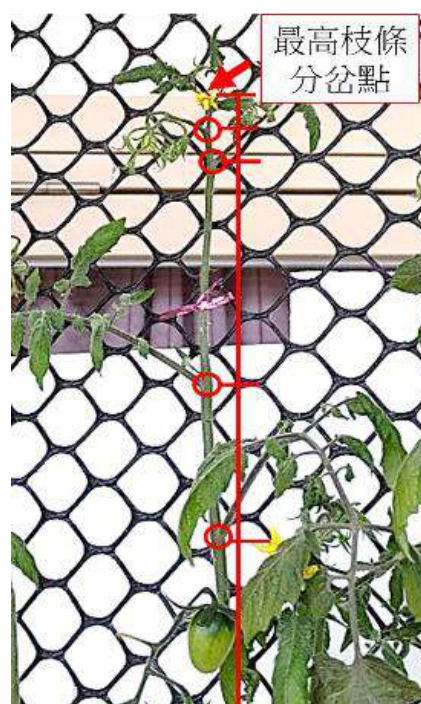


圖六、小番茄地圖葉及其枝條分布。本圖片由作者親自拍攝與製作。

- (1) 葉片部分僅計算地圖葉數量，地圖葉是指被斑潛蠅幼蟲啃食後而留下長條痕跡的葉片(圖六、A)。為避免混淆、漏算或重複計數，檢查方式是從植株的第一個莖節長出的第一分支枝條上的葉片開始一片一片檢查，再逐一往上層的分枝葉片檢查紀錄(圖六、B)。
- (2) 開花紀錄主要依據開花程度分為花未開、花微開、半開、全開、以及花凋零，其定義如下：
 - 花未開-即是花苞緊閉，只見綠色花萼且無露出任何黃色花瓣。
 - 花微開-則是可看到微露出的黃色花瓣，但花萼無向外彎曲。
 - 花半開-為花萼已稍微向外彎曲展開，但中央花蕊未見。
 - 花全開-為花萼已完全向外彎曲且可看到中央花蕊。
 - 花凋零-已有花瓣開始掉落。
- (3) 果實部分為確保花瓣凋零後的子房能發育為果實，因此定義觀察到的子房大小等於或大於 0.5 公分者才視為果實計數。

2. 莖總長與莖節長度測量

莖的總長定義:自莖頂附近的最高枝條分岔點延伸到莖最下方初生葉的莖節點。莖節間長度即為測量最高枝條分岔點(紅色箭頭)到下方下一個莖節點(紅色圓圈)的長度做為一個節間長，依序向下再測量各莖節的距離(圖七)。由於小番茄植株的莖部不一定會直直生長，有部分的彎曲，為求精準，我們利用棉線來註記以協助測量。



圖七、小番茄莖節點分布

本圖由作者親自拍攝與製作。

(四) 小蕃茄植株收成採集實驗

1. 小蕃茄植株各器官採集

小蕃茄植株各器官採集分為二部分進行，首先以剪刀依序剪取小番茄果實、花、莖、葉等器官並分批收集於燒杯中(圖八、A)。根的部分則因植株間互相延伸纏繞，因此先將水缸內培養液回收，於實驗室中將相互殘繞的根部依序排列在方格塑膠墊上(圖八、B)，再自二顆植株根系中間處裁剪(圖八、C)，並使用紙巾擦乾殘留水分後，再和果實、莖、葉分批測量鮮重。第二部分為測量乾重，將測完鮮重後的根、莖、葉置入烘箱，溫度設定為 65°C，烘乾時間為三天(圖八、D)，再分別測量根、莖、葉的乾重，果實則分批裝袋於冰箱 4°C 保存。

Part1.

剪取小番茄植株各部位器官



根

莖、葉、果實
測量鮮重

Part2.

根、莖、葉烘乾



測量
乾重

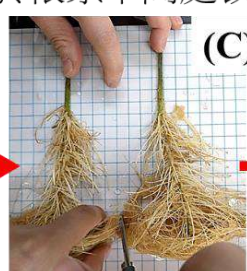
Step1.

小番茄根部依序排列於方格紙上



Step2.

於根系中間處裁剪

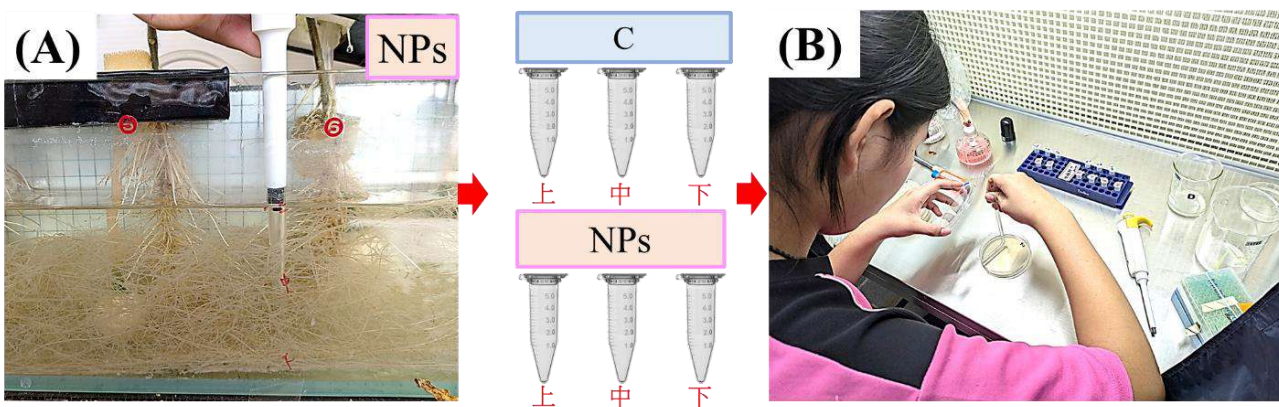


紙巾吸乾
殘留水份

圖八、小蕃茄植株各器官採集與秤重。本圖片由老師拍攝與作者親自與製作。

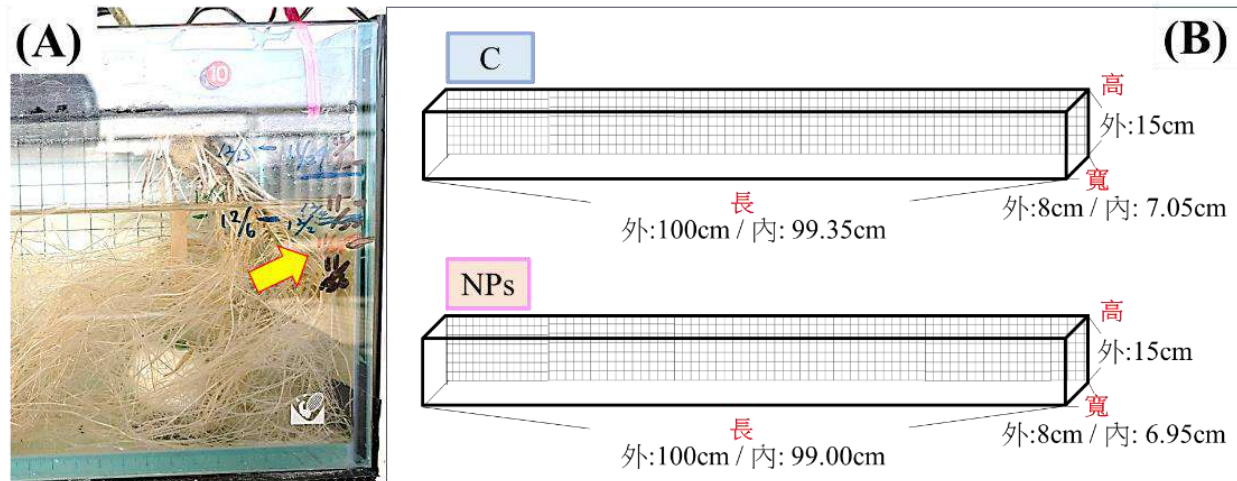
2. 水耕種植缸之水樣本採集

小番茄果實、花、莖、葉採集後，打開定植平台，以微量吸管(微量吸管尖已滅菌)、微量離心管(已滅菌)，吸取水耕種植缸內之培養液各 1ml，採集點為水耕種植缸中間位置(第 5、6 植株中間)，並採集上(近水面)、中、下(根系底部) 三處(圖九、A)。將收集之水樣本於無菌操作台進行菌群培養。首先以微量吸管(微量吸管尖已滅菌)吸取 100 μ l 的水樣本均勻注入 LB 培養盤，再使用酒精燃燒滅菌之玻璃塗抹棒，塗開培養基表面的液體，讓水樣本能夠均勻分散(圖九、B)，塗抹完成之培養基置於室溫下培養二天並拍照。



圖九、水樣本採集與菌群培養。本圖片由作者親自拍攝與製作。

(五) 水耕種植缸之水位變化判定



圖十、水耕種植缸之水位變化判定。本圖片由作者親自拍攝與製作。

水耕種植缸後面貼的方格紙做為水位變化參考標記，水位距離缸頂 3 公分處定義為滿水位狀態，當水位下降至有部分根系露出水面時，即會加入蒸餾水至滿水位。每次加水之前，先將下降之水面的位置畫記在玻璃缸二側的玻璃表面上，並標示當天日期(圖十、A)，再加入蒸餾水至滿水位。根據標記計算水位下降高度，再乘上長與寬的內徑(圖十、B)，即可判定水量變化。

(六) 水樣本之菌種判定

自培養出菌落的 LB 培養基中，選殖最優勢菌種(數量最多)之單一菌落，利用新的 LB 培養基繼代培養單一菌落，再委託基隆米克斯生物科技公司以細菌核糖體 16SrDNA 進行菌種鑑定，流程如圖十一。



圖十一、生技公司菌種鑑定流程圖。本圖片由作者親製作。

二、資料分析

(一) 小蕃茄生長情況

小番茄定植後，每日進行各植株生長、根系發展觀察並拍照，根據日期建立相簿，於 Microsoft PowerPoint 編排照片以比較差異。

(二) 小蕃茄植株各器官生長數據、水位變化量統計分析

小番茄植株各器官之鮮重、乾重、莖長度，以及葉片、花、果實之數量、水位減少量等數據先以 Microsoft Excel 進行初步整理，再藉以 SPSS 22.0 統計軟體之曼惠特尼 U (Mann-Whitney U test)無母數檢定，來比較對照組與 NPs 暴露組間的差異。

伍、研究結果

一、塑膠微粒暴露對小番茄生長的影響

表三、對照組與 NPs 暴露組的小番茄植株總重量之統計分析 $N=20$

	定植日植株鮮重(day 0)	植株鮮重(day 56)	植株乾重(day 56)
重量(g)	$M (SD)$	$M (SD)$	$M (SD)$
C	1.708(0.168)	57.641(4.936)	11.402(0.604)
NPs	1.707(0.165)	53.963(6.848)	10.674(1.127)
p	1.000	0.2471	0.105

為了確保兩組之間在實驗處理前重量無顯著差異，在 11 月 02 日植物定植當天(day 0)進行植株第一次鮮重測量，結果如表三。對照組平均重量約為 $1.708 \pm 0.168\text{g}$ ，NPs 暴露組平均重量約為 $1.707 \pm 0.165\text{g}$ ，二組確實無顯著差異($p=1.000$)。12 月 28 日(day 56)進行第二次植株的重量測量，對照組平均重量約為 $57.641 \pm 4.936\text{g}$ ，NPs 暴露組平均重量約為 $53.963 \pm 6.848\text{g}$ ，亦沒有顯著差異($p=0.2471$)。植株烘乾測量其乾重，對照組平均重量約為 $11.402 \pm 0.604\text{g}$ ，NPs 暴露組平均重量約為 $10.674 \pm 1.127\text{g}$ ，二組乾重也沒有無顯著差異($p=0.105$)。

(一) 塑膠微粒暴露對小番茄根部生長的影響

1. 塑膠微粒暴露對小番茄根部生長重量的影響

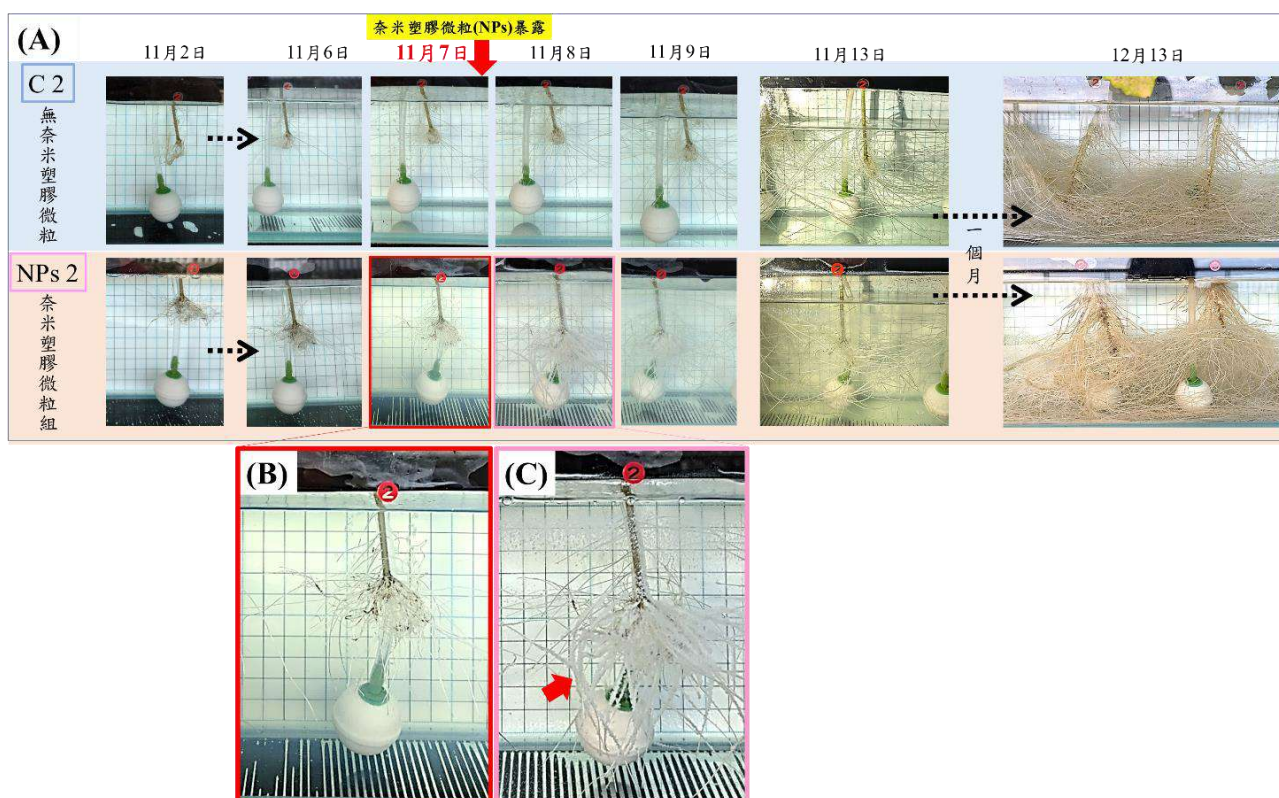
表四、對照組與 NPs 暴露組的小番茄根部生長重量之統計分析 $N=20$

	根鮮重(day 56)	根乾重(day 56)
	$M (SD)$	$M (SD)$
C	11.179(1.384)	3.349 (0.118)
NPs	9.460 (1.242)	3.300 (0.127)
p	0.023	0.481

12 月 28 日(day 56) 進行根部鮮重測量，結果如表四。對照組植株的根平均重量約為 $11.179 \pm 1.384\text{g}$ ，NPs 暴露組的根則平均重量約為 $9.460 \pm 1.242\text{g}$ ，二組間有顯著差異($p=0.023$)。番茄根部烘乾後測量其乾重，對照組根的平均乾重為 $3.349 \pm 0.118\text{g}$ ，NPs 暴露組根的平均乾重為 $3.300 \pm 0.127\text{g}$ ，二組乾重並無顯著差異($p=0.481$)。

2. 塑膠微粒暴露對小番茄根系發展的影響

番茄植株於 11 月 02 日(day 0)進行定植，並觀察根部每日的生長變化，如圖十二。對照組與 NPs 暴露組的根系都有明顯增長。確認番茄穩定生長後，11 月 07 日(day 5)進行 PS 奈米塑膠微粒暴露實驗。隔天 11 月 08 日(day 6)我們隨即發現 NPs 暴露組的根系有非常大量、顯著的奈米塑膠微粒的聚集(圖十二、C 紅色箭頭)，原本暴露當下呈現半透明白色的混濁狀態的水體(圖十二、B)在隔天也變得較透明。我們持續觀察根部每日的生長變化，發現二組小番茄的根系都持續朝向四面八方生長，由 12 月 13 日(day 41)，即 NPs 暴露的第 37 天後的照片發現，對照組與 NPs 暴露組的根系都已延伸拓展到隔株甚至鄰近區域(圖十二、A)。



圖十二、對照組與 NPs 暴露組的小番茄根系發展實況。(A) C2 與 NPs2 小番茄根部生長情況 (day 0 到 day 41)。(B) 剛加入 PS 的奈米塑膠微粒後，NPs2 小番茄根部及附近水域實況。(B) 塑膠微粒暴露隔天(day 6)之 NPs2 小番茄根部及附近水域實況，紅色箭頭為塑膠微粒聚集。本圖片由作者親自拍攝與製作。

