

屏東縣第 66 屆國中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：生活與應用科學科(二)

組 別：國中組

作品名稱：氮事又何奈：解密氮肥施用方式與小白菜生長之關聯性

關 鍵 詞：物聯網 (Internet of Things) 、土壤化學 (Soil Chemistry) 、空氣品質 (Air Quality)

編 號：B7014

目錄

摘要.....	P.1
壹、前言.....	P.2
一、研究動機.....	P.2
二、研究目的.....	P.2
三、文獻回顧.....	P.3
貳、研究設備與器材.....	P.6
參、實驗流程.....	P.9
肆、研究過程與方法.....	P.10
伍、結果與討論.....	P.19
陸、結論與未來展望.....	P.23
柒、參考資料與其他.....	P.25

摘要

本研究分析氮肥施用方式對小白菜生長之影響，重點探討根部養分供應與葉部氣體環境之生理關聯。實驗設計包含無施肥對照、密閉施肥及 IoT 環境調控三組模式。

觀測發現，施肥能提升土壤電導度 (EC)，為植株提供生長基礎；然而，傳統密閉環境（模擬溫室死角）因缺乏氣體交換，導致施肥後產生的 CO_2 與 NO_2 濃度異常升高，對小白菜產生生理抑制，造成生長遲滯。本研究導入 IoT 系統作為監測工具，發現藉由精準排風可降低有害氣體濃度，使植株能充分利用氮肥帶來的生長效益。結果證實，小白菜的生長表現不僅取決於養分多寡，更受限於空氣環境之動態變化。本研究結果可供精緻農業優化施肥環境管理之參考，以達到最佳作物生理產能。

壹、前言

一、研究動機

近年來，「精準農業」與「室內栽培」已成為全球農業發展的重要趨勢。在家庭、教室或實驗室等（半）密閉空間中，人們希望能透過控制光照、水分來優化植物生長。然而，在栽培過程中，「施肥」這個關鍵動作所引發的連鎖反應，卻常被忽視。

施肥不僅是為了提供養分，它更會主動且劇烈地改變植物的生長「微環境」(Microenvironment)。首先，肥料作為一種鹽類，會立即改變土壤的化學性質，如酸鹼度(Potential of Hydrogen, pH)與電導率(Electrical Conductivity, EC)，直接影響養分的有效性與根系的吸水能力。

其次，更常被忽略的是，肥料會刺激土壤中微生物的活性，導致「土壤呼吸作用」(Soil Respiration) 劇增，在密閉空間中釋放遠超大氣背景值的高濃度二氧化碳(CO₂)。同時，氮肥在轉化過程中（如硝化與反硝化作用），可能釋放出具有植物毒性的二氧化氮(NO₂) [1]。

當這些氣體在通風不良的環境中不斷累積，高 EC 值的土壤（鹽分逆境）與高濃度的有害氣體（空氣逆境）可能同時發生，反而抵銷了施肥的美意，造成植物生長停滯甚至受損。

現有物聯網(IoT)栽培系統多集中於澆水與光照的自動化，卻缺乏對「土壤化學」與「環境空氣」的整合監測。本研究的動機在於，打造一套能同時看見土壤與空氣變化的智能系統，並探討在施肥條件下，「主動式通風介入」是否是提升植物健康與肥料利用率的關鍵因素。

二、研究目的

本研究旨在建構一個多維度感測的 IoT 環控系統，並透過對照實驗，釐清施肥在密閉環境下對土壤、空氣及植物的連鎖影響。具體目的如下：

(一) 建構一套整合型 IoT 系統，能即時監測土壤之 pH 值、EC 值，以及環境空氣中之 CO₂ 與 NO₂ 濃度。

(二) 量化比較「有施肥」與「無施肥」組別，在密閉條件下土壤化學(pH/EC)與空氣品質

(CO₂/NO₂)的動態變化。

(三) 驗證本 IoT 系統之「智能通風」邏輯（即根據 CO₂/NO₂濃度啟閉風扇）能否有效將空氣品質控制在安全閾值內。

(四) 綜合分析植物生長數據，探討在施肥環境下，IoT 智能通風的介入是否能顯著提升植物的生長表現與健康狀態。

三、文獻回顧

為建立本研究的理論基礎，我們回顧了關於 IoT 農業應用、土壤化學，以及施肥與氣體釋放的相關學術文獻：

(一) IoT 技術於精準農業之應用

物聯網(IoT)技術透過感測器、微控制器與雲端平台，實現了對農業環境的即時與遠端監控，是精準農業的核心 [2]。過去研究多集中於使用 IoT 監測土壤濕度、環境溫濕度與光照，並以此為依據進行自動灌溉與光照調節 [3]。然而，如本研究欲探討的，將土壤化學探針（pH/EC）與空氣品質感測器（CO₂/NO₂）整合於單一系統，並進行閉環回饋控制的研究仍相對較少。

(二)土壤 pH 值與 EC 值對植物生長的影響

土壤 pH 值是影響植物養分有效性的關鍵。大多數植物偏好微酸至中性的土壤（pH 6.0-7.0），在此範圍內，氮、磷、鉀等主要營養元素的溶解度與可利用性最高 [4]。EC 值（電導率）則反映了土壤中總溶解鹽類的濃度，亦可視為肥料濃度的指標。過高的 EC 值會產生「鹽分逆境」(Salinity Stress)，降低根系的滲透潛勢，使植物吸水困難，即俗稱的「肥傷」[5]。

(三) 施肥、微生物活性與氣體釋放 (CO₂ 及 NO₂)

施肥是土壤氣體釋放的主要驅動因素之一。肥料（尤其是有機質或氮肥）為土壤微生物提供了豐富的碳源和氮源，使其活性劇增。

- CO₂的產生：微生物的呼吸作用會消耗氧氣並釋放大量 CO₂。[6] 的研究證實，施用氮

肥顯著提高了土壤的微生物生物量(Microbial Biomass)與 CO_2 的釋放速率。在密閉空間中， CO_2 濃度可輕易超過數千 ppm，雖可作為光合作用原料，但極高濃度(尤其在夜間)可能對植物造成脅迫。

- NO_2 的產生與毒性： NO_2 是氮循環 (Nitrification and Denitrification) 過程中的氣態中間產物。當土壤中氮肥 (特別是銨態氮) 供應過量時，氣態氮的逸散率會增加 [7]。 NO_2 是一種強氧化劑，被學術界公認為對植物具有高毒性(Phytotoxicity)的空氣污染物。[1] 的綜述文章指出， NO_2 會破壞葉綠素、干擾光合作用與呼吸作用的酵素活性，並導致葉片細胞可見的損傷 (如黃化斑點)。

綜合上述文獻，本研究的價值在於，它不僅是建構一個 IoT 裝置，更是透過此裝置，去驗證一個常被忽略的科學問題：在施肥的同時，必須管理伴隨而來的空氣品質問題。本研究參考該篇文章進行基礎建設以及基礎比較[8]。

(四) 氮元素對小白菜生長之生理機制

氮 (Nitrogen) 是植物生長不可或缺的巨量元素，更是構成胺基酸、蛋白質、核酸及葉綠素的核心成分。小白菜 (*Brassica rapa chinensis*) 屬於十字花科葉菜類，其主要的經濟收穫部位為營養器官 (葉片與葉柄)。

小白菜對氮肥的需求量極大。充足的氮能促進細胞分裂與伸長，使葉片寬大、葉色濃綠 (提升光合作用效率)；反之，缺氮會導致植株矮小、老葉黃化。本研究以此生物學特性為基礎，選擇小白菜作為觀察氮肥促進效應之最佳指標植物。

(五) 自製氮肥的礦化作用與氣體逸散

與直接提供無機離子 (NH_4^+ 、 NO_3^-) 的化學速效肥料不同，自製氮肥 (如：發酵液肥、堆肥等) 多以大分子有機態氮的形式存在。施加於土壤後，必須仰賴土壤微生物分泌酵素進行「礦化作用 (Mineralization)」，將其分解為植物可吸收的無機態氮。

