

Arduino低成本開發板於光合作用測量的應用及展望¹

李昱錡^{2*}

摘 要

光合作用是植物將光能轉換為化學能的重要生理過程，直接影響作物生長與產量。隨著全球人口增加及氣候變遷帶來的挑戰，提高植物光合作用效率成為迫切需求。然而，目前常用的光合作用測量設備價格昂貴且操作複雜，限制了研究與應用發展。近年來，隨著低成本微控制器開發板（如Arduino）及各類感測器的普及，發展客製化、自組裝的監測系統成為替代昂貴設備的新趨勢。Arduino因具備經濟性、穩定性及開源特性，廣泛應用於能源、教育及農業領域，但在植物光合作用研究方面的整合資訊仍較缺乏。本文回顧光合作用之生理意義、環境影響及常用測定技術，並探討Arduino於光合作用測量系統中之應用與發展，期望提供未來植物生理研究與農業應用之參考，提升作物對氣候變遷的適應能力，並促進農業永續發展。

關鍵字：智慧農業、感測器應用、植物生理環境調控、遠端監測系統

前 言

光合作用(photosynthesis)是植物賴以維生的重要生理過程。由於光合作用的效率直接影響植物的生長速率與產量，因此，準確評估光合作用能力對於植物生理研究、作物改良及農業生產管理均具有重要意義(Black, 1973)。

全球人口持續成長，但在氣候變遷的嚴峻挑戰下，適合農業栽植的土地卻逐漸減少。因此，為了滿足日益增加的人口糧食需求，需要提升植物光合作用和生產力(Hussain *et al.*, 2021)。而於實驗室條件下進行良好設計的研究，仍需透過田間試驗以驗證植物在實際環境中的生理反應。目前，農業研究普遍依賴商業化或試驗等級之環境監測及測量設備，以進行數據蒐集，但上述設備價格昂貴，且操作與學習門檻高，成為限制研究發展的因素之一(李, 2024)。因此，發展低成本、易於操作且具備一定準確度的替代方案，

¹農業部臺中區農業改良場研究報告第 1100 號。

²農業部臺中區農業改良場助理研究員。

*通訊作者：李昱錡，Email: klyc1512@tcdares.gov.tw

成為植物生理研究與農業應用領域的重要需求。

隨著低成本微控制器(microcontroller unit)開發板的普及，結合各種外部感測器，能夠提供客製化的自組監測系統，逐漸成為替代昂貴商業設備的趨勢(Al Hamwi *et al.*, 2024; Smith *et al.*, 2019; Wünsche & Palmer, 1997)。其中，具備高經濟效益與穩定監測能力的「Arduino」開源(open-source)軟硬體備受關注。Arduino 開發板由義大利 Arduino 開源公司設計製造，已廣泛用於能源工業、教育教學、物聯網及空汙監測(Chojer *et al.*, 2020; Kondaveeti *et al.*, 2021)。

儘管 Arduino 開發板已在農業領域被應用於精準農業的設計與開發，但目前仍缺乏光合作用測量相關應用文獻的綜整資訊。有鑑於此，本文聚焦於光合作用之生理意義、環境影響及常用測定技術，並回顧近年 Arduino 於影響光合作用環境因子調控方面的發展，探討低成本開發板於光合作用測量系統中所扮演的角色，以期提供未來研究及應用之參考。

一、植物光合作用之重要性及其測定

光合作用是植物利用光能將無機碳固定為有機碳的生理過程。植物細胞內的葉綠體可利用太陽光能解離水分子，釋出氧分子、氫質子與電子，並經由電子傳遞鏈的過程，將光能(電子)轉換為化學能(NADPH 與 ATP)，進而進行卡爾文循環(Calvin-Benson cycle)並合成有機碳，作為植株能量及碳骨架的來源(Black, 1973)。因此，光合作用效率可透過多種調查指標進行評估，包含葉綠素螢光(chlorophyll fluorescence，代表電子傳遞鏈活性)、酵素代謝、二氧化碳消耗(氣體交換)及有機碳累積程度(卡爾文循環)等(Hussain *et al.*, 2021)。

除了光照外，環境因子如大氣溫度與葉片溫度亦顯著影響光合作用相關酵素代謝速率(Sharma *et al.*, 2020)。當植株長時間處於合適溫度後，提高環境溫度會降低卡爾文循環中關鍵酵素「核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶」(ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, Rubisco)對二氧化碳之親和性，增加光呼吸(photorespiration)，並累積活性氧化物(reactive oxygen species)，進而破壞光化學反應(Ehleringer, 2006; Sharma *et al.*, 2020)。相反地，低溫環境則可能影響葉綠體對磷酸根的吸收與轉運，抑制植株光合作用速率(Ehleringer, 2006)。

目前，利用氣體交換方式量測植物光合作用之方法，可根據氣體流動方式分為密閉式(closed-flow, or recirculatory)與開放式(open-flow)兩種光合作用測量系統(gas exchange/photosynthesis system) (Flore & Lakso, 1989)。密閉式系統因內部氣體循環與固

定空間內，容易受到調查環境之溫濕度、二氧化碳濃度快速下降及植物生理狀況，影響測量準確度；相較之下，開放式系統則提供單一方向之穩定氣流(正壓)，避免外界氣體混入系統內部，而有長時間監測優點及準確的測量結果(李，2024; Garcia *et al.*, 1990; Hunt, 2003)，影響開放式系統測定結果的關鍵因素，則包含氣體流量、槽室內溫度、相對濕度及二氧化碳濃度。

二、低成本微控制器開發板之需求與應用

為有效監測環境變化及植物生長表現，並適時調整栽培條件以提升農產品品質與生產效率，科學研究與農業生產需借助精準的監測儀器。然而，多數商業化或試驗等級之環境監測及測量設備(如 LI-6400, LI-COR Inc., USA; LCI-T, ADC BioScientific Ltd., UK)價格昂貴，且操作與學習的門檻較高(經費、時間)，限制研究的靈活性與普及性(李，2024)。為因應不同試驗需求與試驗材料的多樣性，近年來，各種客製化的自組監測系統逐漸被發表(Smith *et al.*, 2019; Wünsche & Palmer, 1997)。其中，透過微控制器及外部感測器，建構低成本、客製化的測量工具已成為新興趨勢(Al Hamwi *et al.*, 2024)。此外，微控制器的低功耗特性，使其在電子製造業廣泛應用於嵌入式系統(Kondaveeti *et al.*, 2021)。