(二) 塑膠微粒暴露對小番茄莖部生長的影響

1. 塑膠微粒暴露對小番茄莖部生長重量的影響

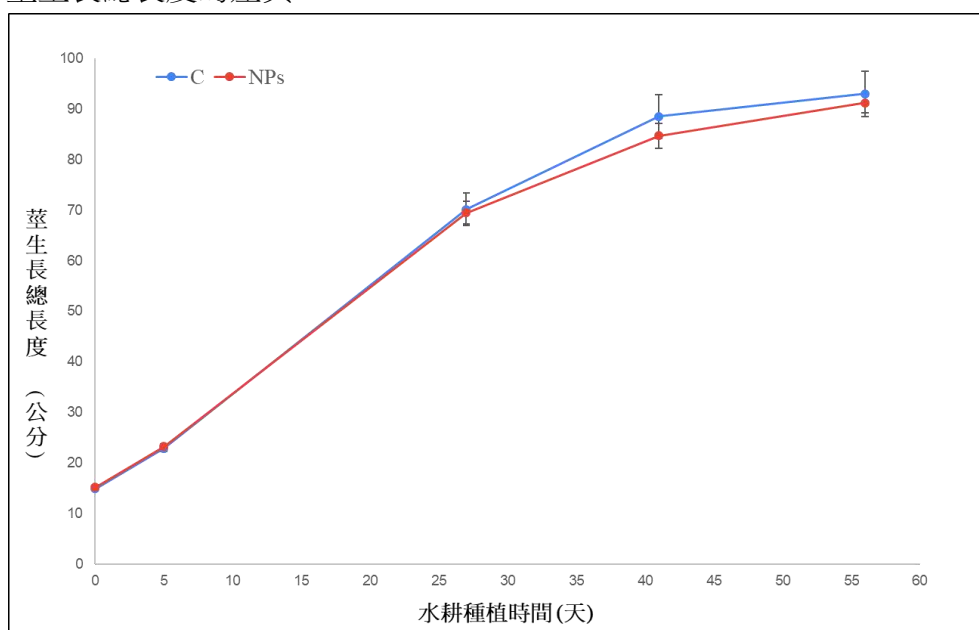
表五、對照組與 NPs 暴露組的小番茄莖部重量之統計分析 $N=20$

	莖鮮重	莖乾重
	$M (SD)$	$M (SD)$
C	33.261 (4.019)	5.729 (0.522)
NPs	31.659 (4.652)	5.221 (0.807)
p	0.393	0.063

12 月 28 日(day 56)，進行莖部鮮重測量，結果如表五。對照組莖的平均鮮重為 $33.261 \pm 4.019\text{g}$ ，而 NPs 暴露組則為 $31.659 \pm 4.652\text{g}$ ，NPs 暴露組的莖鮮重略低於對照組，不過並沒有統計上的顯著差異($p=0.393$)。莖的乾重部分，對照組平均重量為 $5.729 \pm 0.522\text{g}$ ，NPs 暴露組平均重量為 $5.221 \pm 0.807\text{g}$ ，但也沒有顯著差異($p=0.063$)。

2. 塑膠微粒暴露對小番茄莖生長長度的影響

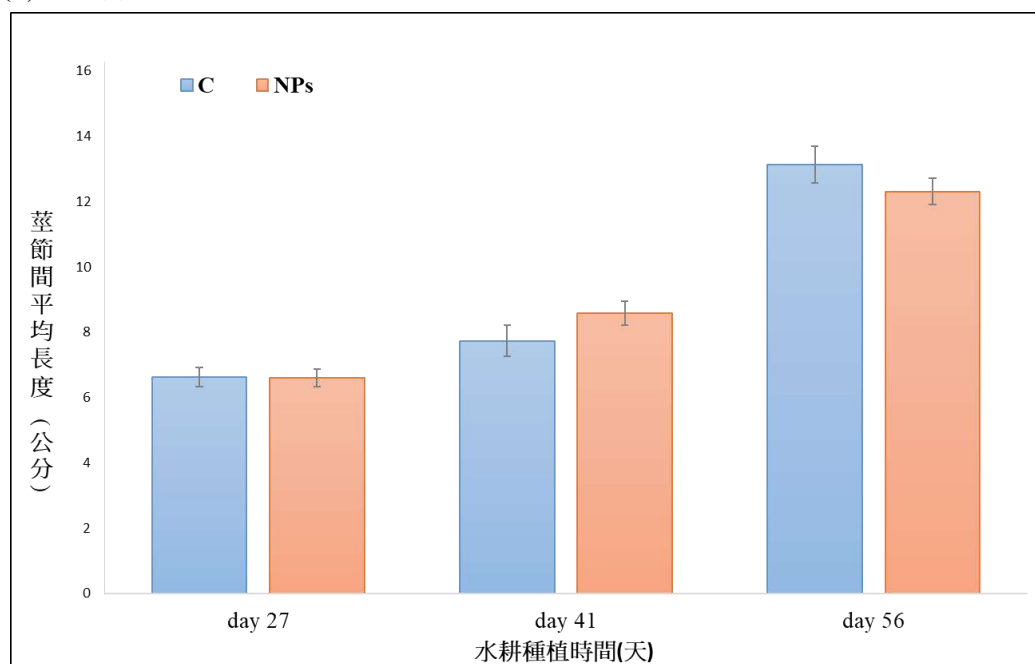
(1) 莖生長總長度的差異



圖十三、小番茄莖生長總長度的變化。本圖由作者親自製作。

定植當天(day 0)與 NPs 暴露當天(day 5)，對照組與 NPs 暴露組的莖平均總長沒有差異，且都持續穩定生長，如圖十三。不過，對照組 day 41 的莖平均總長度為 88.500 ± 13.739 cm，NPs 暴露組則略矮，只有 84.680 ± 7.620 cm，但並無顯著差異($p=0.393$)。在種植 56 天之後，二組差異更加微小($p=0.436$)。

(2) 莖節間長度的差異



圖十四、對照組小番茄與 NPs 暴露組小番茄之莖節間長度的差異。本圖由作者親自製作。

因為我們在 11 月 23 日(day 21)，發現 NPs 暴露組的小番茄遭受蟲害，為了瞭解蟲害是否

影響莖的節間長度，因此在 11 月 29 日(day 27)後，增加莖節間長度的測量，結果如圖十四所示。無論是在 day 27($p=1.000$)、day 41($p=0.063$)或 day 56($p=0.247$)，對照組與 NPs 暴露組的莖節間長度並沒有顯著差異。

(三) 塑膠微粒暴露對小番茄葉子生長的影響

1. 塑膠微粒暴露對小番茄葉子生長重量的影響

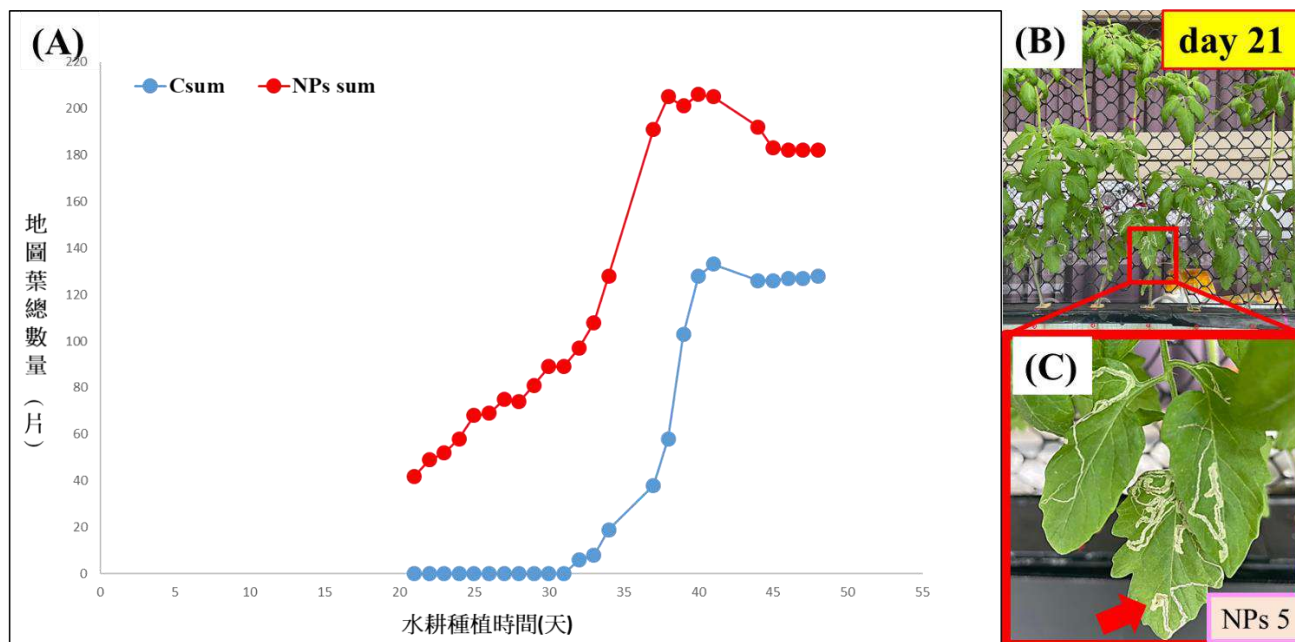
表六、對照組與 NPs 暴露組的小番茄植株葉子生長重量之統計分析 $N=20$

	葉子鮮重	葉子乾重
	$M (SD)$	$M (SD)$
C	13.201 (0.914)	2.324 (0.203)
NPs	12.844 (1.944)	2.153 (0.290)
p	0.853	0.190

12 月 28 日(day 56)，進行葉子的鮮重測量，結果如表六。對照組葉子平均鮮重為 $13.201 \pm 0.914\text{g}$ ，NPs 暴露組的葉子鮮重略輕，平均重量為 $12.844 \pm 1.944\text{g}$ ，但二組無顯著差異($p=0.853$)。乾重部分，對照組葉子平均乾重為 $2.324 \pm 0.203\text{g}$ ，NPs 暴露組之平均乾重則為 $2.153 \pm 0.290\text{g}$ ，也是略輕於對照組，不過兩組仍無顯著差異($p=0.190$)。

2. 塑膠微粒暴露對小番茄葉子遭受蟲害的影響

(1) 葉子受蟲害而產生地圖葉的時間與累計數量的差異



圖十五、對照組小番茄與 NPs 暴露組小番茄的葉子受蟲害而產生地圖葉的差異。

本圖由作者親自製作。

11 月 23 日(day 21)，我們發現 NPs 暴露組多株小番茄的葉子開始出現條條彎曲的白線(圖十五、B、C)，經查詢後推測應該是受到番茄斑潛蠅的危害。斑潛蠅雌成蟲以產卵管刺穿表皮組織，在葉肉中產卵，孵化後幼蟲會潛食葉肉，僅剩上、下表皮，形成肉眼可見之灰白色彎

曲隧道食痕，因為食痕在葉片上看起來很像地圖樣式，我們就將具有食痕的葉子定義為地圖葉。

NPs 暴露組很早就出現地圖葉(day 21)，對照組在 12 月 04 日(day 32)也開始出現地圖葉，但是整整晚了 11 天(圖十五、A)。隨後二組地圖葉都持續增加，顯示斑潛蠅危害愈來愈嚴重，12 月 13 日(day 41)達到地圖葉數量高峰，對照組為 133 片，NPs 暴露組地圖葉的累計總數則高於對照組，為 205 片，後來因為有些地圖葉已經枯黃焦乾而凋落，所以二組地圖葉數量均有減少，而在 day 45(12 月 17 日)、day 46、day 47、day 48 地圖葉數量幾乎沒有變化，因此不再觀察記錄地圖葉。

表七、對照組與 NPs 暴露組小番茄之地圖葉累計數量分析 $N=20$

蟲害感染階段	第一階段(phase1)	第二階段(phase2)	第三階段(phase3)
蟲害感染週次	第一週(W1)	第二週(W2)	第三週(W3、W 4)
紀錄日期起迄	(11/23→11/29)	(11/30→12/06)	(12/09→12/17)
	M (SD)	M (SD)	M (SD)
C	0(0)	1.900(2.558)	12.600(4.766)
NPs	7.500(2.635)	12.180(5.138)	18.300(7.439)
p	<0.001	0.035	0.063

為瞭解二組間地圖葉數量的差異程度，我們區分不同蟲害感染階段來進行分析，由於 day 45、day 46、day 47、day 48 數量相當，因此僅以 12 月 17 日(day 45)數值為代表，而 11 月 23 日(day 21)至 12 月 17 日(day 45) 共計 25 天中扣掉沒有紀錄的 4 天，即 12 月 7 日(day 35)、12 月 8 日(day 36)、12 月 14 日(day 42)、12 月 15 日(day 43)，再將有紀錄的 21 天劃分為三階段進行比較，結果如表七。

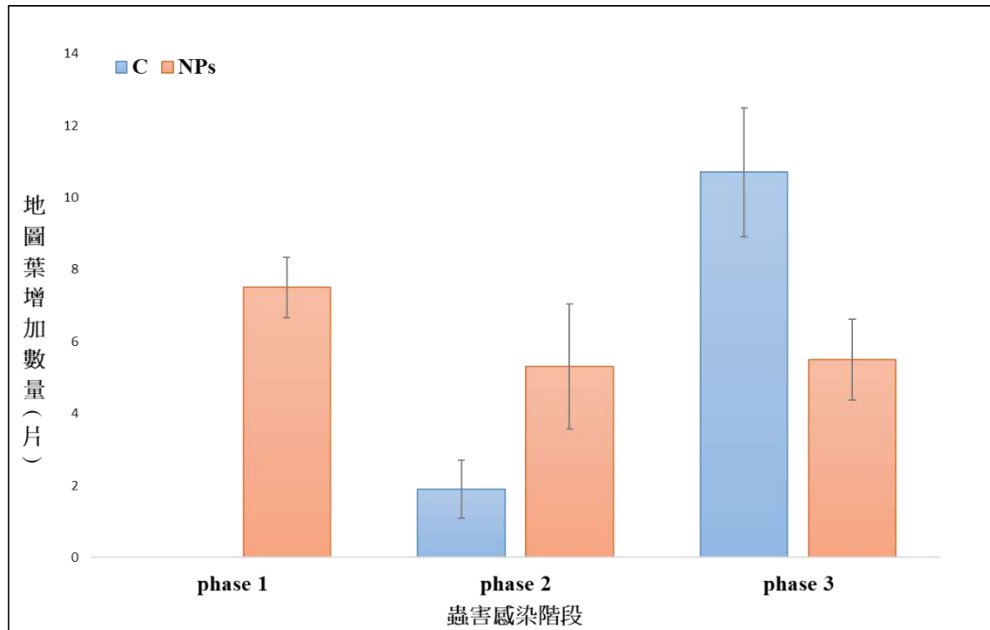
我們分析發現蟲害感染第一階段，NPs 暴露組平均累積的地圖葉有 7.500 ± 2.635 片，而對照組還未出現地圖葉，所以兩者有顯著差異($p < 0.001$)。蟲害感染第二階段，對照組也發現了蟲害感染，累積地圖葉平均為 1.900 ± 2.558 片，NPs 暴露組則有 12.180 ± 5.138 片，數量依然多於對照組，二組間依然有顯著差異($p = 0.035$)。不過，在蟲害感染第三階段，NPs 暴露組平均累積的地圖葉有 18.300 ± 7.439 片，對照組則為 12.600 ± 4.766 片，二組間的差異則不顯著($p = 0.063$)。

(2) 不同蟲害感染階段之地圖葉增加數量的差異

表八、對照組與 NPs 暴露組小番茄之地圖葉增加數量分析 $N=20$

蟲害感染階段	第一階段(phase1)	第二階段(phase2)	第三階段(phase3)
蟲害感染週次	第一週(W1)	第二週(W2)	第三週(W3、W 4)
紀錄日期起迄	(11/23→11/29)	(11/30→12/06)	(12/09→12/17)
	M (SD)	M (SD)	M (SD)
C	0(0)	1.900(2.558)	10.700(5.658)
NPs	7.500(2.635)	5.300(5.498)	5.500(3.567)
p	<0.001	0.089	0.035

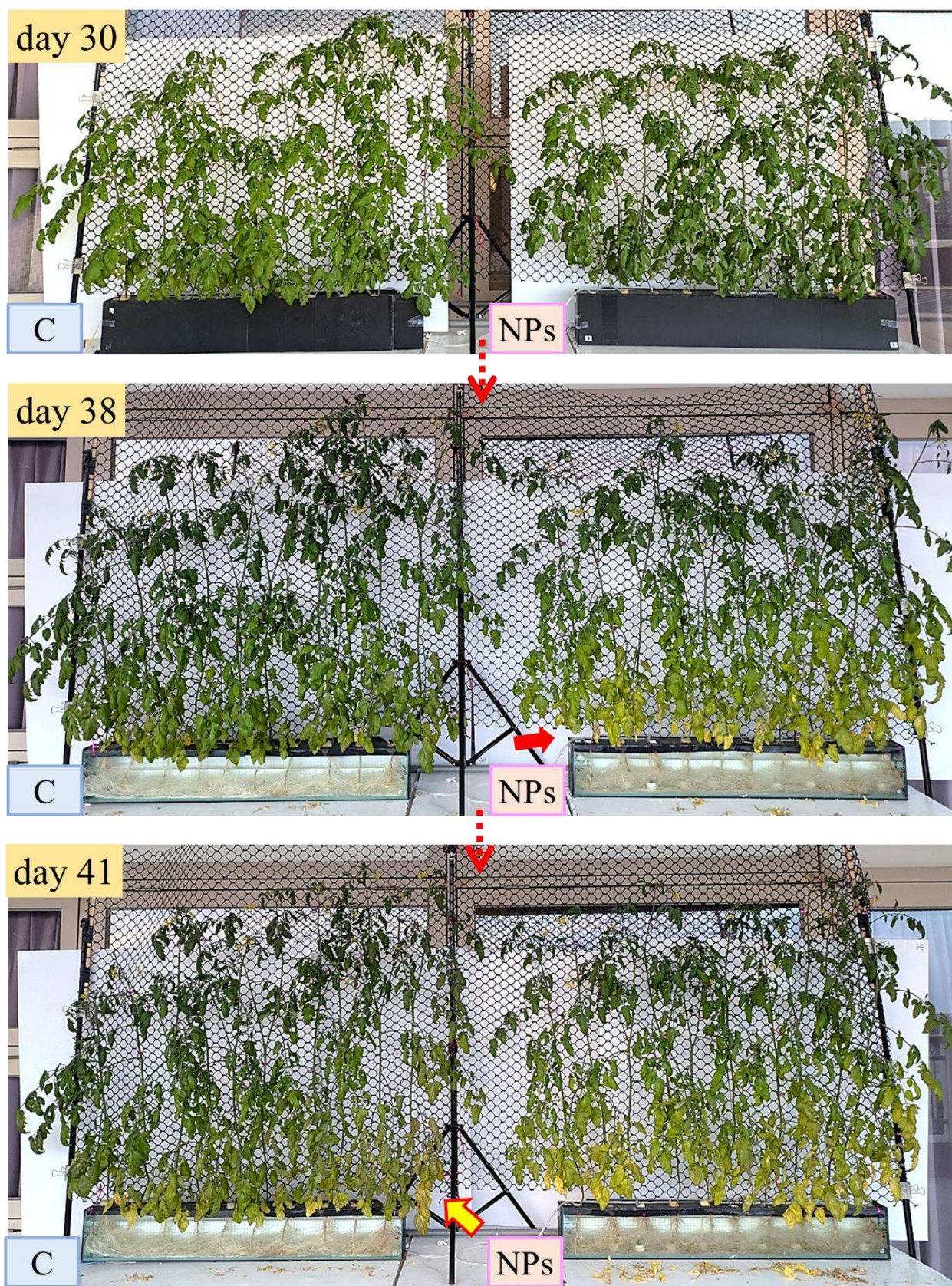
蟲害感染第一階段，對照組還未出現地圖葉，NPs 暴露組平均有 7.500 ± 2.635 (片) 地圖葉，因此地圖葉增加的數量有顯著差異 ($p < 0.001$)。蟲害感染第二階段，對照組的地圖葉平均增加 1.900 ± 2.558 片，NPs 暴露組則平均增加 5.300 ± 5.498 片，雖然 NPs 暴露組增加的平均數量仍多於對照組，不過兩組間未達顯著差異 ($p = 0.089$)。而在蟲害感染第三階段，對照組地圖葉平均增加數量很多，為 10.700 ± 5.658 (片)，反觀 NPs 暴露組的平均增加數量與第二階段差不多，為 5.500 ± 3.567 片，約只有對照組的一半，兩組增加數量有顯著差異 ($p = 0.035$)，結果如表八、圖十六。