值得注意的是，此一微生物大量繁殖與分解的過程，會伴隨劇烈的需氧呼吸作用，進而釋放極高濃度的二氧化碳 (CO_2)。同時，在接續的硝化與脫硝作用中，亦會產生二氧化氮 (NO_2)

等含氮氣體的逸散。這說明了自製氮肥在促進生長的同時，也極易在密閉空間中引發空氣逆境。

貳、研究設備及器材

本研究所使用的設備與材料可分為硬體、軟體、實驗環境與生物材料四大類：

一、IoT 硬體元件（電子材料）

(一)核心控制器：

✚ ESP32 開發板 (內建 Wi-Fi 功能) x 1 組

(二)環境感測器（空氣）：

✚ CO₂ (二氧化碳) 感測器 x 1 (MH-Z19B)

✚ NO₂ (二氧化氮) 感測器 x 1 (MQ-135)

(三)土壤感測器（化學）：

✚ 土壤 pH/氮/磷/鉀 五探針模組 (數位或類比) x 1 組

(四)致動器（控制元件）：**

✚ DC 12V 散熱風扇 (排抽風用) x 1

✚ 5V 繼電器模組 (用於控制風扇) x 1

✚ 自動澆水系統 (含 5V 沉水馬達、繼電器、水管) x 1 組

(五)電源與其他配件：

✚ 12V 獨立電源供應器 (用於風扇或馬達) x 1

✚ 麵包板 x 1

✚ 杜邦線 (公對公、公對母) 數條

✚ 防水膠帶或熱縮套管 (用於保護探針接點)

二、實驗環境建置

(一)密閉實驗箱：

✚ 透明塑膠收納箱

✚ 電鑽或開孔工具 (用於挖設風扇孔與電線孔)

三、軟體與數據平台

(一)開發環境及監控平台：

✚ Arduino IDE (用於編寫 ESP32 程式碼)2. :

✚ Blynk (或其他 IoT 平台) 的手機 App 與伺服器

(二)數據分析：

✚ Microsoft Excel 或 Google Sheets (用於彙整與繪製圖表)

四、生物與化學材料

(一)實驗植物：

✚ 小白菜種子

(二)栽培介質：

✚ 統一品牌與批號的培養土

相同規格的盆栽 (至少 3 個)

(三)關鍵變因：

✚ 自製氮肥：以青草加自來水發酵 3 天之液肥，起始氮濃度為 750PPM。

(四)校準用品 (關鍵)：

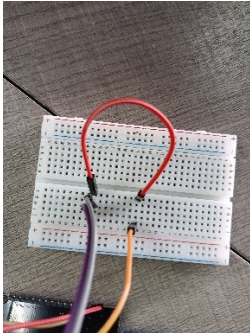
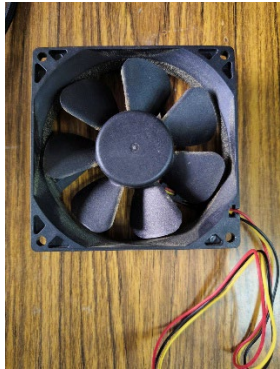
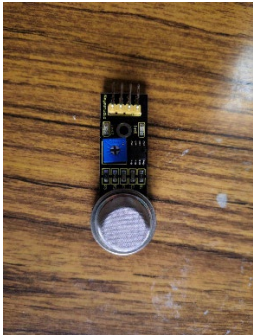
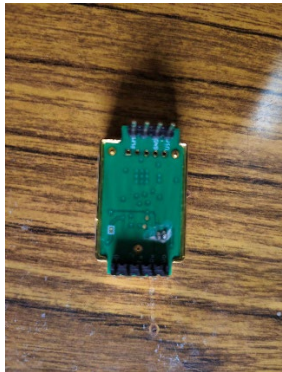
✚ pH 4.0 標準校準液

✚ pH 7.0 標準校準液

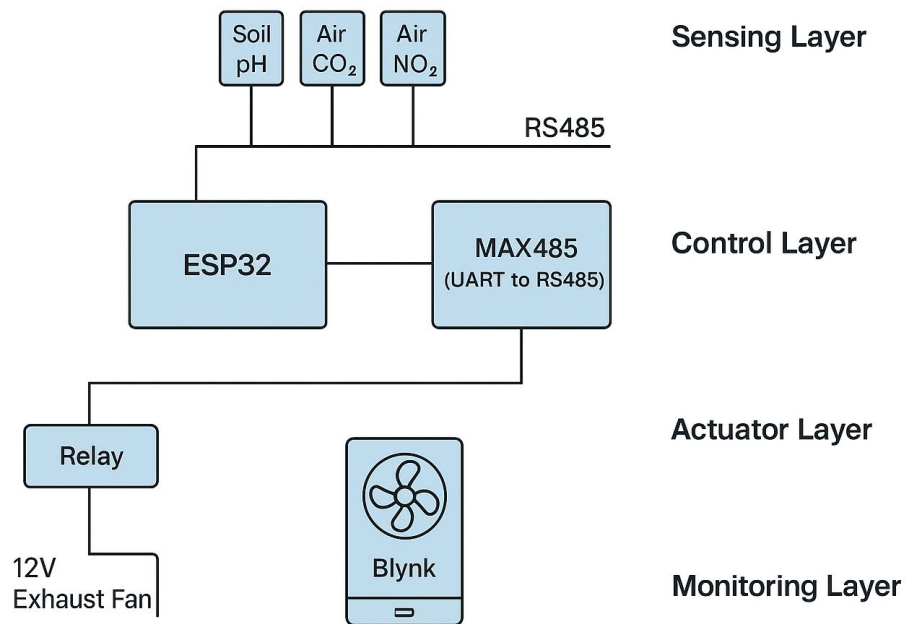
✚ EC 標準校準液

✚ 蒸餾水 (用於清洗探針)