在眾多開源平台(open-source platform)開發板中，Arduino 與 Raspberry Pi (樹莓派)之微控制器具備高重複使用性、成本效益(Cressey, 2017)及穩定可靠的性能，而受到廣泛的青睞(Kondaveeti *et al.*, 2021)。此兩個網路平台分別自 2005 年及 2012 年推出，均提供開源軟體及硬體，使用者可依需求調整程式與硬體配置(Bonaccorsi & Rossi, 2003)。在價格方面，基礎型 Arduino 開發板最低約新臺幣 166 元，若搭配電源供應、外殼及線材等配件，整體成本約新臺幣 2,075 元(Cressey, 2017)。相較之下，樹莓派開發板最低購置成本約需新臺幣 222 元，搭配電源供應、螢幕、鍵盤及滑鼠等基礎配備，整體成本約合新臺幣 4,736 元(Jolles, 2021)。兩者之間，Arduino 開發板的微控制器包含 8 位元中央處理器，適合執行簡單任務，開發小型原型(prototyped)設計專案，樹莓派開發板則為小型電腦，具有 64 位元的中央處理器，可用於處理大量資料的複雜任務，兩者微控制器簡要差異整理如表一。

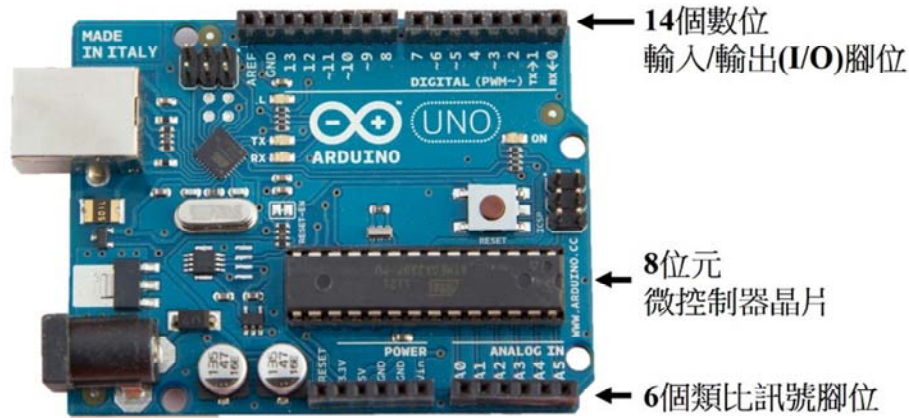
表一、Arduino 開發板及 Raspberry Pi (樹莓派)開發板簡要差異

Table 1. Brief differences between Arduino and Raspberry Pi development boards¹

Comparison parameter	Arduino	Raspberry Pi
Central processing unit	Atmel (8-bit)	ARM (64-bit)
Operational voltage	5 V	5 V
Input voltage	Maximum of 12 V	5.1 V
Digital I/O pins	14	13
Analog input pins	6	27
RAM	2 KB (ATmega328)	1 GB
Flash memory	32 KB (ATmega328)	32 GB (eMMC)
Minimum Price	166 NTD	222 NTD

¹after Cressey (2017), Jolles (2021), and Kondaveeti *et al.* (2021).

以 Arduino UNO Rev3 開發板為例(圖一)，其核心為 8 位元微控制器晶片 (ATmega328, Atmel Corp., USA)，內建 14 個數位輸入/輸出(I/O)腳位及 6 個類比訊號腳位，其中 6 個數位腳位支援脈衝寬度調變(Pulse Width Modulation, PWM)輸出。Arduino 以 C++ 程式語言為基礎進行程式開發，透過 Wiring 語法及整合開發環境(integrated development environment)來撰寫、編譯與上傳程式碼，並可以免費使用與修改程式。Arduino 開發板具備高度的精準度，可透過 I/O 腳位控制各類感測器，並可將程式碼儲存到開發板的 EEPROM，使開發板能獨立運行而無需外部電腦介入。Arduino 支援物聯網(Internet of Things, IoT)運用，因此能實現自動化控制、遠端數據收集與分析(D'Ausilio, 2012; Kondaveeti *et al.*, 2021; Patnaik Patnaikuni, 2017)。



圖一. Arduino UNO Rev3 開發板。

Fig. 1. Arduino UNO Rev3 development board.

然而，Arduino 開發板在實務應用上仍有部分限制。例如，使用者所編寫的程式碼通常包含預設的程(函)式庫，這些額外的程式碼可能佔用微控制器的快閃記憶體(flash memory)，導致系統記憶體空間資源不足，而使程式碼無法順利運行。因此，當系統需要連接其他外部裝置時，仍需要進一步優化與簡化程式碼，以提高微控制器的運行效率(李，2024)。值得注意地，低成本感測技術須進行校準與驗證，以提高數據可靠性(Chojer *et al.*, 2020)。目前市面上最受使用者青睞的 Arduino 開發板包括 Arduino UNO、Arduino Due、Arduino Mega 及 Arduino Nano (Kondaveeti *et al.*, 2021)，適用於不同試驗規模與需求的開發環境，提供低成本智慧監控模組更靈活的選擇。

近年，隨著低成本開發板與 IoT 感測技術的發展，將其應用於光合作用測量系統有助於降低監測成本，提升農業生產現場的應用潛力，並為光合作用生理研究與農業管理提供更具經濟效益的解決方案。

Arduino 開發板於光合作用評估之應用

外接與 Arduino、樹莓派等開源開發板相容的多種感測器，可實現多功能、自組式系統的可能性。其中，應用於光合作用測定的環境調控，涵蓋光線測定、二氧化碳測定、氣體流量控制及溫度與水分管理等領域。

