



亞熱帶地區

果菜栽培

溫室之設計

行政院農業委員會 臺南區農業改良場 編印

中華民國 105 年 5 月



亞熱帶地區

果菜栽培

溫室之設計



荷蘭在設施栽培領域為世界之冠，設施番茄經營規模及環控技術具有領先地位，單位產量高而穩定；而臺灣小果番茄具有高精度、高品質之優勢，曾讓荷蘭園藝專家讚賞為是農業中的藝術。為精進國內果菜類栽培設施及栽培技術，本場承接會本部國際處任務，自2011年起本場與荷蘭瓦赫寧根大學合作，共同規劃一座適合亞熱帶地區小果番茄生產之溫室。計畫執行期間，雙方互訪交流，尤其本場研究人員與轄區青年農民一同前往荷蘭研習溫室管理課程與參訪荷蘭產業發展，對於溫室管理之理論及實務均有深入的了解。而荷蘭團隊在Hemming博士的帶領下，將先進的荷蘭設施管理技術與國內研究人員分享，舉辦了兩次研討會。而計畫目標之一在於依現今產業可能需求下，設計適合亞熱帶地區的環控溫室。

「臺荷示範溫室」由荷蘭瓦赫寧根大學溫室園藝研究中心團隊，透過專業軟體分析及模擬，分析臺灣小果番茄重要產區(雲林、嘉義及臺南地區)之氣象資料，及嘉義地區傳統栽培設施之微氣候及小果番茄生產成本，模擬臺灣地區經濟可行性溫室及節能降溫模式。「臺荷示範溫室」於2014年由臺灣溫室公司(奇圃園藝)依據荷方規劃建造完工，示範溫室正式營運迄今約兩年，為達到最佳化的栽培管理，陸續加入植槽下通風管，及引入鄰近蘭花溫室之冰水機系統進行夜間除濕。

本研究成果在2012年由荷方Dr. Hemming及Dr. Speetjens與臺方代表蔡致榮博士及本人共同以英文發表，荷方期待能快速翻譯成中文供更多人參考，本場動員同仁進行翻譯工作，再補充溫室目前進展，期待能提供荷蘭設施設計之邏輯，提昇溫室園藝知識。中文版出版也邀請Hemming博士提供序言，期待未來設施發展能再有所突破。

臺南區農業改良場 場長

王如俊 謹識



臺灣地區露天栽培常受到強風及豪雨損害，在病蟲害防治上亦需要較高的成本，透過溫室栽培可以達到保護作物、減少作物受到氣候及蟲害的威脅。目前臺灣設施小果番茄品質優良但是產量不足，而高階溫室生產體系尚未應用於臺灣果菜類生產溫室，透過本計畫，可探討適合臺灣地區氣候條件的果菜生產溫室設計。

溫室設計需要透過系統性的納入多種因子進行設計 (van Henten等人, 2012)，以當地的氣候條件 (外輻射，溫度，濕度，風速) 為基本因子，再套入不同溫室環控的模擬條件求出溫室內環境，及作物生長評估，再進一步套入經濟分析評估經濟可行性。以氣候及作物生長資料進行經濟模式模擬，以評估最適合之經濟可行性溫室設計。本示範溫室以臺灣地區氣候條件 (6GJ/m²輻射量、高溫35°C及100%高濕) 進行分析，以1996年de Zwart的溫室氣候模擬模型及2011年 Vanthoor作物生長模型進行模擬，再蒐集現行經濟資料套入以經濟模式進行分析。

針對臺灣地區生產高糖度小果番茄栽培，設計亞熱帶地區經濟可行性溫室，以50%自然通風量的大面積天窗，配合防蟲網以避免粉蝨危害，溫室以具有高透光率、高熱傳導及高散射性的塑膠布覆蓋，此外，溫室配置有噴霧量達300g/m²/h之噴霧系統。目前正針對夜間降溫進行研究，透過增加空氣循環，能減少高濕所造成的生理障礙及病害。示範溫室面積為680平方公尺，座落於臺南區農業改良場，本書介紹溫室設計過程相關模擬，透過示範溫室設計相關研究，有助提升臺灣溫室園藝知識。

Wageningen University Greenhouse Horticulture

Silke Hemming



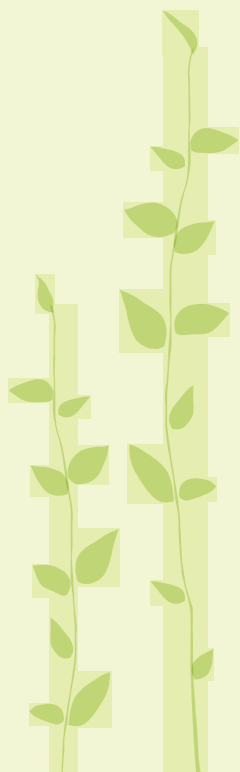
目錄

1. 摘要.....	劉依昌 譯	8
2. 緒言.....	黃圓滿 譯	11
3. 方法.....	盧子淵 譯	13
3.1 設計方法.....		13
3.2 形態圖.....		14
3.3 動態氣候模式KASPRO和輸入數據的描述.....		15
3.4 經濟模式和數據收集的描述.....		16
4. 溫室氣候模擬的結果.....		19
4.1 氣候資料.....	吳雅芳 譯	19
4.2 通風效能.....	林明瑩 譯	23
4.3 被覆材料.....	鍾瑞永 譯	28
4.4 絕熱冷卻.....	楊清富 譯	30
4.5 二氧化碳添加.....	江汶錦 譯	35
4.6 光控和節能網.....	江汶錦 譯	37
4.7 作物生產.....	黃瑞彰 譯	38
4.8 加溫需求.....	張嵐雁 譯	40
4.9 人工光源.....	黃士晃 譯	41
4.10 太陽能.....	張嵐雁 譯	42
4.11 密閉和半密閉溫室.....	張元聰 譯	46
4.12 雨水儲存.....	許涵鈞 譯	52
4.13 四個溫室類型比較經濟分析.....	許涵鈞 譯	53
4.14 敏感度分析.....	許涵鈞 譯	55
5. 結論.....	謝明憲 譯	57
6. 示範溫室營運現況及未來展望.....	許涵鈞 撰	59
參考文獻.....		65
附錄 - 序2原文.....		68



目錄

表 3.1 經濟模式中價格、成本及收益的假設值.....	17
表 3.2 經濟模式對投資、折舊率、維護和利率的假設值.....	18
表 4.1 增加天窗比率對溫室內氣候及番茄全年蒸散量的影響.....	24
表 4.2 依照所要阻絕的害蟲種類來決定防蟲網的屬性.....	26
表 4.3 2009 年臺南氣象條件下防蟲網對溫室內氣候的影響.....	27
表 4.4 被覆材料之效能.....	28
表 4.5 不同型態溫室以玻璃或塑膠布為被覆材料之產量比較.....	29
表 4.6 炎熱時數對噴霧及年度噴霧量的影響.....	31
表 4.7 噴霧與風扇水牆系統耗能之評估.....	34
表 4.8 2009 年臺南氣候下不同類型遮陰網的影響.....	37
表 4.9 2009 年到 2010 年於臺灣氣候下加熱系統之容量資料.....	41
表 4.10 在臺南及荷蘭氣候下，不同條件模擬人工光源之效果.....	42
表 4.11 蓄熱桶及集熱器的大小對溫室內部溫度和作物產量之影響.....	45
表 4.12 在臺灣氣候條件下三種不同形式密閉溫室特色之總結.....	46
表 4.13 此經濟分析中被比較的四個溫室類型特徵.....	53
表 4.14 比較四種溫室類型的經濟分析摘要.....	54
表 4.15 敏感性分析的參數變化.....	55
表 6.1 溫室內溫濕度資料.....	62





目錄

圖3.1 溫室設計要件形態圖.....	14
圖4.1 臺灣和荷蘭的日長時數比較圖.....	19
圖4.2 2009年和2010年臺南、雲林、義竹的累積日照總輻射量.....	20
圖4.3 2009年和2010年臺南、雲林、義竹和荷蘭的每天日照輻射總量	20
圖4.4 2009年和2010年臺南的每日室外平均溫度和相對濕度.....	21
圖4.5 2009年和2010年義竹的每日室外平均溫度和相對濕度.....	21
圖4.6 2009年和2010年雲林的每日室外平均溫度和相對濕度.....	22
圖4.7 2009年和2010年荷蘭的每日室外平均溫度和相對濕度.....	22
圖4.8 2009年臺南的風速.....	23
圖4.9 溫室內溫度及相對濕度在不同天窗比率下之負載期間曲線.....	25
圖4.10 在臺南地區溫室在2種不同天窗比率下氣體交換量的總合.....	25
圖4.11 在天窗開口的防蟲網，結合有外遮陰網.....	27
圖4.12 不同溫室被覆材料對於溫室內微氣候及作物溫度之影響.....	29
圖4.13 不同噴霧量下，溫室溫度及濕度負載期間曲線.....	31
圖4.14 不同噴霧量下，溫室內每日平均溫度及濕度.....	32
圖4.15 不同噴霧量下，溫室內每日最高溫度及濕度.....	33
圖4.16 風扇水牆冷卻效應在溫室內形成之溫度剖面.....	34
圖4.17 臺灣和荷蘭溫室添加二氧化碳的效果.....	35
圖4.18 臺灣和荷蘭整年天窗開口狀況.....	36
圖4.19 臺灣氣候下開放型溫室天加二氧化碳的影響.....	36
圖4.20 提高加溫系統的容量對室內溫溼度的影響.....	40
圖4.21 太陽能收集系統之示意圖.....	43
圖4.22 單日及二日溫室內加熱需求及直射陽光輻射能之總量分佈.....	43
圖4.23 用於溫室加熱系統之集熱器及熱能儲存桶.....	44
圖4.24 不同蓄熱桶容量及集熱器大小對溫室內溫度之負載期間曲線...	44

圖4.25 完全密閉溫室操作之全年環境數據.....	48
圖4.26 完全密閉溫室操作之3日環境數據.....	48
圖4.27 開放溫室操作之全年環境數據.....	49
圖4.28 開放溫室操作之3日環境數據.....	49
圖4.29 半封閉溫室日間降溫操作之全年環境數據.....	50
圖4.30 半封閉溫室日間降溫操作之3日環境數據.....	50
圖4.31 半封閉溫室夜間降溫操作之全年環境數據.....	51
圖4.32 半封閉溫室夜間降溫操作之3日環境數據.....	51
圖4.33 2009年和2010年臺南地區降雨量.....	52
圖4.34 2009與2010兩年年降雨樣態下，兩年期間雨水儲存的水量.....	52
圖4.35 研究重要參數對回收期影響的敏感度分析.....	56
圖6.1 示範溫室外觀.....	63
圖6.2 溫室內採用懸吊式植槽，配合養液滴灌系統以椰纖為介質建立 栽培模式.....	63
圖6.4 灌溉系統主機及養液桶.....	63
圖6.3 示範溫室內以噴霧、大面積天窗及側窗降溫.....	63
圖6.5 噴霧系統主機及RO水設備.....	63
圖6.6 利用光積值決定灌溉頻率.....	64
圖6.7 比較臺荷溫室與本場其他溫室溫度.....	64
圖6.8 示範溫室環控系統示意圖.....	65



