

溫室遮光與隔熱塗層技術對農業從業人員熱危害 暴露之評估

IMPACT ASSESSMENT OF GREENHOUSE SHADING AND THERMAL INSULATING COATING TECHNOLOGIES ON
HEAT STRESS EXPOSURE OF AGRICULTURAL WORKERS

勞動部
勞動及職業安全衛生研究所

洪柏宸
Po-Chen Hung

中信金融管理學院
AI 環境工學與循環經濟研究中心

黃筱茜
Hsiao-Chien Huang

國立屏東科技大學
農園生產系

鍾興穎
Hsing-Ying Chun

中信金融管理學院
通識教育中心自然學科

徐櫻芳
Ying-Fang Hsu

中信金融管理學院
通識教育中心自然學科

楊心豪*
Shin hao Yang

長榮大學
職業安全與衛生學系

莊啓佑
Chi-Yu Chuang

摘要

台灣地處亞熱帶氣候區，夏季高溫伴隨高濕環境，使得設施農業從業人員面臨嚴峻之熱危害 (heat stress) 風險。傳統主動式降溫設備 (如風扇水簾) 雖具成效，但受限於高建置成本與高能耗，難以普及於一般農戶。本研究旨在評估利用植保無人機 (UAV) 噴灑機能性氣候控制塗層，對於改善溫室作業環境微氣候與緩解人員熱暴露之實場成效。研究選定溫室 1 (京都水菜/連棟溫室) 與溫室 2 (洋香瓜/獨棟溫室) 兩處場域，分別施作 ReduHeat (隔熱透光) 與 ReduFuse IR (隔熱散射) 塗層，並透過物聯網 (IoT) 系統連續監測施作前後之環境數據。結果顯示，塗層技術屬有效之被動式降溫策略，在全日照時段下，溫室 1 與 2 場域之室內平均氣溫分別降低 1.4 °C 與 2.9 °C，於高溫峰值時段最大溫差可達 4.3 °C。在職業衛生指標方面，塗層施作能將夏季核心作業時段 (10:00-14:00) 之室內綜合溫度熱指數 (WBGT) 降低 2.2 °C 至 3.7 °C，成功將作業環境風險由「極度危險」降級至「警戒」區間，顯著延長勞工之容許連續作業時間。成本效益分析指出，針對台灣多颱風氣候採取「半年重噴」之適應性策略，於大面積場域之年度單位成本僅約 111.5 TWD/m²，遠低於傳統主動式降溫系統。本研究證實此技術兼具農藝生產效益與職業安全防護功能，為高濕熱環境下之設施農業提供具經濟誘因之工程控制解決方案。

關鍵詞：溫室、熱危害、機能性塗層、無人機、綜合溫度熱指數 (WBGT)。

* 通訊作者，中信金融管理學院通識教育中心自然學科教授

709301 台南市安南區台江大道 3 段 600 號，shinhaoyang@ntu.edu.tw

IMPACT ASSESSMENT OF GREENHOUSE SHADING AND THERMAL INSULATING COATING TECHNOLOGIES ON HEAT STRESS EXPOSURE OF AGRICULTURAL WORKERS

Po-Chen Hung

Institute of Labor, Occupational Safety and Health, Ministry of Labor, New Taipei City, Taiwan, ROC.

Hsing-Ying Chun

Department of Plant Industry, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan, ROC.

Shinhao Yang*

Division of Natural Science, Center for General Education, CTBC Business School, Tainan, Taiwan, ROC.

Hsiao-Chien Huang

Research Center for AI Environmental Engineering and Circular Economy, CTBC Business School, Tainan, Taiwan, ROC.

Ying-Fang Hsu

Division of Natural Science, Center for General Education, CTBC Business School, Tainan, Taiwan, ROC.

Chi-Yu Chuang

Department of Occupational Safety and Health, Chang Jung Christian University, Tainan, Taiwan, ROC.

ABSTRACT

Located in a subtropical climate zone, agricultural workers in Taiwan face severe heat stress risks in greenhouses due to high temperatures accompanied by high humidity during summer. While traditional active cooling systems are effective, their widespread adoption is limited by high installation costs and energy consumption. This study aims to evaluate the field efficacy of using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to spray functional climate control coatings for improving greenhouse microclimates and mitigating workers' heat exposure. Two experimental sites were selected, greenhouse 1 (Mizuna/multi-span greenhouse) and greenhouse 2 (Muskmelon/standalone greenhouse), treated with ReduHeat (heat-reflecting) and ReduFuse IR (heat-reflecting and diffusing) coatings, respectively. An IoT monitoring system was employed to continuously record environmental data before and after application. The results demonstrated that coating technology is an effective passive cooling strategy. During daylight hours, the average indoor temperatures at the greenhouse 1 and 2 decreased by 1.4°C and 2.9°C, respectively, with a maximum temperature difference of up to 4.3°C during peak hours. Regarding occupational health, the application reduced the indoor Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) by 2.2°C to 3.7°C during core working hours (10:00-14:00), successfully downgrading the environmental risk level from "Extreme Danger" to "Alert/Danger" and significantly extending the allowable continuous work duration for laborers. Cost-benefit analysis indicated that adopting a "half-yearly re-spraying" strategy to adapt to Taiwan's typhoon-prone climate resulted in an annual unit cost of approximately 111.5 TWD/m² for the large-scale site, which is significantly lower than traditional active cooling systems. This study

confirms that UAV-applied functional coatings provide both agronomic benefits and occupational safety protection, offering a cost-effective engineering control solution for facility agriculture in hot and humid environments.

Keywords: Greenhouse, Heat stress, Functional coatings, UAV, WBGT.

一、前言

隨著全球氣候變遷加劇，極端高溫事件發生的頻率、強度與持續時間均顯著增加，熱危害 (heat stress) 已演變為威脅全球勞動力健康與生產力的關鍵職業衛生議題^[1]。農業部門因作業場域多位於戶外或缺乏空調設施的半開放空間，且工作內容常涉及高體力負荷，被國際學術界視為受氣候變遷熱衝擊最鉅的產業之一^[1]。根據國際勞工組織 (ILO, 2019) 發布的評估報告指出，在氣溫持續升高的情境下，預估至 2030 年全球因熱壓力導致的工時損失將達到 2.2%，相當於 8,000 萬個全職工作崗位，其中農業部門即佔了大部分比例，顯示熱危害對農業生產力之衝擊已不容忽視^[2]。流行病學研究進一步證實，農業從業人員長期暴露於高濕熱環境，不僅容易引發體溫調節失常、熱衰竭與中暑等急性熱疾病^[3]，在高強度勞動所產生的代謝熱 (metabolic heat) 與環境熱負荷雙重作用下，亦顯著增加罹患慢性腎臟病 (CKD)、心血管疾病及不明原因急性腎損傷的風險^[4,5]。特別是在亞熱帶與熱帶地區，夏季強烈的太陽輻射負荷進一步加劇了戶外勞動者的生理熱應力 (heat strain)，使得農業職業安全衛生面臨極為嚴峻的挑戰^[6]。