一、光照調控

太陽輻射產生的光譜中，人眼可見光波段通常介於 380-760 nm 之間，而影響植物光合作用的有效光譜範圍(400-700 nm)能量，稱為光合有效輻射(photosynthetically active radiation)。光子通量密度(photosynthetic photon flux densities)則是評估植物光合作用表現的重要環境指標，表示單位時間內植物表面積上光合有效輻射的能量(陳，2012)。

目前市售的光合有效輻射感測器價格昂貴，成本約新臺幣 12,000-15,000 元(Dong & Hansen, 2024)，主流儀器如 LI-190R (LI-COR, Inc., USA)通常需要搭配 LI-6400 光合作用測量系統或 LI-1500 紀錄器，才能有效評估 400-700 nm 光譜範圍的能量。然而，此類設備的整體價格高昂(可達 70,000 元)，更加局限研究人員及農民於田間使用的可行性。

近年，透過 Arduino 開發板(Pro Mini, USA)搭配 micro SD 記憶卡，並運用通用互導放大器(universal transconductance amplifier)，增加 LI-190SA 光合有效輻射感測器的訊號後，試驗顯示該系統所測得的光合有效輻射數值與標準儀器相近($y = 0.99x - 14.84$)，其單日光合有效輻射平均差異僅 3.49%。而該系統可將光合有效輻射感測及紀錄模組的成本大幅降低到新臺幣 20,550 元(Barnard *et al.*, 2014)，成為市售高單價模組的替代方案。

此外，為提供低成本、高效的光合有效輻射感測器取代方案，研究團隊利用 Particle Boron 開發板(San Francisco, CA, USA)搭配與 Arduino 開發板相容之 SI 1145 可見光感測器 (Adafruit Industries, USA)進行田間試驗(Dong & Hansen, 2024)，數據顯示 SI 1145 所測得的光合有效輻射數值與 LI-190R 之間具有高度相關性($R^2 = 0.961$)，顯示該系統可做為評估植物在不同光照條件下光合作用表現之有效工具。

儘管田間試驗是釐清環境變因影響植物生長的重要步驟，然而，面對氣候變遷導致的天氣變化，難以預測田間試驗過程產生的變數。因此，試驗初期可以透過控制溫度、水分及營養條件等生長環境，以評估植物生育表現。目前大部分的 LED 或螢光燈設備可配備調光電源(Caracciolo *et al.*, 2024)，倘能模擬自然光的單日動態變化，將有助於釐清植物在自然環境中的生理機制，藉此提供栽培管理的參考依據。

透過開發板微控制器輸出的 PWM 工作週期(duty ratio，即脈衝信號高電平持續的時間與脈衝週期的比值)，再結合電阻及光耦合器(電氣隔離)，可調節 LED 光源的恆定電流量(constant current reduction)，進而改變 LED 光輻射量的強度。因此，利用與 Arduino 開發板相似的樹莓派開發板，以 Micropython 撰寫程式，調整 PWM 工作週期可有效模擬單日光照變化(Caracciolo *et al.*, 2024)。綜上所述，開發板搭配適當的感測器及電子零組件，可望提供低成本、高效能的光合作用測定模組，大幅降低高單價科學儀器的使用

限制。

二、二氧化碳測定

Arduino 開發板具備 IoT 功能，可控制、讀取並記錄槽室內二氧化碳濃度變化 (González-Buesa & Salvador, 2019)；槽室的大小則取決於試驗的目的及環境需求。透過 Arduino 開發板控制繼電器，可啟動電磁閥並搭配抽氣幫浦，進行氣體取樣。以 670 mL 組織培養盒內進行氣體取樣為例，經過開發板控制氣體取樣後，LI-840 紅外線氣體分析儀(infrared gas analyzer, IRGA, LI-COR Inc., USA)可即時監測二氧化碳濃度變化(Lee *et al.*, 2023)。該系統能長時間監測(Calzadilla *et al.*, 2022; Long *et al.*, 1996; Tusi & Shimazu, 2020)不同水分逆境條件之培養環境，對紅龍果(*Hylocereus polyrhizus*)組織培養瓶苗光合作用的影響，結果顯示維持良好的介質水分潛勢有助於光合作用速率表現(Lee & Chang, 2024)。

低成本二氧化碳感測器的應用亦逐步發展，例如使用 K30 感測器(Senseair Co., Sweden)監測 432 L 槽室內的二氧化碳濃度，結果顯示其測量數據與 LI-850 分析儀(IRGA, LI-COR Inc., USA)的讀值誤差不到 1.5% (Al Hamwi *et al.*, 2024)，顯示該感測器具備良好的測量品質。

隨著溫室氣體(greenhouse gas, GHG)排放導致氣候變遷問題加劇，水田的甲烷及一氧化二氮等 GHG 的排放監測成為關注焦點，其中二氧化碳排放亦為重要的參考指標 (Bonilla-Cordova *et al.*, 2024)。目前大田作物氣體排放的監測方法包含密閉罩法(chamber method)及渦流協變法(eddy covariance method, EC)，然前者儀器設備價格高昂，後者則存在操作及取樣點選擇困難等問題(許，2023)。因此，利用 MH-Z19B 二氧化碳氣體感測器(Winsen Electronics Technology Co., Ltd., China)搭配 Arduino DUE 開發板，可即時量測 250 L 密閉槽室的二氧化碳濃度。試驗結果顯示，當在測量前 30 分鐘啟動內循環風扇以均勻內部氣體分布，該系統與傳統密閉罩法及 EC 量測結果相似，可做為田間監測二氧化碳濃度的替代方案(Bonilla-Cordova *et al.*, 2024)。

目前，大多數二氧化碳感測器採用非色散式紅外線(non-dispersive infrared, NDIR)氣體偵測技術(Chojer *et al.*, 2020)。經過精細校準後，常見的 NDIR 感測器可以提供不確定度 ≤ 0.1 ppm 的精確讀值，且具備反應時間短、無毒性及操作簡單等特點 (Hummelgård *et al.*, 2015)，適合作為動態監測二氧化碳濃度的良好選擇(Levintal *et al.*, 2021)。其中，LI-840 及 LI-850 為 LI-COR 公司開發之實驗級 NDIR 氣體分析儀，廣泛用於監測全冠(whole canopy)植物二氧化碳氣體交換(Alterio *et al.*, 2006; Douthe *et al.*,