亞熱帶地區 果菜栽培 溫室之設計

1 摘要

本研究探討適合臺灣蔬菜生長的最佳溫室，目標是要設計低耗能，高水分利用率，對環境友善為前提的生產系統，因此將太陽能也納為評估選項。理想的溫室生產除了高產量外，同時須兼具高品質及安全性。我們所建議的溫室具備經濟可行性。許多因素會影響溫室設計，在這研究中，重點集中在當地的氣候條件、能源、水、成本、售價以及設備的價格。本研究目的在設計一個低投資成本的溫室。

本研究利用系統化的設計程序來設計溫室。逐一列出並評估溫室系統中的所有功能及可能的設計方案。本研究利用 KASPRO 溫室模擬模型，來研究不同設計方案可達到的效果。它是一個動態的模式，能夠精準地模擬溫室中的狀況，提供每小時一次的數據紀錄資料，包括溫度、相對濕度、作物生長和二氧化碳濃度。此模型是以溫室內相關的質能平衡為基礎進行計算，並以另一個經濟模式，研究設計方案的經濟性效能。以年為基礎來計算所得和成

本，作物產量取自KASPRO所模擬的數據，投資成本係以歷年來平均數據以及栽培者所提供的數據之基礎進行計算。單純的投資回收期的計算方法，能夠快速比較不同溫室類型。臺南農改場提供三個地點的氣象數據，臺南地區年太陽輻射能約 6 GJ (即60億焦耳，荷蘭地區為 3.9 GJ，約39億焦耳)。植物生長很大程度上取決於太陽輻射，臺灣蔬菜生產的作物潛在產量高於荷蘭，然而，由於臺灣有較高的輻射強度，溫室中的溫度也較高，這將影響作物生長。臺灣空氣的相對濕度是非常高的，經常超過95%。臺灣溫室設計的另一個重要考慮因素是颱風的存在，溫室結構不能因颱風造成永久性損壞。正如前面所述，我們使用一個動態的溫室模式以模擬溫室不同設備的效果，以這經濟模式迭代運算，下列技術得以被評估：

● 通風和防蟲網 (Ventilation and insect net)

臺灣亞熱帶氣候的溫室通風系統應經過計算與模擬，以避免過高的溫度。機械通風耗電高，所以我們建議使用自然通風。通風口應配備防蟲網以防止粉蝨進入。為了維持足夠的通風能力，即使是使用防蟲網情況下，通風的面積至少為0.5平方公尺/每平方公尺溫室地板面積。在這種情況下，在溫室內的溫度接近外界溫度。自然通風是無法降低室內溫度至低於外界溫度。

● 溫室覆蓋材料和遮蔭網

我們建議使用具漫射性塑膠膜，且有較高的光透射 (> 75%)，及較高的遠紅光透射，這有助於降低溫室溫度。遮蔭網在高輻射下有效降低作物溫度，但同時減少了光線透射，產量比沒有應用遮蔭網情況較低。臺灣有許多的陰雨天，遮蔭的效果是有限的。然而，遮蔭網提供了減少作物逆境的另一種方式，因此我們建議安裝一個外遮蔭網 (遮光率30%)。這種類型的遮蔭網並不會減少通風量太多，但可減少作物因強光而受損的風險。

● 絕熱冷卻 (Adiabatic cooling)

當系統與周邊無熱量傳送發生時，則稱該系統係在絕熱狀態。在絕熱狀態下，使系統降溫的過程，稱之為絕熱冷卻，當系統內某一成份物發生相變，吸收系統內的顯熱，蒸發為氣體，而造成系統溫度降低。水冷卻塔即為一常見之實例，溫水與未飽和空氣充分接觸，由於質量傳送的因素，水蒸發為氣體，在理想狀況下，出口空氣溫度將達到露點溫度，若將水及空氣視為系統內的兩部份，則水及空氣之溫度均會降低，而系統對外之熱傳可忽略。

我們建議安裝淨容量至少為 $300\text{ g/m}^2/\text{h}$ 的噴霧系統。該系統將在溫室一天最熱的時間降溫，有助於減緩作物逆境。我們不建議使用水牆風扇系統 (Pad and Fan system)，因為它需更高的能源成本，且溫室內溫度分佈不均勻。

● 加熱系統和二氧化碳供給系統

為避免長期低溫對作物產生的負面影響，建議使用加熱系統和二氧化碳供給系統。在無加熱系統之溫室中，植物雖可存活，然而產量會因加熱系統而提高。加熱系統可採用化石燃料或太陽能 (或兩者的組合)。以太陽能加熱溫室具永續及低成本。然而，它卻不是最經濟的選項 (隨著能源價格的不斷提高，在未來可能會有所改變)。如果只用太陽能加熱的溫室，我們建議安裝太陽能集熱器的規格為“ 0.7 平方公尺集熱器/平方公尺溫室面積”；緩衝桶大小應為 200 立方公尺/公頃溫室面積。鍋爐的容量 (如果是唯一的熱源) 約為 100 W/m^2 ，可保持溫室溫度不低於 12°C 。配合緩衝桶，可減少鍋爐的容量。除非二氧化碳是免費或便宜，在通風良好的溫室中施加二氧化碳，所需成本非常高。如果在未來的計畫中，可以連結使用工業 (廢棄) 二氧化碳，值得重新探討其可行性。

● 密閉型溫室

密閉型溫室可提供作物最佳生長條件，達到高產目標。然而，此類溫室的投資成本高 (需要昂貴的溫室和降溫設備)。而且種植者對溫室的環控策略必須能發揮溫室最大效能。對於一般臺灣蔬菜栽培者，從目前使用的溫室到一個密閉型溫室之轉變太大。密閉型溫室的概念在未來，更適合作為一個示範和研究計畫，而不是用於商業蔬菜生產。

2 緒言

作物設施栽培系統在世界各地廣為使用，設施栽培面積仍持續增加中。栽培面積增加之原因來自於諸多因素，例如設施栽培能提高產量、延長產季、較露天栽培節水，以及減低作物被暴風、雨或冰雹、病蟲危害等歉收風險，對高經濟價值之特用作物、花卉以及盆栽植物，能滿足其栽培需求，提升其品質或使其產品食用更為安全。

綜觀世界各地之各類型設施栽培系統，隨著當地環境需求而變化迥異。從低技術需求與低成本的塑膠布隧道棚，到西歐與北美地區使用的高技術需求、高成本的玻璃溫室等皆是。溫室大小、形狀與建造的材質差異極大，其變化範圍可從塑膠布單棟結構到玻璃材質的連棟結構。溫室內部相關配備亦具多樣性，從採用自然通風來降溫的簡單設計，到採用電腦調控溫度、濕度、二氧化碳濃度，以及人工光源的精密型生產系統。以荷蘭與中東等地區所建造使用的溫室為例，甚至是配備有自動降溫裝置的完全密閉型溫室，溫室內之作物以土耕栽培或是介質栽培，採用滴灌供水、供肥，過多的灌溉水於封閉迴路中循環回收使用。世界各地設施栽培主要以人工管理，但是近期將引入機器人於高技術發展之溫室中，以取代人力。

經由諸多觀察心得，本研究將對適合臺灣當地環境之設施栽培體系設計進行闡述。無疑地，此一問題並非首次顯現，眾多文獻顯示，許多溫室相關的設計議題已被探討過，如溫室結構與被覆材質 (如 Von Elsner *et al.* 2000a,b)、特定地區或是單一結構變數的最佳化溫室設計 (如 Hemming *et al.* 2004; Impron *et al.* 2007; Zaragoza *et al.* 2007)、最佳氣候條件 (如 Garcia *et al.* 1998)、溫室氣候控制 (如 Bakker *et al.* 1995)，或是介質和營養控制 (如 Gieling 2001)……等。在諸多溫室設計的研究中，多數的溫室設計僅探討單一因子的影響，此意味著，僅考量單一因子導致其成為次佳設計。設施栽培系統的溫室設計，必須考量多方面的影響因子，才能解決可能發生的問題，並達其最佳化 (van Henten *et al.* 2006, Hemming *et al.* 2008)，因此，須了解各項影響因子及其處理方法，藉以達到最佳化設計。

此研究的主要議題是：何種溫室設計最適於臺灣之蔬菜栽培？我們的目標在於建立一個對環境友善的生產體系，此一體系不僅節能、儘可能地使用永續能源、高效率之水分利用、高產與產量的可預期性、產品品質良好、產品安全，以及此生產體系的高益本比。

影響溫室設計的最重要因素之一是所在地之氣候條件。氣候因子影響溫室內部微氣候，也是溫室栽培作物產量差異之主要原因。Hanan (1998)、Van Heurn與Van der Post (2004) 等人

則提出一些除了氣候條件之外的其他影響因子，這些影響因子決定了設施栽培系統的特別需求。綜述其所列之影響因子如下：

1. 市場大小、區域機能性與社會基礎建設，決定農產品販售機會，同時也影響其運輸成本。
2. 於不同區域氣候下，考量其風力強弱、雪或冰雹等影響，而決定該區域溫室結構之需求，溫室中須配備符合當地氣候之環控裝置，亦即有設備與能源等之支出。
3. 溫室中設備運轉與環控所需燃料類型或電力能源，其方便取得與否以及成本。
4. 水是否方便取得與品質。
5. 土壤品質，包含排水系統、地下水位高度、淹水風險與地形。
6. 土地的可取得性與成本、所在地現今與日後都市化潛力、有無 (汙染) 工業與區域限制的存在。
7. 資金的來源。
8. 人力成本，以及人民之教育水準。
9. 材料與設備之可獲得性，以及公共設施水準，以決定設施栽培系統的結構與設備。
10. 食品安全、農藥殘留、化學藥劑的使用與排放至土壤、水和空氣等方面之法規規範。

溫室設計主要聚焦在當地氣候條件，尤其須特別注意電力、能源及水的方便取得性、當地成本與價格，以及設備價格。本設計之目的在於提供一般栽培業者，在有限投資下，能搭建出其適合的溫室。