圖十六、不同蟲害感染階段之地圖葉增加數量的差異。本圖由作者親自製作。

3. 塑膠微粒暴露對小番茄葉子枯黃凋謝的影響

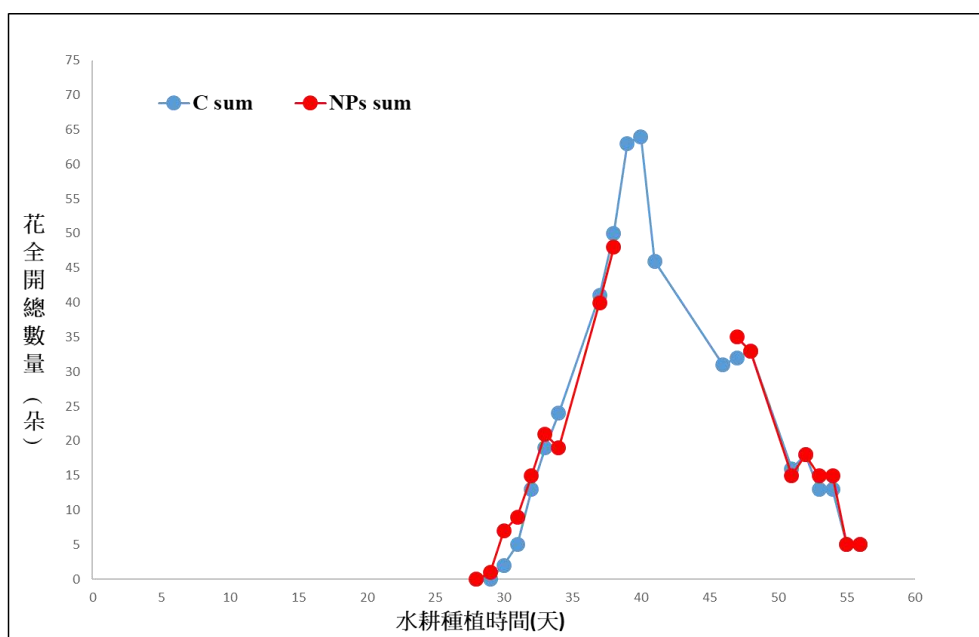
小番茄種植後的 30 天(day 30)，我們開始發現 NPs 暴露組基部有一些葉子開始變黃，如圖十七。隨著時間的推移，NPs 暴露組枯黃的葉子越來越多，凋落在桌面的葉子數量逐漸增加。在種植的第 38 天(day 38)，相較於對照組，NPs 暴露組每株小番茄下半部分的葉子已明顯變黃(紅色箭頭)。對照組的葉子則在第 41 天(day 41)有較明顯的枯黃情況，且以最靠近 NPs 暴露組的番茄植株 C10 最明顯(黃色箭頭)。



圖十七、對照組與 NPs 暴露組小番茄葉子枯黃凋謝的時間差異與實況。
本圖由作者親自拍攝與製作。

(四) 塑膠微粒暴露對小番茄開花及結果的影響

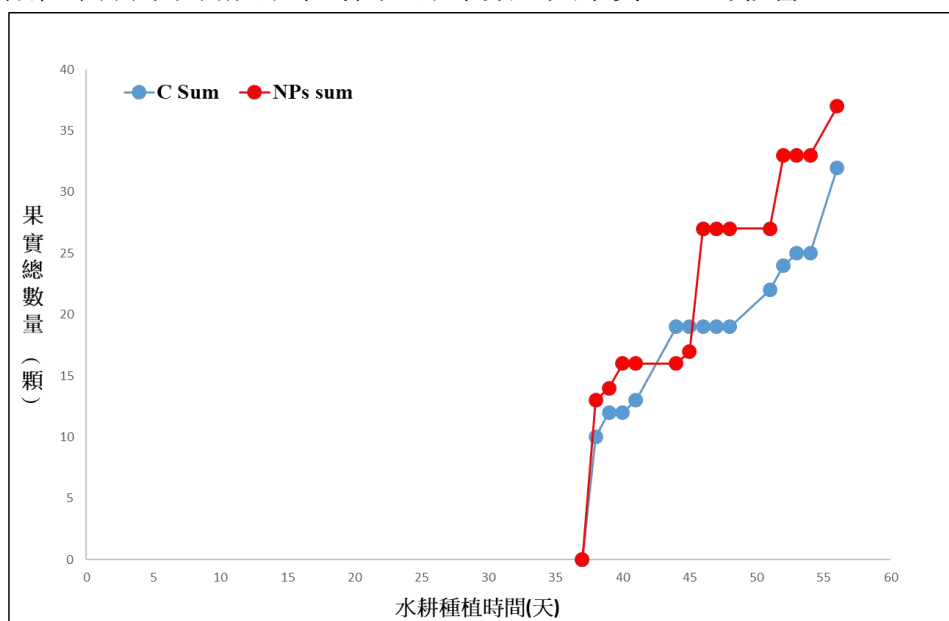
1. 塑膠微粒暴露對小番茄開花時間與開花數量的影響



圖十八、對照組與 NPs 暴露組小番茄開花時間與開花數量的差異。本圖由作者親自製作。

為減少誤差，我們只分析小番茄之花全開的數量。在開花時間部分，NPs 暴露組只比對照組提早一天開花。花全開總數部分，因為 NPs 暴露組在 day 39 到 day 45 期間只記錄到總花苞數，而沒有進一步記錄開花狀態，因此缺乏這段期間的數據，不過整體來看，二組的分布趨勢很相近，顯示對照組和 NPs 暴露組的花全開總數沒有明顯差異，如圖十八。

2. 塑膠微粒暴露對小番茄結果時間、結果數量與果實重量的影響

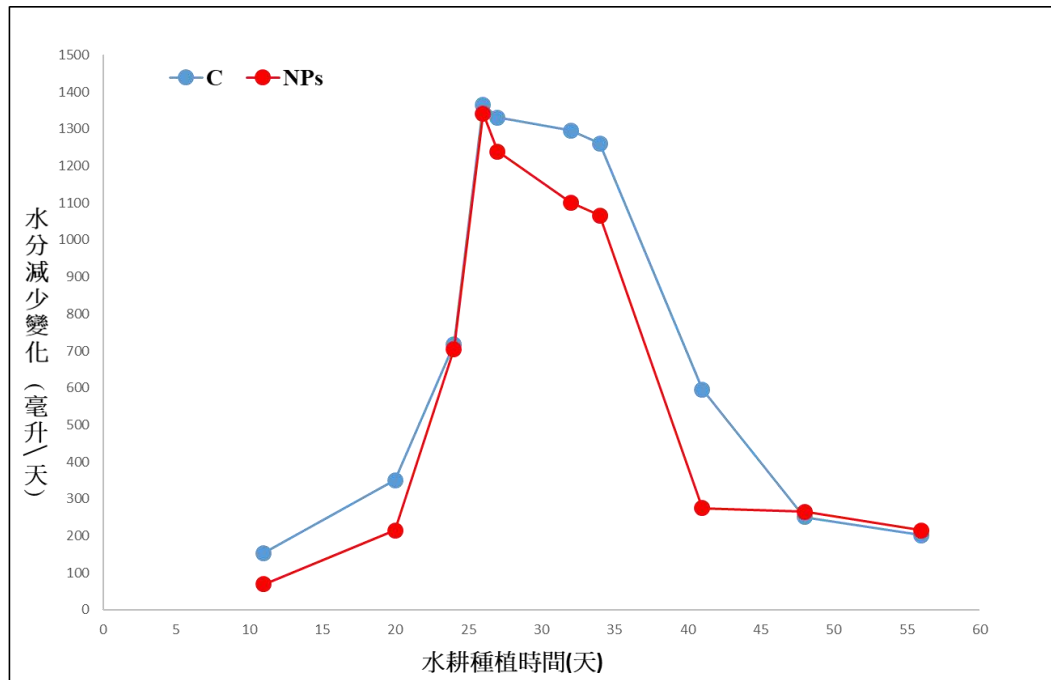


圖十九、對照組小番茄與 NPs 暴露組小番茄結果時間與結果數量的差異。
本圖由作者親自製作。

我們定義果實的標準是子房直徑 $\geq 0.5\text{cm}$ ，對照組與 NPs 暴露組產生果實的時間均為同一天(day 38)，且一開始結果的數量差不多，但 NPs 暴露組最後產生較多的果實，主要是在種植第 46 天後，NPs 暴露組的果實數量明顯增加，如圖十九。另外，12 月 28 日(day 56)，我們也進行果實的鮮重測量，對照組平均果實重量約為 $10.735 \pm 5.472\text{g}$ ，NPs 暴露組果實平均重量約為 $15.667 \pm 4.732\text{g}$ ，雖然 NPs 暴露組的果實鮮量較重，但未達顯著差異($p = 0.052$)。

二、塑膠微粒暴露對水耕種植環境的影響

(一) 水耕種植缸之水量變化的差異

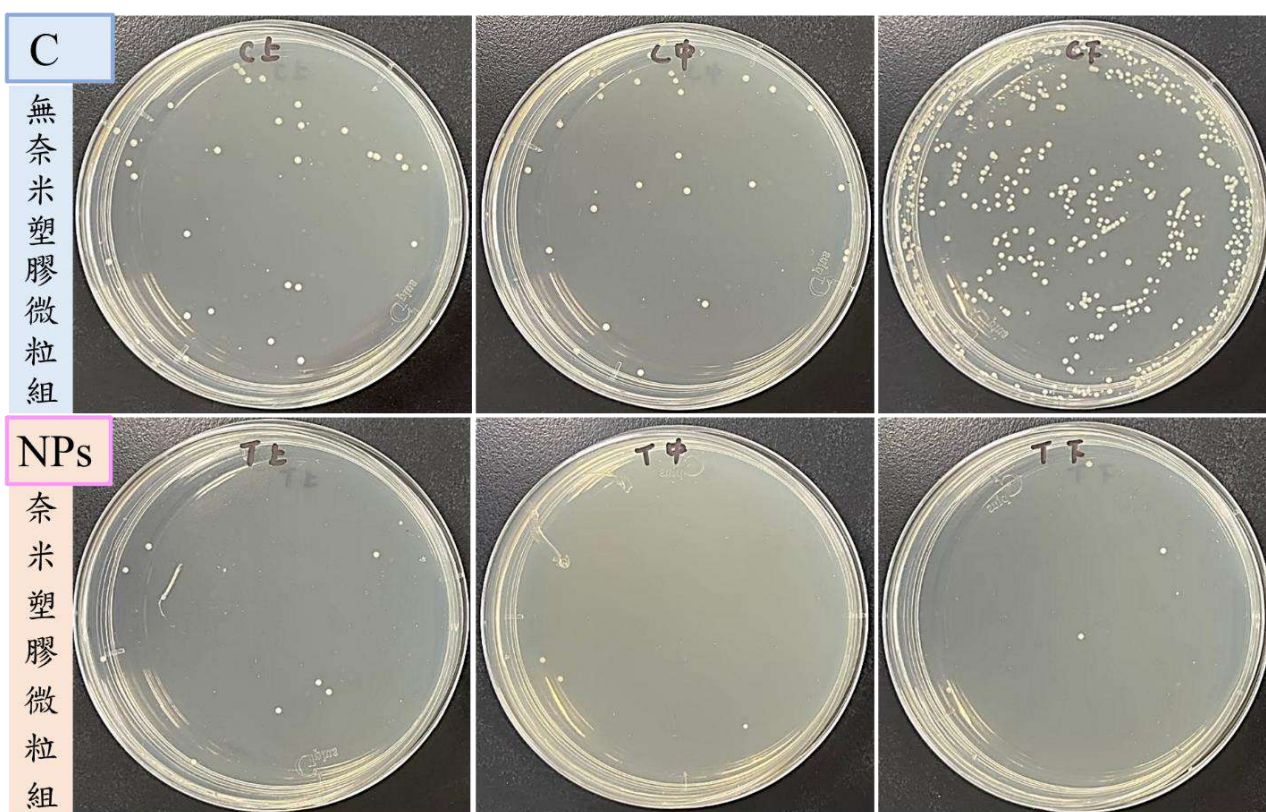


圖二十、對照組與 NPs 暴露組水耕種植缸之水量減少的差異。本圖由作者親自製作。

整體而言，對照組與 NPs 暴露組的水位減少趨勢相近，種植初期和後期的水位減少都不明顯，中期(day 24 到 day 34)則可能因葉子數量較多，導致蒸散旺盛而水位下降的較顯著。不過，對照組的水位減少較多，NPs 暴露組水位減少則較少，如圖二十。

(二) 小番茄根圈之微生物群落的差異

1. 水耕種植缸之水樣本菌群培養



圖二十一、水耕種植缸之水樣本菌群培養。本圖由作者親自拍攝與製作。

我們分別在水缸的第五與第六植株中間區域，收集上、中、下 3 處的水樣本，並進行菌群培養，如圖二十一。我們發現對照組 LB 培養基上的菌落數都多於 NPs 暴露組，而在對照組的 LB 培養基當中，靠近根系部位(C 下)的菌落數量是最多的。

2. 優勢菌種鑑定

我們自培養出菌落的 LB 培養基中，選殖最優勢菌種(數量最多)之單一菌落，繼代培養後委託生技公司進行菌種鑑定。以 NCBI 資料庫 16S ribosomal RNA sequences(Bacterial and Archaea)進行序列比對結果如圖二十二。細菌鑑定結果為 *Achromobacter xylosoxidans* (木糖氧化無色桿菌)。

	Description	Scientific Name	Max Score	Total Score	Query Cover	E value	Per. Ident	Acc. Len	Accession
<input checked="" type="checkbox"/>	Achromobacter xylosoxidans strain NBRC 15126 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter xylosoxidans	2562	2562	100%	0.0	99.93%	1456	NR_113733.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter xylosoxidans strain LMG 1863 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter xylosoxidans	2412	2412	94%	0.0	99.92%	1309	NR_118403.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter insuavis strain LMG 26845 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter insuavis	2551	2551	100%	0.0	99.78%	1483	NR_117706.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter pulmonis strain R-16442 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter pulmonis	2545	2545	100%	0.0	99.71%	1489	NR_117644.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter xylosoxidans strain Hugh 2838 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter xylosoxidans	2545	2545	100%	0.0	99.71%	1495	NR_044925.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter denitrificans strain CCUG 407 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter denitrificans	2390	2390	94%	0.0	99.62%	1309	NR_118398.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter insolitus strain LMG 6003 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter insolitus	2538	2538	100%	0.0	99.57%	1473	NR_025685.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter anxiifer strain LMG 26857 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter anxiifer	2532	2532	100%	0.0	99.50%	1483	NR_117708.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter insolitus strain CCUG 47057 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter insolitus	2385	2385	94%	0.0	99.47%	1309	NR_118399.1
<input type="checkbox"/>	Achromobacter veterisilvae strain LMG 30378 16S ribosomal RNA, partial sequence	Achromobacter veterisilvae	2529	2529	100%	0.0	99.42%	1483	NR_179653.1

圖二十二、NCBI 資料庫 16S ribosomal RNA sequences(Bacterial and Archaea)序列比對結果。

本圖摘錄自生技公司菌種鑑定報告。

陸、討論

根據我們的研究結果，NPs 的暴露對小番茄的生長可能造成了一些影響，植株的乾鮮重，根、莖、葉的乾鮮重，以及莖的長度等，NPs 暴露組的平均值都略低於對照組，然而，除了根鮮重的差異達顯著外，其他生長參數都沒有顯著差異，與我們的預期不符。因此我們參考相關研究-PVC 塑膠微粒(Changmai et al., 2024)以及 HDPE 奈米塑膠微粒對番茄植株的影響(Hao et al., 2025)，來嘗試解釋這些結果。

Changmai 等人以粒徑 1-150 微米的聚氯乙烯(PVC)塑膠微粒，搭配四種不同濃度(2.5%、5%、7.5%、10% w/w)以土耕方式進行番茄暴露實驗，研究顯示小番茄的整株長度、植物乾鮮重、莖的直徑和葉子的面積都有顯著的減少，此外，PVC 塑膠微粒的暴露也會使光合色素葉綠素和類胡蘿蔔素顯著減少，這就是導致小番茄生長受到抑制的因素之一。不過 PVC 的生物毒性本身就很大，而我們所使用的 PS 奈米塑膠微粒則毒性相對較小，再加上我們研究中 PS 奈米塑膠微粒的暴露濃度僅 40mg/L，都可能是我們研究結果不顯著的原因。