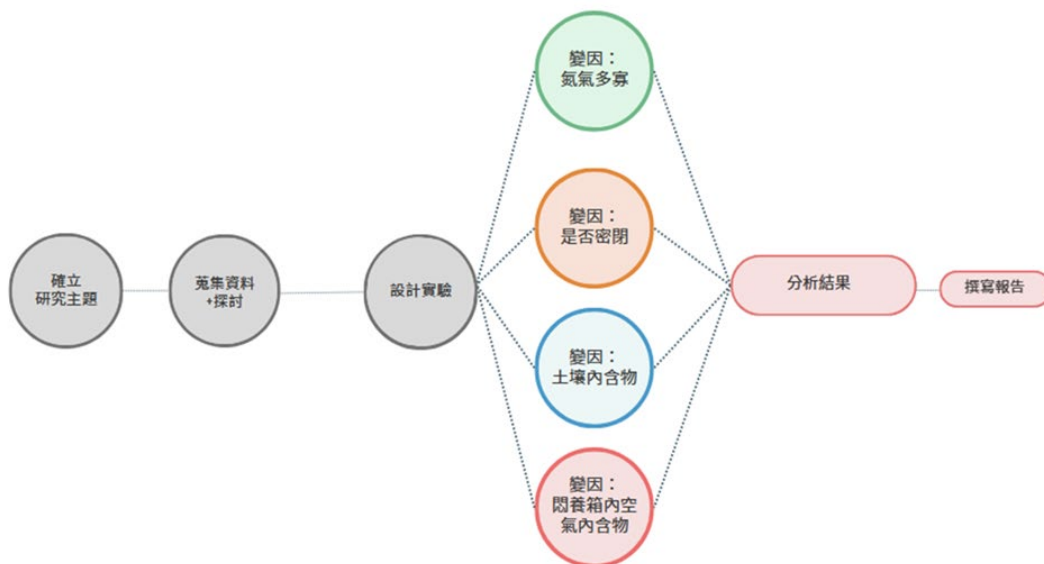
表一；實驗器材圖片

相關器材圖片			
			
ESP32 開發板	土壤 pH/氮/磷/鉀 五探針模組	麵包板	風扇
			
小白菜	培養土	化學肥料(自製)	MQ-135
			
pH 4.0 標準校準液	pH 7.0 標準校準液	蒸餾水	MH-Z19B

參、實驗流程



圖一、系統架構圖



圖二、實驗流程圖

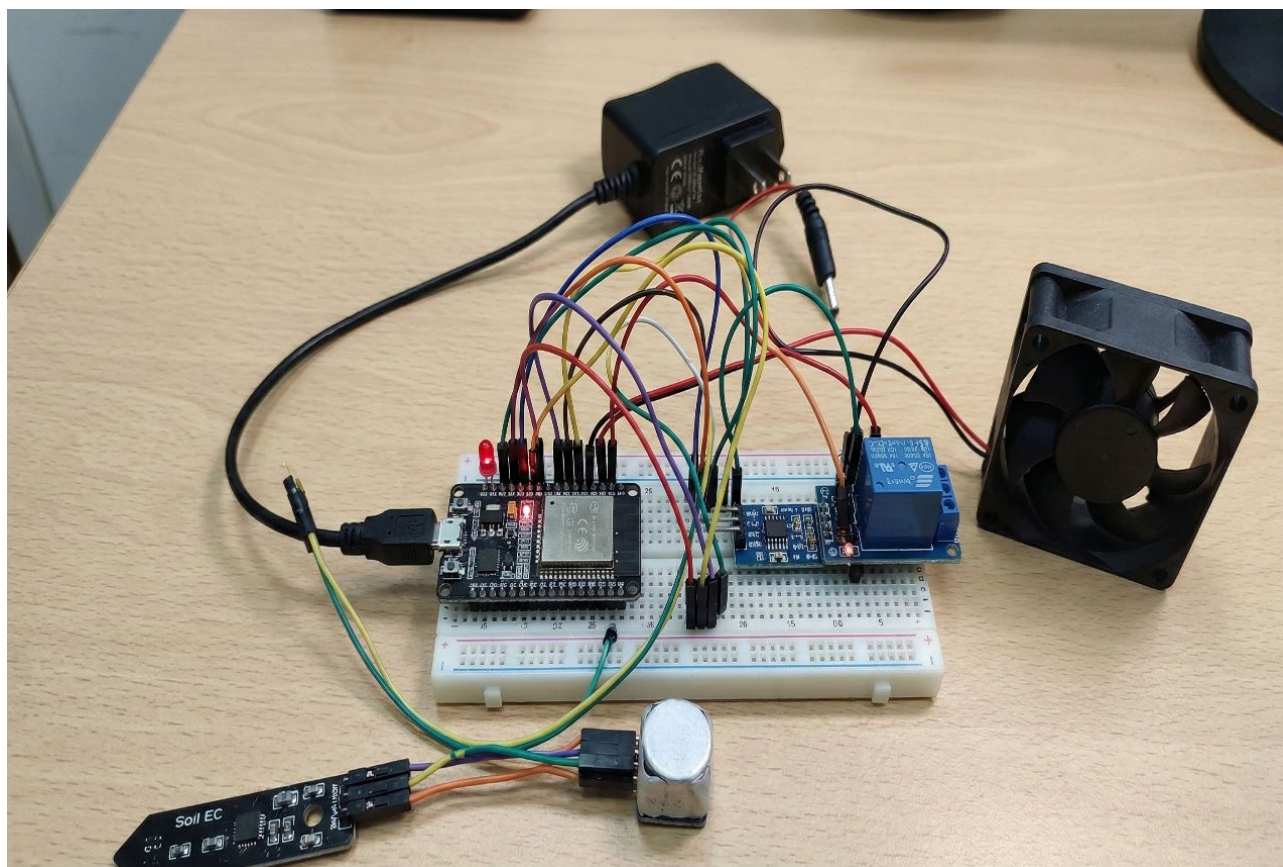
肆、研究過程與方法

本研究之過程主要分為四大階段：(一) 系統架構與硬體建置、(二) 軟體程式與控制邏輯開發、(三) 核心感測器校準，以及 (四) 對照組實驗設計。

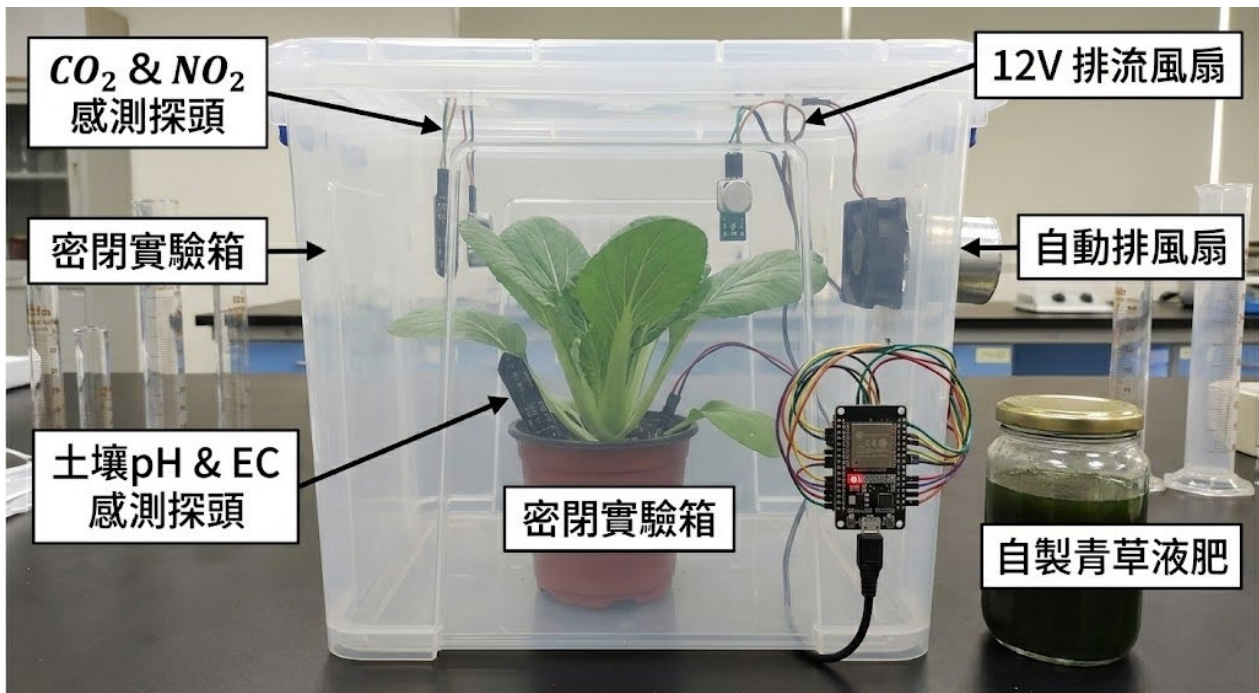
一、系統架構與硬體建置

- 本研究旨在建構一套能整合監測土壤化學與空氣品質的物聯網(IoT)閉環控制系統。整體系統架構如下圖所示：

本系統核心採用 ESP32 微控制器 (ESP32 Microcontroller) 與 MAX485 通訊模組 (MAX485 Communication Module) 建立 Modbus (RS485) 匯流排，依序連接土壤 pH 感測器 (Soil pH Sensor)、土壤 EC 感測器 (Soil EC Sensor)、CO₂ 感測器與 NO₂ 感測器。當氣體濃度超標時，ESP32 透過 5V 繼電器 (5V Relay) 啟動 12V 排風扇 (12V Exhaust Fan) 排除有害氣體。