3 方法

3.1 設計方法

設施栽培系統設計必須整合多項因子並使其能達到最佳效益。在設計過程中，必須從建築結構、被覆材料、氣候環控設備、能源來源、能源管理、光照管理、種植介質、水和養分供應、內部運輸和勞力等方面考慮。所有的選擇都會互相影響，而且也會受到當地如氣候、市場、法律和可用資源及技術層面的影響，設計結果將會影響栽培者的收益。

根據Van den Kroonenberg、Siers (1999) 和Cross (2001) 所描述的系統設計程序，設計過程大致包含以下步驟：

0. 定義設計目標 (本研究：設計在臺灣適用的蔬菜溫室)。
1. 設定符合需求及目標之規格 (本研究：低能源投入、使用永續能源、高用水效率、高產量和產品品質及產量的可預測性、藉由低農藥使用以達高食品安全、生產系統的高益本比)。
2. 藉由系統分析所需要的功能。
3. 模擬分析每項因子及其可能替代方案，並以圖形進行分析。例如降溫因子，我們會考慮自然通風、內循環風扇、噴霧系統、水牆風扇降溫或是空調系統作設計選項。其他的因子在此階段也以相同方式模擬分析。
4. 概念的發展階段。在這個階段，在形態圖的不同的因子組合成更具體的概念設計，滿足設計目標中的最低功能需求。數個不同的溫室模型會在此階段成型。
5. 設計評估和瓶頸評估。在這個階段，以專家和數學模式的數值，模擬評估不同的溫室設計模型。(本研究：動態溫室氣候模型和經濟模型)。
6. 為所選擇的模型，制定出更多細節，例如溫室氣候的設定值和種植策略；於本文研究中未涉及此部分。
7. 依設計需求建立與測試原始模型。

此種設計過程的優點為：設計者仔細思考所有問題，避免太快下結論。它提供系統設計一個多面向思考的機會，減少錯誤發生。可以多面向的考慮每一個設計因子，避免忽略或過於重視某些因子，並能及早發現設計矛盾與瓶頸。它在設計過程中提供數據，有助於更客觀

的決策。投資者和決策者藉著對生產的了解，可以在過程中提供意見，更能使人信服其設計的正確性。雖然工程師在設計過程中遵循這樣的方法，但它並不能保證成功。而是以合適的模型(本文裡的溫室氣候、作物和經濟模型)深入評估可能執行的模型，配合決策支援系統，有助於提高成功率。

3.2 形態圖

形態圖在設計過程中是非常重要的。右邊圖表最左列顯示一個溫室的所有因子。在每個因子中列出各種可能的設計方案。藉著選擇每個因子的不同設計方案，我們可以定義一個新溫室系統的設計。(紅色線條為Wageningn大學所提出之方案；綠色線條為臺南區農業改良場所提出之方案)

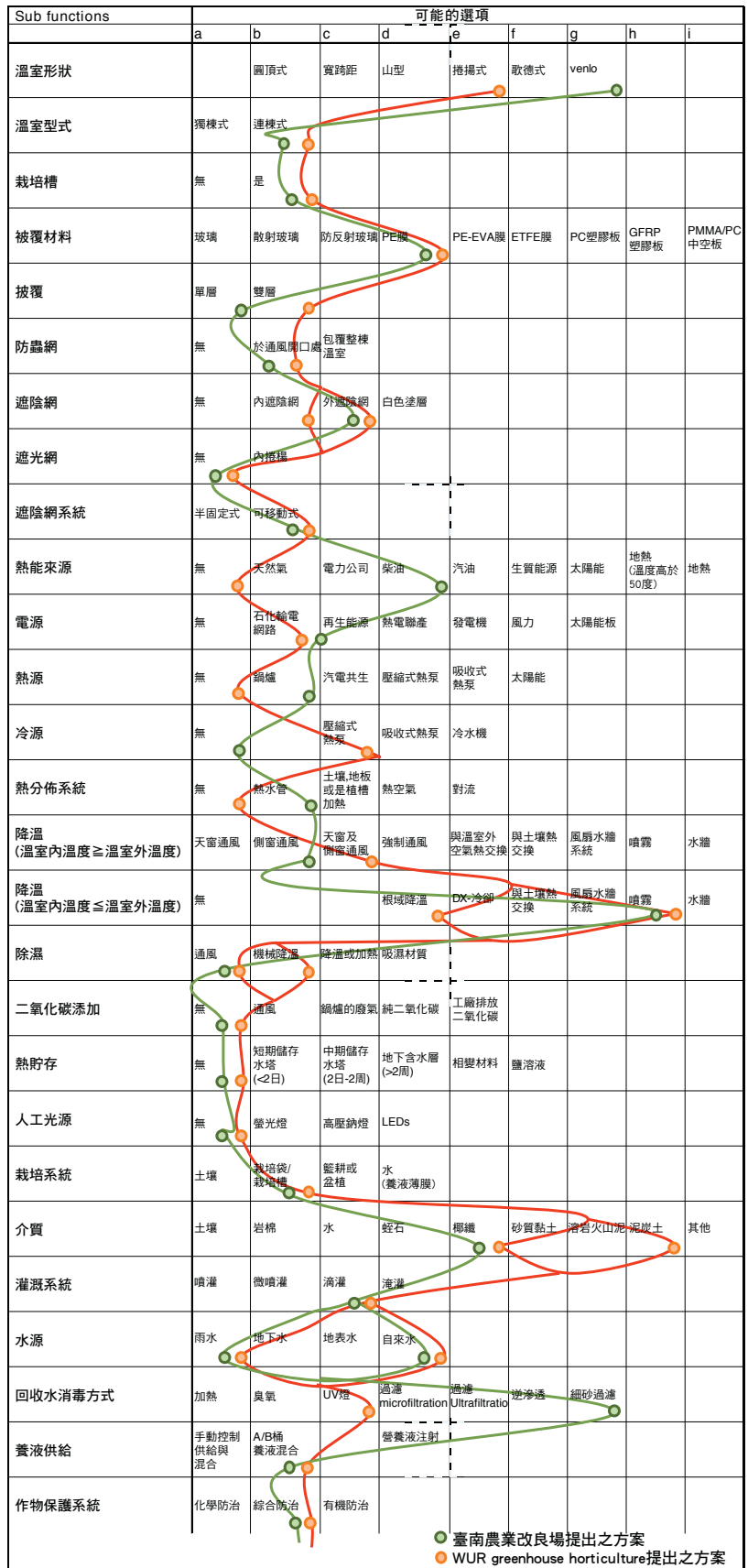


圖3.1 溫室設計要件形態圖

3.3 動態氣候模式KASPRO和輸入數據的描述

目前已經開發出許多決策支援系統用來評估各種溫室系統設計，如KASPRO (de Zwart,1996)、法國的SERRISTE (Tchamitchian等, 2006)、HORTEX (Rath, 1992)或GTa-Tools (Vans Ooster, 2006)。這些系統讓設計者或栽培者，針對影響經營策略及操作選項，提供可靠並且快速的評估。

本研究利用KASPRO系統進行評估。以全面性的動態模擬模式模擬一個虛擬溫室，根據溫室建築元素、通風口面積、溫室設備、不同的被覆材料和材料的屬性(穿透、反射和散射)，以及內部氣候與外部氣候的觀測，任何估算的數值均能逐一列出。本計畫中所列出數值包括溫室一年中每個小時的氣候、能源消耗、作物的水分蒸發量、二氧化碳的施用量和作物產量。

該系統是根據熱及質量平衡相關的計算所建立 (Bot,1983)。熱平衡包括對流和輻射過程。質量平衡是由滲漏和通風的過程 (de Jong, 1990)，包括植株的蒸散作用 (Stanghellini, 1987) 和表面的凝結。而二氧化碳濃度的質量平衡是依據通風與光合作用所損失的二氧化碳，和經由二氧化碳施用量與呼吸作用增加的二氧化碳計算而得。

基本上，該系統由進入溫室結構的太陽輻射，計算由輻射所導致的熱流通量與水分流通量。熱量和水分主要由植株釋放，但熱流通量也來自外部元素。以太陽輻射的反射量評估被覆結構和遮光網的反射。熱流通量與水分流通量影響植株周圍的空氣條件，與溫室結構和環境的動態相互影響。在某種程度上而言，株冠周圍的微氣候和環境之間的相互作用，可以藉著加熱、通風、加濕和除濕、二氧化碳的施用、遮光和甚至冷卻來控制。溫室氣候可以現有的環控系統來控制 (de Zwart,1996)。

本計畫以KASPRO模擬臺南地區氣候條件對溫室內氣候的影響，而作物依所設定的溫室結構而有不同反應。本研究利用自然通風或噴霧的蒸發冷卻來達到降溫目的，並評估二氧化碳施用量對產量的影響，以及使用遮光網或人工照明設備的光照控制的影響。

僅以自然通風，對具高溫和高輻射的亞熱帶氣候降溫效果有限。在外界處於低濕度條件時，噴霧蒸發冷卻有助於改善溫室的室內氣候。所裝設的噴霧容量取決於當地的外部氣候條件。二氧化碳施用可以增加生產量，但當通風率高時，必須大量施用，而且沒有實質效益，因為二氧化碳會散逸到外界空氣中。臺灣地區輻射強度高，高輻射強度對提高生產量的助益

不如中度輻射強度地區，因此研究重點著重於如何利用遮陰網減少溫室中的高溫，且不影響作物光合作用。

輸入外界溫度、濕度、全輻射、風速和天空的溫度等氣候條件之每小時平均值。

KASPRO模型以作物光合作用速率推算作物的生長和蒸散，這種方法適用於模擬溫室氣候，但不適合準確預測亞熱帶氣候的總產量。因此，我們必須使用另外的決策支援系統來預測每年番茄產量。由Vanthoor (Vanthoor, 2011) 開發之系統，使用更詳細的作物模型，特別針對高溫對作物造成的不利影響。

同時結合KASPRO溫室系統和INTKAM作物生長系統 (Elings等, 2010) 來模擬人工光源，分別使用二種光照 ($85 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ 和 $195 \mu\text{mol}/\text{m}^2$) 狀況下的作物生長。此三種條件分別在溫室使用或不使用二氧化碳施肥下，同時以荷蘭氣候進行模擬進行比較。

所有KASPRO模擬的結果，包括所實現溫室內一年中每小時的氣候、能源消耗、作物蒸散的水量、二氧化碳施用量，和在不同方案中作物的乾物質產量，然後這些結果被套用於經濟模擬系統中進行分析。