然而值得注意的是，在我們的研究結果中，對照組和 NPs 暴露組的乾重沒有顯著差異，但 NPs 暴露組的鮮重卻是顯著低於對照組，表示二組根部生長量差不多，但 NPs 暴露組的根部含水量有顯著下降，而 PVC 塑膠微粒四種濃度的暴露研究中，根部含水百分比都和對照組相當，我們推測可能與塑膠微粒的粒徑大小有關。研究指出若塑膠微粒的直徑為 200~4,800 奈米(0.2~4.8 微米)，塑膠微粒就可以藉由損傷或變形的根部細胞進入根部組織，或是藉由根表皮細胞的內吞作用而進入植物體(Liang et al., 2023)。PVC 塑膠微粒的大小介於 1~150 微米，因此僅少部分微粒能進入根部細胞，而其根部的顯微鏡分析也證實，根部細胞僅吸收了小於 10 微米的 PVC 塑膠微粒(Changmai et al., 2024)。Hao 等人則在土壤中加入平均粒徑約 0.14 微米的 HDPE 奈米塑膠微粒，分別以 0.5、2.8、6.5mg/kg 等不同濃度進行番茄暴露實驗，其研究結果顯示 HDPE 奈米塑膠微粒會降低植株早期結果期(day 43)的水分利用效率(Hao et al., 2025)。我們使用的 PS 奈米塑膠微粒大小為 0.05~0.1 微米，粒徑比上述研究更小，因此更容易進入根部細胞而大量聚積在根部組織內，進而導致根的含水量下降。此外，我們透過水耕栽培確實觀察到大量 PS 奈米塑膠微粒會累積在根部表面，可能影響水分的吸收與利用，推測這是 NPs 暴露組的水位下降變化較小的原因之一。

小番茄葉片狀態也明顯受 PS 奈米塑膠微粒暴露的影響，NPs 暴露組受斑潛蠅感染時間比對照組早 11 天，推測 NPs 暴露可能影響小番茄的抗蟲害能力，例如葉片更容易被斑潛蠅雌蟲產卵管戳刺，或者 NPs 暴露影響小番茄的氣味而吸引斑潛蠅雌蟲產卵，因為食草昆蟲會透過植物特有的揮發物質來定位其宿主植物(Radžiūtė & Būda 2023)，因此蟲害發生第一周斑潛蠅的感染都集中在 NPs 暴露組的小番茄，蟲害第二周後期的地圖葉數量因對照組小番茄感染數累積而無顯著差異，斑潛蠅感染的轉移可能與雌蠅偏好將卵產在已成熟的葉片有關(錢景秦，1997)，也正因為 NPs 暴露組成熟葉幾乎都被感染，因此在蟲害感染第三階段，對照組的地圖葉數量顯著高於 NPs 暴露組。

除了提早遭受到斑潛蠅的蟲害外，NPs 暴露組的葉片也明顯較早枯黃，一部分原因可能是遭受斑潛蠅蟲害所導致，學者發現植株受害後，葉片會自植株下方往上方黃化枯萎(錢景秦，1997)，這與我們觀察到的現象一致。此外，葉片老化也可能與植物激素-乙烯有關。而 NPs 暴露組葉片較早枯黃也可能影響植株蒸散作用，而為 NPs 暴露組水缸之水位下降變化較小的另一個原因。

另外我們也發現 NPs 暴露會影響小番茄根系之微生物群落。最新的研究也顯示 PS 奈米塑膠微粒會破壞促植物生長細菌(Plant Growth-Promoting Bacteria, PGPB)-枯草芽孢桿菌(*Bacillus subtilis*)和小番茄之間的正向交互作用，因為 PS 奈米塑膠會在細菌表面形成穩定的塗層，導致細菌對植物根部的附著受到嚴重抑制(Perez et al., 2025)。這也能合理解釋在我們 NPs 暴露組植株的根系附近微生物群落較少的現象，而優勢菌落鑑定的結果為木糖氧化無色桿菌(*Achromobacter xylosoxidans*)，亦為一種促植物生長細菌(PGPB)。木糖氧化無色桿菌可以協助乙烯前驅物-氨基環丙烷羧酸(1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)進行脫胺(deaminase)作用來減少植物體內乙烯的合成(林冠穎、李俊佑，2022)。NPs 暴露組因為根系附近的木糖氧化無色桿菌(*Achromobacter xylosoxidans*)較對照組少，乙烯合成相對較多，進而造成 NPs 暴露組番茄植株的葉片提早枯黃衰老。

雖然目前尚不知木糖氧化無色桿菌(*Achromobacter xylosoxidans*)對植物抗病害能力的影響，不過或許我們小番茄根系尚有其他能提高抗病害能力的促植物生長細菌(PGPB)，如鏈黴菌屬(*Streptomyces*)、液化澱粉芽孢桿菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)等(林如玲，2023)，或許也可以為 NPs 暴露組番茄提早遭受蟲害提供部分解釋。近期一篇研究也證實 PS 奈米塑膠微粒會破壞番茄根際土壤細菌群落的結構，抑制番茄對病害的抵抗性，而使疾病發生率提升 2.19 倍(Cao et al., 2025)，這也為 NPs 暴露可能影響小番茄的抗蟲害能力而提早遭受斑潛蠅傷害的推測提供一個支持。

在開花的部分，雖然我們有擬訂不同開花程度的判斷標準，不過並沒有針對各花苞進行編號，不同開花程度的數據會有重複，因此僅以花全開的數量來進行比較，不過二組開花數差異不大。果實部分的計算雖也有統一的判別標準，不過也缺乏標記，無法追蹤果實的成長變化，只能初步計算每日觀察到的果實數量，實驗結束當天(day 56)測量其重量，我們的研究結果雖然顯示 NPs 暴露組的果實的平均鮮量較重，不過二組未達顯著差異。因為我們的研究僅 56 天，並沒有涵蓋小番茄完整的產季，因此果實產量與重量的研究結果尚不完整，可能無法真實反映塑膠微粒對小番茄的影響。Hao 等人維持五個月的田野試驗中，定義成熟果實為整顆番茄都變成紅色且立即採收秤重，番茄果實的採收在種植後 85 天完成，植株已經不再結果。其研究顯示 HDPE 奈米塑膠微粒暴露會降低果實數量，不過也發現果實總重量以及單顆果實平均重量比對照組高，但是小番茄整體果實總產量未達顯著差異(Hao et al., 2025)，與我們初步研究結果相似。

柒、結論與未來展望

本研究證實 PS 奈米塑膠微粒的暴露會對小番茄造成影響，包含降低小番茄根部含水量、使小番茄更易遭斑潛蠅感染、植株葉子提早黃化枯萎、減少小番茄根系中促植物生長細菌-木糖氧化無色桿菌(*Achromobacter xylosoxidans*)的菌數，而大量的 NPs 累積於根部表面可能影響小番茄對水分及礦物質的吸收等。根據本研究結果，建議黑色塑膠地膜等農業廢棄物避免採用碾碎埋進土中的處理方式，應該要將塑膠地膜回收，以減少土壤中塑膠微粒的污染，也可能可以減少農作物的蟲害，降低農藥的使用。此外，土壤中的塑膠微粒會影響植物根系的微生物，雖然在種植期間可以額外添加促植物生長細菌，但若能減少土壤中塑膠微粒的污染，也有助於維持這些促植物生長細菌的數量，以確保其功效。再者，植物根部表面所吸附的塑膠微粒較少，也有助於水分和礦物質的吸收。

未來可使用含螢光標定的 PS 奈米塑膠微粒來瞭解這些微粒在小番茄體內的分布情況，尤其是 NPs 在根部的累積，追蹤根部 NPs 將有助於瞭解其根部的水分利用與組織含水量的變化。此外，也可以嘗試測量光合色素的含量變化來探討 NPs 對小番茄光合作用效益與生長的關係。開花與果實部分則延長研究期程以涵蓋完整的產季，再搭配編號標記追蹤開花情形與果實發育程度，探討 NPs 暴露對開花與果實產量的影響。最後可以在家人的番茄園中嘗試田野實驗，搭配暴露不同種類或不同濃度的塑膠微粒，來探討塑膠微粒對小番茄生長的影響。

捌、參考文獻

- 方儉（2023 年 6 月 10 日）。《努力小農》注意塑膠微粒對農業的危害 已經潛伏多年的土壤生態殺手。信傳媒。<https://www.cmmedia.com.tw/home/articles/40511>
- 朱柏青（2020）。認識生活中一絲半「塑」的汙染—塑膠微粒。174，8-10。
- 林如玲（2023）。淺談植物有益微生物在種子處理之應用。種苗科技專訊，22，2-5。
- 林冠穎、李俊佑（2022）。大自然的肥料—植物促生微生物的育苗應用。林業研究專訊，29(3)，32-35。
- 曹可芝 編譯（2025 年 2 月 11 日）。屍檢結果揭人腦微塑膠 8 年增 50% 研究：相當於一整支湯匙。環境資訊中心。<https://e-info.org.tw/node/240715>
- 國中自然科學一下（2024）。5-2 生物多樣性面臨的危機。臺北市：翰林文教
- 陳正次（2013）。番茄品種特性簡介。小果番茄產銷技術與經驗分享研討會專輯。農業部台南區農改場。
- 陳亭瑋（2024）。科學家首次揭露人體內的塑膠微粒與心血管疾病有關。科學月刊，508。
- 聯合國環境署（2021）。从污染到解决方案：全球海洋垃圾和塑料污染评估。
<https://www.unep.org/zhans/resources/congwurandaojiejuefanganganquanqiuhaityanglajihesuliaowuranpinggu>
- 錢景秦（1997）。台灣地區斑潛蠅之發生與防治概況。農業部農業試驗所。
- Grand View Research（2023）。聚苯乙烯 (PS) 市場規模、佔有率和趨勢分析報告：按樹脂類型、形狀類型、最終用途、地區和細分市場分類的趨勢，2023-2030 年。
<https://www.gii.tw/report/grvi1376120-polystyrene-market-size-share-trends-analysis.html>
- Cao, X., Wang, C., Luo, X., Yue, L., White, J. C., Wang, Z., & Xing, B. (2024). Nano-and microplastics increase the occurrence of bacterial wilt in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *ACS nano*, **18**(27), 18071-18084.
- Changmai, U., Sahana, S. K., Kumar, N., Borah, B., Chikkaputtaiah, C., Saikia, R., & Phukan, T. (2024). Impact of polyvinyl chloride (PVC) microplastic on growth, photosynthesis and nutrient uptake of *Solanum lycopersicum* L.(Tomato). *Environmental Pollution*, **349**, 123994.
- da Costa Araujo, A. P., & Malafaia, G. (2021). Microplastic ingestion induces behavioral disorders in mice: A preliminary study on the trophic transfer effects via tadpoles and fish. *Journal of Hazardous Materials*, **401**, 123263.
- Hao, J., Prasher, S. O., Mawof, A., Tovar, I., & George, S. (2025). Presence of high-density polyethylene nanoplastics (HDPE-NPs) in soil can influence the growth parameters of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) at various stages of development. *Sustainability*, **17**(5), 2071.
- Liang, Y., Cao, X., Mo, A., Jiang, J., Zhang, Y., Gao, W., & He, D. (2023). Micro (nano) plastics in plant-derived food: Source, contamination pathways and human exposure risks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **165**, 117138.
- Monikh, F. A., Holm, S., Kortet, R., Bandekar, M., Kekäläinen, J., Koistinen, A., ... & Kukkonen, J. V. (2022). Quantifying the trophic transfer of sub-micron plastics in an assembled food chain. *Nano Today*, **46**, 101611.

- Perez, F., Andoy, N. M. O., Hua, U. T. T., Yoshioka, K., & Sullan, R. M. A. (2025). Adaptive responses of *Bacillus subtilis* underlie differential nanoplastic toxicity with implications for root colonization. *Environmental Science: Nano*, **12**: 1477-1486.
- Radžiutė, S., & Būda, V. (2013). Host feeding experience affects host plant odour preference of the polyphagous leafminer *Liriomyza bryoniae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **146**(2): 286-292.
- Schwabl P, Köppel S, Königshofer P, Bucsics T, Trauner M, Reiberger T, et al. Detection of Various Microplastics in Human Stool. *Annals of Internal Medicine*, **171**: 453-457.
- Xu, Z., Zhang, Y., Lin, L., Wang, L., Sun, W., Liu, C., ... & Wang, Y. (2022). Toxic effects of microplastics in plants depend more by their surface functional groups than just accumulation contents. *Science of the Total Environment*, **833**, 155097.
- United Nations Environment Programme (2021). From pollution to solution: a global assessment of marine litter and plastic pollution. Available at: <http://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-andplastic-pollution>.

【評語】 030318

1. 此研究以聚苯乙烯奈米塑膠微粒(PS-NPs)為例，利用水耕方式系統探討其暴露對小番茄根部、莖、葉生長、抗蟲性及微生物群落的影響。
2. 本研究顯示 NPs 暴露雖未明顯影響植株乾重與開花結果，但顯著降低根部含水量，可能增加蟲害易感性，使葉片提早枯黃，並減少根系中木糖氧化無色桿菌數量，顯示塑膠微粒或許對植物健康與生態鏈具有潛在風險。
3. 奈米塑膠微粒向來為重要的環境議題，也有許多文章與報導指出其對於環境具有很大的威脅性。
4. 本實驗暴露用的塑膠微粒是聚苯乙烯奈米塑膠微粒(PS - NPs)，應可以多說明為什麼選擇本研究中所使用的這顆粒大小以及最終濃度。對於 NPs 在實驗後的處理方式需要多說明。此些研究也可多重複幾次以獲得結果的再現性。
5. 對於NPs處理組別對於小番茄的免疫或是對於病蟲害的的影響，建議需要多方討論得以獲得較為合理且全面的解釋。能以不同病原菌感染實驗組與對照組同時比較可添加研究深度。黃葉的呈現似乎是一個可以被評估的指標，未來將此列為分析項之一。

6. 可以探討有無 NPs 對於所結出來的果實在數量、質量上的影響。小番茄應為土耕，此研究是用水耕方式進行，建議應可使用水耕植栽來進行測試。
7. 可以多閱讀參考文獻，了解現今 NPs 對於植物的多層面影響，再回饋於此實驗中所觀測的結果。

作品海報



“番”

天覆地~

難逃

“塑”

命？

塑膠微粒暴露對番茄生長的影响

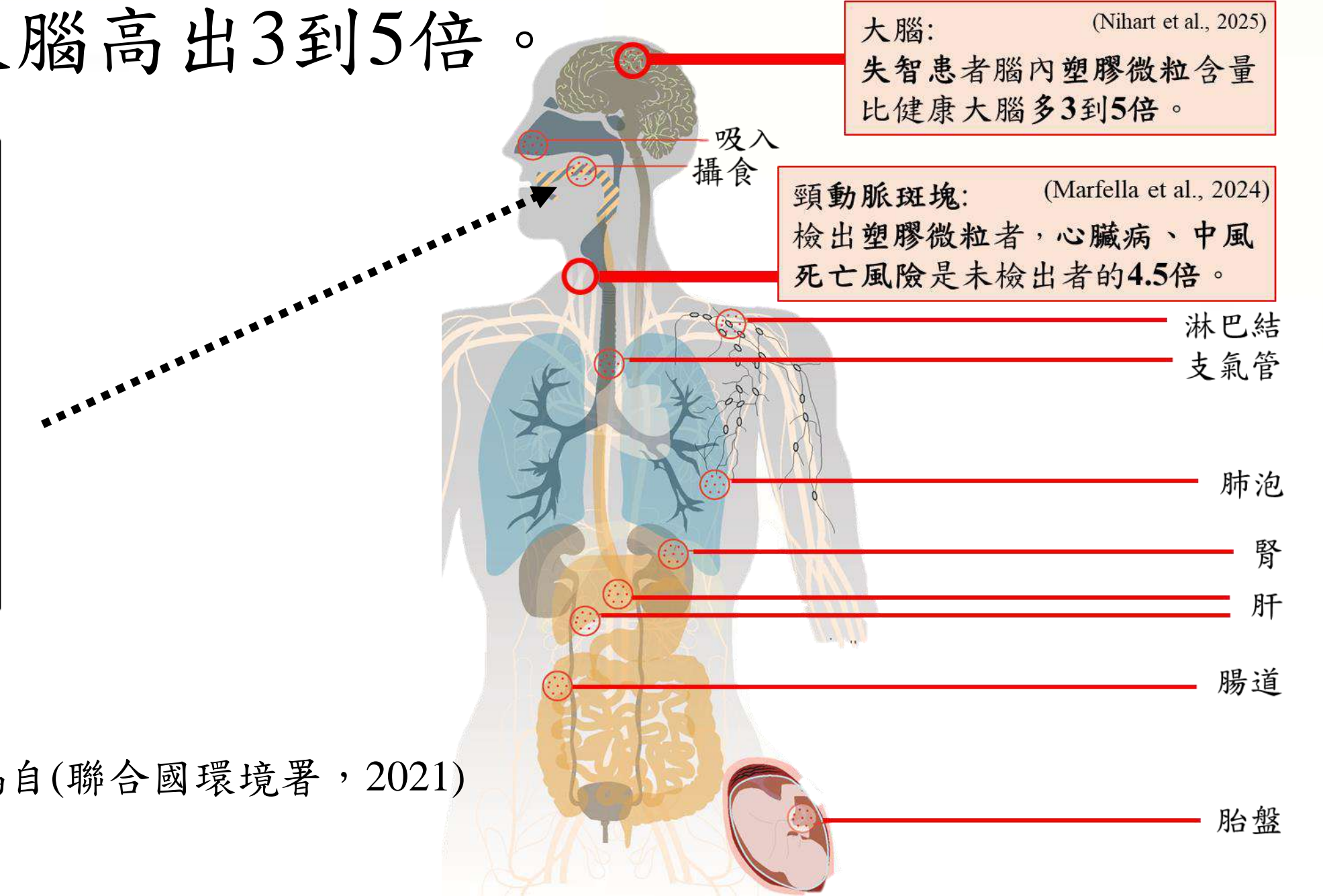
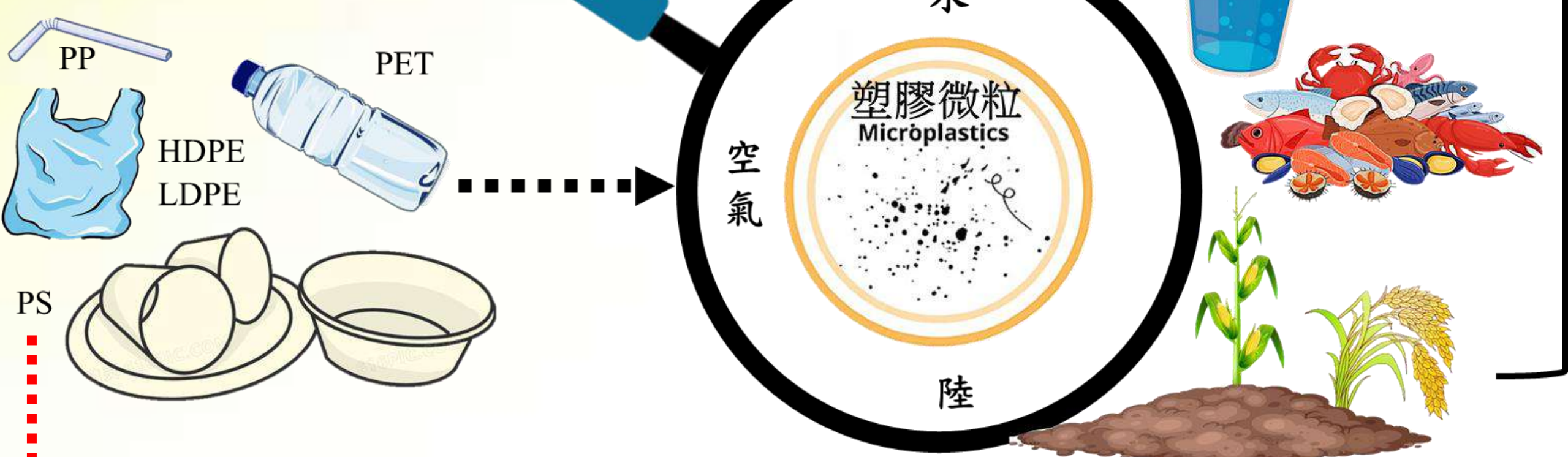