2018)。然而，該儀器體積(約 $22 \times 15 \times 7.5$ cm)及重量(約 1 kg)較大，不適合用於攜帶式系統，亦不利於與其他設備一同攜帶或頻繁移動。因此，在考量可攜帶式系統的便利性時，須尋找可替代傳統 IRGA 之二氧化碳感測器，以便整合系統於田間監測系統(Lee *et al.*, 2023)。

小型感測器如 CO₂ Engine BLG、K30 等 Senseair 公司開發的感測器(0-2,000 ppm)，可直接測定槽室內二氧化碳濃度變化，提供連續監測與簡便操作的優勢(Blackstock *et al.*, 2019; Chojer *et al.*, 2020; González-Buesa & Salvador, 2019; Levintal *et al.*, 2021)。此外，MH-Z19 (0-5,000 ppm; China)及 CM1107 (0-5,000 ppm; China)氣體模組亦具備高精度測量能力(Jo *et al.*, 2022; Lapshina *et al.*, 2019)，提供微控制器穩定監測二氧化碳濃度的依據。

三、氣體流量控制

氣體流量(即單位面積之氣體流速)是開發開放式光合作用測量系統時的重要考量因素，適當的氣體流量可在固定槽室空間內，降低內外溫度差異並擴大二氧化碳濃度差異(Smith *et al.*, 2019)，以期確保試驗環境與外界條件相近。

氣體流量的調控對植株生理狀態影響顯著：當氣體流量過低，會導致槽室內溫濕度升高、降低二氧化碳分布，進而抑制植株生長；相反地，若氣體流量過高，則導致植株氣孔關閉，而低估氣體交換能力(Heo & Kozai, 1999; Hunt, 2003; Zobayed *et al.*, 2000)。適當的氣體流量能控制槽室內外溫差小於 3°C，降低溫室效應並提升測量準確性(李，2024; Corelli-Grappadelli & Magnanini, 1993; Wünsche & Palmer, 1997)。此外，適當的通氣(ventilation)亦有助於減少槽室內水汽凝結，避免低估植株的蒸散速率(Garcia *et al.*, 1990)。

氣體流量除了影響槽室內氣體均勻分布及溫度累積(Burkart *et al.*, 2007; Corelli-Grappadelli & Magnanini, 1993; Hunt, 2003)，其變化也影響蘋果(*Malus domestica*) (Wünsche & Palmer, 1997)與甜櫻桃(*Prunus avium*) (Whiting & Lang, 2001)植株之氣體交換效率，及影響加工葡萄(*Vitis vinifera*)的果實品質(Smith *et al.*, 2019)。於實際應用上，利用 Arduino UNO 開發板之 PWM 訊號，調控葡萄槽室風扇的速度，如將白天 PWM 信號設置工作週期為 25%，使白天氣體流量為每分鐘交換 2.2 個室內體積，夜間則調降至 10%，使氣體流量降為每分鐘交換 1.3 個室內體積，可有效維持試驗期間日均溫度上升 1.4°C 以內(Smith *et al.*, 2019)。透過該新系統的開發，維持合適的生長條件，可確保葡萄果實品質符合葡萄酒生產的需求。

四、溫度與相對濕度管理

溫度對於植物營養與生殖生長影響深遠，不同作物對溫度的需求亦有所差異。當荔枝(*Litchi chinensis*)與龍眼(*Dimocarpus longan*)等無患子科(*Sapindaceae*)果樹的地上部葉片感測涼溫時，可促進花芽分化(Paull & Duarte, 2011)。相反地，當番茄(*Lycopersicon esculentum*)幼苗根系處於低溫環境時(10°C)，則會抑制光合作用並減少葉片生長(Zhang *et al.*, 2023)。

萵苣(*Lactuca sativa*)適合生長於涼溫環境，若根溫升高，將導致地上部生長量、鮮重及光合作用效率下降。因此，在氣耕(aeroponics)等無土栽培系統中，需要精準調控根圈溫度以確保生長表現。於日夜溫為 36/30°C 之栽培環境下，研究人員利用搭載 ESP8266 之 Node 微控制器開發板及 DHT11 溫濕度感測器(ASAIR Electronic Co., Ltd., China)，控制冷卻風扇以調控根圈溫度。試驗結果指出，該系統可維持根圈溫度在 28.7-29.2°C，相較之下，對照組的根圈溫度則為 29.5-31.5°C，低根溫不僅提高植物養分吸收，亦增加植物鮮重及碳水化合物含量(Mohamed *et al.*, 2022)。

另一方面，植株氣孔的開張程度(stomata aperture)亦影響其氣體交換效率(Graham & Nobel, 2005; Nobel & De la Barrera, 2002; 2004; Sánchez *et al.*, 2013)。當空氣相對濕度過高或過低時，皆會導致植株氣孔關閉，進而降低二氧化碳氣體交換量(Nobel, 1988; Rosado-Calderón *et al.*, 2020)。適當的蒸氣壓差(vapor pressure deficit)可以維持土壤-植物-大氣連續體的穩定性，使植株獲得充足的水分含量，以維持正常生長及代謝(Bartlett *et al.*, 2014; Levin & Nackley, 2021)。

研究人員利用 ESP32-WROOM-32 開發板模組，搭配 DHT22 溫濕度感測器、加濕器及繼電器開關，調控溫室內相對濕度維持在 80%-90%之間，穩定芥藍的光合作用，而其與室外最低相對濕度的差距可超過 20% (Abidin *et al.*, 2024)。此外，在 DHT11 溫濕度感測器監控下，透過 Node 微控制器開發板控制冷卻風扇啟動，能維持氣耕栽培之萵苣根圈環境在 94.1%-94.6 %的相對濕度。相較之下，若缺乏風扇調控，相對濕度則為 92.6%-94.2% (Mohamed *et al.*, 2022)。此結果顯示，低成本開發板結合 IoT，能有效維持栽培管理所需的環境穩定性，提供良好的生產管理效率。