設施栽培為現代精準農業生產之主流趨勢，透過溫室結構調控微氣候以穩定作物產量並提升品質。然而，溫室之物理特性在於透過覆蓋材料讓短波太陽輻射進入，並攔截室內長波熱輻射散失，若缺乏有效的遮蔭與通風冷卻設計，室內氣溫往往高於環境氣溫 5 °C 至 10 °C 以上，形成顯著的溫室效應^[7]。特別是在台灣等高溫多濕氣候區，為配合高密度種植環境下作物旺盛的蒸散作用，室內相對濕度經常維持在極高水平。根據 Cramer and Jay (2016) 的生理學研究，這種高溫伴隨高濕的微氣候環境會大幅降低水氣壓差，抑制人體藉由排汗蒸發散熱的效率，導致核心體溫蓄積而產生極高的熱不適感^[8]。Jung and Kim (2022) 的實場監測研究亦顯示，溫室內部的熱環境參數在夏季正午時段，經常超過國際標準組織 (ISO 7243) 所訂定之人體熱舒適極限與作業暴露限值，嚴重影響勞動力、作業專注度與職場安全^[9]。因此，在不消耗過多能源的前提下，開發高效能且具成本效益的被動式降溫技術 (passive cooling technologies)，已成為改善溫室作業環境與永續農業發展之關鍵課題^[10]。

目前產業界常見的溫室降溫策略包括自然通風、機械風扇、蒸發冷卻 (如水牆、噴霧) 及遮陰網等^[11]。然而，各項技術均存在其應用限制：機械風扇與水牆

系統不僅耗能且耗水，且其冷卻效率受限於環境濕球溫度，在環境濕度過高時降溫效果會顯著下降，甚至因增加室內濕度而加劇人體悶熱感^[12]；傳統黑色遮陰網雖能透過阻擋光線來降低熱負荷，但其對太陽光譜缺乏選擇性，往往在降低溫度的同時也過度阻擋了作物光合作用所需之可見光 (PAR)，導致作物徒長或產量下降^[13]。鑑於上述限制，光譜選擇性塗層 (spectrally selective coatings) 技術近年來在農業工程領域獲得廣泛關注^[14]。這類機能性塗料 (如近紅外線反射塗料) 之設計原理，係利用奈米材料或特殊干涉顏料針對太陽光譜進行精準篩選，旨在阻隔佔太陽輻射熱能約 50% 的近紅外線 (NIR, 700-2500 nm) 進入溫室，同時維持光合作用有效輻射 (PAR, 400-700 nm) 的高穿透率，達到降溫不減光之理想目標^[15,16]。此外，部分先進塗層更結合了光線散射 (light diffusion) 功能，能將直射光轉換為散射光，不僅能提升光線穿透至作物冠層中下部的效率、減少上層葉片光抑制，亦能消除室內局部熱點 (hot spots)，改善整體微氣候均勻度^[17,18]。

儘管光譜選擇性塗層在優化溫室微氣候、提升作物產量與水分利用效率 (WUE) 方面的農藝效益已有大量文獻支持^[19,20]，但既有研究多聚焦於植物生理反應、光合作用效率或建築能源節約^[21]，鮮少有研究系統性評估此類技術對於「溫室內作業人員」熱危害暴露的改善成效。Schulte *et al.* (2016) 指出，勞工往往是氣候變遷調適策略中被遺忘的一群，改善作物生長環境的工程手段，理應具備改善勞工職業衛生的附加效益，此為目前相關研究的重要缺口^[22]。再者，傳統溫室塗層施作多仰賴人工攀爬屋頂或架設鷹架進行塗刷，根據美國職業安全衛生署 (OSHA) 統計，高處墜落是營造與維護作業中致死率最高的災害類型，顯示人工施作存在極高的職業安全風險且塗佈均勻度難以控制^[23]。隨著無人機 (UAV) 技術在精準農業的應用日趨成熟，利用 UAV 搭載噴灑系統進行溫室屋頂塗層施作，具備施作快速、覆蓋均勻、節省人力且無需人員高空作業之安全優勢，為設施農業環境改善提供了創新的技術路徑^[24,25]。

基於上述背景，本研究旨在評估利用 UAV 施作不同機能特性 (遮光、隔熱透光、散射) 之氣候控制塗層，對於降低溫室作業環境熱危害之實場成效。研究選定台灣具代表性之設施栽培場域，透過物聯網 (IoT) 環境監測系統收集塗層施作前後之連續微氣候數據，並結合綜合溫度熱指數 (WBGT) 進行量化分析。期能透過科學實證數據，驗證此項農業工程技術在職業安全衛生領域的應用潛力，為建構具氣候韌性、安全且健康的農業作業環境提供具體策略建議。

二、研究方法

2.1 試驗場域與作物特性

本研究選定台灣南部主要設施農業生產區之兩處商業溫室進行實場試驗，分別位於高雄市與嘉義縣，兩處場域因種植作物種類與生長特性之差異，對光照與溫度之需求截然不同，故作為評估不同機能性氣候控制塗層之代表性場域。

溫室 1 位於高雄試驗場域，以水耕栽培京都水菜之連棟溫室，面積約 860 平方公尺。水菜屬十字花科葉菜類，雖對光照需求較高以維持葉片色澤與厚度，但其葉片表面積大且氣孔導度對高溫極為敏感。Kozuki *et al.* (2015) 的研究指出，葉菜類作物在遭受波長 850 nm 以上之近紅外線 (NIR) 輻射時，會導致氣孔關閉並累積活性氧 (ROS)，抑制蒸散散熱作用並影響產量^[26]。此外，葉菜類作物需光量雖高，但過強的直射光易造成光抑制現象^[27]。考量水菜需高 PAR (光合作用有效輻射) 穿透但需隔絕 NIR 熱能之生理特性，本場域選用具高透光隔熱特性之 ReduHeat (ReduSystems, Mardenkro B.V., The Netherlands) 塗層。

溫室 2 位於嘉義試驗場域，以直立式栽培洋香瓜之溫室，面積約 1,250 平方公尺。洋香瓜屬葫蘆科作物，在設施栽培中常採立體支架種植，其冠層結構較為複雜，上層葉片極易遮蔽下層葉片，導致垂直光分佈不均。根據 Zheng *et al.* (2020) 針對瓜果類作物之研究，將直射光轉換為散射光 (diffuse light) 能顯著改善光線在冠層中下部的穿透率，提升整體群落光合作用效率並減少頂端葉片之熱蓄積^[16]。特定針對洋香瓜的研究亦證實，施用具 NIR 反射功能之散射塗層，能在夏季高溫期降低溫室氣溫並維持果實品質^[28]。基於此

作物對光線穿透性與均勻度之特殊需求，本場域選用兼具隔熱與散射功能之 ReduFuse IR (ReduSystems, Mardenkro B.V., The Netherlands) 塗層。

2.2 機能性塗層施作

為克服傳統人工攀爬溫室屋頂施作之高處墜落風險及塗佈不均問題，本研究採用搭載高壓噴灑系統之植保無人機 (UAV) 進行塗層施作。施作前先行透過氣象預報確認作業時段之風速低於 3 m/s 且無降雨機率，以確保塗層附著效果。

溫室 1 場域，使用 ReduHeat 塗料，總施用量為 6 桶 (每桶 15 公斤)，採多層次十字交叉噴灑法施作 2 至 3 層，以強化對強烈南台灣日照之紅外線阻隔率。溫室 2 場域，使用 ReduFuse IR 塗料，以同樣作法，總施用量調整為 5 桶。圖 1 為施作示意圖。