壹、研究動機與背景

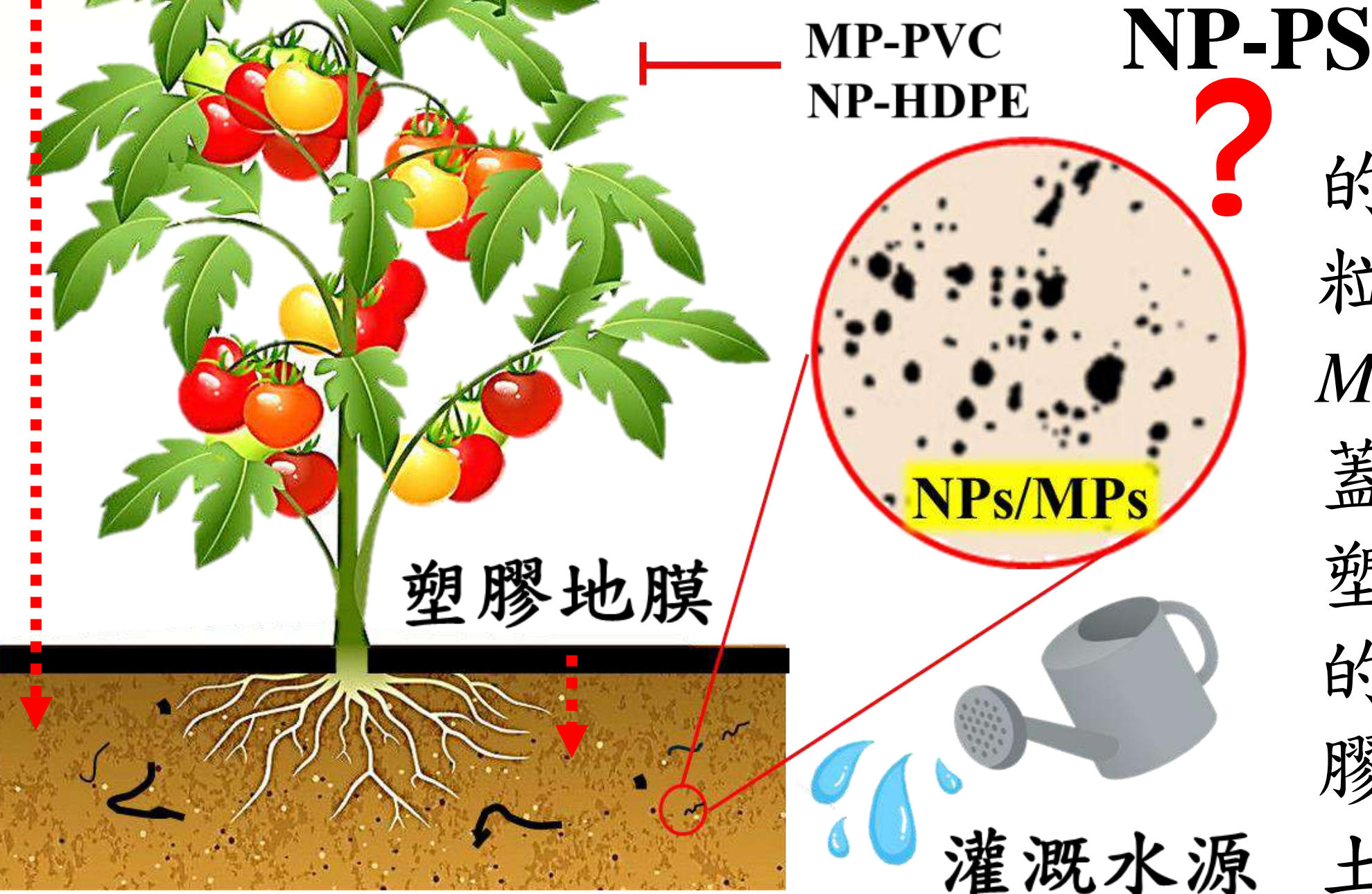
塑膠(plastics)廣泛應用於生活中，但也衍生許多環境問題，而塑膠歷經各種應力作用後所產生數量龐大之塑膠微粒(microplastics, MPs)，是近年大家極為關注的議題。塑膠微粒是指粒徑尺寸小於5毫米(mm)的塑膠碎片和粒子，而尺寸小於0.1微米(100 nm)，則稱為奈米塑膠微粒(nanoplastics, NPs)。

塑膠微粒已存在陸、海、空環境中(聯合國環境署，2021)並能透過食物鏈傳遞，研究指出昆蟲吃了種植在含塑膠微粒之土壤的萵苣，昆蟲體內也檢出塑膠微粒，且這些塑膠微粒也會透過魚攝食昆蟲而轉移至下一個消費者(Monikh et al., 2022)。攝食也是塑膠微粒進入人體的主要方式，且只要粒徑夠小，塑膠微粒就有可能進入循環系統而累積在體內其他器官。近年研究指出受試者體內檢出塑膠微粒之罹患心臟病、中風或死亡的風險是未檢出者的4.5倍(Marfella et al., 2024)。今年一篇屍檢報告(Nihart et al., 2025)，發現12個失智症患者的大腦檢體中，塑膠微粒含量比健康大腦高出3到5倍。

塑膠製品



圖一、環境塑膠微粒來源與健康風險。改編自(聯合國環境署，2021)



圖二、土壤塑膠微粒來源及其對番茄的影響。

既然透過食物鏈傳遞是導致體內塑膠微粒累積的主因，作為食物鏈起點的生產者，是探討塑膠微粒健康風險的著眼點。小番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)為家鄉重要作物，小番茄種植期間，土壤上會蓋著塑膠地膜(plastic mulch)，小番茄收成之後，部分塑膠地膜會直接碾碎埋進土裡，可能會成為土壤中的塑膠微粒，此外，灌溉水中的塑膠微粒，以及塑膠廢棄物的污染也是土壤塑膠微粒的來源。然而，土壤中的塑膠微粒對小番茄有何影響?研究顯示土壤中的PVC塑膠微粒會影響小番茄生長，如植株高度、葉面積、莖直徑、植株乾鮮重下降以及根的長度增加等(Changmai et al., 2024)。而土壤中的HDPE奈米塑膠微粒則會導致幼苗發育不良、降低植株早期結果期的水分利用率(Hao et al., 2025)。不過這些研究並沒有提到PS塑膠微粒對番茄的影響，此外，根是暴露塑膠微粒的重要器官，因此，我們嘗試藉由水耕法種植小番茄，以利實驗變因控制，方便直接觀察塑膠微粒在植物根部的分布情況，瞭解塑膠微粒暴露對小番茄的影響。

貳、研究目的

本研究主要探討奈米塑膠微粒的暴露對小番茄生長的影響。待答問題如下：

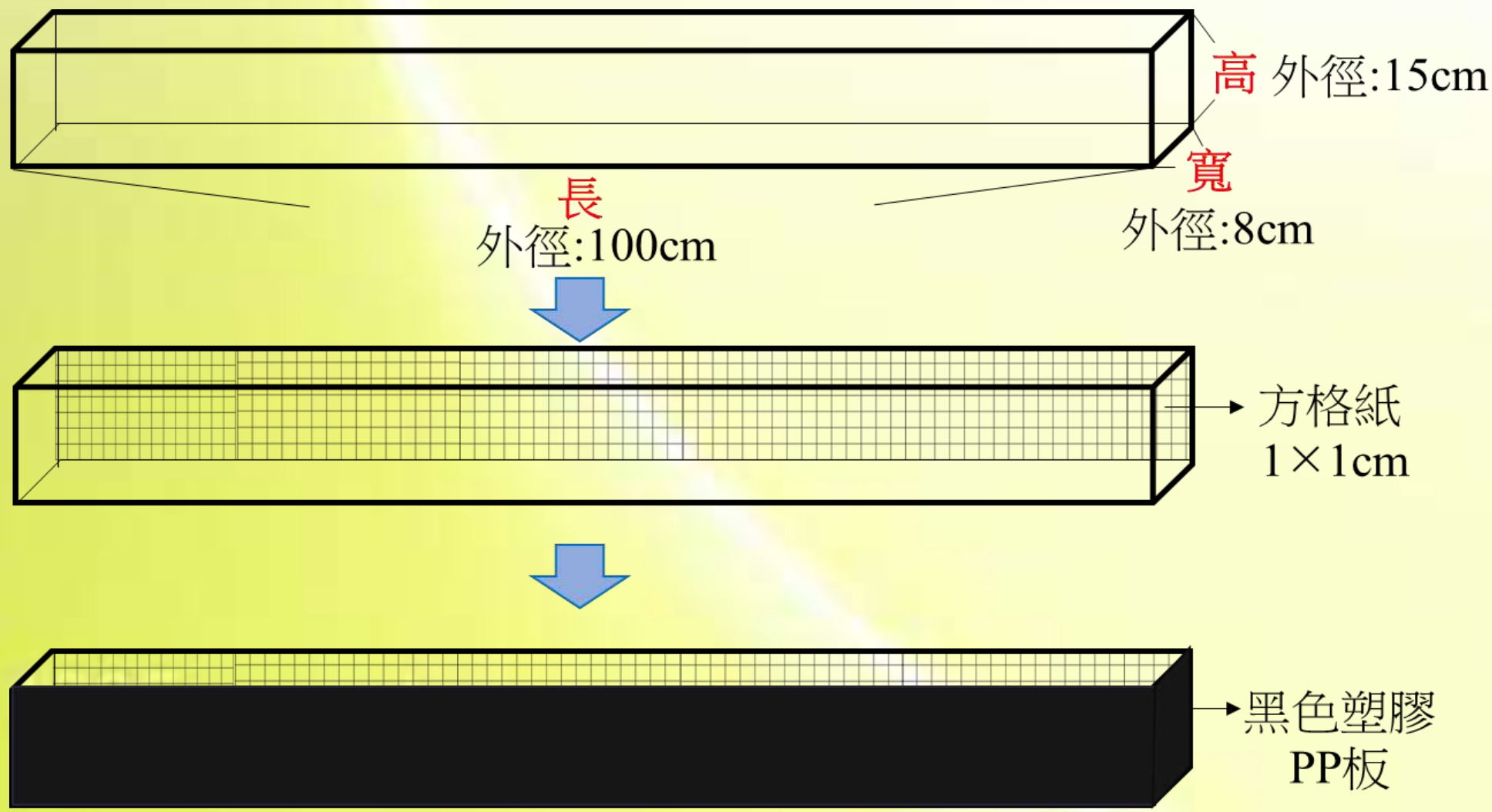
- 一、奈米塑膠微粒(NPs)的暴露對小番茄根、莖、葉生長有何影響？
- 二、奈米塑膠微粒(NPs)的暴露對水耕種植環境有何影響？

參、實驗材料與器材

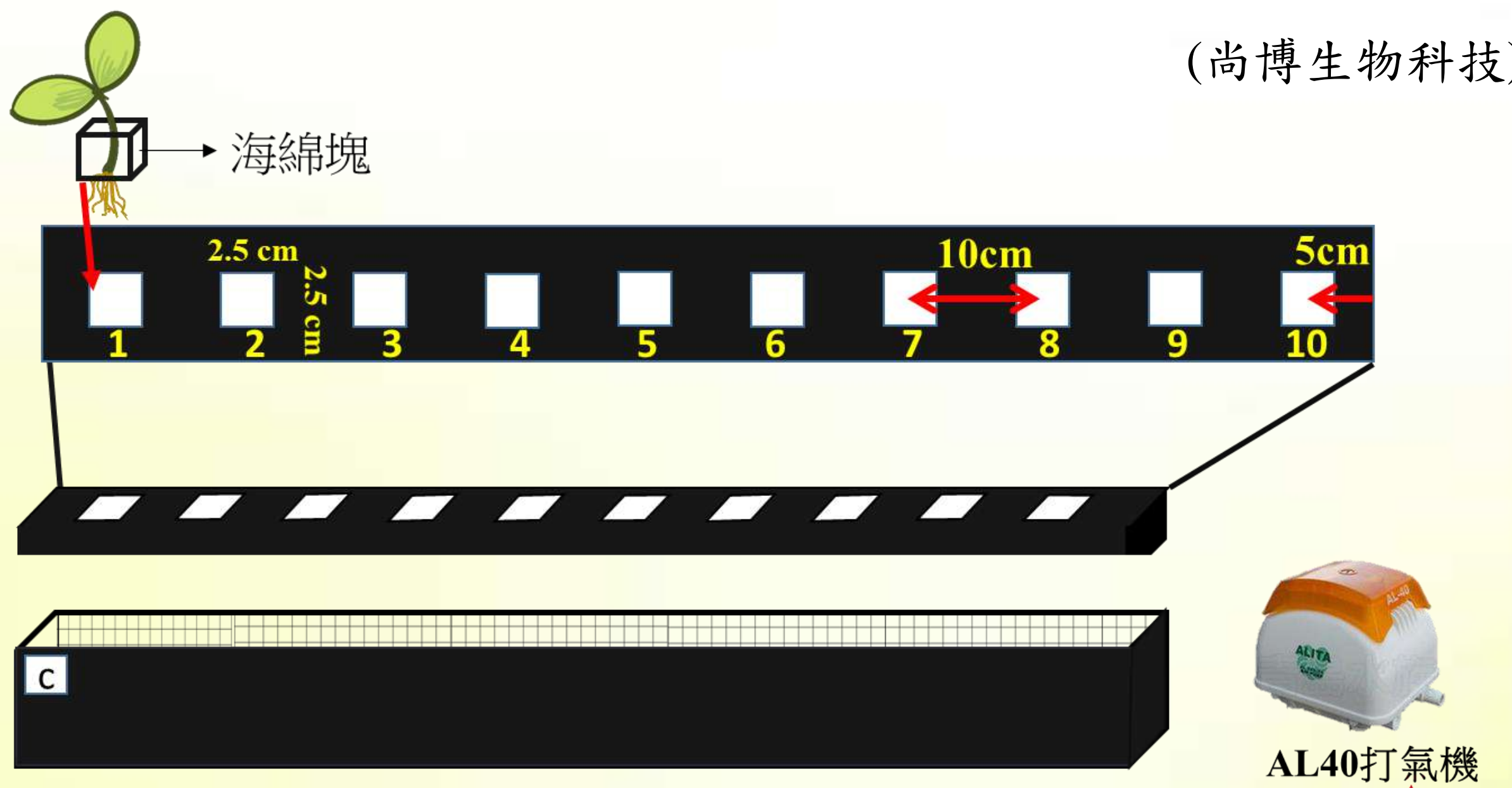
一、實驗材料：

1. 小女番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)，抗病性強，較玉女番茄容易栽種。(嘉華育苗)
2. 聚苯乙烯(Polystyrene)奈米塑膠微粒(PS -NPs)，粒徑0.05-0.1 μ m，濃度5%w/v，10mL