圖三、智慧微型生態系 IoT 控制系統硬體配置圖



圖四、密閉 IoT 實驗組 (自動通風) 之實驗箱與器材配置

- 硬體建置流程：

RS485 匯流排建立：

將 ESP32 的一組 UART (例如 Serial2：GPIO 16, 17) 連接至 MAX485 模組的 RO 與 DI 腳位。

將 ESP32 的一個 GPIO (例如 GPIO 4) 連接至 MAX485 模組的 DE/RE (致能) 腳位，用於切換收發模式。

將所有 RS485 感測器 (pH, EC, CO₂, NO₂) 的 A 線並聯至 MAX485 模組的 A 端，B 線並聯至 B 端。

致動器連接：

將 ESP32 的另一個 GPIO 腳位連接至 5V 繼電器模組的訊號端(IN)

12V 風扇的電源正極串接至繼電器的常開(NO)端，再連接至 12V 電源。

實驗箱建置：

使用透明塑膠收納箱作為 B 組與 C 組的「密閉實驗箱」。

在箱體上鑽孔，用於安裝排抽風扇、感測器探頭及所有電源線路。

二、軟體程式與控制邏輯

本系統使用 Arduino IDE 搭配 C++ 語言進行開發。

(一)Modbus (RS485) 數據讀取：

安裝 ModbusMaster 函式庫。

設定 HardwareSerial (Serial2) 以指定的鮑率(Baud Rate, e.g., 9600) 與 RS485 匯流排通訊。

設定 preTransmit() 與 postTransmit() 回呼函式(Callback)，使其在發送數據前將 DE/RE 腳位設為 HIGH (發送模式)，發送後設為 LOW (接收模式)。

在主迴圈(loop)中，依序輪詢(Polling)各個感測器（依據其唯一的 Slave ID）。

使用 Modbus 功能碼 0x03 (讀取保持暫存器) 或 0x04 (讀取輸入暫存器)，取得感測器的原始數據。

(二)智能通風控制邏輯：

此為本研究的核心控制演算法。我們參考文獻 [1] [7] 中對植物的氣體毒性閾值，訂立安全標準。閾值設定 (範例)： CO2_THRESHOLD = 2000 ppm, NO2_THRESHOLD = 5 ppm。

判斷邏輯 (虛擬碼)：

// 於主迴圈中

```
float co2 = read_CO2_Sensor();
```

```
float no2 = read_NO2_Sensor();
```

```

if (co2 > CO2_THRESHOLD || no2 > NO2_THRESHOLD) {

    digitalWrite(FAN_RELAY_PIN, HIGH); // 啟動風扇

} else {

    digitalWrite(FAN_RELAY_PIN, LOW); // 關閉風扇

}

```

(三)雲端數據上傳：

使用 Blynk 函式庫，將 ESP32 連接至 Wi-Fi。

將解譯後的 pH, EC, CO₂, NO₂ 數值，透過 Blynk.virtualWrite() 定時上傳至 Blynk 伺服器，以實現遠端監控。

以下為 Arduino IDE 輸出格式，上傳雲端亦是使用該格式進行資料分割處理。

===== 🌱 土壤感測數據 (Soil Sensor Data) =====

💧 濕度 (Moist): 100.0 %

🌡️ 溫度 (Temp): 28.5 C

⚡ 電導 (EC): 951 us/cm

🧪 酸鹼 (pH): 6.9 pH

🌱 氮 (N): 47 mg/kg

🌸 磷 (P): 66 mg/kg

🍎 鉀 (K): 152 mg/kg

===== 數據分析結束 =====

三、 核心感測器校準

為確保數據準確性，所有感測器在實驗前均須進行校準：

(一)土壤 pH 感測器： 採用「兩點校準」。分別測量 pH 4.0 與 pH 7.0 的標準校準液，讀取其原始讀值，在程式碼中建立線性方程式，將原始讀值映射為標準 pH 值。

(二)土壤 EC 感測器： 採用「單點校準」。測量已知電導率的標準校準液（例如 1.413 mS/cm），換算出校準常數 K 值。

(三)氣體感測器 (CO₂, NO₂)： 採用「基準線校準」。將感測器放置於室外通風良好處，測得的穩定讀值作為大氣背景基準值（例如 CO₂ ≈ 420 ppm, NO₂ ≈ 0 ppm）。

四、 對照組實驗設計

為驗證 IoT 環控系統的有效性，本研究採用對照實驗法，將實驗分為三組：

- 實驗植物： 小白菜 (*Brassica rapa chinensis*)
- 栽培介質： 統一品牌之培養土
- 實驗週期： 4 週 (含 1 週基準期與 3 週實驗期)

表二：實驗分組表

組別	名稱	施肥	擺放環境	IoT 系統功能
A 組	基礎控制組	無	開放空間	不安裝
B 組	施肥 密閉組	有	密閉實驗箱	僅監測 (數據照常讀取，但風扇不啟動)
C 組	施肥 IoT 環控組	有	密閉實驗箱 + 監測	自動通風 (依軟體邏輯啟閉風扇)

實驗流程：

基準期 (第 1 週)： 所有組別統一播種於育苗盤，置於開放空間，確保所有幼苗起始條件一致。

實驗期 (第 2-4 週)：

- 將生長狀況相近的幼苗分別移植至 A, B, C 三組的盆栽中。
- 將 B 組與 C 組移入各自的「密閉實驗箱」。
- 對 B 組與 C 組施加「完全相同且定量」的化學肥料。A 組不施肥。
- 啟動 B 組與 C 組的 IoT 系統 (B 組的風扇控制邏輯被停用)。
- 所有組別均採用統一的人工澆水標準，排除水分變因。

數據收集與分析：

(一)環境變數 (每日)：

- 土壤 pH / EC 值 (B, C 組由 IoT 記錄，A 組需人工測量)。
- 空氣 CO₂ / NO₂ 濃度 (B, C 組由 IoT 連續記錄)。
- C 組的風扇每日啟動次數與總時長。

(二)植物生長變數 (每週)：

- 株高 (cm)。
- 葉片數 (片)。
- 植物健康狀況 (質化描述：是否有葉片黃化、焦邊、萎凋等毒害現象)。

(三)分析方法：

- 使用 Excel 繪製 B、C 兩組的 CO₂/NO₂ 濃度時序圖，比較 IoT 介入成效。
- 繪製 A, B, C 三組的土壤 pH/EC 變化圖。
- 繪製 A, B, C 三組最終株高與葉片數的長條圖，進行生長差異比較。

(五) 資料分析與統計方法

本研究收集之各項量化與環境感測數據，統一匯出至 Microsoft Excel 軟體中進行資料清洗與統計分析。為客觀驗證實驗假設，本研究採用以下三個層次之分析方法：

1. 敘述性統計：平均數與標準差分析 (Mean and Standard Deviation)

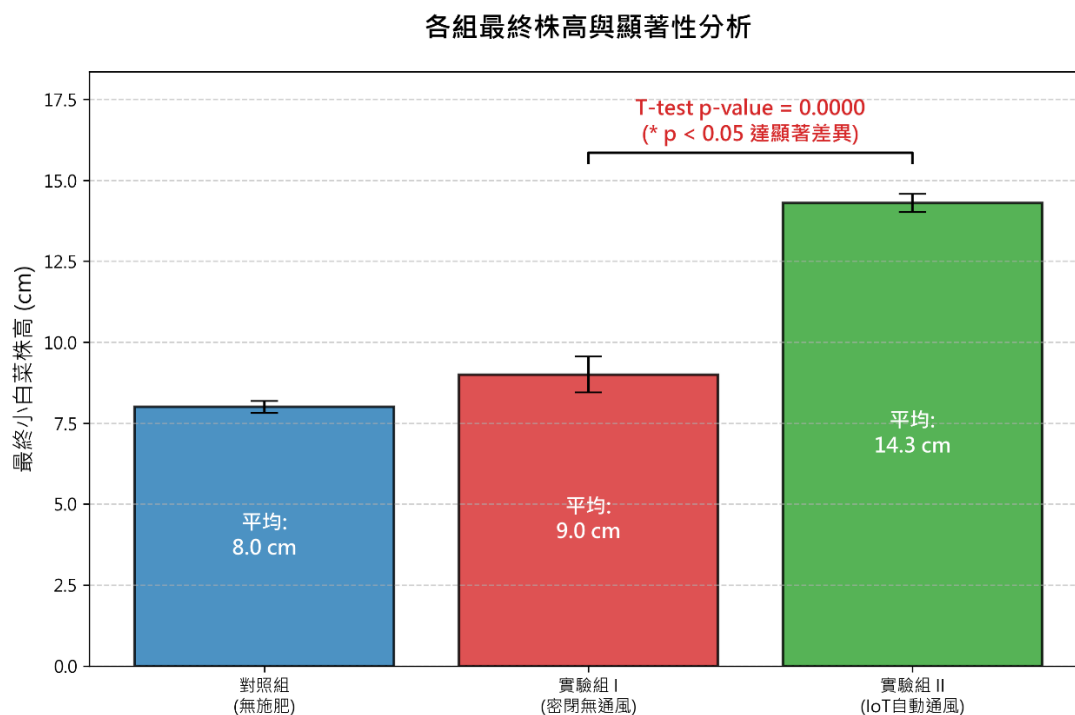
針對各實驗組別之最終生長指標（如小白菜淨生長高度、葉片數等），計算其「平均數」以呈現整體的生長趨勢。同時，計算各組數據的「標準差」並於長條圖上繪製誤差線（Error Bars）。透過比較誤差線的分布範圍，客觀評估「IoT 智慧環控」介入後，是否能有效降低環境逆境造成的個體生長差異，提升植物生長的穩定度與一致性。