Arduino 開發板之應用展望

一、氣候變遷對環境與植物生長的影響

氣候變遷對全球環境與植物生長造成顯著影響，並呈現於大氣溫度變化及增加極端天氣事件發生的頻率與強度。微軟(Microsoft)創辦人比爾蓋茲(Bill Gates)曾指出歷史上

的氣候變遷與溫度變化密切相關。例如，最近一次的冰河時期平均溫度只低於現今溫度 6°C ，而恐龍活躍時高溫潮濕的環境只高出目前氣溫 4°C ，當時鱷魚正棲息於現在的北極地區(Gates, 2023)。此對比凸顯全球氣溫變化對生態系統的影響。

事實上，全球溫度正逐年上升。聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)示警，若不積極減緩 GHG 排放，本(21)世紀末全球溫度將較工業化前(1850-1900 年)溫度上升 $1.5\text{-}2^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2023)，進一步加劇環境衝擊。然而，世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)於 2024 年 7 月發布一則重要報告指出，該年 6 月的全球均溫已超過工業化前月均溫 1.5°C ，並連續 13 個月達到或突破 1.5°C 的門檻(WMO, 2024)，顯示穩定溫度的目標已面臨嚴峻的挑戰。臺灣亦深受氣候變遷的影響，除了氣溫升高之外，降雨分布及降水量差異(precipitation deviation)亦日益顯著。根據氣象數據，2022 年的降水量相較過去 30 年平均表現增加 30%，降雨日數則減少 5-10 天(CWB, 2022)，進而影響植物營養生長及生殖生長。

氣候變遷造成全球暖化，其所產生之乾旱、強降水及淹水等極端天氣事件，進一步影響植物的生理機制。例如，水分逆境降低植物氣孔導度(stomatal conductance)，進而抑制氣體交換及光合作用，並降低根系吸收水分的能力(Calzadilla *et al.*, 2022; Hussain *et al.*, 2021; IPCC, 2023; Kapoor *et al.*, 2020)。此外，環境的溫度、濕度及光線變化，對植物生長發育及其光合作用效率產生直接影響，而 GHG 及水分的動態變化，則與植物、土壤及大氣的交互作用密切相關(Al Hamwi *et al.*, 2024; Bartlett *et al.*, 2014; Levin & Nackley, 2021)。合適的田間管理措施有助於緩解氣候變遷帶來的糧食安全風險(IPCC, 2023; Kapoor *et al.*, 2020; Ozturk *et al.*, 2021)，因此，透過 Arduino 開發板 IoT 技術，應用田間資訊並強化、即時調控栽培管理措施，將可期待農業的永續發展。

二、環境監測之智能工具需求評估

事實上，除了本文介紹的 Arduino 應用於光合作用測量系統外，為確保農業生產穩定，並有效調控溫度、水分及光照等環境因子，掌握其對植物的生長與發育的影響程度，以提高田間管理效率，具備田間即時監測與調控栽培環境能力的 IoT 技術，逐漸受到重視。

近年，農業智慧化應用的市場需求調查顯示，農業從業人員對環境監控系統的關注度最高。根據「台灣趨勢研究」針對稻作、雜糧、蔬果及花卉項目的智慧應用服務調查，約 53%-80% 的受訪者重視「監控系統」。該系統利用感測器即時回傳栽培環境數據，並

透過整合及連結管理設備，即時調控環境條件(李，2019a, b；李與謝，2019)。該系統不僅能節省工作者前往現場及監控的時間，亦提升管理效率。此外，約 31%-56%的受訪者認為「數據收集」亦為關鍵服務，可作為調整栽培條件的決策依據，以優化產銷管理。

若進一步從生產、倉儲、物流及銷售 4 大環節評估智慧工具的需求，調查結果顯示，目前僅有 12%-18%的受訪者於生產階段導入智慧工具，但 40%-68%的受訪者期待引入相關應用技術，以提升生產效率(李，2019a, b；李與謝，2019)。上述數據反映智慧農業技術在實際應用與市場需求之間仍存在顯著落差，主要障礙包含：對智慧工具的使用及應用缺乏了解、導入成本較高，以及現有技術難以支援現有產業需求。因此，低成本且具高度彈性的智慧監測工具仍具龐大市場潛力，應積極開發符合產業需求的智能解決方案，以促進農業數位轉型。

三、Arduino 開發板於氣候變遷下農業栽培管理之應用

在氣候變遷的背景下，植物面臨日益嚴峻的環境挑戰。如何降低植物因環境壓力導致的光呼吸及氣孔限制，提高植物對光能的利用效率及有機碳轉運能力，成為重要課題(Hussain *et al.*, 2021)。利用 Arduino 低成本開發板進行光合作用測量，可探討植物於不同逆境條件下即時的光合作用反應，為因應極端天氣變化提供參考。此外，低成本的 Arduino 開發板亦可用於灌溉管理及病蟲害監測等農業自動化技術，進一步提升生產效率(Ardiansaha *et al.*, 2020; Negrete, 2023)。

於灌溉管理方面，適當的田間水分管理可減緩氣候變遷帶來的栽培風險，提升作物對水分逆境的適應能力(IPCC, 2023; Kapoor *et al.*, 2020)。透過調節植物水分含量及光合作用，可改善田間植物碳同化(carbon assimilation)，提高作物產量並減緩農業碳排放(Jo *et al.*, 2022)。利用 Arduino UNO 開發板連接 SHT31 溫濕度感測器(Sensirion AG, Switzerland)，長期監測生長箱內植物蒸發散量(evapotranspiration)，以評估灌溉條件。測量結果顯示，SHT31 溫濕度感測器的測值與 LI-850 分析儀相比，其相關係數高達 0.98 (Al Hamwi *et al.*, 2024)，顯示其於田間試驗的可靠性。