二、實驗器材：



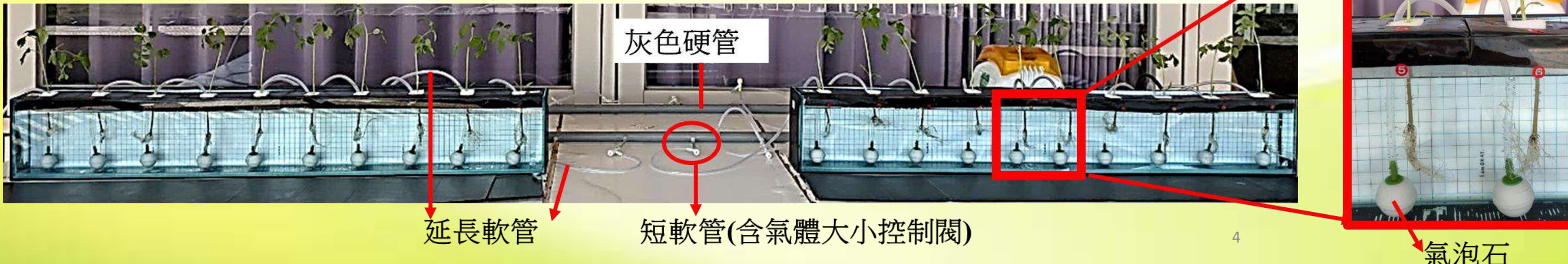
圖三、水耕種植缸設計。



圖四、番茄定植平台設計。

表一、實驗器材清單

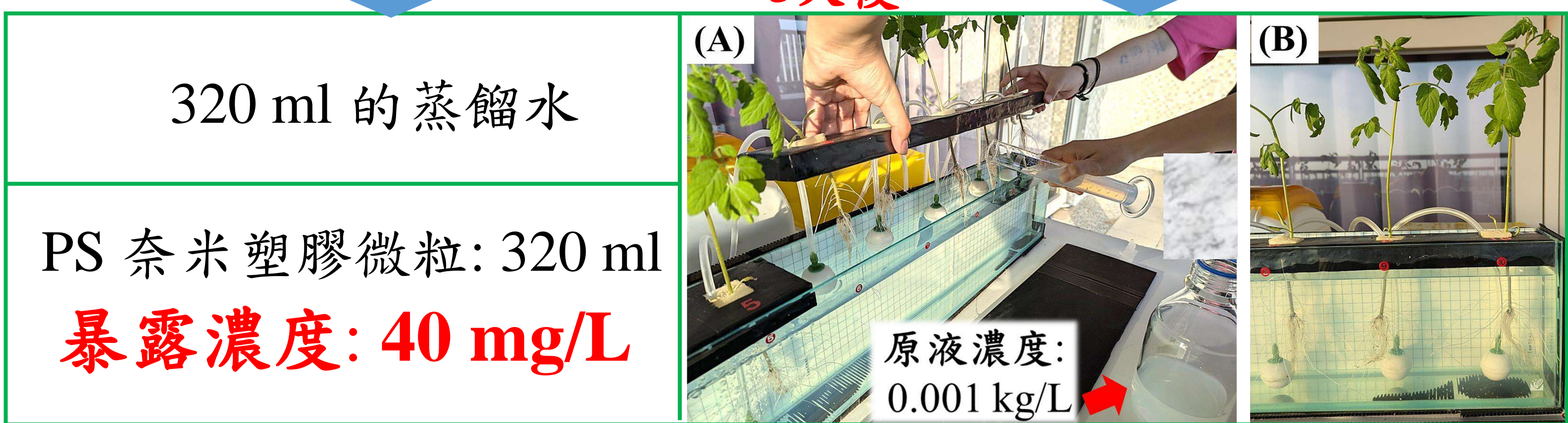
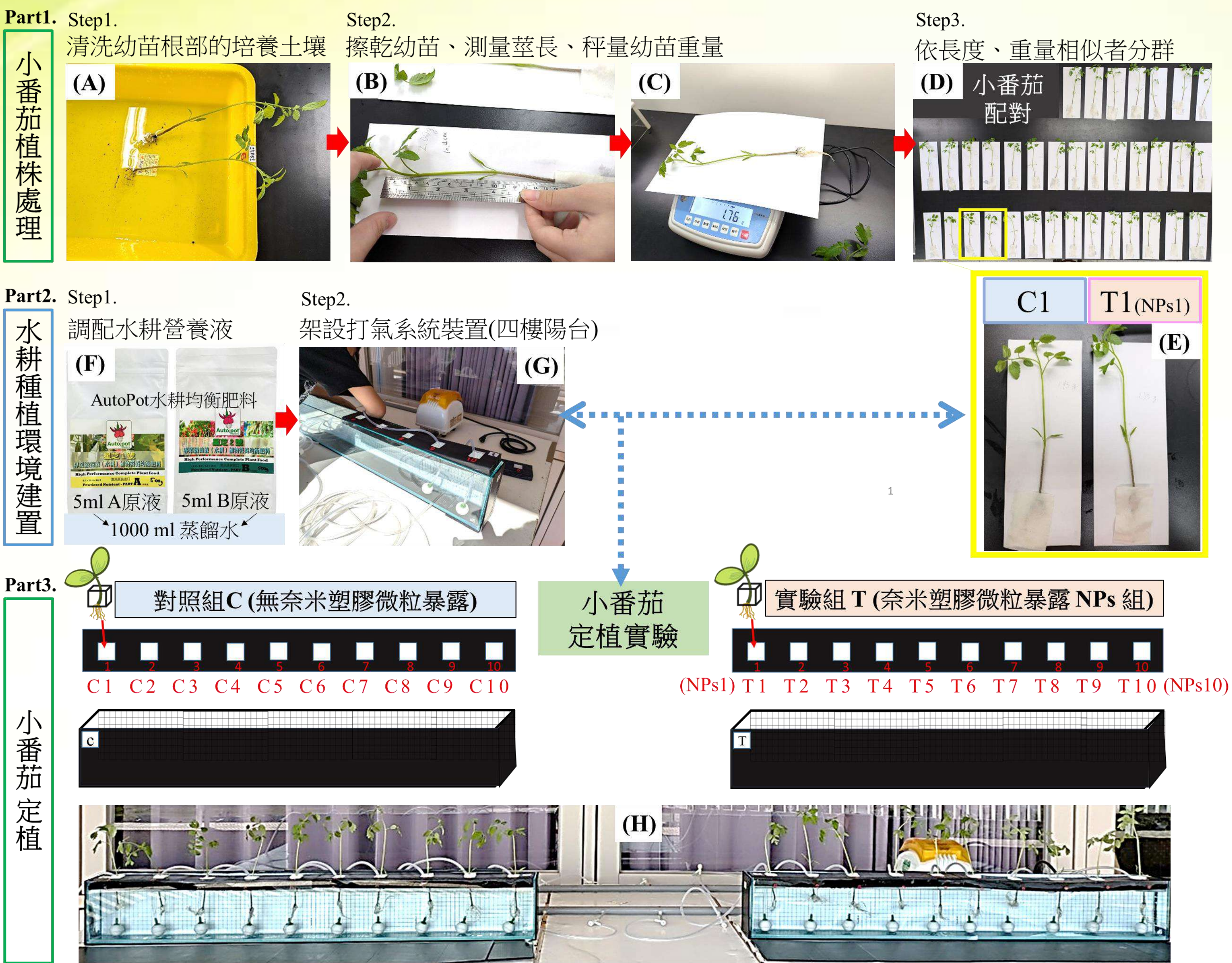
其他實驗器材			
1 玻璃缸	6 海棉塊	11 電子秤	16 烘箱
2 黑膠帶	7 氣泡石	12 打氣管	17 量筒
3 打氣機	8 延長線	13 塑膠圍籬	18 微量吸管
4 血清瓶	9 保麗龍板	14 pH試紙	19 LB培養基
5 珍珠板	10 蒸餾水	15 角架	20 棉線



圖五、打氣系統建置與實況。

肆、實驗流程與方法

一、小番茄定植與奈米塑膠微粒(NPs)暴露實驗



圖六、小番茄定植實驗與PS奈米塑膠微粒(NPs)暴露實驗流程。

伍、結果

一、塑膠微粒暴露對小番茄生長的影響

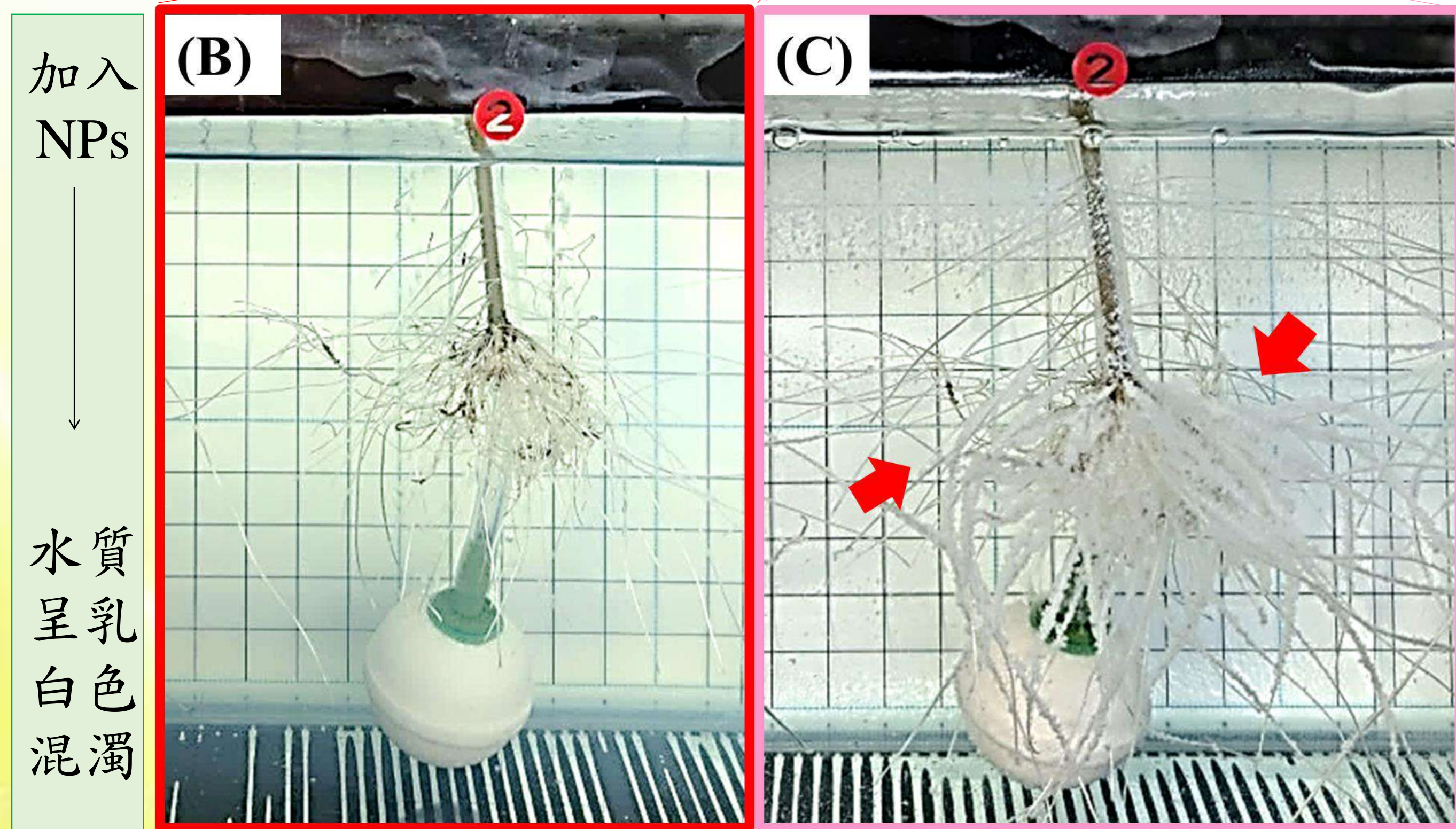
表二、對照組與NPs暴露組小番茄植株總重量分析 $N=20$

組別	重量(g)	定植日植株鮮重	植株鮮重	植株乾重
	種植天數	(day 0)	(day 56)	(day 56)
	n(株)	M (SD)	M (SD)	M (SD)
C	10	1.708(0.168)	57.641(4.936)	11.402(0.604)
NPs	10	1.707(0.165)	53.963(6.848)	10.674(1.127)
p		1.000	0.2471	0.105

根

表三、對照組與NPs暴露組小番茄根部生長重量分析 $N=20$

組別	重量(g)	根鮮重(day 56)	根乾重(day 56)
	n(株)	M (SD)	M (SD)
C	10	11.179(1.384)	3.349 (0.118)
NPs	10	9.460 (1.242)	3.300 (0.127)
p		0.023	0.481



加入NPs隔天：
肉眼可見大量塑膠微粒
附著於根部表面，而且
水質轉為清澈。

莖

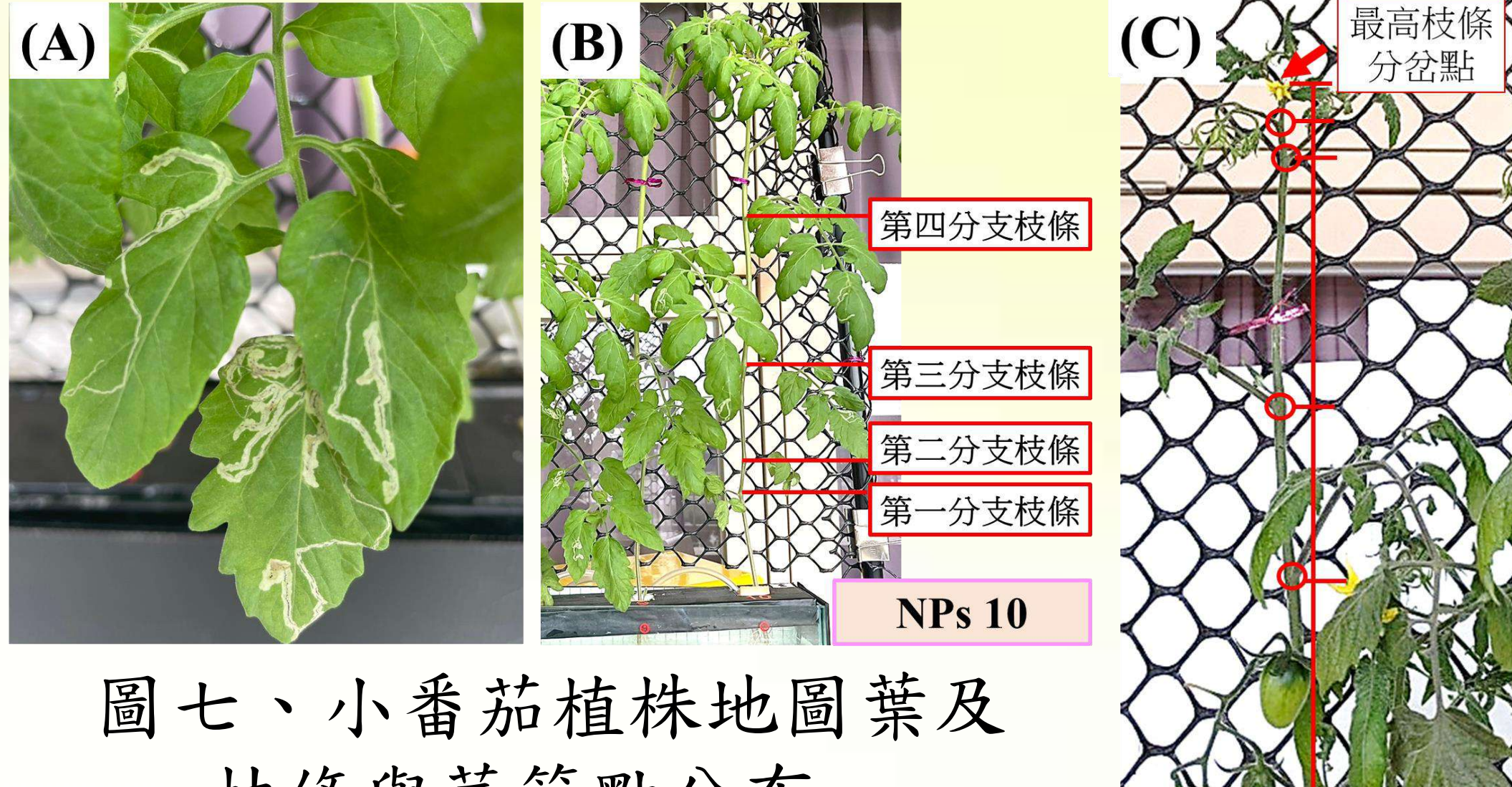
二組之莖總長度變化、節間的平均長度皆無顯著差異。

表四、對照組與NPs暴露組小番茄莖部生長重量分析 $N=20$

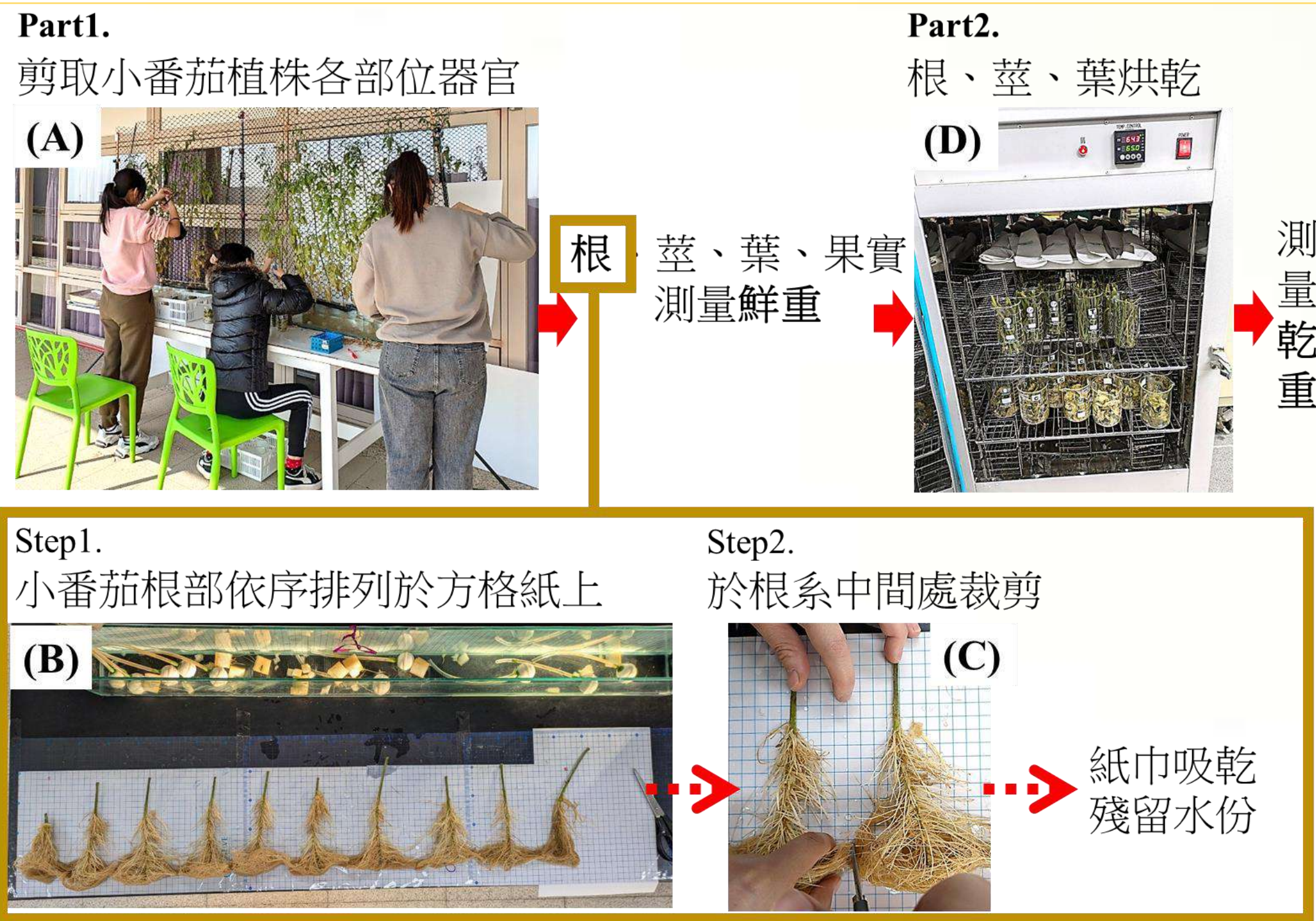
組別	重量(g)	莖鮮重(day 56)	莖乾重(day 56)
	n(株)	M (SD)	M (SD)
C	10	33.261 (4.019)	5.729 (0.522)
NPs	10	31.659 (4.652)	5.221 (0.807)
p		0.393	0.063