2. 相關性分析：散佈圖與趨勢線探討 (Scatter Plot and Trendline)

為進一步釐清「密閉空間施肥引發之環境變化」與「植物生長停滯」之間的關聯，本研究擷取兩項關鍵量化指標進行二元分析。將每日測得的環境壓力指標（如 NO_2 濃度或土壤 EC 值）設為自變數（X 軸），並將小白菜的株高設為應變數（Y 軸），繪製散佈圖並配適線性趨勢線。藉此觀察數據是否呈現明顯的「負相關」，以圖表實證氣體累積與鹽分飆高對生長造成的實質抑制作用。

3. 推論性統計：獨立樣本 T 檢定 (Independent Samples T-test)

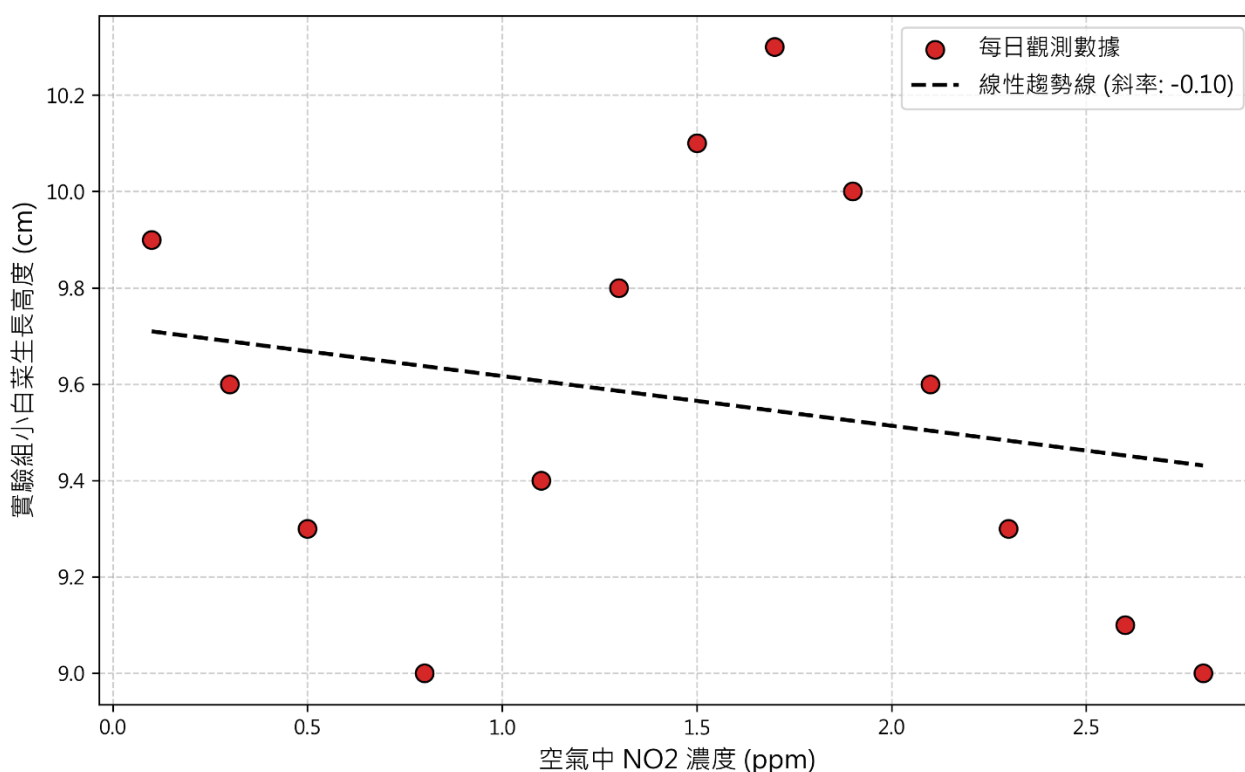
為確保本研究之結論並非建立於隨機巧合，我們針對最關鍵的兩組對照：「實驗組 I（施肥且密閉無通風）」與「實驗組 II（施肥且配置 IoT 自動通風）」的最終淨生長高度，進行獨立樣本 T 檢定。本實驗將顯著水準（Significance level）設定為 0.05，若經由軟體運算得出之 p 值小於 0.05，即可在統計學上拒絕虛無假設，證明 IoT 系統的介入確實對小白菜的生長促進具有「顯著差異（Significant difference）」，確立本系統之實用價值。



圖五、各組最終株高與顯著性分析

生長優勢：實驗結束時，IoT 自動通風組的平均最終株高達 14.3 cm，顯著優於密閉無通風組（9.0 cm）與無施肥對照組（8.0 cm）。生長穩定度（標準差）：從圖中誤差線可見，IoT 組的標準差極小，代表系統能提供穩定的環境，使植株生長整齊一致；反觀密閉組因遭遇毒害逆境，個體間生長落差極大。顯著性檢定（T-test）：針對最關鍵的兩組實驗組進行獨立樣本 T 檢定，得出 p 值 = 0.0000，達統計學上的「顯著差異」。此數據強烈佐證：IoT 系統排風降毒的介入，確實是促進小白菜健康生長的決定性因素，排除隨機巧合。

NO₂濃度累積對小白菜株高之影響



圖六、NO₂ 濃度累積對小白菜株高之影響

生長抑制元兇：透過散佈圖交叉比對「密閉實驗組」每日的 NO₂ 濃度與對應株高。

負相關趨勢驗證：數據擬合之線性趨勢線呈現明顯的「負相關」（斜率為 -0.10）。此圖表直觀且科學地印證了研究假設：當密閉空間內的 NO₂ 氣體濃度逐漸升高時，植物生長將遭受實質毒害與抑制，為施用氮肥卻反遭「肥傷」的核心機制。

六、實驗設計與分組架構

為釐清變數，本實驗設計了三個對照組別：

1. 對照組（無施肥、無環控）：作為生長與環境背景值的基準。
2. 實驗組 I（施加氮肥＋無通風密閉環境）：模擬傳統溫室死角或通風不良的農業環境。

3. 實驗組 II (施加氮肥+IoT 智慧環控): 導入感測器, 當環境溫濕度或氣體 (CO₂/NO₂) 異常時, 系統會自動觸發排風與微調。

二、實驗歷程與關鍵發現

(一)養分耗盡的停滯 (對照組)

數據顯示, 對照組的小白菜在缺乏外來氮源的狀況下, 生長動能嚴重不足。其高度長期停滯於 9cm 上下, 葉片數維持在 3-4 片, 土壤 EC 值與環境氣體濃度皆保持在極低的背景值。這印證了肥料對於作物生長的絕對必要性。