2.3 環境監測配置

為量化評估塗層施作前後之微氣候改善成效，本研究於兩處溫室內部中央位置，懸掛架設物聯網 (IoT) 環境監測系統。感測器 (temperature and humidity sensor) 設置高度為距離地面 1.5 公尺處，以模擬作業人員之呼吸帶高度。系統設定每 5 分鐘自動記錄一次空氣溫度 (T_a) 與相對濕度 (RH)，並透過無線傳輸模組即時上傳至雲端資料庫。數據分析時，選取塗層施作前 3 日與後 3 日，每日 06:00 ~ 17:00 之數據進行比對。為排除室外氣候變異 (如鋒面過境或日照量下降) 對實驗之干擾，本研究同步擷取交通部中央氣象署 (CWA) 歷史觀測資料庫中，最鄰近試驗場域之測站數據作為外部對照基準。

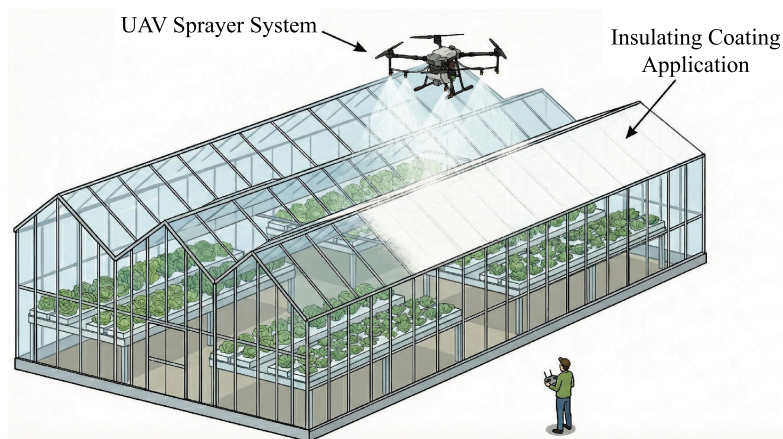


圖 1 以 UAV 施作噴漆塗層示意圖

在作業人員熱危害評估方面，本研究採用綜合溫度熱指數 (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) 為量化指標。WBGT 為國際勞工組織 (ILO) 與 ISO 7243 標準中評估熱應力之核心依據。考量溫室內部環境特性，其計算公式採用室內或無太陽直射之標準：

$$WBGT = 0.7 T_{nw} + 0.3 T_g$$

其中， T_{nw} 為自然濕球溫度，能真實反映高濕環境下人體藉由汗水蒸發散熱受阻之程度； T_g 為黑球溫度，用於量化太陽短波輻射與環境長波輻射之總熱負荷。考量台灣農業從業人口高齡化，以及農忙期常需仰賴短期新進移工之產業現況，本研究基於「保守防護 (conservative protection)」之安全工程原則，採用 ISO 7243 與我國勞動部規範中較嚴格之「未經熱適應 (unacclimatized)」勞工中重度作業暴露限值 (25.0 °C 至 28.0 °C) 作為評估基準。本研究利用熱指數監測儀 (Qusettemp, TSI Inc.) 進行量測，藉此評估塗層技術對降低農業職業危害之實質貢獻。

2.4 成本效益評估方法

本研究除評估物理環境改善成效外，另建立成本效益評估模型，將「無人機噴灑塗層技術」與傳統溫室主動式降溫系統 (如風扇水簾系統、高壓噴霧系統) 進行經濟效益比較。評估指標包含初始設置成本 (CAPEX) 與營運維護成本 (OPEX)。

成本計算公式如下：

$$\begin{aligned} \text{總成本 (Total Cost)} &= C_{\text{initial}} \\ &+ \sum (C_{\text{elec}} + C_{\text{water}} + C_{\text{maint}}) \end{aligned}$$

其中， C_{initial} 為系統設備購置或單次施作費用； C_{elec} 與 C_{water} 分別為電力與水資源消耗成本； C_{maint} 為維護保養費用。

依據國內溫室工程文獻與實務數據顯示，風扇水簾系統雖降溫效率高，但需配合密閉式強固結構，初始建置成本極高，且全時運轉之電力與水資源消耗極大，降溫極限亦受限於台灣夏季的高濕球溫度^[29]。高壓微霧系統之設備成本雖略低，但在台灣高濕環境下，極易造成溫室內部通風不良並大幅增加作物病害之風險^[30]。相對而言，本研究之無人機塗層技術屬被動式降溫，無後續之水電營運成本 ($C_{\text{elec}} = 0, C_{\text{water}} = 0$)，其經濟效益分析將聚焦於單次施作成本與其所能提供之降溫幅度 (以每降低 1 °C 之成本換算)，作為農業經營者決策之參考依據。

三、結果與討論

3.1 塗層施作前後之溫室微氣候變化

本研究透過物聯網 (IoT) 環境監測系統，連續蒐集機能性塗層施作前後之溫室內部微氣候數據。為量化塗層對溫室熱環境之具體影響，本節選定塗層施作前與施作後之日間時段 (06:00 ~ 17:00)，針對兩處不同作物與結構之試驗場域進行溫度歷線分析。表 1~2 與圖 2 分別為施作前後之溫室室內溫度趨勢比較。

在分析室內降溫成效前，必須先考量試驗期間室外天氣變化之潛在干擾。本研究擷取中央氣象署鄰近測站之歷史數據 (如表 3 所示)，發現兩處場域在塗層施作後，室外氣候確實受到秋季鋒面影響而有轉涼趨

表 1 塗層施作前後溫室 1 內部空氣溫度變化趨勢比較

時間 (Hour)	噴漆前室溫 (Avg)	噴漆前室溫 (Std)	噴漆後室溫 (Avg)	噴漆後室溫 (Std)	降溫度數
6	23.71	1.11	23.34	0.82	0.37
7	27.22	0.93	26.76	1.22	0.46
8	33.47	2.65	29.51	0.82	3.96
9	33.67	2.32	32.65	0.87	1.02
10	34.31	1.59	33.17	0.84	1.14
11	34.67	1.63	33.59	1.56	1.08
12	35.91	1.58	34.71	0.79	1.2
13	34.41	2.05	33.1	0.93	1.31
14	34.91	1.51	32.8	1.39	2.11
15	32.73	1.6	30.89	1.36	1.84
16	30.01	3.11	28.58	1.42	1.43
17	28.32	2.2	26.48	0.34	1.84

表 2 塗層施作前後溫室 2 內部空氣溫度變化趨勢比較

時間 (Hour)	噴漆前室溫 (Avg)	噴漆前室溫 (Std)	噴漆後室溫 (Avg)	噴漆後室溫 (Std)	降溫度數
6	26.08	1.22	25.67	0.90	0.41
7	28.58	0.98	28.10	1.28	0.48
8	36.82	3.12	33.46	0.90	3.36
9	37.04	2.55	35.92	0.96	1.12
10	39.46	1.83	35.15	0.97	4.31
11	39.18	1.84	35.50	1.76	3.67
12	40.15	1.82	35.80	0.91	4.35
13	39.92	2.38	37.40	1.08	2.52
14	39.45	1.71	37.06	1.57	2.38
15	35.42	1.68	32.43	1.43	2.98
16	32.56	3.27	30.01	1.49	2.55
17	29.74	2.31	27.80	0.36	1.93