相似的 Arduino 開發板模組也用於決策節水灌溉，如結合 DHT11 溫濕度感測器評估田間椰棗蒸發散量及需水量(Mohammed *et al.*, 2021)，也可透過重力法監測盆栽重量(Liyanage *et al.*, 2022)，當盆栽失重至預設閥值時，Arduino 開發板即發送訊號啟動電磁閥，進行精準灌溉。此技術可根據即時數據調整給水時機，進一步提升水資源利用效率。

在病蟲害管理方面，Arduino 開發板結合熱線矽感測器後，即時監測空氣濕度、溫

度及風速。根據監測數值，自動啟動風扇以調整葉片邊界層(boundary layer)厚度(Makhlouf *et al.*, 2016)，從而降低病害產生的機會。此類 IoT 技術減少病害對農作物的影響，為農業生產提供更智慧化的解決方案。

結 論

植物光合作用不僅是碳循環的關鍵過程，更直接影響作物的生長與農業生產效益。透過各項技術指標，如葉綠素螢光、酵素活性分析、氣體交換及有機碳累積測量，能有效掌握光合作用的效率與植株健康狀態。同時，環境因子如光照與溫度的變化亦影響光合作用的進行，因此必須加以監測與調控，以避免造成生理生化障礙等不利植物生長的影響。

在光合作用測定技術方面，開放式氣體交換系統因具備穩定且高準確度的特性，逐漸成為主流選擇。然而，商業化儀器價格昂貴且操作門檻高，限制了研究與農業現場的普及應用。近年來，隨著低成本開發板與 IoT 技術的興起，如 Arduino 及樹莓派等開源平台，為科學研究及智慧農業提供了新的契機。這些平台不僅具備高重複使用性與良好穩定性，且成本低廉，搭配外部感測器後，可建構靈活且符合需求的自組式監測系統。

Arduino 開發板以其開放性與易於客製化的特性，廣泛應用於光合作用測定相關的環境監測，包括光線強度、二氧化碳濃度、氣體流量及溫濕度等領域。而其多功能性亦提供需求者或試驗人員設計並建構各種用於監測與控制農業過程的自動化系統(Negrete, 2023)。此技術及工具不僅能降低傳統科學儀器的使用門檻，同時可增強農業對氣候變遷的適應能力。

儘管 Arduino 在記憶體空間及系統整合上仍有部分技術挑戰，但透過精簡程式設計及感測器校準，仍能有效提升數據可靠性與系統效能。隨著低成本智慧監控技術的持續演進與應用，未來在植物光合作用生理研究及農業管理中，預期將有更廣泛且深入的發展，為農業生產力提升與永續發展目標提供堅實的技術支撐。

參考文獻

1. 李昱錡。2024。以 Arduino 開放式光合作用測量系統探討瓶內誘導水分逆境對‘大紅’紅龍果組織培養植株 CAM 模式之調節。國立中興大學園藝學系博士論文，160 頁。
2. 李家如。2019a。台灣智慧農業現況與需求調查：稻作與雜糧篇。台灣趨勢研究，4。
3. 李家如。2019b。台灣智慧農業現況與需求調查：蔬菜與果樹篇。台灣趨勢研究，4。
4. 李家如、謝宜儒。2019。台灣智慧農業現況與需求調查：花卉篇。台灣趨勢研究，5。
5. 許龍欣。2023。農田溫室氣體量測與計算方法簡介。臺南區農業專訊，125，5-10。
6. 陳令錫。2012。光線量測與植物生長。臺中區農業改良場特刊，111，64-71。
7. Abidin, I., Faridah, S.N., Sapsal, M.T., Samsuar, S., Mubarak, H. 2024. Automation of humidity in the greenhouses for plant cultivation. BIO Web Conf. 96, 04004.
8. Al Hamwi, W., Dubbert, M., Schaller, J., Lueck, M., Schmidt, M., Hoffmann, M. 2024. Technical note: a low-cost, automatic soil-plant-atmosphere enclosure system to investigate CO₂ and ET flux dynamics. EGU sphere 2024, 1-17.
9. Alterio, G., Giorio, P., Sorrentino, G. 2006. Open-system chamber for measurements of gas exchanges at plant level. Environ. Sci. Technol. 40(6), 1950-1955.
10. Ardiansaha, I., Bafdalb, N., Suryadib, E., Bono, A. 2020. Greenhouse monitoring and automation using Arduino: a review on precision farming and internet of things (IoT). Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol. 10(2), 703-709.
11. Barnard, H.R., Findley, M.C., Csavina, J. 2014. PARduino: a simple and inexpensive device for logging photosynthetically active radiation. Tree Physiol. 34(6), 640-645.
12. Bartlett, M.S., Vico, G., Porporato, A. 2014. Coupled carbon and water fluxes in CAM photosynthesis: modeling quantification of water use efficiency and productivity. Plant Soil 383(1-2), 111-138.
13. Black, C.C. 1973. Photosynthetic carbon fixation in relation to net CO₂ uptake. Annu. Rev. Plant Physiol. 24(1), 253-286.
14. Blackstock, J.M., Covington, M.D., Perne, M., Myre, J.M. 2019. Monitoring atmospheric, soil, and dissolved CO₂ using a low-cost, Arduino monitoring platform (CO₂-lamp): theory, fabrication, and operation. Front. Earth Sci. 7, 313.
15. Bonaccorsi, A., Rossi, C. 2003. Why Open Source software can succeed. Res. Policy 32(7), 1243-1258.