圖十一、對照組與NPs暴露組小番茄根系發展實況。

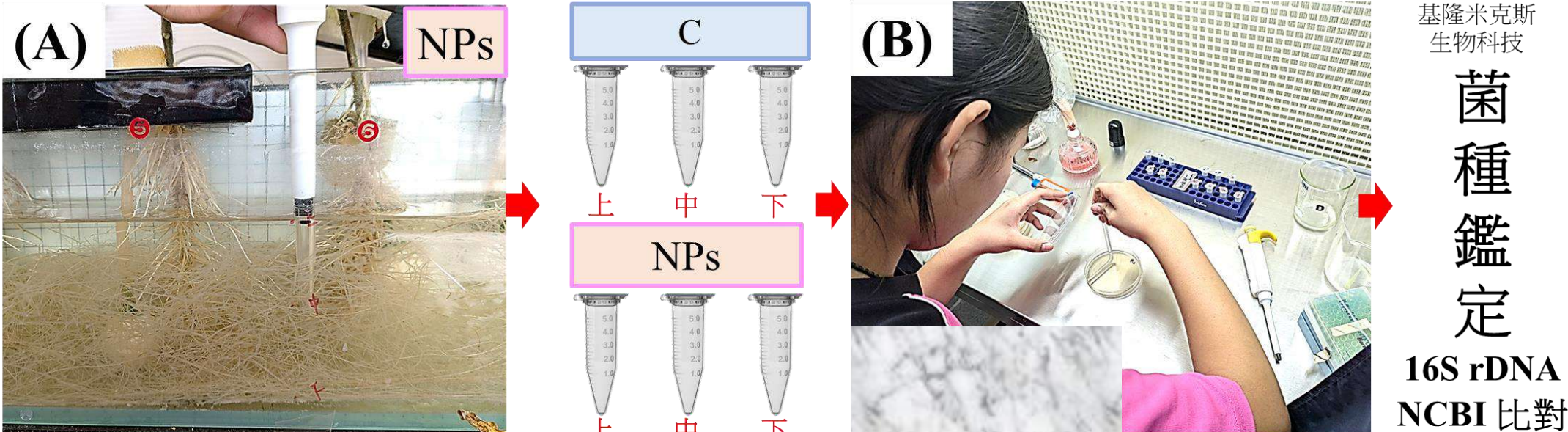
二、小番茄植株種植期間生長紀錄



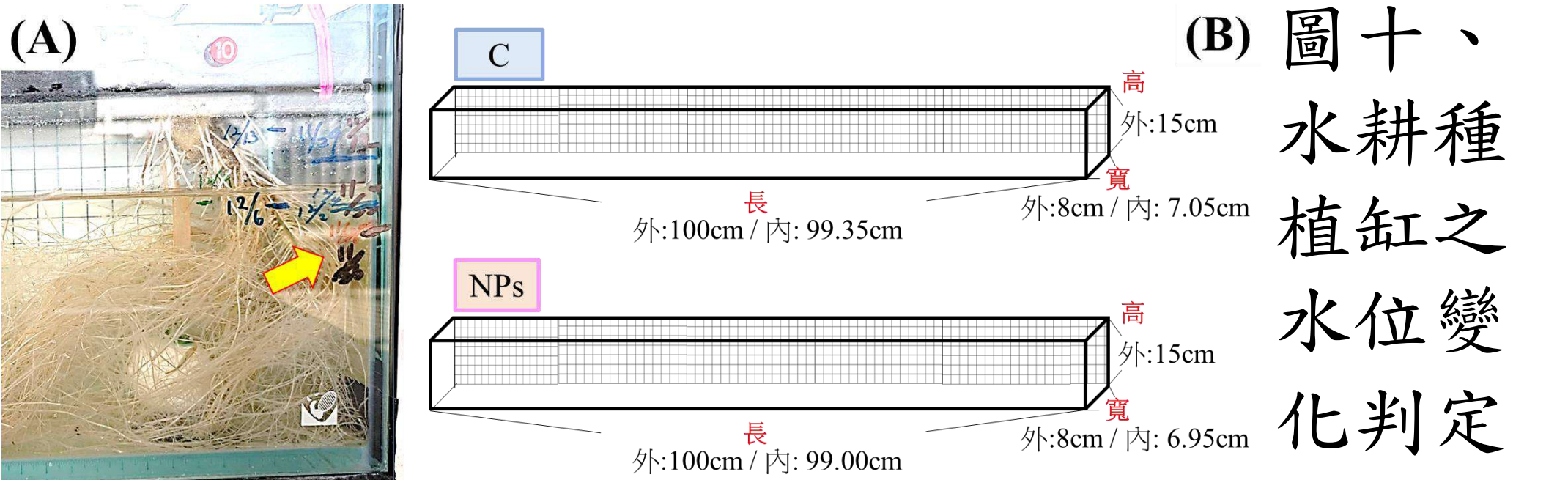
圖七、小番茄植株地圖葉及枝條與莖節點分布。



圖八、小番茄植株各器官採集與秤重。

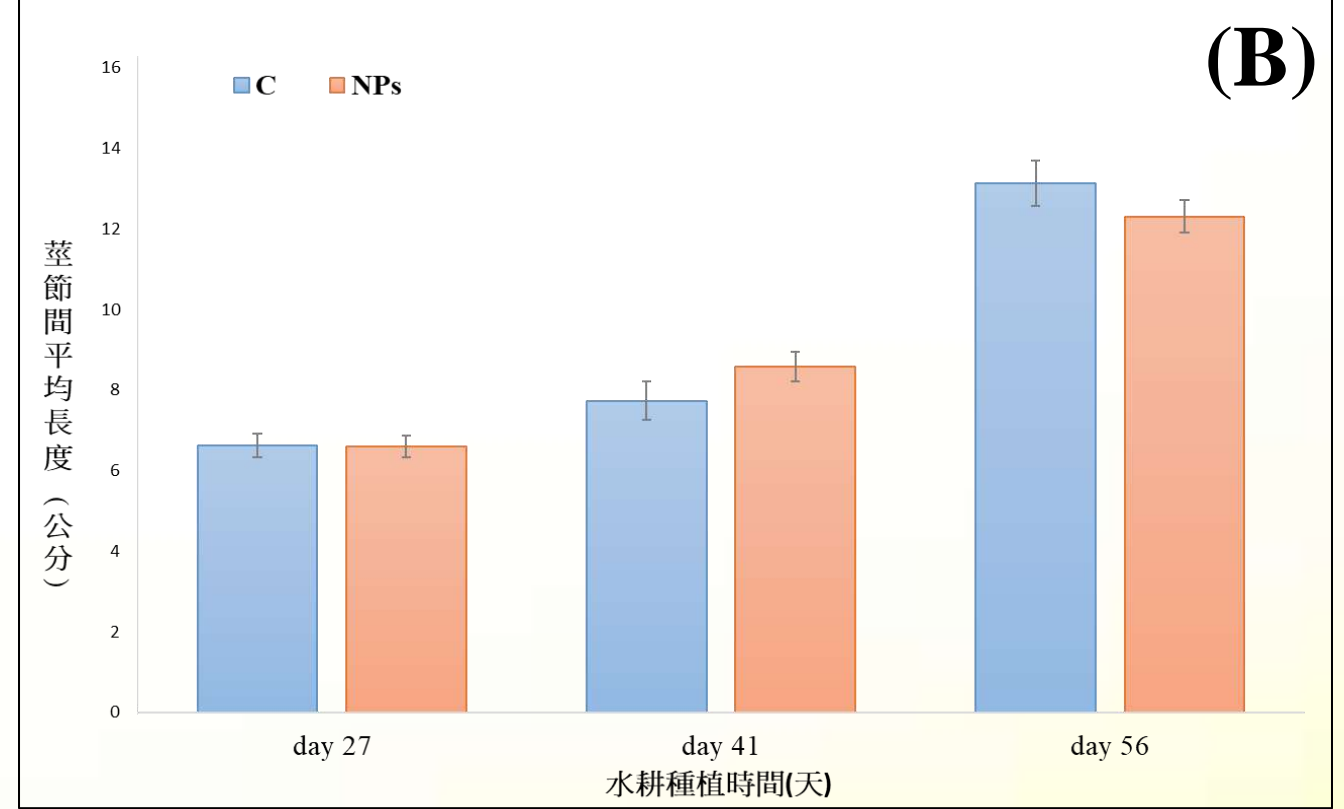
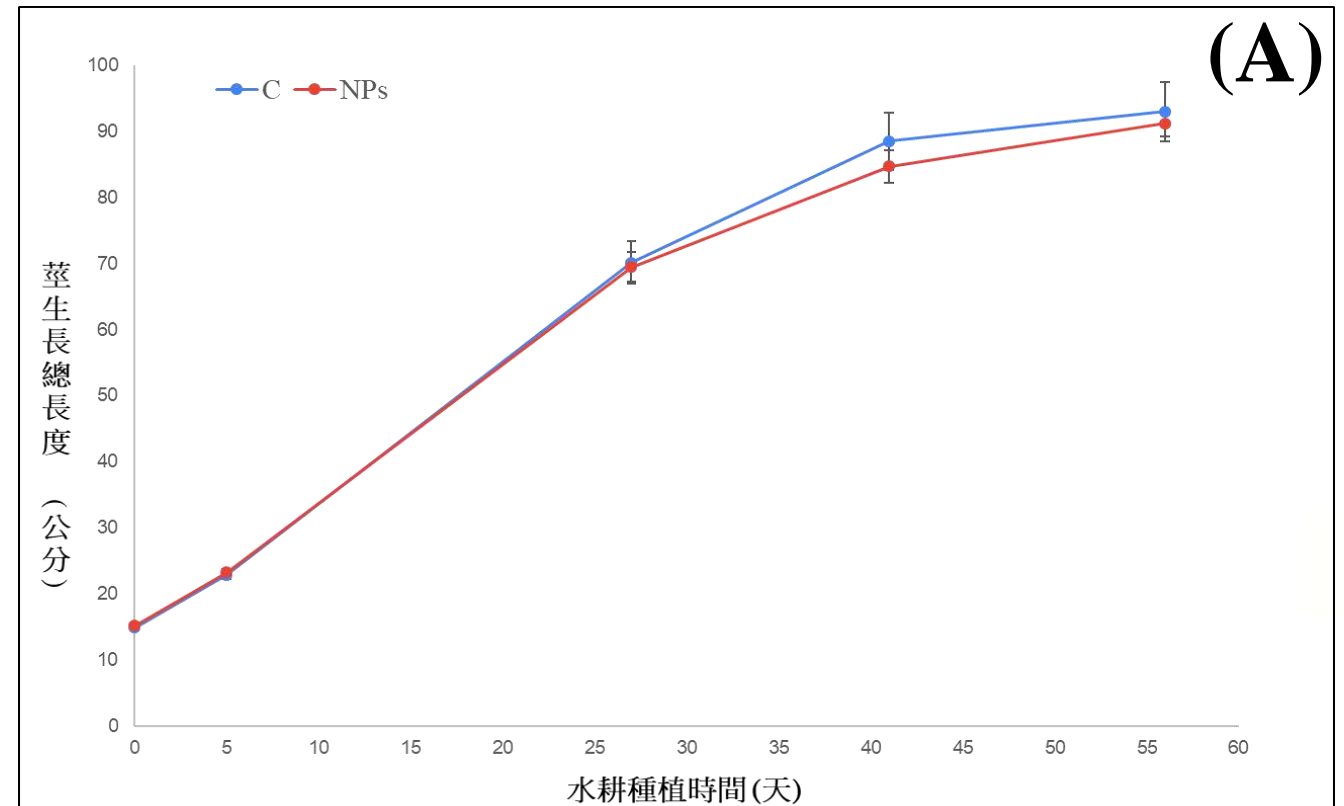


圖九、水樣本採集與菌群培養。



二組之根鮮重有顯著的差異，但根乾重則無。
●NPs組根部的含水量比較低。

●NPs吸附根部影響水分吸收



圖十二、小番茄莖生長影響 (A)總長度變化 (B)莖節間長度差異。

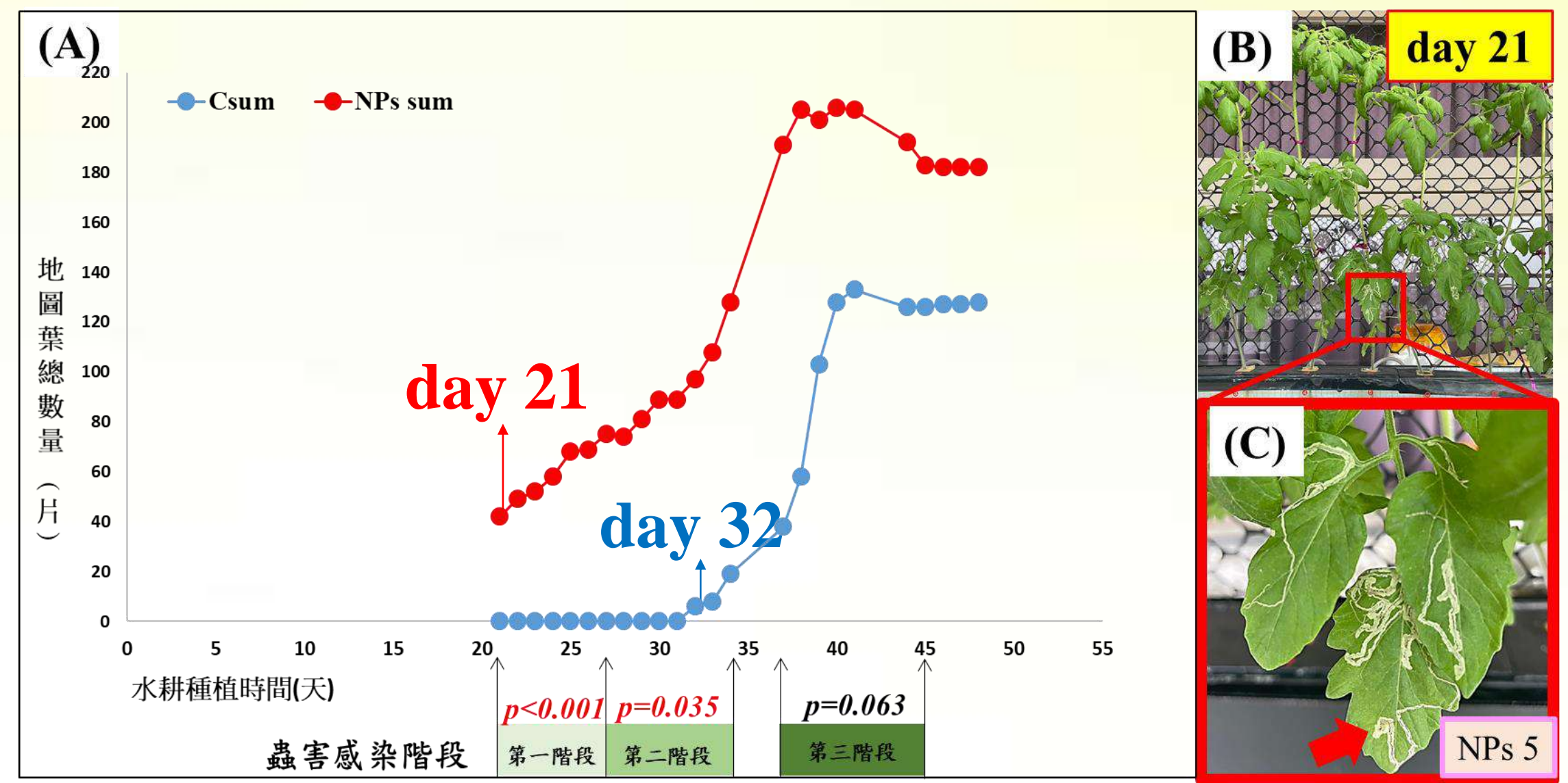
葉

1. 塑膠微粒暴露對小番茄葉子生長重量的影響

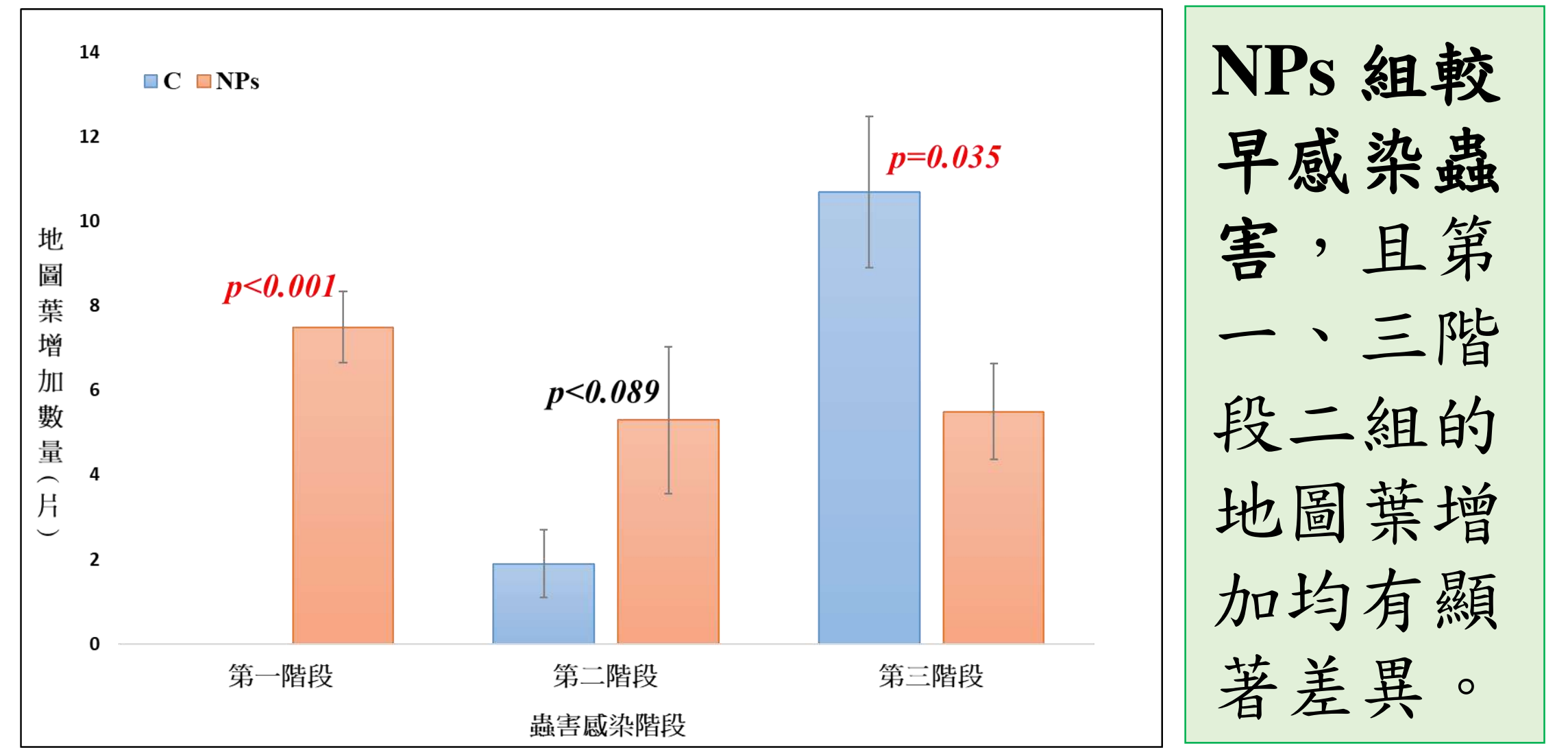
表五、對照組與NPs組小番茄葉子生長重量 N=20

組別	重量(g)	葉子鮮重(day 56)	葉子乾重(day 56)
	n(株)	M (SD)	M (SD)
C	10	13.201 (0.914)	2.324 (0.203)
NPs	10	12.844 (1.944)	2.153 (0.290)
p		0.853	0.190