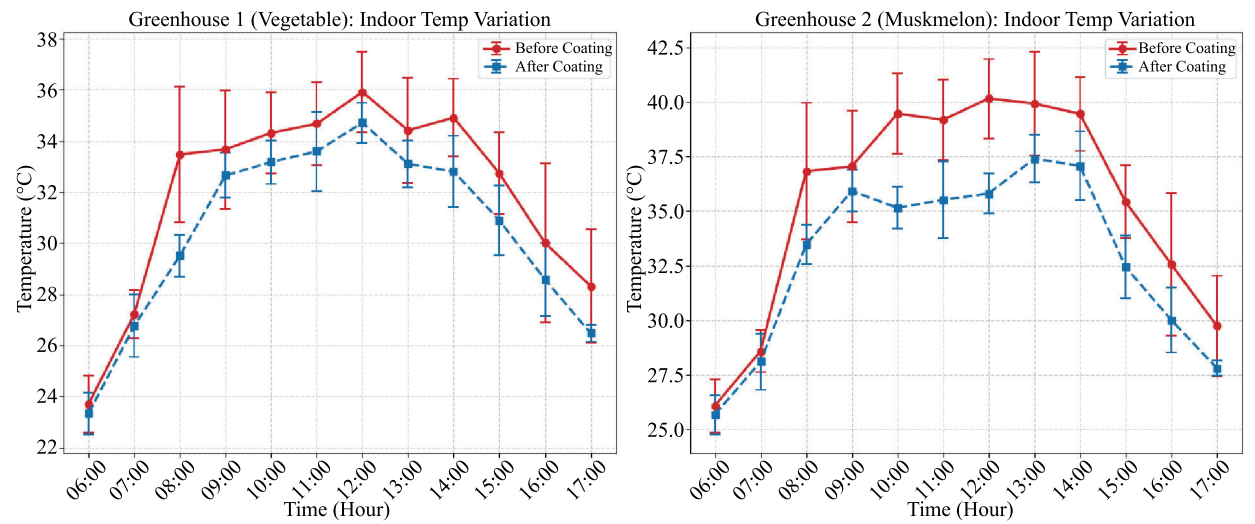


圖 2 塗層施作前後溫室內部空氣溫度變化趨勢比較

表 3 試驗期間鄰近氣象測站之室外氣象條件對照表

試驗場域	氣象測站 (代碼)	試驗階段 (日期)	室外日最高氣溫平均 (°C)	日照時數平均 (hr)	降水狀況
溫室 1 (水菜)	高雄旗南 (72V140)	施作前 (2022/09/17 - 09/19)	34.1	7.3	無降雨 (0.0 mm)
		施作後 (2022/09/21 - 09/23)	32.9	4.1	無降雨 (0.0 mm)
溫室 2 (洋香瓜)	嘉義鹿草 (C0M700)	施作前 (2022/10/05 - 10/07)	34.6	9	無降雨 (0.0 mm)
		施作後 (2022/10/09 - 10/11)	29.5	6.1	無降雨 (0.0 mm)

勢。溫室 1 之室外平均高溫微降 1.2 °C，溫室 2 之室外平均高溫則下降了 5.1 °C。因此，後續溫室內部觀測到之溫度下降，應視為「外在天氣轉涼」與「塗層阻隔輻射熱」之疊加結果。然而，氣象數據亦顯示施

作後每日仍有 4 至 6 小時以上之強烈日照且無降雨，在此條件下，塗層對直射輻射熱（近紅外線）的阻隔效應，仍是決定室內微氣候與熱危害指標（WBGT）改善的關鍵工程因子。

3.1.1 溫室 1 (ReduHeat 多層塗佈) 之溫度變化特徵

溫室 1 位於高雄，為三連棟式溫室結構，種植作物為京都水菜。該場域採用 ReduHeat 塗料進行多層次噴灑。圖 2 顯示溫室 1 於施作前後之室內空氣溫度變化趨勢。

由監測數據可知，在塗層施作前，溫室 1 內部氣溫隨日照增強而迅速攀升，於上午 10:00 至下午 14:00 之核心日照時段，室內平均氣溫維持在 34.0 °C 以上，最高溫甚至接近 36.0 °C。於完成塗層施作後，溫度曲線呈現明顯之下降趨勢。特別是在 12:00 至 15:00 之高溫時段，施作後之溫度曲線穩定低於施作前約 1.2 °C 至 2.1 °C，最高溫被成功控制在 34.7 °C 左右。

統計數據顯示，全日照時段之平均降溫幅度約為 1.4 °C。值得注意的是，在下午 14:00 至 15:00 時段，降溫效益達到最大值 (約 2.1 °C)，顯示 ReduHeat 塗層在阻隔午後強烈斜射日照與累積熱負荷上具有顯著成效，有效緩解了連棟溫室容易發生的熱蓄積現象。

3.1.2 溫室 2 (ReduFuse IR 單層散射) 之溫度變化特徵

溫室 2 位於嘉義，為大型獨棟溫室結構，種植作物為洋香瓜。該場域採用 ReduFuse IR 塗料進行單層噴灑。圖 2 顯示溫室 2 於施作前後之室內空氣溫度變化趨勢。

相較於溫室 1，溫室 2 展現出極為顯著的降溫成效。在塗層施作前，雖然獨棟結構較佳的自然通風條件，但因日照強烈，10:00 至 14:00 時段之室內氣溫仍飆升至 39.0 °C 以上，最高溫甚至突破 40.0 °C，屬極度高溫環境。於完成塗層施作後，全日溫度曲線呈現大幅度下移。

數據顯示，在 10:00 至 12:00 之日照高峰期，施作後之氣溫與施作前相比，溫差高達 3.6 °C 至 4.3 °C，成功將室內最高溫壓制在 35.8 °C 以下。此一結果證實 ReduFuse IR 之散射機制能有效消除溫室內的局部高溫熱點 (hot spots)，配合獨棟溫室良好的熱浮力通風效應，能將阻熱效益最大化，使整體作業空間維持在相對較低之熱負荷狀態。

3.2 不同場域與塗層策略之降溫效益比較

綜合比較兩處試驗場域之微氣候監測數據，可發現顯著的效益差異。溫室 2 (嘉義) 在採用單層 ReduFuse IR 塗層之條件下，全日照時段之平均降溫幅度達 2.9 °C，且於高溫峰值時段可創造大於 4.3 °C 之顯著溫差；相對而言，溫室 1 (高雄) 雖施作了多層

ReduHeat 塗層，其平均降溫幅度約為 1.4 °C，最大溫差約 2.1 °C。此一結果顯示，儘管兩者皆能有效降溫，但其成效幅度深受溫室結構形式與塗層光學機制兩大關鍵因子之交互影響。