16. Bonilla-Cordova, M., Cruz-Villacorta, L., Echegaray-Cabrera, I., Ramos-Fernández, L., Flores del Pino, L. 2024. Design of a portable analyzer to determine the net exchange of CO₂ in rice field ecosystems. *Sensors* 24(2), 402.
17. Burkart, S., Manderscheid, R., Weigel, H.J. 2007. Design and performance of a portable gas exchange chamber system for CO₂- and H₂O-flux measurements in crop canopies. *Environ. Exp. Bot.* 61(1), 25-34.
18. Calzadilla, P.I., Carvalho, F.E.L., Gomez, R., Lima Neto, M.C., Signorelli, S. 2022. Assessing photosynthesis in plant systems: a cornerstone to aid in the selection of resistant and productive crops. *Environ. Exp. Bot.* 201, 104950.
19. Caracciolo, L., Philippi, J., Theeuwes, T.P.J.M., van Amerongen, H., Harbinson, J. 2024. An open-source controller to build a dynamic light intensity setup. *Plant Methods* 20(1), 35.
20. Chojer, H., Branco, P.T.B.S., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M., Sousa, S.I.V. 2020. Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: recent advancement. *Sci. Total Environ.* 727, 138385.
21. Corelli-Grappadelli, L., Magnanini, E. 1993. A whole-tree system for gas-exchange studies. *HortScience* 28(1), 41-45.
22. Cressey, D. 2017. The DIY electronics transforming research. *Nature* 544(7648), 125-126.
23. CWB. 2022. Weather analysis of Taiwan in 2022. Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, pp. 1-5.
24. D'Ausilio, A. 2012. Arduino: a low-cost multipurpose lab equipment. *Behav. Res. Methods* 44(2), 305-313.
25. Dong, Y., Hansen, H. 2024. Design of an internet of things (IoT)-based photosynthetically active radiation (PAR) monitoring system, *AgriEngineering*, pp. 773-785.
26. Douthe, C., Medrano, H., Tortosa, I., Escalona, J.M., Hernández-Montes, E., Pou, A. 2018. Whole-plant water use in field grown grapevine: seasonal and environmental effects on water and carbon balance. *Front. Plant Sci.* 9, 1540.
27. Ehleringer, J. 2006. Photosynthesis: physiological and ecological considerations, In: Taiz, L., Zeiger, E. (Eds.), *Plant Physiol.* 4th ed. Sinauer Associates, pp. 243-269.
28. Flore, J.A., Lakso, A.N. 1989. Environmental and physiological regulation of photosynthesis in fruit crops. *Hortic. Rev.* 11, 111-157.

29. Garcia, R.L., Norman, J.M., McDermitt, D.K. 1990. Measurements of canopy gas exchange using an open chamber system. *Remote Sens. Rev.* 5(1), 141-162.
30. Gates, B. 2023. How to avoid a climate disaster: the solutions we have and the breakthroughs we need. *CommonWealth Magazine*, Taiwan.
31. González-Buesa, J., Salvador, M.L. 2019. An Arduino-based low cost device for the measurement of the respiration rates of fruits and vegetables. *Comput. Electron. Agric.* 162, 14-20.
32. Graham, E.A., Nobel, P.S. 2005. Daily changes in stem thickness and related gas exchange patterns for the hemiepiphytic cactus *Hylocereus undatus*. *Int. J. Plant Sci.* 166(1), 13-20.
33. Heo, J., Kozai, T. 1999. Forced ventilation micropropagation system for enhancing photosynthesis, growth, and development of sweetpotato plantlets. *Environ. Control Biol.* 37(1), 83-92.
34. Hummelgård, C., Bryntse, I., Bryzgalov, M., Henning, J.-Å., Martin, H., Norén, M., Rödjegård, H. 2015. Low-cost NDIR based sensor platform for sub-ppm gas detection. *Urban Climate* 14, 342-350.
35. Hunt, S. 2003. Measurements of photosynthesis and respiration in plants. *Physiol. Plant.* 117(3), 314-325.
36. Hussain, S., Ulhassan, Z., Brestic, M., Zivcak, M., Weijun, Z., Allakhverdiev, S.I., Yang, X., Safdar, M.E., Yang, W., Liu, W. 2021. Photosynthesis research under climate change. *Photosynth. Res.* 150(1), 5-19.
37. IPCC. 2023. Summary for policymakers, In: Team, C.W., Lee, H., Romero, J. (Eds.), *Climate change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34.
38. Jo, N.Y., Lee, J., Byeon, J.E., Park, H.J., Ryoo, J.W., Hwang, S.G. 2022. Elevated CO₂ concentration induces changes in plant growth, transcriptome, and antioxidant activity in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Front. Plant Sci.* 13, 1067713.
39. Jolles, J.W. 2021. Broad-scale applications of the Raspberry Pi: a review and guide for biologists. *Methods Ecol. Evol.* 12(9), 1562-1579.
40. Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., Sharma, A. 2020.

The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Appl. Sci.* 10(16), 5692.

41. Kondaveeti, H.K., Kumaravelu, N.K., Vanambathina, S.D., Mathe, S.E., Vappangi, S. 2021. A systematic literature review on prototyping with Arduino: applications, challenges, advantages, and limitations. *Comput. Sci. Rev.* 40, 100364.
42. Lapshina, P.D., Kurilova, S.P., Belitsky, A.A. 2019. Development of an Arduino-based CO₂ monitoring device, 2019 IEEE Conference of russian young researchers in electrical and electronic engineering, pp. 595-597.
43. Lee, Y.-C., Chang, J.-C. 2024. Sensitivity and regulation of diel photosynthesis in red-fleshed pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) micropropagules under mannitol-induced water stress/rehydration cycle *in vitro*, *Horticulturae*, p. 235.
44. Lee, Y.-C., Ho, M.-C., Chang, J.-C. 2023. Re-identification of non-facultative crassulacean acid metabolism behavior for red-fleshed pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) micropropagules *in vitro* using an Arduino-based open system. *Sci. Hortic.* 309, 111646.
45. Levin, A., Nackley, L. 2021. Principles and practices of plant-based irrigation management. *HortTechnology* 31(6), 650-660.
46. Levintal, E., Lee Kang, K., Larson, L., Winkelman, E., Nackley, L., Weisbrod, N., Selker, J.S., Udell, C.J. 2021. eGreenhouse: robotically positioned, low-cost, open-source CO₂ analyzer and sensor device for greenhouse applications. *HardwareX* 9, e00193.
47. Liyanage, D.K., Chathuranga, I., Mori, B.A., Thilakarathna, M.S. 2022. A simple, semi-automated, gravimetric method to simulate drought stress on plants. *Agronomy* 12, 349.
48. Long, S.P., Farage, P.K., Garcia, R.L. 1996. Measurement of leaf and canopy photosynthetic CO₂ exchange in the field. *J. Exp. Bot.* 47(11), 1629-1642.
49. Makhlof, S., Laghrouche, M., Adane, A.E.H. 2016. Hot wire sensor-based data acquisition system for controlling the laminar boundary layer near plant leaves within a greenhouse. *IEEE Sens. J.* 16(8), 2650-2657.
50. Mohamed, T.M.K., Gao, J.M., Tunio, M. 2022. Development and experiment of the intelligent control system for rhizosphere temperature of aeroponic lettuce via the Internet of Things. *Int. J. Agric. Eng.* 15(3), 225-233.