2. 塑膠微粒暴露對小番茄葉子遭受蟲害的影響

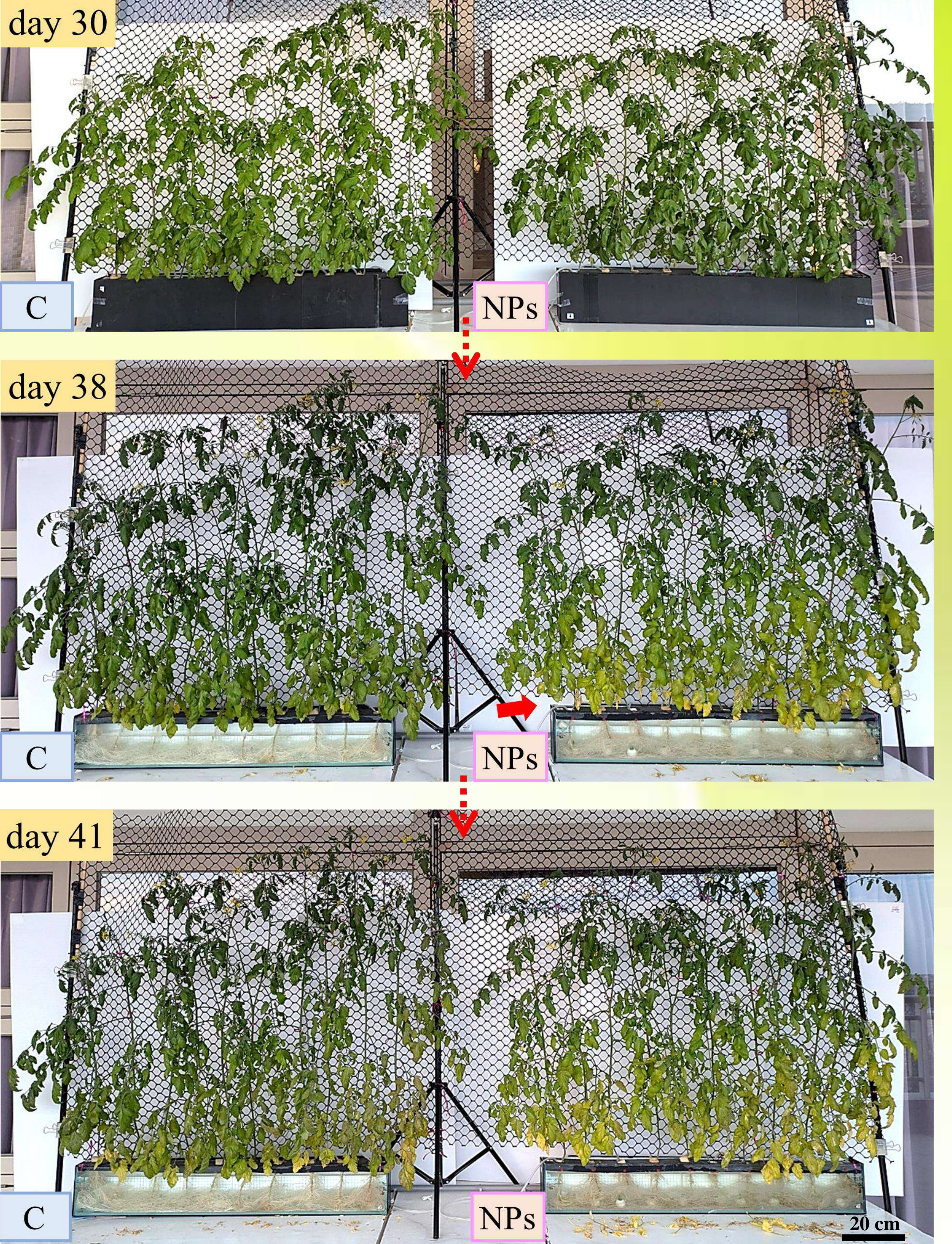


圖十三、小番茄地圖葉累計數量的差異。



圖十四、不同感染階段地圖葉增加數量的差異。

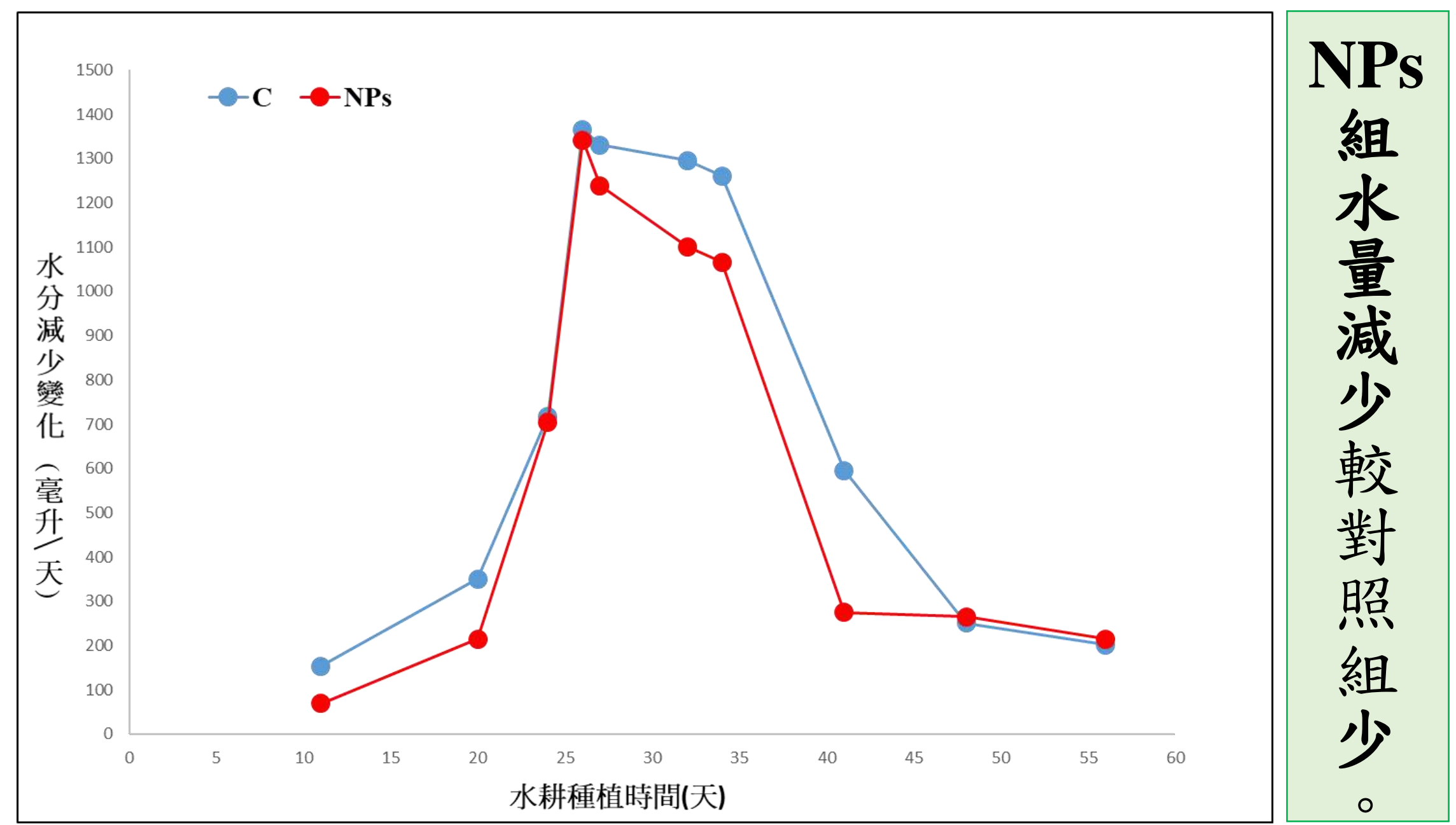
3. 塑膠微粒暴露對小番茄葉子枯黃凋謝的影響



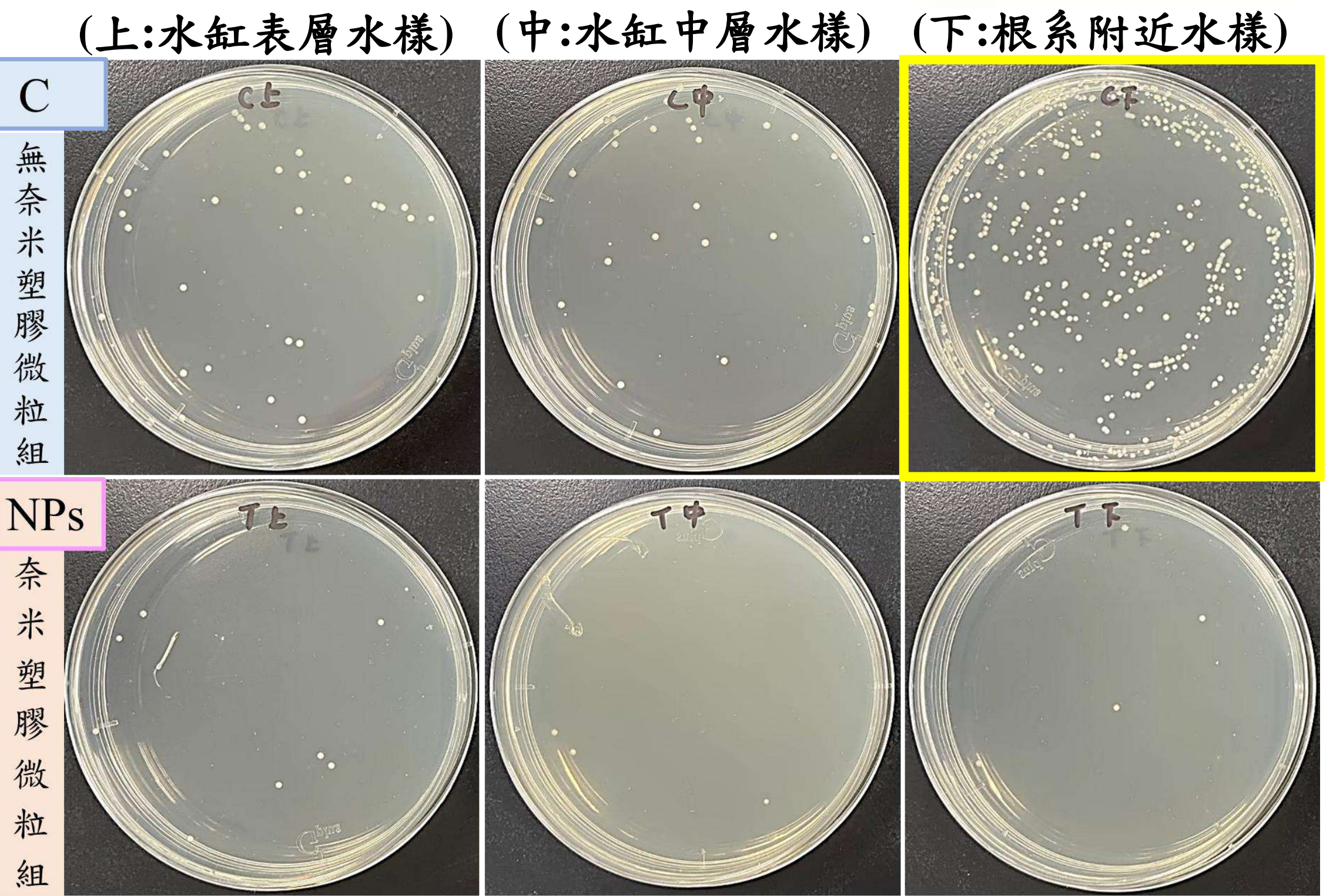
圖十五、小番茄葉枯黃凋謝的時間差異與實況。

NPs暴露組之下半部的葉子枯黃較早且較明顯。

二、塑膠微粒暴露對水耕種植環境的影響



圖十六、水耕種植缸之水量減少差異。



圖十七、水耕種植缸之水樣本菌群培養。

對照組根系(C下)之菌落數最多，NPs組都較少。
菌種為 *Achromobacter xylosoxidans* (木糖氧化無色桿菌)

陸、討論與結論

NPs的暴露確實會對小番茄產生影響，包含:

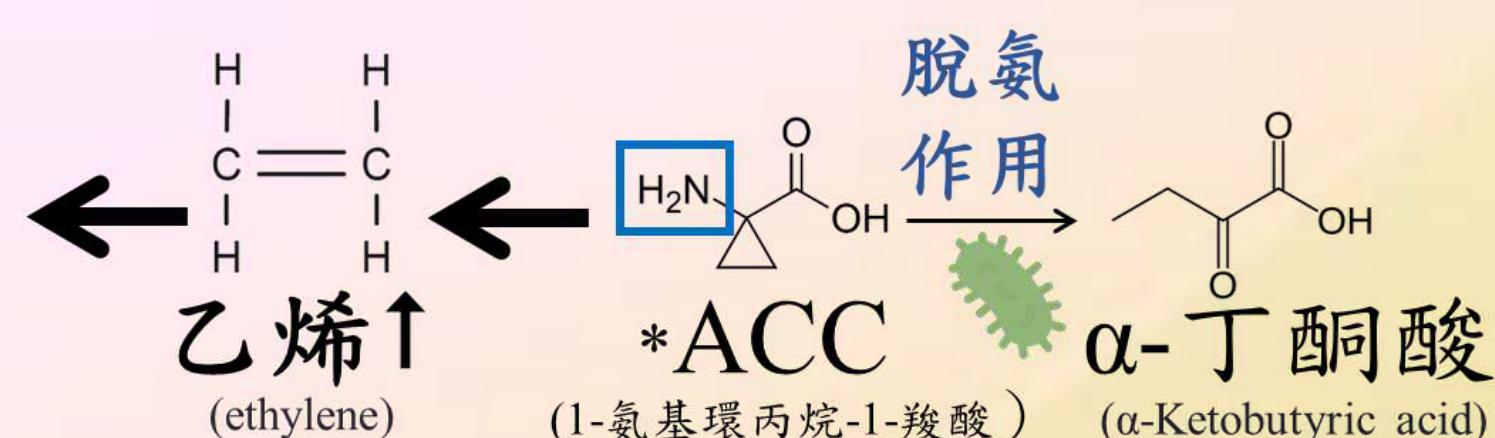
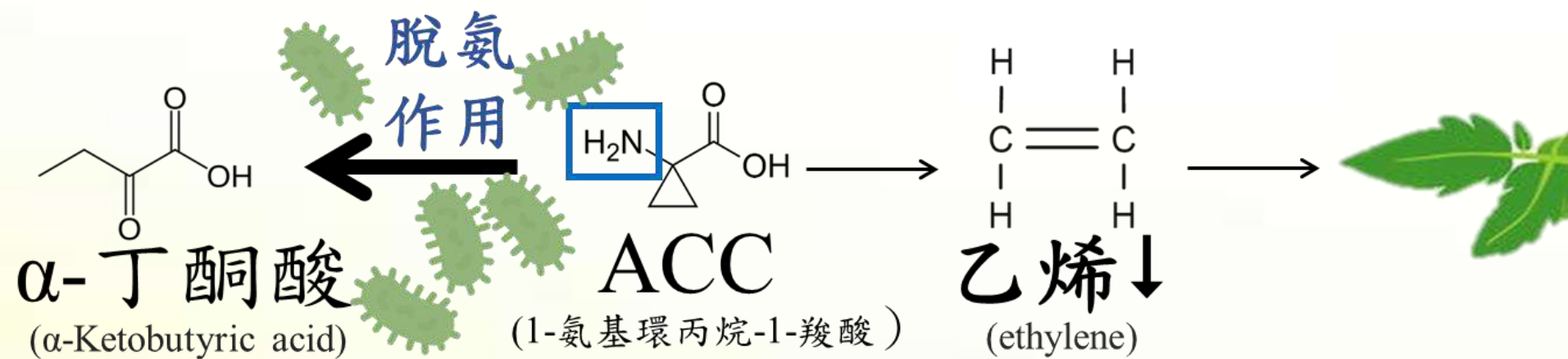
C對照組 NPs暴露組

- 促植物生長細菌 PGPB(Plant Growth-Promoting Bacteria)
Achromobacter xylosoxidans
(木糖氧化無色桿菌)
- 其他促植物生長細菌 (PGPB)
如: 液化澱粉芽孢桿菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*)

↓少、晚

地圖葉

晚葉枯黃早



↑多 水分減少

吸水↑

↑高 含水量

低↓

1. NPs附着→吸水↓

2. NPs堆積→空間↓

水分減少

少↓

*1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC)

研究建議

- 塑膠固體廢棄物→分類回收
如: 塑膠地膜→回收、再製

未來研究

- 田野實驗
如: 盆栽式土耕、延長研究期
混和不同種類的塑膠微粒

研究結果二: 水耕環境變化-NPs暴露

- 1. 減少促植物生長細菌 - 木糖氧化無色桿菌 (*Achromobacter xylosoxidans*)
- 2. 降低水分吸收利用