3.4 經濟模式和數據收集的描述

在經濟模擬系統中，分析不同投入等級的數個案例，以找出在亞熱帶氣候的臺灣蔬菜生產最佳的溫室設計。

經濟模擬系統是依據KWIN (2010) 的分析方法，計算每年收益和成本。產量和產品價格為收益，而熱能、電能、二氧化碳的消耗、作物資材、勞動力成本、作物保護成本、作物營養、水、介質、塑膠薄膜、電線、夾子和包裝及相關成本價格為變動成本。而每個案例中計算初始設備的投資，包括溫室建置、覆蓋材料、隔離網、防蟲網、加熱和種植系統、灌溉系統、二氧化碳施用系統、噴霧系統、人工光照系統、環控系統和一般管理成本、運輸、包裝區和機械。計算初始投資每年的成本，應考慮到折舊、維修及利息。簡單投資回收期的算法是總投資總和 \div (作物的年收益 $-$ 年變動成本 $-$ 年維修成本)。

由此經濟模擬系統計算可分析許多經濟數據，KASPRO虛擬溫室模型提供以乾物重表示的番茄產量、熱能、電力、二氧化碳和水消耗的數據，再輸入此經濟模式。植物種苗數量以每平方公尺2.5棵植株為基礎。就作物保護、作物營養、介質、塑膠薄膜、金屬線和夾子的成本由KWIN (2010) 取得，並假設荷蘭與臺灣的生產相似。對於所有方案，假設勞力成本會

隨著產量比例而變化。在臺灣傳統情況下，勞工成本常被忽略，但栽培過程中有許多的手工作業尚未被自動化機械所取代。一個開放的灌溉系統比封閉的灌溉系統多消耗40%以上的水。臺南農改場提供能源、電力、二氧化碳和勞力的價格。假設包裝成本隨產量而變動，假設塑膠薄膜覆蓋材料、防蟲網、遮蔭網和二氧化碳系統的折舊為3年，而其他大多數設施設備的折舊為15年。根據設備的種類，維護成本在2%~8%之間 (KWIN, 2010)。在臺南地區實際的利率為6.5% (來源：貿易經濟)。臺南區農業改良場提供番茄價格，大約是每公斤120 NTD (€3/kg)。由於缺乏臺灣溫室番茄隨季節變化的產品價格資訊，我們全年使用這樣的價格。假設生產面積為2公頃，並涵蓋公司所有的投資，包括一般設施與包裝區。表3.1為價格、成本和收益的假設值概觀；表3.2為投資、折舊、維護和利率以及年投資成本的假設值。

表3.1 經濟模式中價格、成本及收益的假設值

	價格 [NTD]	資訊來源
小果番茄價格 [NTD/kg]	120.00	Tainan Dares
柴油 [NTD/liter]	29.50	Tainan Dares
電力 [NTD/kWh]	3.00	Tainan Dares
二氧化碳 (純) [NTD/kg]	27.50	Tainan Dares
地下水 [NTD/m ³] (植物灌溉水)	10.00	Tainan Dares
植物種苗 [NTD/plant]	11.75	Tainan Dares
作物勞動力成本 [NTD/h]	170.00	Tainan Dares
病蟲害防治 [NTD/m ²]	21.50	KWIN, 2010
作物營養閉路循環 [NTD/m ²]	18.90	基於KWIN的估計, 2010
作物營養開放系統 [NTD/m ²]	48.26	基於KWIN的估計, 2010
介質 [NTD/m ²]	49.40	KWIN, 2010
塑膠膜,金屬線,夾子 [NTD/m ²]	19.00	KWIN, 2010
包裝材料 [NTD/m ²]	0.38	KWIN, 2010

KASPRO軟體為1996年由de Zwart所提出，主要評估溫室內外能量平衡，即太陽輻射、直接或間接熱能加熱及二氧化碳加熱系統等能源對溫室內溫度之影響，同時評估由屋頂、地板及四周被覆材料傳導所散失之溫度。

INKAM crop model是在2000年由Marcelis等人所提出，主要模擬溫室內植物之淨光合作速率、葉溫、蒸發散量及產量等。

將KASPRO模擬之溫室氣候資料套用於INTKAM進行作物產量模擬，配合臺灣設施番茄生產之成本資料一併進行經濟可行性評估，包括投資成本與回收期估算等。

表3.2 經濟模式對投資、折舊率、維護和利率的假設值 (投資成本是來自工業夥伴的報價)

所有投資數據是以每平方公尺溫室地板面積來計算	投資 [NTD/m ²]	折舊率 [%/year]	維護 [%/year]	利率 [%/year]	年投資成本 [NTD/m ² /year]
玻璃覆蓋	152.00	7	0.5	6.5	16.34
塑膠膜覆蓋	68.40	30	2	6.5	24.11
現代玻璃溫室(包含覆蓋物)	1330.00	7	0.5	6.5	142.98
現代塑膠膜溫室	1140.00	7	2	6.5	139.65
簡易塑膠膜溫室	684.00	7	2	6.5	83.79
加熱系統	475.00	7	2	6.5	58.19
簡易溫室加熱系統	425.60	7	2	6.5	52.14
水牆風扇系統	456.00	25	2	6.5	137.94
具熱幫浦和冷水機的主動冷卻系統	2470.00	7	2	6.5	302.58
栽培系統	209.00	7	2	6.5	25.60
遮陰系統	131.10	25	5	6.5	43.59
防蟲網	190.00	20	5	6.5	53.68
二氧化碳施用	26.60	25	5	6.5	8.84
噴霧系統	171.00	10	5	6.5	31.21
開放式灌溉系統	209.00	15	5	6.5	48.59
具再循環和消毒的灌溉系統	266.00	15	5	6.5	61.85
電力設施	133.00	7	2	6.5	16.29
簡單氣候電腦	114.00	20	8	6.5	35.63
進階氣候電腦	148.20	20	8	6.5	46.31
其他：運輸、包裝區域、手推車和機械	262.20	7	2	6.5	32.12
其他：運輸、包裝區域、手推車和機械；高科技溫室	555.18	7	2	6.5	68.01
雨水儲存[NTD/m ³]	380.00	10	5	6.5	69.35

4 溫室氣候模擬的結果

如同前言提到的，設計一個設施栽培系統需多方面考慮，在設計過程中，必須選擇如建築架構、材料、空調設備、能源來源及管理、栽培介質、水和肥料的供應、內部管理及勞動力等，這些不僅相互影響，也受到在地條件如氣候、市場、法規及資源可獲得性的影響。

完成電腦溫室模型的模擬，並用於測試不同的技術對溫室內氣候及作物生長的影響，這些結果將導入經濟模擬系統，於下一章詳述。

4.1 氣候資料

當地的氣候條件影響溫室設計，相較於荷蘭，臺灣全年的日長相對較為穩定，最短日長在冬天略高於11小時，最長日長則略高於13小時(圖4.1)。

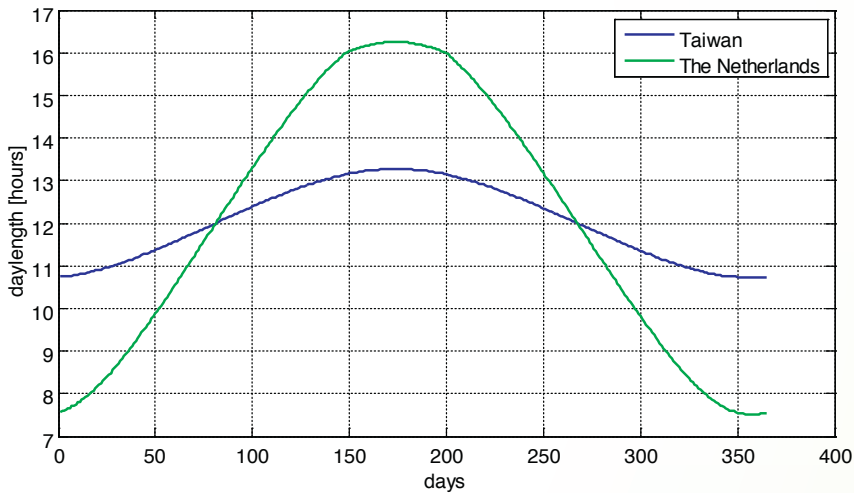


圖4.1 臺灣和荷蘭的日長時數比較圖

4.1.1 輻射

分析臺灣南部包括臺南、雲林、義竹三地以小時記錄的氣象資料，雖然缺乏直接的日照輻射量和漫射輻射量的數據，但利用雲量的資料可以精確合理地建構出日照輻射資料，基於臺灣的緯度(北緯21度)，可計算出晴天日照輻射強度，並與雲量的觀測值結合，以估算日照輻射總量、漫射及直接日照輻射量的概況。

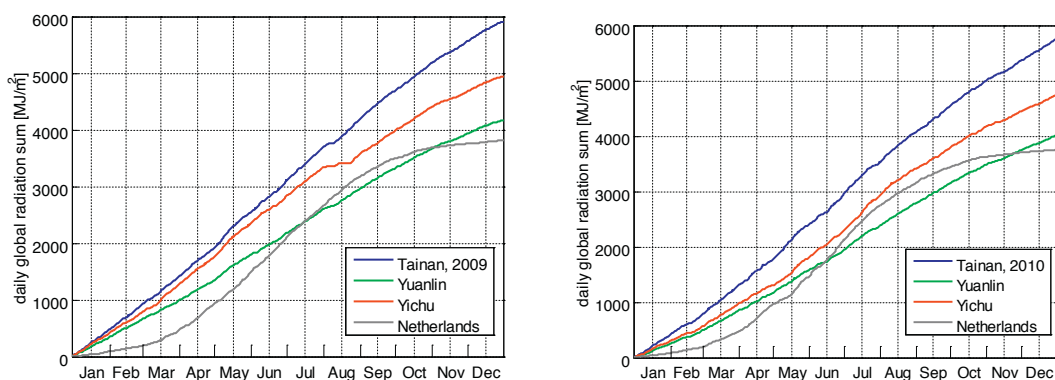


圖4.2 2009年(左) 2010年(右)年臺南、雲林、義竹的累積日照總輻射量

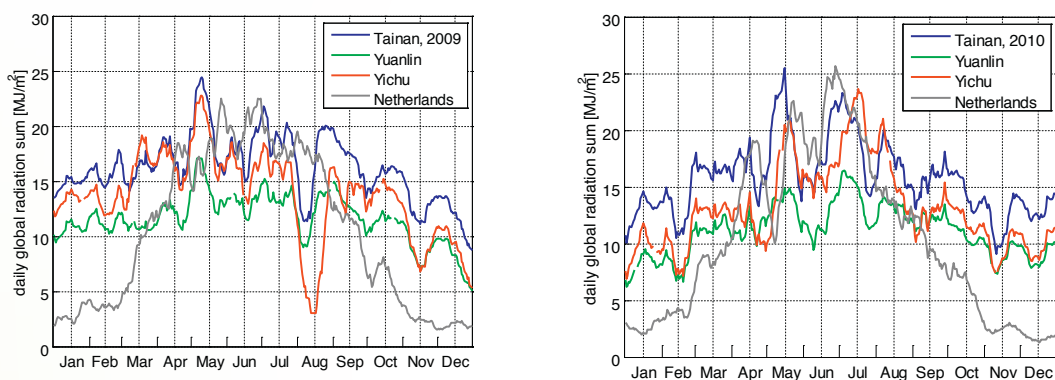


圖4.3 2009年(左) 和2010年(右)年臺南、雲林、義竹和荷蘭的每天日照輻射總量，數據以14天移動平均過濾器消除雜訊

過去幾年的每年輻射總量並不穩定，以荷蘭做為參考值(灰色線)，將2009年及2010年的輻射資料做成上列圖表，三個地點的日照輻射量有差異，其中臺南的光照較雲林高40%，而在植物生長主要依賴光照量的情形下，這二個地區的產量自然會產生顯著的差異。