首先，就設施結構特性而言，溫室通風效率是決定被動式降溫成效之關鍵。溫室 2 屬於大型獨棟結構 (standalone greenhouse)，其屋頂通風口與側牆之開口配置，有利於形成強制的熱浮力通風 (thermal buoyancy ventilation) 效應。當塗層在屋頂端阻絕了近 4 °C 的等效溫度輻射熱，配合良好的自然通風路徑，能迅速將室內剩餘顯熱排出，從而放大降溫效益。反觀溫室 1 為傳統連棟式結構 (multi-span greenhouse)，雖然 ReduHeat 塗層已有效阻擋了紅外線 (數據顯示降溫達 2.1 °C)，但連棟處之天溝 (gutter) 結構容易造成熱空氣滯留，且寬廣的屋頂面積導致自然通風路徑過長，部分熱氣難以有效逸散，限制了進一步的降溫潛力。

其次，就塗層光學機制分析，光線性質對微氣候分佈具決定性影響。溫室 1 使用之 ReduHeat 主要功能為「光譜篩選」，即在維持直射光穿透的前提下過濾近紅外線，這雖滿足了葉菜類對光強度的需求，但在強烈日照下，穿透的直射光仍易在作物葉表產生局部熱蓄積。溫室 2 選用之 ReduFuse IR 則具備「光線散射」功能，能將入射之平行太陽光轉換為各向同性之漫射光。根據文獻指出，散射光能有效消除溫室內部的陰影與聚熱熱點，使光能與熱能更均勻地分佈於三維空間中^[16]。數據證實，對於洋香瓜這類立體栽培作物而言，散射機制配合獨棟通風，能產生「阻熱+均溫+通風」之加乘效應，達到最佳化之作業環境改善成果。

3.3 對農業作業人員熱危害暴露之緩解評估

將焦點由作物生長環境轉移至作業人員之職業安全，本研究進一步採用勞動部職業安全衛生署及國際標準組織 (ISO 7243) 所建議之綜合溫度熱指數 (WBGT)，作為評估熱危害暴露風險之核心指標。對於在溫室內從事農藥噴灑、整枝或採收等高代謝率作業之勞工而言，降低環境 WBGT 值是預防熱疾病最直接的工程控制手段。表 4~5 與圖 3 為按照 3.1 節中比較方式，針對噴漆塗層前溫室內 WBGT 之分析數據。

3.3.1 溫室 1 (ReduHeat 多層塗佈) 之熱危害緩解效益

分析溫室 1 (高雄) 之監測數據，在塗層施作前之核心作業時段 (11:00~14:00)，室內平均 WBGT 值長期維持在 30.5 °C 至 31.9 °C 之間，逼近 32.0 °C 之高

表 4 塗層施作前後溫室 1 內部 WBGT 變化趨勢比較

時間 (Hour)	噴漆前 WBGT (Avg)	噴漆前 WBGT (Std)	噴漆後 WBGT (Avg)	噴漆後 WBGT (Std)	降溫幅度
6	24.07	0.98	23.2	0.66	0.87
7	26.82	1.04	25.39	0.84	1.43
8	29.13	2.11	26.9	0.63	2.23
9	29.87	1.47	28.33	0.37	1.54
10	30.11	1.01	28.28	0.42	1.83
11	30.57	0.76	28.28	0.64	2.29
12	31.57	0.68	29.37	0.53	2.2
13	31.94	0.94	29.61	0.44	2.33
14	30.26	0.61	28.2	0.68	2.06
15	29.24	0.86	27.21	0.74	2.03
16	28.27	1.66	26.3	0.58	1.97
17	26.72	1.56	25.38	0.31	1.34

表 5 塗層施作前後溫室 2 內部 WBGT 變化趨勢比較

時間 (Hour)	噴漆前 WBGT (Avg)	噴漆前 WBGT (Std)	噴漆後 WBGT (Avg)	噴漆後 WBGT (Std)	降溫幅度
6	26.48	1.08	25.52	0.73	0.96
7	28.16	1.09	26.66	0.88	1.50
8	32.04	4.51	29.59	0.69	2.45
9	32.86	1.62	31.16	0.41	1.69
10	34.63	1.16	31.53	0.45	3.09
11	34.54	0.86	31.25	0.68	3.29
12	35.31	0.78	31.80	0.56	3.50
13	35.05	1.09	31.32	0.50	3.73
14	34.19	0.69	31.87	0.77	2.33
15	30.70	0.90	28.57	0.78	2.13
16	29.68	1.74	27.62	0.61	2.07
17	28.06	1.64	26.65	0.33	1.41

55

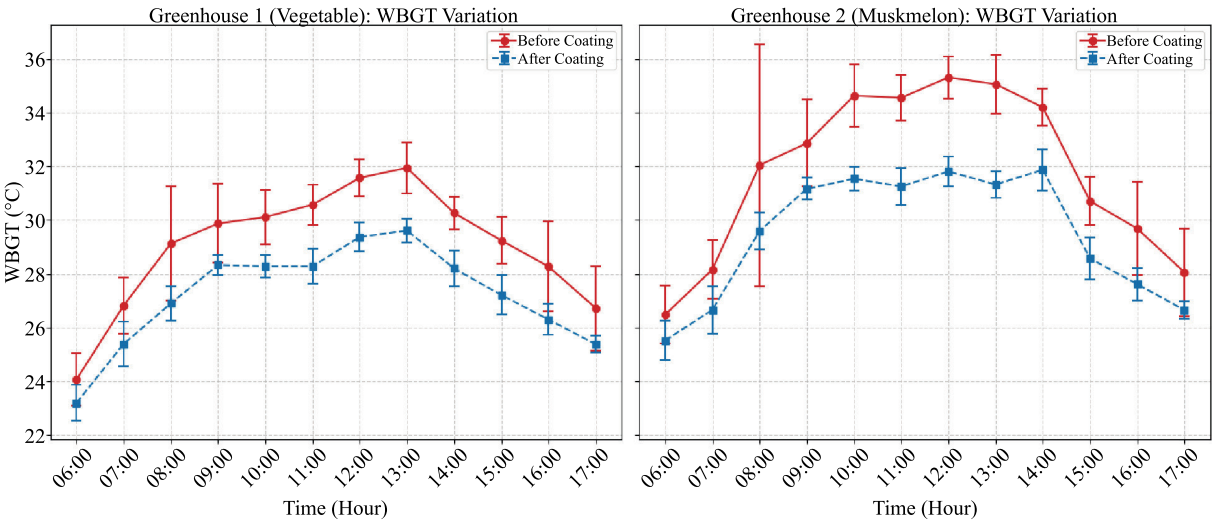


圖 3 塗層施作前後溫室內部綜合溫度熱指數 (WBGT) 之變化比較

風險門檻，遠高於中重度作業之暴露限值 (25.0 °C ~ 28.0 °C)。於施作 ReduHeat 塗層後，WBGT 值呈現顯著下降。數據顯示，在中午 12:00 至 13:00 的熱負荷高峰，WBGT 值由原本的 31.6 °C ~ 31.9 °C 下降至 29.4 °C ~ 29.6 °C，平均降幅約 2.2 °C。

此一改善將作業環境從接近「極度危險」邊緣拉回至相對安全的「警戒」範圍。對於需長時間在連棟溫室內作業的勞工而言，這 2 °C 以上的 WBGT 降幅能顯著減緩深層體溫的上升速率，有效延長單次可連續作業時間，降低因熱蓄積導致中暑的風險。