51. Mohammed, M., Sallam, A., Munir, M., Ali-Dinar, H. 2021. Effects of deficit irrigation scheduling on water use, gas exchange, yield, and fruit quality of date palm. *Agronomy* 11, 2256.
52. Negrete, J.C. 2023. Arduino in agriculture and the teaching of mathematics. *Hortic. Int. J.* 7(3), 80-83.
53. Nobel, P.S. 1988. *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge University Press, UK.
54. Nobel, P.S., De la Barrera, E. 2002. Stem water relations and net CO₂ uptake for a hemiepiphytic cactus during short-term drought. *Environ. Exp. Bot.* 48(2), 129-137.
55. Nobel, P.S., De la Barrera, E. 2004. CO₂ uptake by the cultivated hemiepiphytic cactus, *Hylocereus undatus*. *Ann. Appl. Biol.* 144(1), 1-8.
56. Ozturk, M., Turkyilmaz Unal, B., García-Caparrós, P., Khursheed, A., Gul, A., Hasanuzzaman, M. 2021. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiol. Plant.* 172(2), 1321-1335.
57. Patnaik Patnaikuni, D.R. 2017. A comparative study of Arduino, Raspberry Pi and ESP8266 as IoT development board. *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci.* 8(5), 2350-2352.
58. Paull, R.E., Duarte, O. 2011. Litchi and longan, In: Paull, R.E., Duarte, O. (Eds.), *Tropical fruit*. 2 ed. CABI, Wallingford, Oxfordshire, UK, pp. 221-251.
59. Rosado-Calderón, A.T., Tamayo-Chim, M., de la Barrera, E., Ramírez-Morillo, I.M., Andrade, J.L., Briones, O., Reyes-García, C. 2020. High resilience to extreme climatic changes in the CAM epiphyte *Tillandsia utriculata* L. (Bromeliaceae). *Physiol. Plant.* 168(3), 547-562.
60. Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Singh Sidhu, G.P., Bali, A.S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P., Khanna, K., Bakshi, P., Rehman, A., Kohli, S.K., Khan, E.A., Parihar, R.D., Yuan, H., Thukral, A.K., Bhardwaj, R., Zheng, B. 2020. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *J. Plant Growth Regul.* 39(2), 509-531.
61. Smith, J.P., Edwards, E.J., Walker, A.R., Gouot, J.C., Barril, C., Holzapfel, B.P. 2019. A whole canopy gas exchange system for the targeted manipulation of grapevine source-sink relations using sub-ambient CO₂. *BMC Plant Biol.* 19(1), 535.
62. Sánchez, C., Fischer, G., Sanjuanelo, D.W. 2013. Stomatal behavior in fruits and leaves of

- the purple passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) and fruits and cladodes of the yellow pitaya [*Hylocereus megalanthus* (K. Schum. ex Vaupel) Ralf Bauer]. Agron. Colomb. 31(1), 38-47.
63. Tusi, A., Shimazu, T. 2020. The essential factor of ventilation rate in prediction of photosynthetic rate using the CO₂ balance method. Rev. Agric. Sci. 8, 279-299.
64. Wünsche, J.N., Palmer, J.W. 1997. Portable through-flow cuvette system for measuring whole-canopy gas exchange of apple trees in the field. HortScience 32(4), 653-658.
65. Whiting, M.D., Lang, G.A. 2001. Canopy architecture and cuvette flow patterns influence whole-canopy net CO₂ exchange and temperature in sweet cherry. HortScience 36(4), 691-698.
66. WMO. 2024. Record temperature streak continues in June. World Meteorological Organization.
67. Zhang, H., Sun, X., Song, W. 2023. Physiological and growth characteristics of tomato seedlings in response to low root-zone temperature. HortScience 58(4), 442-448.
68. Zobayed, S.M.A., Afreen-Zobayed, F., Kubota, C., Kozai, T. 2000. Mass propagation of *Eucalyptus camaldulensis* in a scaled-up vessel under *in vitro* photoautotrophic condition. Ann. Bot. 85(5), 587-592.

Low-cost Arduino Development Boards in Photosynthesis Measurement: Current Applications and Future Prospects¹

Yu-Chi Lee^{2*}

ABSTRACT

Photosynthesis is a critical physiological process through which plants convert light energy into chemical energy, directly affecting crop growth and productivity. As the global population rises and climate change intensifies, improving photosynthetic efficiency has become an urgent priority. However, conventional equipment for measuring photosynthesis is often expensive and technically complex, limiting its broader use in research and practical applications. In recent years, the widespread availability of low-cost microcontroller development boards, such as Arduino, along with various sensors, has driven the development of customized, self-assembled monitoring systems as alternatives to costly commercial tools. Owing to its affordability, stability, and open-source nature, Arduino has been extensively employed in sectors such as energy, education, and agriculture. Nevertheless, its comprehensive integration into photosynthesis research remains incomplete. This review outlines the physiological importance of photosynthesis, the environmental factors influencing its performance, and standard measurement methods. It also explores current applications and advancements of Arduino-based photosynthesis monitoring system. By highlighting emerging technologies and their potential, this work aims to inform future studies in plant physiology and agriculture, thereby enhancing crop resilience to climate change and promoting sustainable farming.

Key words: smart agriculture, sensor applications, plant physiological environment control, remote monitoring system

¹Contribution No.1100 from Taichung DARES, MOA.

²Assistant Researcher of Taichung DARES, MOA.

*Corresponding Author: Yu-Chi Lee, Email: klyc1512@tcdares.gov.tw