每年的日照輻射總量有很大的不同，平均而言，臺南的年日照輻射總量為60億焦耳，荷蘭為39億焦耳(圖4.2)。圖4.3則為2009年和2010年臺灣三個地區和荷蘭的每日日照輻射量，相對於荷蘭，臺灣有較高的太陽輻射量，此外，全年的日照輻射量也較為穩定，基於這二點，臺灣蔬菜生產的產量應也高於荷蘭。

但是，由於較高的日照輻射量，自然產生較高的溫室溫度，而溫室外平均溫度相對也較高，室外溫度顯示在下面的圖表中。

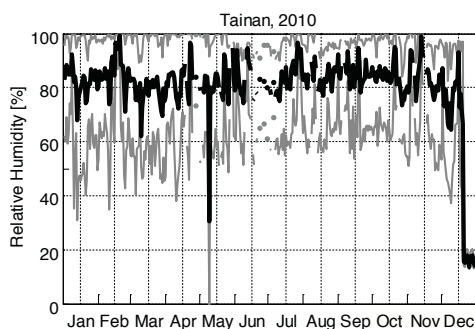
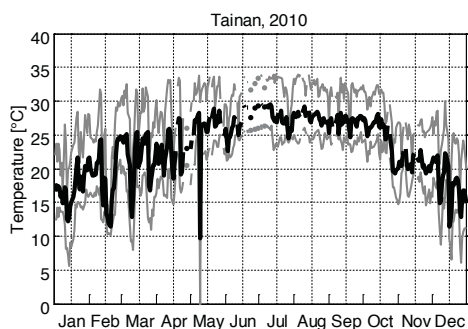
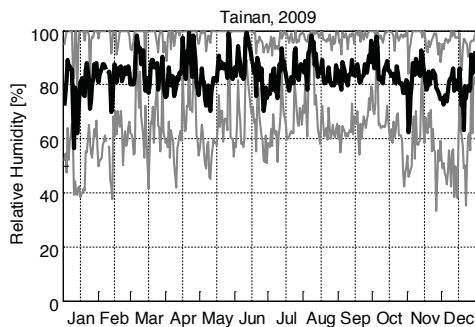
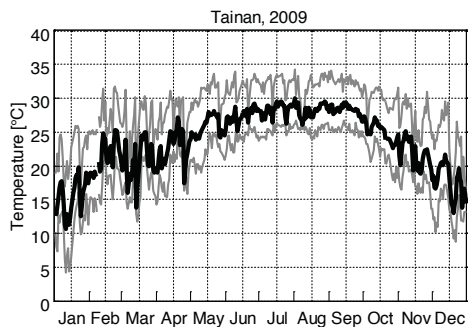


圖4.4 2009年和2010年臺南的每日室外平均溫度 (左) 和相對濕度 (右) (黑線)，灰色線為溫度和相對濕度的每日最低最高值

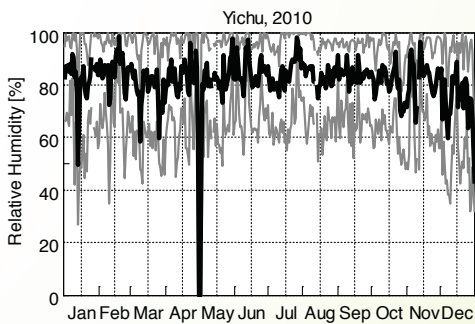
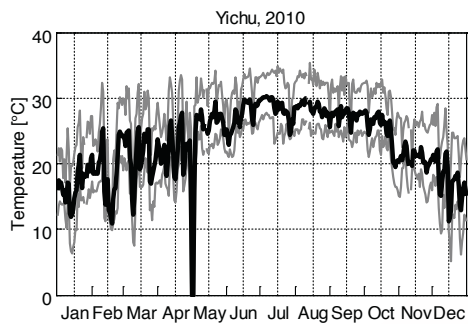
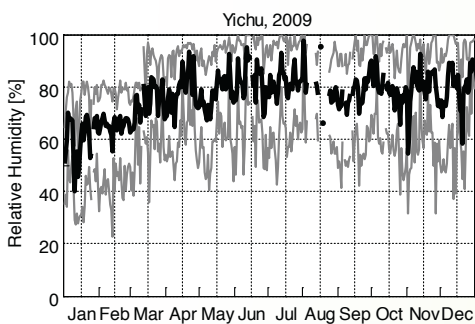
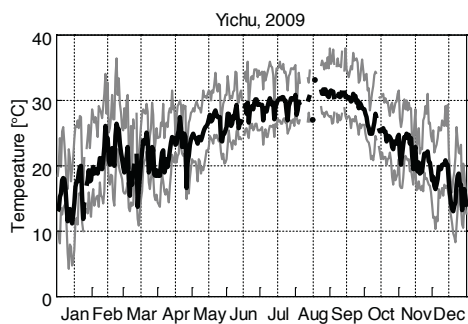


圖4.5 2009年和2010年義竹的每日室外平均溫度 (左) 和相對濕度 (右) (黑線)，灰色線為溫度和相對濕度的每日最低最高值

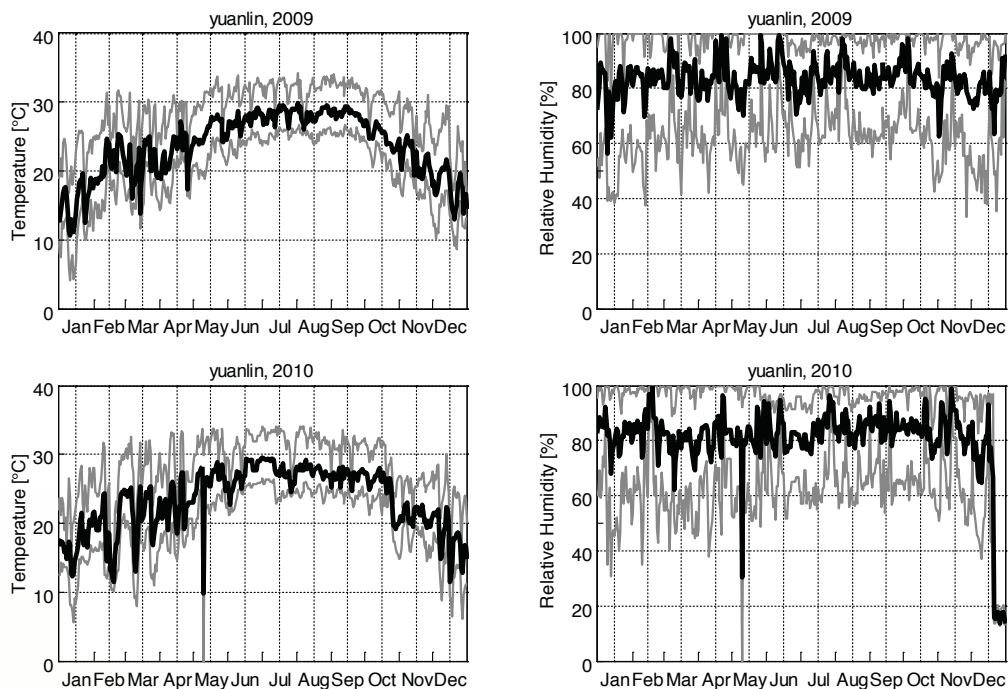


圖4.6 2009年和2010年雲林的每日室外平均溫度(左)和相對濕度(右)(黑線)，灰色線為溫度和相對濕度的每日最低最高溫值(由於數據缺漏，在某些時間點該線掉至X軸)