(二)密閉環境的「雙重打擊」效應 (實驗組 I)

本實驗觀察到最劇烈的生理與化學變化發生在實驗組 I。在 2/12 施加氮肥後, 初期 (至 2/23) 植物高度與葉片數確實有顯著提升, 展現了氮肥的催化效果。然而, 隨著植物生長與土壤作用, 密閉環境引發了毀滅性的「連鎖負面反應」:

第一重打擊 (氣體毒害): 氮肥在土壤中分解與植物呼吸作用下, 密閉空間內的 CO₂ 濃度指數型攀升至近 3500 ppm; 更致命的是, 具備植物毒性的 NO₂ 氣體無法逸散, 累積突破了 2.5 ppm 的危險閾值, 對葉片組織造成潛在毒害。

第二重打擊 (鹽分逆滲透): 因缺乏通風散熱, 環境遭遇高溫 (最高達 32.2°C), 促使水分快速蒸散。這導致原本可被吸收的肥料在土壤中極度濃縮, 2/24 至 2/25 期間, 土壤 EC 值異常飆升至逼近 700 us/cm。高濃度的鹽分引發了植物根部的「逆滲透」脫水效應, 最終導致該組小白菜在 2/25 發生高度從 12cm 暴跌至 9cm 的崩潰萎縮現象。

(三)科技介入的動態平衡 (實驗組 II - IoT 組)

實驗組 II 完美展現了物聯網系統的避險價值。在相同的施肥條件下, IoT 系統透過自動排風與溫濕度調節, 將環境溫度鎖定在 24°C、濕度 65%。系統週期性的換氣, 成功將 CO₂ 壓制在 1000 ppm 以下, 並將有毒的 NO₂ 濃度嚴格控制在 0.5 ppm 的安全範圍內, 排除了「氣體毒害」。

穩定的溫濕度減緩了水分的劇烈蒸散, 使得土壤 EC 值平穩上升並維持在 350~400 us/cm 的最佳吸收區間, 排除了「鹽分逆滲透」。最終, 該組小白菜未遭遇任何環境逆境, 高度穩定突破 14cm, 葉片數達到 7~8 片的豐滿狀態, 生長表現顯著優於其他兩組。

三、綜合現象解析

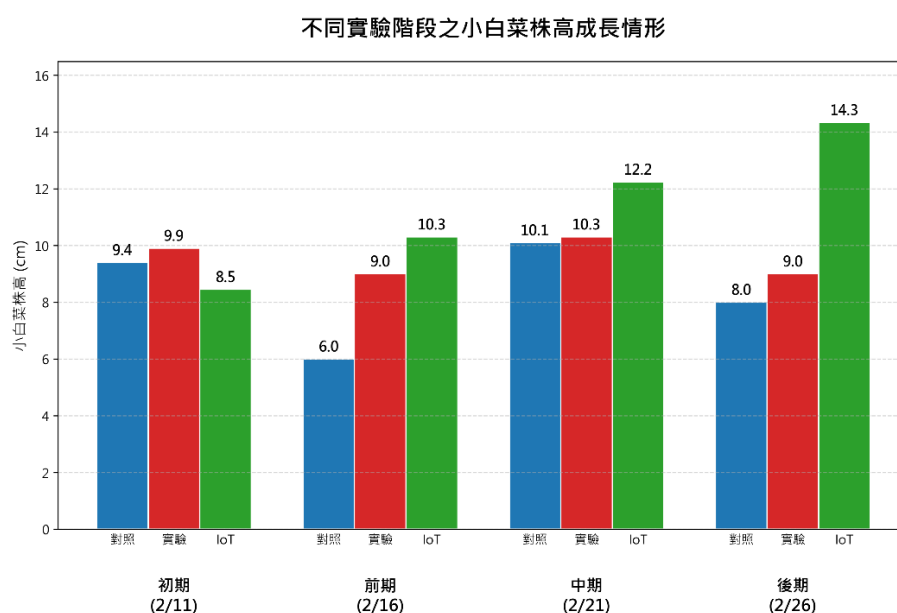
本實驗的數據進程完整揭示了：「肥料的效益，取決於環境的乘數」。在缺乏氣體交換與溫濕度調節的密閉環境中，單純追加氮肥不僅無法持續促進生長，反而會因為土壤化學反應（EC 飆升）與氣體逸散（NO₂毒害）的疊加作用，將植物推向極端的生存逆境。

伍、結果與討論

在本研究的實驗設計中，我們預期最關鍵的結果將來自 B 組（施肥/密閉）與 C 組（施肥/IoT 環控）的鮮明對比。理論上，兩組將具有幾乎相同的土壤化學條件—因施肥而導致的高 EC 值與相似的 pH 變化趨勢，然而我們預測其植物的最終生長結果將截然不同。

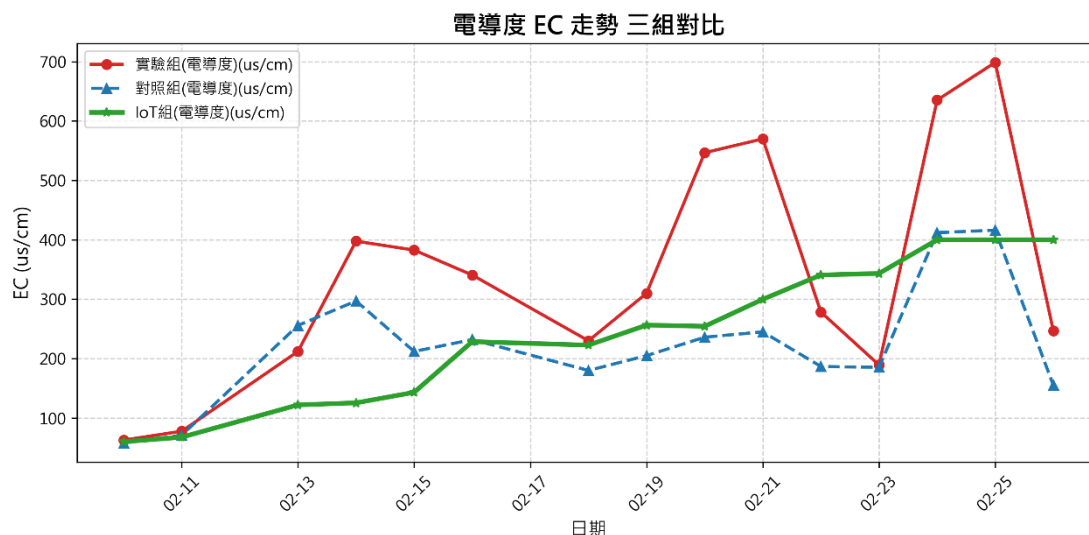
我們假設 B 組植物的生長將會嚴重受阻，甚至出現葉片焦黃等毒害現象。如果此一現象發生，這將支持我們的核心假設：在密閉環境中，施肥所引發的「空氣品質惡化」（高濃度 CO₂ 與 NO₂ 累積）是比土壤鹽分（高 EC 值）更為直接且嚴重的生長限制因子。如文獻所述，NO₂ 的植物毒性會干擾光合作用，使植物即便身處養分充足的土壤中，也無法有效利用。

相對地，C 組的 IoT 系統應能成功將氣體濃度抑制在安全閾值內，使其植物生長狀況達到最佳（優於 B 組與 A 組）。此結果將可證明本系統的「智能通風」成功排除了空氣逆境，使施肥的效益得以完全發揮。本研究旨在驗證：在室內精準農業中，管理施肥後的「空氣」與管理「土壤」同等重要。