3.3.2 溫室 2 (ReduFuse IR 單層散射) 之熱危害緩解效益

溫室 2 (嘉義) 之改善成效則更為劇烈。施作前，該場域受強烈日照與輻射熱影響，上午 10:00 至下午 14:00 之 WBGT 值頻繁飆升至 34.0 °C 至 35.3 °C，超標法定危害閾值 (28.0 °C)，此數值已遠超一般人體熱調節極限，屬極度危險之作業環境。經施作 ReduFuse IR 散射塗層後，WBGT 值呈現大幅度下降。

在 10:00 至 13:00 之關鍵時段，施作後之 WBGT 值被成功壓制在 31.3 °C 至 31.8 °C 之間，與施作前相比，降幅高達 3.1 °C 至 3.7 °C。這意味著作業環境之熱危害風險由「極度危險」(WBGT > 32.0 °C) 直接降級為「警戒」等級。此外，塗層技術亦有效延後了高溫發生的時間點，施作前 WBGT 於上午 08:00 即突破 32.0 °C，施作後全日均未超過 32.0 °C，優化了該溫室的熱蓄積特性，為勞工創造了全日皆可進行基礎作業的安全環境。

綜上所述，雖然兩處溫室之結構與塗層策略不同，但實測數據證實，機能性塗層能有效阻斷外部輻射熱源，將室內 WBGT 值降低 2.2 °C 至 3.7 °C。此一降幅在職業衛生工程控制上具有極高價值，能直接將作業環境之危害等級向下修正，提供農業勞工更具人性化與安全性的勞動條件。

3.4 成本效益與實務應用分析

本研究除評估物理環境與熱危害改善成效外，進一步針對該技術導入之經濟可行性進行實證分析。考量台灣亞熱帶氣候特徵，夏季午後雷陣雨頻繁且颱風季節降雨強度，傳統溫室外部塗層極易受雨水冲刷而剝落或效能衰退。因此，本研究設定塗層之有效耐用年限為半年 (6 個月)，即每年需進行 2 次施作 (春季與秋季各 1 次)，以維持全年度之穩定隔熱與光質調節效益。

3.4.1 年度成本結構與規模經濟分析

在成本結構估算上，分為「變動材料成本」與「固定技術成本」兩部分。材料部分依據作物需求決定施用量；技術部分則採用植保無人機 (UAV) 進行噴灑，依據目前市場行情與設備折舊攤提，設定單次無人機出勤施作之固定基本費為新台幣 50,000 元。

表 6 呈現兩處場域之詳細成本分析。溫室 1 (高雄) 為 3 連棟結構，面積 860 平方公尺，因種植之京都水菜對紅外線熱源敏感，採多層次噴灑策略 (施用 6 桶 ReduHeat)，單次施作總成本為 74,000 元，年度總成本 (施作 2 次) 為 148,000 元。溫室 2 (嘉義) 為大型獨棟結構，面積 1,256 平方公尺 (380 坪)，種植之洋香瓜需兼顧光合作用，採標準單層散射噴灑策略 (施用 5 桶 ReduFuse IR)，單次施作總成本為 70,000 元，年度總成本為 140,000 元。

經計算「單位面積年度總成本」(Annual Cost per Unit Area)，溫室 2 之效益顯著優於溫室 1 (111.5 元/m² 年 vs. 172.1 元/m² 年)。此差異揭示了無人機施作之「規模經濟」特性：溫室 2 為單一完整大面積結構，無人機飛行路徑規劃效率較高，且固定噴灑施作費 (50,000 元) 可分攤至較大面積，大幅降低了單位成本。反之，溫室 1 受限於面積較小且結構較複雜，固定成本佔比過高，導致單位效益被稀釋。

表 6 無人機施作機能性塗層之年度成本效益分析表

評估項目	溫室 1 (高雄)	溫室 2 (嘉義)
溫室結構特性	3 連棟溫室 (面積較小)	1 獨棟溫室 (面積較大)
施作面積 (m ²)	860	1,256
塗層策略	多層噴灑 (隔熱透光)	單層噴灑 (隔熱散射)
單次材料用量 (桶)	6.0	5.0
單次材料成本* (TWD)	24,000	20,000
無人機施作費 (TWD/次)	50,000	50,000
單次施作總成本 (TWD)	74,000	70,000
年度施作頻率 (次/年)	2 (半年重噴一次)	2 (半年重噴一次)
年度總投入成本 (TWD/年)	148,000	140,000
單位面積年度成本 (TWD/m ² 年)	172.1	111.5

*註：材料成本以進口機能性塗料市價約 4,000 元/桶估算；無人機施作費含設備、操作人員及保險等固定出勤成本。

3.4.2 與傳統主動式降溫系統之比較

為釐清本技術之市場定位，本研究進一步將其與傳統主動式降溫系統進行比較（表 7）。依據國內溫室工程實務與本土研究數據顯示^[29,30]，風扇水簾系統雖具備最強之降溫能力（4.0 °C~6.0 °C），但其必須配合封閉式強固型溫室，初始建置成本（含結構升級與設備）往往高達每平方公尺數千元台幣，且後續需負擔高額電力與水資源消耗成本。高壓微霧系統設備成本次之，但在台灣高濕環境下易造成作物病害風險。

相對而言，本研究驗證之塗層技術屬於「被動式降溫」，其營運成本為零（無水電消耗），且初始建置成本極低（以溫室 2 為例，單次施作僅約 55.7 元/m²）。雖然其絕對降溫幅度（約 2.9 °C）不及主動式系統，但其「單位降溫成本」（Cost per Degree Cooling）具有顯著優勢。對於利潤微薄、缺乏充足電力供應或水源之農業設施而言，機能性塗層提供了一種極具成本效益的熱危害防護策略。

3.5 綜合討論

3.5.1 國際研究數據對照與 WBGT 危害閾值評估

本研究於台灣亞熱帶高濕氣候下之實測結果顯示，應用機能性塗層技術可使溫室內部全日平均氣溫降低 1.4 °C 至 2.9 °C，且於高溫峰值時段可創造最大 4.3 °C 之溫差。與國際上針對地中海型氣候或乾燥氣候區（如以色列、西班牙）之相關研究相比，其降溫幅度通常可達 3.0 °C 至 5.0 °C^[17,18]，本研究之平均數值看似略顯保守。此差異主要源於環境背景條件之不同，台灣夏季高溫常伴隨極高之相對濕度（常態高於 75%），使得環境濕球溫度居高不下，大幅限制了蒸發冷卻（evaporative cooling）之物理潛力，亦使得依賴水分蒸發之主動式降溫系統效率低落^[29]。

然而，若將評估指標轉為與人體熱壓力直接相關之綜合溫度熱指數（WBGT），本研究之效益則顯得至

關重要。對照國際標準組織（ISO）發布之 ISO 7243 熱環境評估標準，未施作塗層前之溫室 WBGT 值常突破 33.0 °C 甚至達 35.0 °C，遠超未經熱適應勞工從事中重度負荷工作之暴露限值（25.0 °C~28.0 °C），屬「極度危險」環境^[31,32]。本研究透過塗層技術將 WBGT 壓制在 31.3 °C~31.8 °C 區間，雖仍高於連續作業標準，但依據美國國家職業安全衛生研究所（NIOSH）標準，此降幅已成功將作業環境從「醫療緊急狀況風險極高」拉回至可透過飲水與休息管理之「高風險」區間^[33]，在亞熱帶高濕環境限制下，證實為具備良好可行性且能有效降低基礎熱危害等級之工程手段。