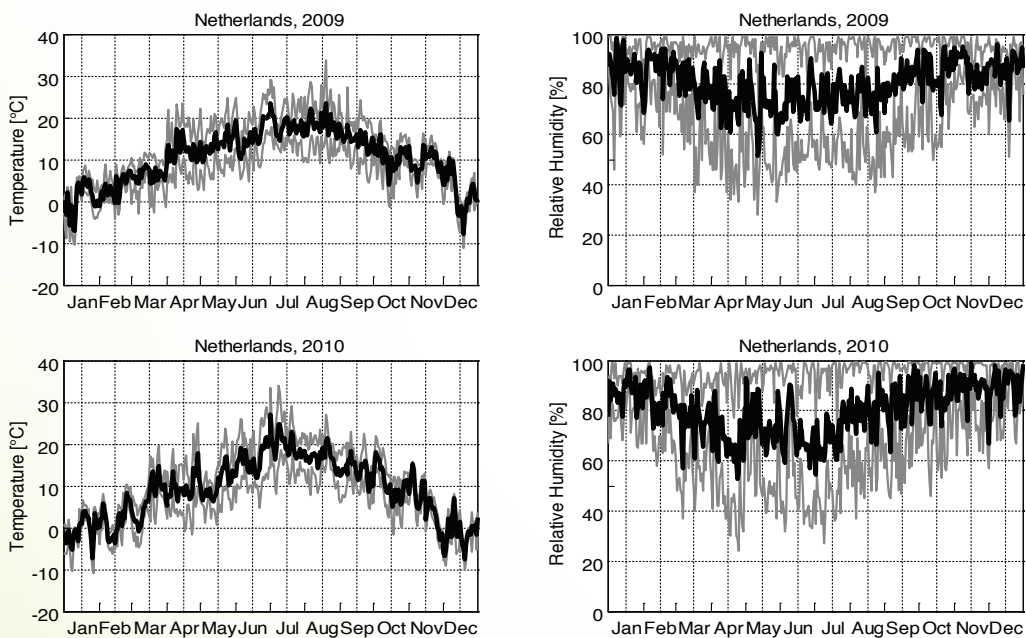


圖4.7 2009年和2010年荷蘭的每日室外平均溫度(左)和相對濕度(右)(黑線)，灰色線為溫度和相對濕度的每日最低最高值

4.1.2 風

下圖為2009年臺南的每日平均風速，最大和最小風速以細灰線表示，但這個測量結果並未明顯顯示出颱風的影響。

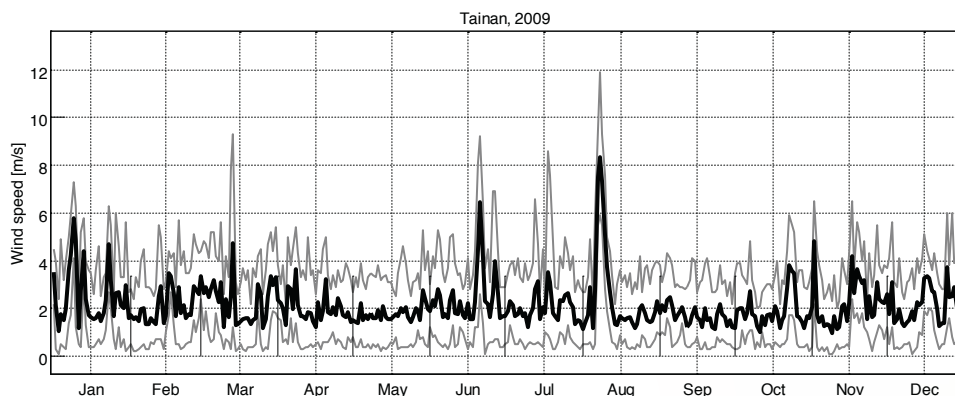


圖4.8 2009年臺南的風速 (黑色線為平均值，灰色線為每天的最小和最大值)

颱風

臺灣常有颱風的侵襲，設計溫室必需考慮能夠抵抗颱風，2009年8月莫拉克颱風期間，風速達到每小時150公里 (每秒40公尺) 且降下大雨 (http://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon_Morakot)。

臺南的氣象資料顯示單日達到700毫米的降雨量，而在颱風期間72小時總計降雨量達到2,777毫米，高風速並未顯示在每日的風速測量資料內，資料中每日平均最高風速為每秒8公尺 (每小時30公里)，明顯太低，此測量值可能是錯誤的。

4.2 通風效能

大部分的溫室是以自然通風的方式將溫室內的熱空氣排出，當溫室外的氣候條件為溫暖且低風速時，自然通風是非常有效率的。機械式的通風相對較為耗能。然而，臺南的氣候資料顯示，幾乎所有時間都有微風，只有短時間是無風的。在此氣候條件下適合以自然通風進行溫室內的氣體交換。

建議使用水平軸流混合風扇 (horizontal mixing fans) 以混合溫室內空氣，使達到溫室內所有角落氣候條件一致。

4.2.1 自然通風

我們廣泛研究運用天窗對提高通風效能的影響，結果顯示大面積天窗有助於自然通風效能。其結果整理於表4.1，並繪製於圖4.9。

在表4.1及圖4.9顯示的「小時數」，代表當溫室內溫度超過門檻值 (30度及35度) 的時間數(小時)。這個資訊是決定溫室的天窗要打開多大的依據。例如：一個0.07的天窗比率 (每1m²的溫室面積打開0.07m²天窗) 可導致1507小時期間作物的溫度高於30度。當天窗比率增加至0.4，該時間數可減少至891小時。

表4.1 增加天窗比率對溫室內氣候及番茄全年蒸散量的影響 (2009年臺南的氣象資料)

天窗比率 [m ² window / m ² greenhouse]	高於30度的 時間 [h]		高於35度的 時間 [h]		相對濕度高於 95%或90%的 時間		蒸散量 [kg/m ² /yr]	作物 產量 [%]
	T air	T crop	T air	T crop	RH>95%	RH>90%		
0.07	1526	1507	374	365	2197	5086	985	100
0.14	1231	1173	157	191	2471	4096	1018	113
0.27	1057	964	41	117	2570	4676	1052	121
0.41	1004	891	18	91	2552	4522	1073	124
0.54	977	860	9	80	2520	4400	1087	126
1.10	943	814	1	65	2405	4176	1117	129

下面的圖稱為負載期間曲線 (duration load curve)。此圖形用於研究一年當中特定狀況會發生的時間。

該圖是由全年發生時間計算而來的值 (例如：溫度, 8760小時) 所組成的。模擬後，所有的值被由大到小排序 (共8760個值)。這些值繪製成圖，所以圖中顯示每年某值發生的總小時數。我們對室內溫度及濕度最感興趣，因此，對不同的天窗開口下溫溼度變化均進行演算。

透過下列敘述，有助於了解負載期間曲線。首先，選擇一個門檻值 (於y軸上)；例如溫室內溫度高於35°C的小時數，然後可以從x軸來得到這個值；如綠色曲線對應是500小時，因此，我們推斷出整年溫室內溫度高於35°C的時間為500小時。

藉由增加通風效能，設施內的溫度會下降，對作物產量的影響是正面的。天窗開啟比例從0.07調至1.1m²/m²時，產量可增加10至15%。

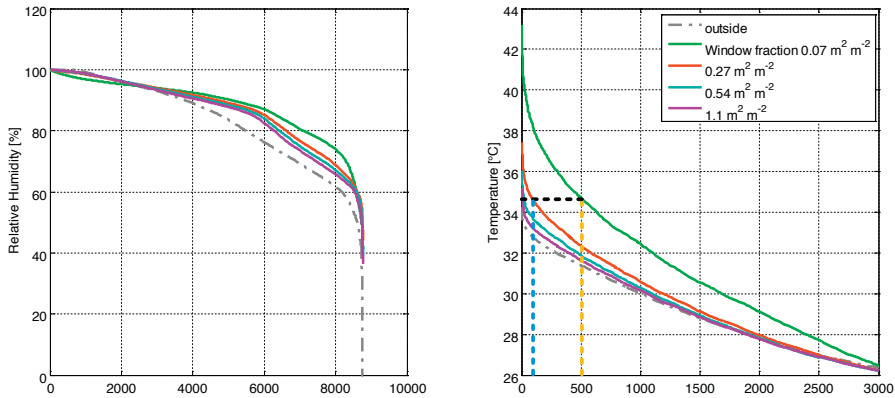


圖4.9 溫室內溫度及相對濕度在不同天窗比率下之負載期間曲線

4.2.2 機械通風

若以機械通風使新鮮的空氣進入溫室中，則平均每年每平方公尺溫室面積需要引入800到1,100 千立方公尺的空氣。每年每平方公尺所需要的能源大概為：

Flow * dP / eff = $(800 * 10^3)$
 $* 100 / 0.8 = 100 \text{ MJ} / \text{m}^2 / \text{year}$
 $(=28\text{kWh} / \text{m}^2 / \text{year})$ 。(其中eff為通風扇效率 [0-1]，dP是通過通風扇的壓力差 [Pa]，Flow是空氣體積流量 [m^3]；在此假設通風效率eff=0.8)。

每千瓦小時成本為3元時 (NTD)，設施內每平方公尺每年將增加84元的成本。使用自然通風是免費的，因此建議以自然通風來取代機械通風。

4.2.3 防蟲網

粉蝨等昆蟲在臺灣園藝栽培會傳播病害。因此，溫室必需適度地使用防蟲網來防止粉蝨

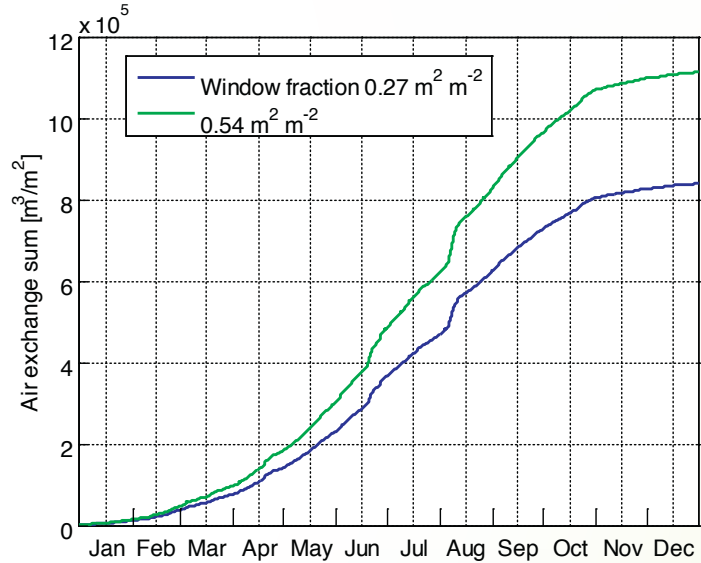


圖4.10 在臺南地區 (2009年) 溫室在2種不同天窗比率下氣體交換量的總合[立方公尺空氣/每平方公尺溫室地板面積]

的入侵。建議網目最大僅能在0.24×0.24mm以內，孔隙度為38%，以避免粉蟲的入侵 (如下表)。

但防蟲網的設置有可能會造成天窗開啟時阻擋部分的通風效能。Perez Parra (2004) 建議以下列的公式來計算防蟲網孔隙度對通風率的影響：

$$\text{通風} = \eta_{\text{screen}} * \text{潛在的通風}$$

$$\text{及 } \eta_{\text{screen}} = \zeta_{\text{screen}} (2 - \zeta_{\text{screen}})$$

此處 η_{screen} 是指通風率的降低因子，而 ζ_{screen} 是孔隙度 ($\text{m}^2 \text{ holes}/\text{m}^2 \text{ screen}$)。下表顯示針對不同害蟲種類所需的孔隙度，及網子所造成的通風減少。

另一種方式是將整個溫室以防蟲網進行包覆。這種增加網子覆蓋的比例會對通風的效果有直接的影響，無論是網子或溫室建物主體均阻礙了光線，我們估計在這樣的案例中溫室內的日照量會減少約15%。

表4.2 依照所要阻絕的害蟲種類來決定防蟲網的屬性

要阻絕的害蟲	網目大小 [mm]	孔隙度 [-]	factor 通風降低係數 [-]
serpentine leaf miner 潛葉蠅	0.61	0.64	0.13
sweet potato whitefly 甘藷粉蟲	0.46	0.57	0.19
melon aphid 棉蚜	0.34	0.48	0.27
greenhouse whitefly 溫室粉蟲	0.29	0.43	0.32
silverleaf whitefly 銀葉粉蟲	0.24	0.38	0.39
western flower thrips 西方花薊馬	0.19	0.31	0.47