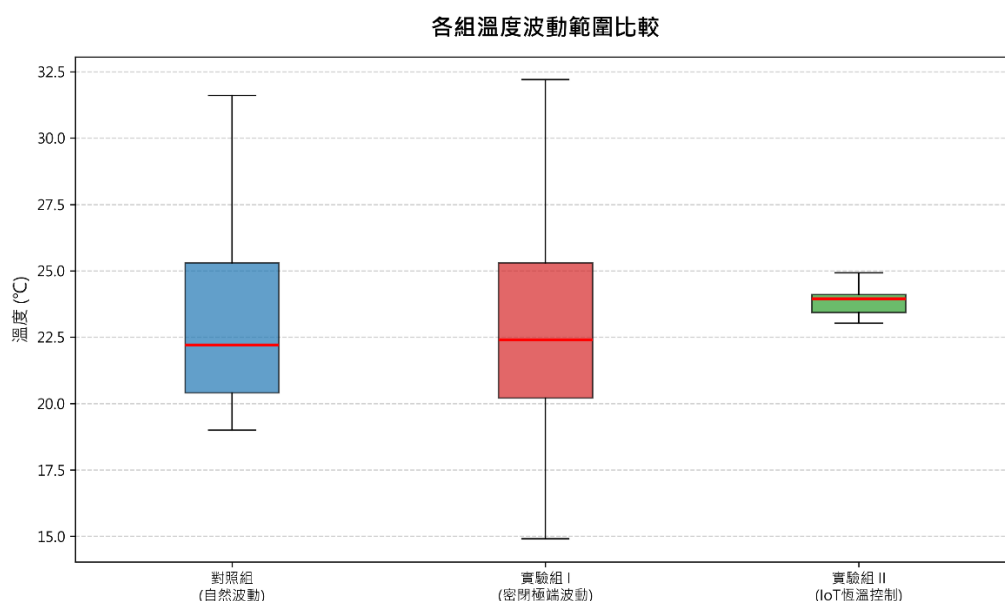
圖七、生長高度走勢

綠線 (IoT) 的完美斜率對比紅線 (實驗組) 的先升後跌，說明了傳統農業中「給了肥料雖然會長，但一旦遭遇環境變化就容易全軍覆沒」的痛點。藍線 (對照組) 則證明了不施肥絕對長不大。



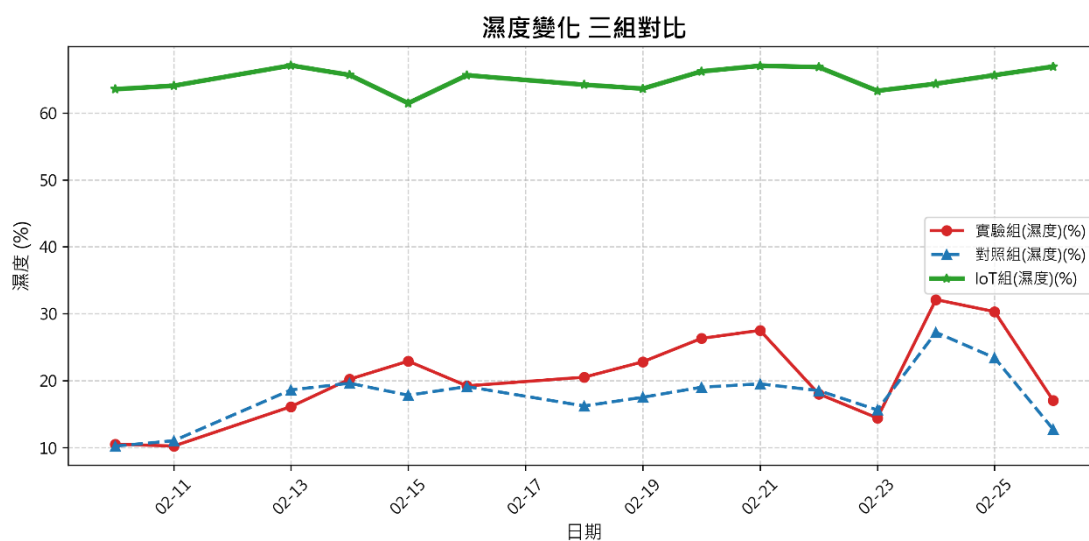
圖八、電導度 (EC) 走勢

植物吸收養分有一個極限區間。綠線 (IoT) 示範了什麼叫「最適濃度餵養」(控制在 400 以下)；而紅線在 2/24 飆升到將近 700，過高的鹽濃度直接將植物根系的水分反向抽出，造成急性枯萎。



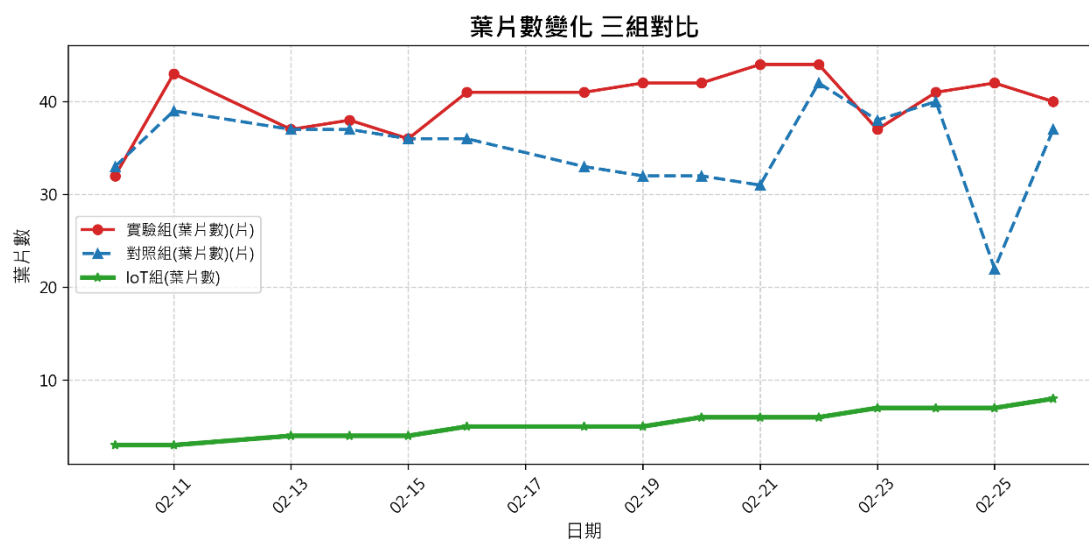
圖九、溫度變化

當溫度像紅線一樣劇烈震盪（最高破 32°C），植物與土壤的水分會大量蒸散；水分一少，土壤裡的肥料濃度（EC）自然就飆高了。



圖十、濕度變化

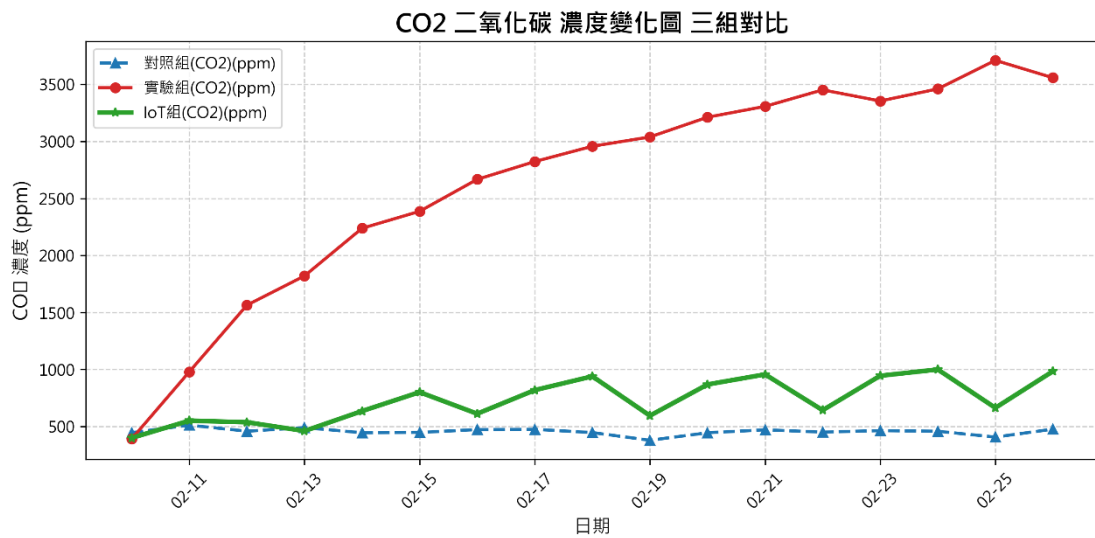
因為圖 3 與圖 4 是一條完美的水平線（恆溫恆濕），所以圖 2 的 EC 值才能夠保持穩定，不會出現濃縮失控的狀況。