3.5.2 對勞動生產力與生理熱應力之緩解貢獻

在職業安全衛生之風險控制層級中，工程控制優於行政管理與個人防護具。本研究證實之降溫成效，除了降低中暑風險外，對維持勞動生產力亦有具體貢獻。根據 Kjellstrom *et al.* (2009) 建立的熱氣候生產力損失模型，當 WBGT 超過 32 °C 時，勞工從事高強度體力勞動之生產力損失可達 40%至 50%^[34]。本研究在溫室 2 創造的 3.7 °C WBGT 降幅，實質上挽回了可觀的有效工時。

此外，從生理學角度分析，Lundgren *et al.* (2013) 指出環境 WBGT 每降低 1 °C，人體深層體溫之上升速率可減緩約 0.1 °C/hr 至 0.2 °C/hr，心血管負擔亦隨之降低^[35]。因此，本研究利用塗層技術創造之微氣候改善，能有效延緩作業人員熱蓄積之速率，延長單次可連續作業時間，這對於無法全面裝設空調且勞動強度高之設施農業而言，提供了具備廣域保護效果之集體防護措施，補足了僅依賴個人防護具（如涼感衣）之不足。

3.5.3 氣候適應性與彈性施作策略之實務優勢

針對本研究設定塗層需「半年重噴」（一年施作 2 次）之特性，傳統觀點或視為維護成本之增加，然本研究認為應將其重新定義為一種具高度韌性之「氣候適應性管理策略」。

表 7 不同溫室降溫策略之成本效益比較估算

評估指標	無人機噴灑塗層 (本研究實測-溫室 2)	高壓噴霧系統 (國內實務與文獻 ^[30])	風扇水簾系統 (國內實務與文獻 ^[29])
初始建置成本 (TWD/m ²)	55.7 (單次施作)	450 ~ 750	750 ~ 1,200
能源消耗 (水電)	無	中 (需電力加壓)	高 (風扇與幫浦全時運轉)
預期降溫幅度 (°C)	2.9 (全日平均)	3.0 ~ 5.0	4.0 - 6.0
維護需求	每年需重新施作 2 次	噴頭清潔、濾心更換	水簾更換、馬達保養
適用情境	缺水電地區、大面積設施	需加濕之蘭花/種苗場	封閉式環控溫室

* 註：傳統主動式降溫系統（高壓噴霧與風扇水簾）之初始建置成本，係綜合國內溫室設施建置實務報價與本土研究文獻^[29,30]之估算結果，實際金額依溫室結構強度需求與設備規格略有差異。

特別是針對實務應用上「冬季是否會導致日照不足或過冷」之疑慮，此策略展現了極佳的解決機制。傳統固定式外遮陰網或永久性隔熱板在夏季雖能降溫，但進入冬季時常導致溫室內部過度寒冷且光積溫不足，反而對作物發育與勞工作業產生負面影響。本研究選用之機能性塗層屬「季節性可風化材料」，其有效設計壽命約為 4 至 6 個月。在歷經夏季與初秋後，塗層會因自然降雨與紫外線風化而逐漸變薄，溫室透光率將於入冬前自然恢復至原始狀態，以滿足冬季作物對光與熱之需求。此外，若遇異常氣候提早入冬，農業經營者亦可選擇使用專用還原劑（如 ReduClean）搭配無人機進行一次性洗除，遇雨後即會完全恢復溫室原貌。

另一方面，台灣位處西太平洋颱風路徑要衝，傳統固定式外遮陰網或機械降溫設施常因強風豪雨遭受結構性破壞，維修成本高昂且復原期長。反觀本研究驗證之無人機噴灑技術，具備「隨需施作」之高機動性。農民可彈性規劃於颱風季結束後或作物需光轉折期進行噴灑，若遇颱風導致塗層受損，僅需再次噴灑即可快速復原，無硬體設施損壞之資產風險。此外，透過半年一次之重噴機制，農民可依據季節特性動態調整配方（如夏季選用高遮熱之 ReduHeat，冬季選用高透光之 ReduFuse），此種「以變應變」之彈性策略，搭配本研究驗證之低單位成本優勢，相較於僵固之硬體設施，更符合極端氣候下永續農業經營之需求。

四、結論

本研究旨在探討亞熱帶高濕氣候下，應用植保無人機噴灑機能性氣候控制塗層對於改善設施農業熱環境與作業人員熱危害之實務成效。經由高雄與嘉義兩處場域之實證研究證實，機能性塗層具備顯著之被動式降溫效益，能有效阻隔太陽輻射熱源進入溫室。在全日照時段下，塗層施作可使室內平均氣溫降低 1.4 °C 至 2.9 °C，且於高溫峰值時段之最大降溫幅度可達 4.3 °C；其中，結合散射機制與獨棟通風結構之場域展現出最佳之冷卻潛力，顯示塗層光學特性需與溫室結構通風相互搭配，方能最大化其降溫效益。

在職業衛生改善方面，本研究透過綜合溫度熱指數 (WBGT) 分析，確認塗層技術能將夏季核心作業時段之室內 WBGT 值降低 2.2 °C 至 3.7 °C。此一降幅成功將作業環境之熱危害風險等級由「極度危險」降級至可管理之「警戒」或「危險」區間，實質延長了勞工之容許連續作業時間，並降低中暑與熱衰竭之生

理風險。此外，相較於傳統風扇水簾或高壓噴霧系統高昂之建置與營運成本，本研究驗證之無人機噴灑模式，在考量規模經濟效益後，其單位年度成本僅約 111.5 元/m²，為缺乏充足電力與水資源之農業設施，提供了一種具高度經濟誘因之解決方案。

綜上所述，本研究提出之「半年重噴」施作模式，不僅符合塗層材料特性，更構成一種適應台灣颱風氣候之彈性管理策略。透過無人機之高機動性，農民可避開颱風季風險並依季節需求動態調整塗層配方，展現出優異之氣候韌性。此技術兼具提升農藝生產效益與保障職業安全之雙重功能，可作為未來政府推動農業職災預防政策，以及協助農民建構友善安全作業環境之重要參考依據。

五、誌謝

感謝勞動部勞動及職業安全衛生研究所提供經費贊助此研究，研究團隊致上最高敬意。

參考文獻

1. Kjellstrom T, Briggs D, Freyberg C, Lemke B, Otto M, Hyatt O. "Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Issue for the Assessment of Global Climate Change Impacts," *Annual Review of Public Health*. 37, pp.97-112, 2016.
2. ILO. Working on a Warmer Planet: The Impact of Heat Stress on Labour Productivity and Decent Work, Geneva: International Labour Office, 2019.
3. Flouris AD, Dinas PC, Ioannou LG, Nybo L, Havenith G, Kenny GP, *et al.* "Workers' Health and Productivity under Occupational Heat Strain: A Systematic Review and Meta-analysis," *The Lancet Planetary Health*. 2(12):e521-e531, 2018.
4. Glaser J, Lemery J, Rajagopalan B, Diaz HF, Garcia-Trabanino R, Taduri G, *et al.* "Climate Change and the Emergent Epidemic of CKD from Heat Stress in Rural Communities: The Case for Heat Nephropathy," *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, 11(8), pp.1472-1483, 2016.
5. Nerbass FB, Pecoits-Filho R, Clark WF, Sontrop JM, McIntyre CW, Moist L. "Occupational Heat Stress and Kidney Health: From Farms to Factories," *Kidney*