表4.3所呈現的是在溫室天窗開口上方覆蓋防蟲網且配合噴霧系統降溫的模擬結果。在這個表的資料中，我們可以推論有覆蓋防蟲網且溫室通風開口50%時，與未覆蓋防蟲網且溫室通風開口40%下的氣候條件幾乎相同。包覆防蟲網一年約阻擋15%的日照量，造成減產約23%。因此，在臺灣日照條件下蔬菜生產，不建議使用防蟲網。

因此，我們建議溫室裝設通風口最少為0.5 m²通風面積/ m²溫室面積，並於通風開口裝設0.24 mm網目的防蟲網。

表4.3 2009年臺南氣象條件下防蟲網對溫室內氣候的影響 (模擬溫室內配備有噴霧系統)

網孔隙度 [%]	通風面積 [m ² /m ²]	高於30°C的小時數 [h]		高於35°C的小時數 [h]		相對濕度高於95 或 90% 的小時數 [h]		蒸散量 [kg/m ² /yr]	作物生產 [%]
		T air	T crop	T air	T crop	>95%	>90%		
No net	0.4	842	1139	0	366	2388	4080	850	100
38	0.3	1015	1325	8	453	2390	4262	784	88
38	0.4	930	1233	3	397	2391	4181	806	93
38	0.5	880	1178	2	367	2386	4125	824	96
38 ¹	0.5 ¹	1006	1329	0	414	2406	4284	783	77

¹假設：外遮防蟲網具12%光反射，外面的風速因網子降低30%。

通風及防蟲網的結論

臺灣位在亞熱帶氣候條件下，溫室內通風系統必須經過計算。大量通風可避免溫室內白天積熱；由於機械式的通風相當耗能，建議使用自然通風。出風口必需裝設防蟲網以將粉蟲阻擋在外。

為了維持通風效能，在使用防蟲網的狀況下，每平方公尺的溫室面積至少需配合0.5平方公尺的通風口。在本設計中，溫室內外的溫度將非常接近。只藉由自然通風無法讓溫度降到比溫室外還低。



圖4.11 在天窗開口的防蟲網，結合有外遮陰網

4.3 被覆材料：塑膠布或玻璃

多1%的光線就增加1%的蔬菜產量，當然這仍需考量溫濕度及二氧化碳濃度等環境生長因子，溫室覆蓋材料應以最多的太陽光穿透為首要條件，以求得最大的產量。

玻璃較塑膠布的透光率高，且塑膠布的透光率會隨使用時間遞減，同時玻璃也較塑膠布容易清洗，不過玻璃成本高，而便宜好用的塑膠布則容易取得，並可依需求附加特殊性質。例如：塑膠布可反射或吸收近紅外光輻射，熱輻射進入溫室愈少，溫室內溫度愈低（不過要反射大量近紅外光方能達到降溫效果，此原理距實用化仍有一段距離）。

另外，塑膠布具高紅外光穿透性，可使熱輻射離開溫室而降低室內及作物溫度，這就是所謂的非積熱型塑膠布 (non-thermic film)，因熱不會累積於溫室內，故適用於熱帶地區 (Hemming et al., 2006)。

下表給予所模擬4種被覆材料的性質，有3種不同型式的塑膠布以遞增的紅外光穿透性進行模擬。

表4.4 被覆材料之效能

被覆材料	EVA	EVA	PE	PE	玻璃
積熱型	是	是	否	否	是
漫射光線	漫射	無漫射	漫射	無漫射	無漫射
代碼	PTO2A	PTO2C	PHO3A	PKO2E	Glass
光線穿透率	0.825	0.9064	0.893	0.89	0.90
漫射光穿透率	0.7099	0.8092	0.765	0.8	0.83
紅外光穿透率	0.20	0.3905	0.37	0.54	0
紅外光阻擋率	0.77	0.58	0.60	0.43	0.80
霧度 (haze)	高度	低度	高度	低度	低度

不同的被覆材料會影響溫室內微氣候，尤其是在高溫及低溫期間，且溫室內光合作用有效光譜也會不同，進而影響作物產量。不同被覆材料之模擬結果如表4.5及圖4.12，但霧度並未列入模擬因子。高霧度的被覆材料提供較高的產量，特別是在高太陽光輻射的氣候條件下，其2大主要原因如下：

1. 作物溫度較低，因為太陽光不會直射葉面。
2. 散射光可使下位葉吸收更多陽光。

相較於其它材料，使用非積熱型被覆材料的溫室，可得最低的室內及作物溫度 (圖 4.12)。玻璃溫室內作物溫度很高，不適合作物生產。

表4.5 不同型態溫室以玻璃或塑膠布為被覆材料之產量比較

溫室型態	被覆材料	
	溫室光線穿透率(%)	作物產量(%) (相較於玻璃被覆)
EVA, 積熱, 漫射光線	65	98
EVA, 積熱, 無漫射光線	71	105
PE, 非積熱, 漫射光線	70	104
PE, 非積熱, 無漫射光線	70	107
玻璃, 積熱, 無漫射光線	72	100

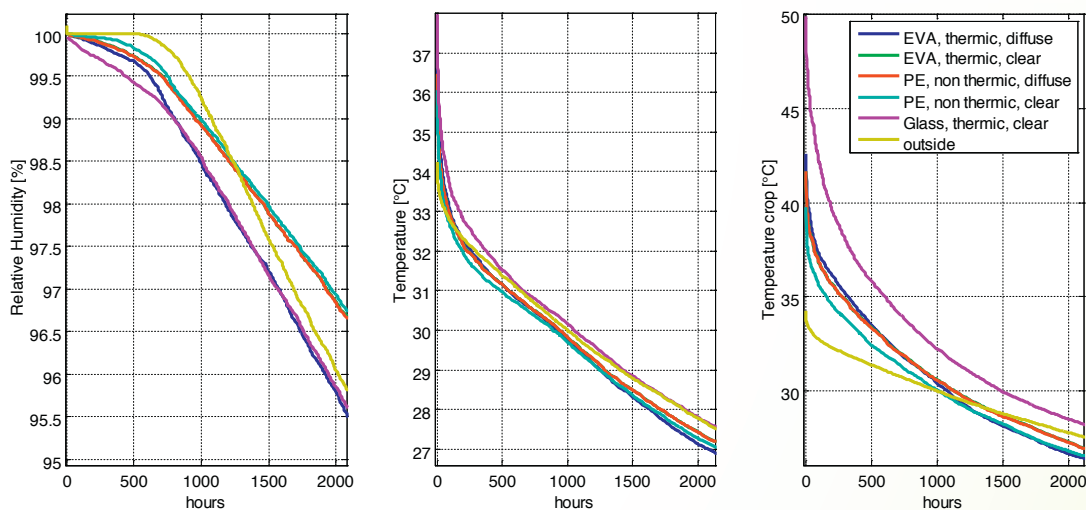


圖4.12 不同溫室被覆材料對於溫室內微氣候及作物溫度之影響

溫室被覆材料結論

建議使用散射及高透光率的塑膠布，同時具有高紅外光輻射穿透性，有助於降低溫室內溫度。

4.4 絕熱冷卻

溫室降溫最簡單的方法就是利用大面積的天窗自然通風，配合利用噴霧，可使溫室內溫度低於室外溫度，其冷卻效果根據空氣相對濕度而定。全球園藝栽培逐漸重視噴霧，尤其是高日照強度及低溼度氣候環境的區域，例如：美國的亞歷桑納、加州或安第斯山脈的高地地區，採用噴霧可營造更合適的溫室氣候。

噴霧的目的是在高日照輻射情況下，增加溫室空氣的濕度及其焓值。空氣的焓值越高，更多的熱能可在溫室內外的空氣間交換。在有限的溫室自然通風能力下（每小時每平方公尺約 50m^3 ），能將過多的熱能量移至溫室外，而使溫室空氣溫度變低。

4.4.1 噴霧

噴霧冷卻原理與水牆-風扇冷卻系統相同，乾燥空氣藉由水分蒸發過程達到降溫目的。水牆-風扇與噴霧冷卻系統之間的主要差異是，噴霧的水霧能均勻噴灑於溫室內，而使溫度分佈均勻。除此之外，霧化裝置的耗電量小於風扇設備所用電量。

表4.6數據顯示噴霧對高溫時數多寡的影響，高溫界定為溫室溫度高於 30°C 和高於 35°C 的時數。參考基準為不使用噴霧，其他情況為使用噴霧，直到空氣的相對濕度達80%後停止。

表格數據顯示，當溫室裝配噴霧量 $300\text{-}375\text{ g/m}^2/\text{hr}$ 的系統時，溫室內高溫時數明顯降低，但植株降溫幅度不如溫室內氣溫，主要因為植株透過蒸散作用達到降溫目的，而植株本身必須要耗能進行蒸散，增加噴霧會減少植株的蒸散量而減少逆境。

上述所提到的噴霧量為總淨流量，實際上噴頭不可能一直不停噴霧，其為間斷式運作。例如瞬間噴霧量 $300\text{ g/m}^2/\text{h}$ 的噴嘴，每分鐘噴45秒後休息15秒，則其總淨流量為 $400\text{g/m}^2/\text{h}$ 。

空氣溫度及相對濕度的負載期間曲線繪於圖4.13，藍線為無噴霧時的參考基準情況，綠線為 300gr/m^2 噴霧量的情況。

表4.6 炎熱時數對噴霧及年度噴霧量的影響，在所有情況下此噴霧系統每年約啟動1880小時
(天窗比率為0.5; 具防蟲網; 2009年臺南氣候)

噴霧量 [g/m ² /hr]	啟動 時數	溫度高於 30°C 時數		溫度高於 35 °C 時數		相對溼度高於 95或90%時數		蒸散量 [kg/m ² / year]	年噴霧量 [kg/m ² / year]
		氣溫	葉溫	氣溫	葉溫	90%	95%		
0	0	1174	1161	97	384	4263	2894	868	0
75	2328	1060	1139	35	344	4155	2839	841	137
150	2339	971	1124	16	316	4117	2801	824	242
225	2343	903	1112	3	289	4095	2802	811	318
300	2343	840	1096	0	259	4099	2800	800	374
375	2345	799	1091	0	241	4101	2801	794	410
450	2347	784	1086	0	230	4101	2804	790	432
525	2347	764	1085	0	225	4100	2804	788	445
600	2347	757	1085	0	217	4100	2804	787	452