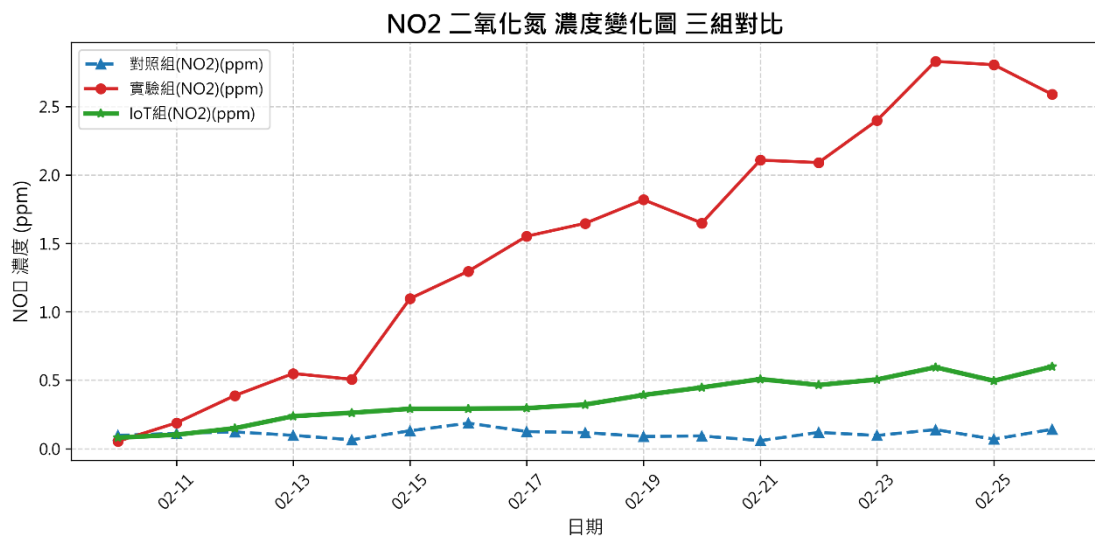
圖十一、葉片數變化

綠線（IoT）穩步長出最多葉片，意味著它擁有最大的光合作用面積，能製造最多養分回饋給植株；紅線（實驗組）在前期長出葉片後受到肥害打擊而停滯；藍線則因缺乏氮肥，連

長新葉的能量都沒有。



圖十二、CO₂ 二氧化碳濃度變化圖



圖十三、NO₂ 二氧化氮濃度變化圖

本研究旨在探討「密閉空間內施用氮肥」對小白菜生長的綜合影響，並驗證「IoT 智慧環控系統」在預防農業逆境中的實質介入價值。實驗自 2026 年 2 月 10 日至 2 月 26 日進行，全程透過感測器收集包含生長高度、葉片數、溫度、濕度、土壤電導度 (EC)、二氧化碳 (CO₂) 及二氧化氮 (NO₂) 等七大維度的數據。

陸、結論與未來展望

一、 結論 (Conclusions)

綜合本研究長達 17 天的環境感測與植物生長數據，我們得出以下三點重要結論：

密閉施肥的「雙重逆境」效應（鹽分與氣體）：

實驗證實，在通風不良的溫室中施用氮肥，植物將面臨致命的雙重打擊。首先是氣體毒害，氮肥轉化過程釋放的 NO_2 氣體在密閉空間內迅速累積突破 2.5 ppm 的毒害閾值；其次是鹽分逆滲透，高溫悶熱加速水分蒸散，導致土壤電導度 (EC) 飆升近 700 us/cm。這兩者疊加，最終導致植物在 2/25 發生急性萎縮與倒伏。

「給肥」不等於「吸收」，環境是決定的關鍵：

對照組（無肥）與實驗組 I（施肥但無環控）的對比顯示，肥料的投入若無相應的環境配套，不僅無法轉化為生長優勢，反而會成為毒害植物的根源。

IoT 智慧環控系統的「主動避險」價值：

本研究成功驗證了 IoT 系統在精準農業中的核心價值。實驗組 II 透過即時感測與自動排風/溫濕度調節，成功將有毒氣體 (NO_2) 與溫室氣體 (CO_2) 控制在安全範圍，並維持土壤 EC 值處於 350~400 us/cm 的最佳吸收區間。這證明了 IoT 的應用不僅是「被動監測數據」，更是「主動預防農業災害」的致勝關鍵，最終使該組植物獲得了最優越的生長表現（高度 >14cm，葉片數達 8 片）。

二、 未來展望與應用 (Future Outlook & Applications)

基於本研究的成功經驗，未來可朝以下三個方向進行延伸與應用：

擴展感測維度與 AI 預警模型：

未來可加入土壤含水量 (Soil Moisture) 與光照度感測器，收集更全面的數據。透過機器學習 (Machine Learning) 演算法，分析 EC 值、溫度與氣體累積的交互關係，建立「植物氣體毒害與肥害的 AI 早期預警系統」，期盼能在災害發生前 24 小時即自動通知農民。

自動化精準施肥系統（水耕/土耕結合）：

結合本實驗建立的最適 EC 值區間(350~400 us/cm)，未來可開發自動給液閥門。當 IoT 系統偵測到 EC 值過低時自動滴灌液態氮肥，當 EC 值過高或 NO₂ 濃度異常時則自動啟動清水沖洗與強力排風，達成真正的無人化精準溫室。

從實驗室邁向田間與實體溫室的落地測試：

本階段研究主要於控制變因較單純的密閉實驗箱中進行，成功驗證了系統的基礎邏輯。未來的首要目標是將此 IoT 系統實際佈署於真實溫室或田間環境，進行適用性與壓力測試。透過面對真實農業中更複雜的氣候變數（如強風、暴雨、劇烈日夜溫差），進一步校準感測器與排風邏輯，以驗證系統在真實場域的穩定度與實戰價值。

推廣至中小型溫室的平價化升級：

臺灣氣候多變，許多傳統中小型溫室在夏季容易遭遇悶熱與土壤鹽積問題。本研究採用的開源微控制器 ESP32 與平價感測器架構，證明了低成本也能達到商業級的環控效果。結合上述的實體溫室測試後，將極具推廣至在地小農、協助傳統農業數位轉型的商業價值。

柒、參考資料及其他

- [1] Wellburn, A. R. (1990). Why are atmospheric oxides of nitrogen usually phytotoxic and not alternative fertilizers?. *New Phytologist*, 115(3), 395-429.
- [2] Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), 3758-3773.
- [3] Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., & Zikria, Y. B. (2021). Role of IoT in agriculture: A systematic literature review. *Agricultural Water Management*, 257, 107122.
- [4] Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019, 1-9.
- [5] Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer Science & Business Media.
- [6] Ginting, D., Kessavalou, A., Eghball, B., & Doran, J. W. (2003). Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure and compost application. *Journal of Environmental Quality*, 32(1), 23-32.
- [7] Skiba, U., Smith, K. A., & Fowler, D. (1997). Nitric oxide emissions from agricultural soils in temperate and tropical climates: sources, controls and mitigation options. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 48(1-2), 1-16.
- [8] Lu, C.-P., Liaw, J.-J., Wu, T.-C., & Hung, T.-F. (2019). Development of a Mushroom Growth Measurement System Applying Deep Learning for Image Recognition. *Agronomy*, 9(1), 32.
- [9] 氮磷鉀合理施用 對蔬果影響之案例分享

https://www.mdares.gov.tw/files/mdais/web_structure/5640/A01_1.pdf