- International Reports*, 2(6), pp.998-1008, 2017..
6. Ioannou LG, Tsoutsoubi L, Mantzios K, Vliora M, Nintou E, Piil JF, *et al.* "The Impacts of Sun Exposure on Worker Physiology and Cognition: Multi-country Evidence and Interventions," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 7698, 2021.
 7. Kumar KS, Tiwari KN, Jha MK. "Design and Technology for Greenhouse Cooling in Tropical and Subtropical Regions: A Review," *Energy and Buildings*. 41(12), pp.1269-1275, 2009.
 8. Cramer MN, Jay O. "Biophysical Aspects of Human Thermoregulation during Heat Stress," *Autonomic Neuroscience*. 196, pp.3-13, 2016..
 9. Jung W, Kim H. "Evaluation of Heat Stress Levels inside Greenhouses during Summer in Korea," *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(19), 12497, 2022.
 10. Tawalbeh M, Aljaghoub H, Alami AH, Olabi AG. "Selection Criteria of Cooling Technologies for Sustainable Greenhouses: A Comprehensive Review," *Thermal Science and Engineering Progress*. 38, 101666, 2023.
 11. Sethi VP, Sharma SK. "Survey of Cooling Technologies for Worldwide Agricultural Greenhouse Applications," *Solar Energy*. 81(12), pp.1447-1459, 2007.
 12. Oz H, Atilgan A, Büyüktas D, Alagöz T. "The Efficiency of Fan-pad Cooling System in Greenhouse and Building up of Internal Greenhouse Temperature Map," *Scientific Research and Essays*. 4(10), pp.1061-1068, 2009.
 13. Alhelal IM, Albadawi AA, Alsadon AA, Alenazi MM, Ibrahim AA, Shady M, *et al.* "Effects of Shading Nets Color on the Internal Environmental Conditions, Light Spectral Distribution, and Strawberry Growth and Yield in Greenhouses," *Plants*. 13(16), 2318, 2024..
 14. Lamnatou C, Chemisana D. "Solar Radiation Manipulations in Greenhouses: A Review on Spectral Filters and Photovoltaic/Thermal Technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 21, pp.107-120, 2013.
 15. Abdel-Ghany AM, Al-Helal IM. "Covering Materials Incorporating Radiation-preventing Techniques to Meet Greenhouse Cooling Challenges in Arid Regions: A Review," *The Scientific World Journal*. 2012, 906360, 2012.
 16. Zheng L, Zhang Q, Zheng K, Zhao S, Wang P, Cheng J, *et al.* "Effects of Diffuse Light on Microclimate of Solar Greenhouse, and Photosynthesis and Yield of Greenhouse-grown Tomatoes," *HortScience*. 55(10), pp.1605-1613, 2020.
 17. López-Marín J, Gálvez A, del Amor FM, Alba E, Fernández JA. "The Effect of Diffuse Film Covers on Microclimate and Growth and Production of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in a Mediterranean Greenhouse," *Agronomy*. 2021;11(5):860.
 18. Abdel-Ghany AM, Al-Helal IM, Alsadon AA, Ibrahim AA, Shady M. "Assessing the Effectiveness of Reflective and Diffusive Polyethylene Films as Greenhouse Covers in Arid Environments," *Agronomy*. 14(5), 1082, 2024.
 19. Yamaura H, Furuyama S, Takano N, Nakano Y, Kanno K, Ando T, *et al.* "Effects of NIR Reflective Film as a High Tunnel-covering Material on Fruit Cracking and Biomass Production of Tomatoes," *Horticulturae*. 2022;8(1):51.
 20. Hao K, Liu X, Wang X, Fei L, Liu L, Jie F, *et al.* "Optimizing Shade Cultivation Method and Irrigation Amount to Improve Photosynthetic Characteristics, Bean Yield, and Quality of Coffee in a Subtropical Monsoon Climate," *Frontiers in Plant Science*. 13, 848524, 2022.
 21. Pisello AL. "State of the Art on the Development of Cool Coatings for Buildings and Cities," *Solar Energy*. 144, pp.660-680, 2017.
 22. Schulte PA, Bhattacharya A, Butler CR, Chun H, Jacklitsch BL, Jacobs T, *et al.* "Advancing the Framework for Considering the Effects of Climate Change on Worker Safety and Health," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 13(3), pp.159-165, 2016.
 23. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). *Commonly used statistics*. Washington, DC: U.S. Department of Labor; 2023. Available from: <https://www.osha.gov/data/commonstats>
 24. He X, Bonds J, Herbst A, "Recent Development of Unmanned Aerial Vehicle for Plant Protection in East Asia," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 10(3), pp.18-30, 2017.
 25. Mogili UR, Deepak BBVL. "Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture," *Procedia Computer Science*. 133, pp.502-509, 2018.
 26. Kozuki Y, Amanuma A, Tsuchihashi N, Kitajima A.

- “Effect of Postharvest Short-term Radiation of Near Infrared Light on Transpiration of Lettuce Leaf,” *Environment Control in Biology*. 53(2), pp.87-92, 2015.
27. Kusuma P, Pattison PM, Bugbee B. “Increasing Growth of Lettuce and Mizuna under Sole-source LED Lighting Using Longer Photoperiods with the Same Daily Light Integral,” *Agronomy*. 10(11), 1659, 2020..
28. Chen WL, Shen CJ, Hsu HS, Chien CS. “Evaluation on Near Infrared-reflective Diffuse Coating for Muskmelon Production in Simple Plastic Greenhouse during Summer Season,” *Acta Horticulturae*. 1353, pp.279-292, 2022.
29. 方煒。「溫室建築的一般需求與台灣適用的溫室系統設計」。農業機械學刊。第9卷4期，頁1-15，2000年。
30. 曾凱成。「溫室微霧降溫系統之性能評估與溫濕度分佈模式建立」。國立中興大學生物產業機電工程學系碩士論文。台中，台灣。2008。
31. ISO. Ergonomics of the Thermal Environment — Assessment of Heat Stress using the WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) Index (ISO 7243:2017). Geneva: International Organization for Standardization; 2017.
32. ACGIH. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2022.
33. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Criteria for a recommended standard: occupational exposure to heat and hot environments. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention; 2016. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/default.html>
34. Kjellstrom T, Holmer I, Lemke B. “Workplace Heat Stress, Health and Productivity—An Increasing Challenge for Low- and Middle-income Countries during Climate Change,” *Global Health Action*. 2(1), 2047, 2009.
35. Lundgren K, Kuklane K, Gao C, “Effects of Heat Stress on Working Populations When Facing Climate Change,” *Industrial Health*. 2013;51(1):3-15.

收稿日期：民國 115 年 01 月 14 日
修改日期：民國 115 年 04 月 09 日
接受日期：民國 115 年 05 月 05 日