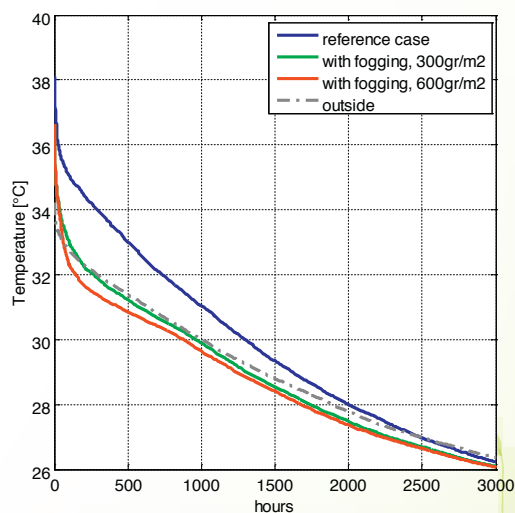
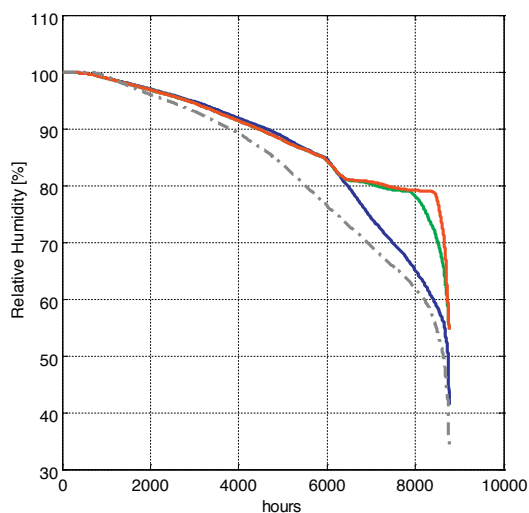


圖4.13 噴霧量分別為300及600 g/m²/year下，溫室溫度及濕度負載期間曲線。噴霧理論上降低溫度並提升濕度，但有趣的現象是濕度的增加只有在低濕度的情況下較顯著，因此噴霧對增加植物罹病的影響有限。在每日最高濕度是相同的 (圖4.15) 情況顯示不會增加濕度相關病害的風險

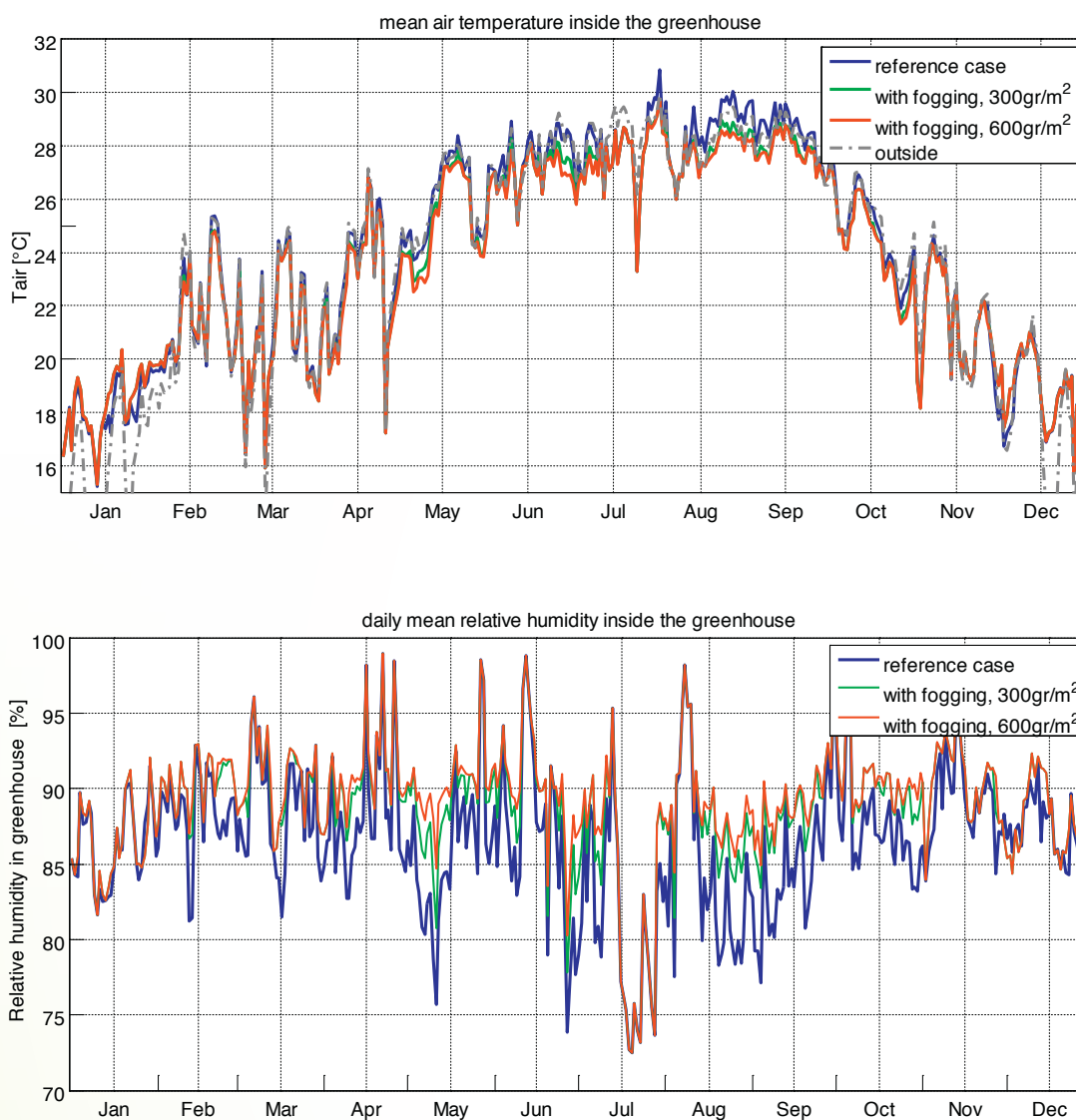


圖4.14 藍線為溫室內每日平均溫度(上)及濕度(下)，綠線及紅線分別為300g/m²/hr及600g/m²/hr噴霧下的結果

4.4.2 風扇水牆

風扇水牆系統的操作原理與噴霧系統相同，運轉時數也相似(約每年1880小時)。最主要的差異在於以風扇代替自然通風。在這些需要通風(1880*80m³/m²/h=150*10³m³)的時間內，使用風扇需要47MJ/m²/year(13kWh m²/year)的能源。耗電是風扇水牆系統最主要的缺點。此

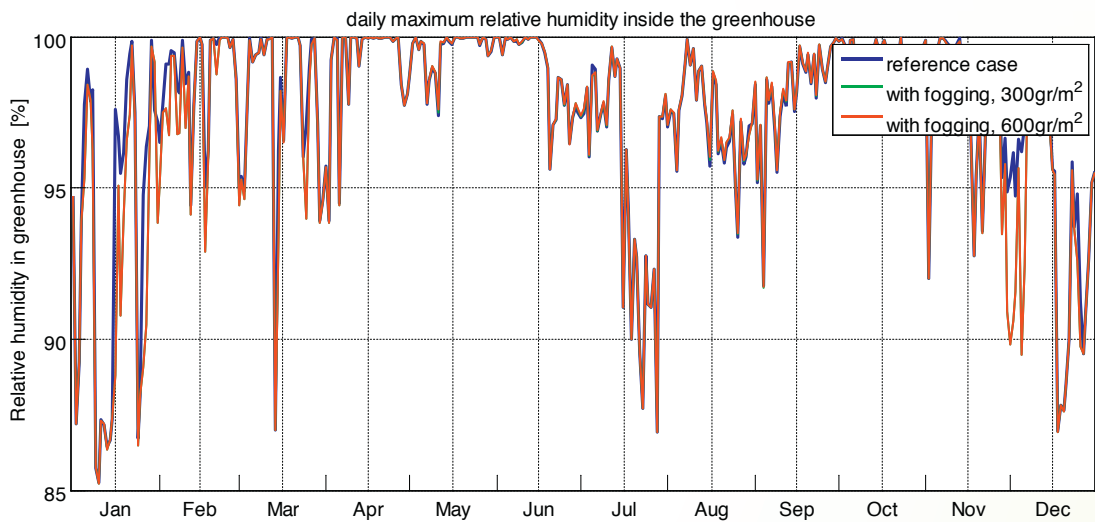
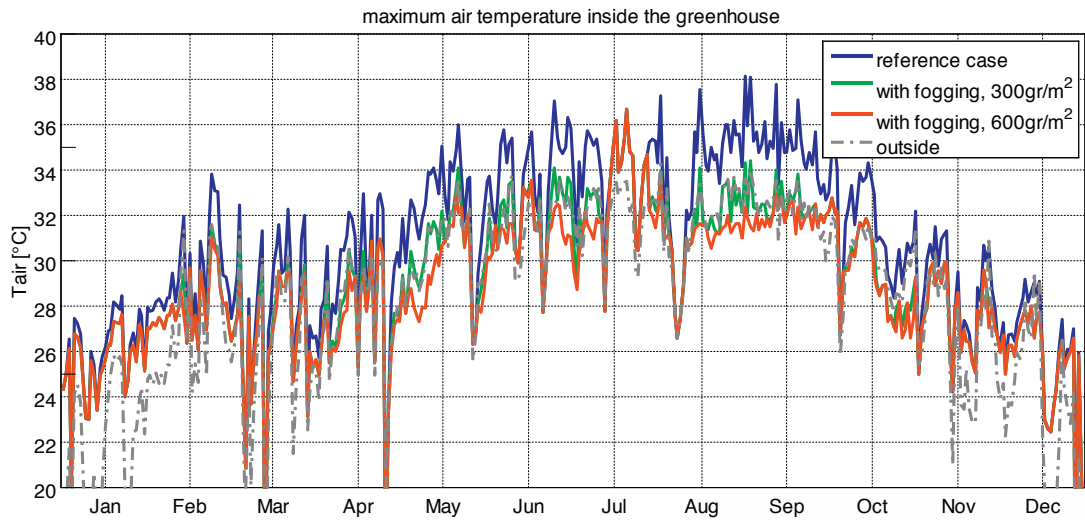


圖4.15 藍線為溫室內每日最高溫度 (上) 及濕度 (下)，綠線及紅線分別為300g/m²/hr及600g/m²/hr噴霧下的結果，每日最高濕度不會受噴霧影響

外，使用風扇水牆系統，溫室內的氣候會變得非常不均勻。為了說明這一點，以計算流體力學 (CFD) 研究所得的圖形顯示如下。在水牆的正後方空氣又冷又濕，空氣在溫室中移向風扇期間被太陽加熱，而在風扇端室內空氣變得更熱，不利於作物生長。

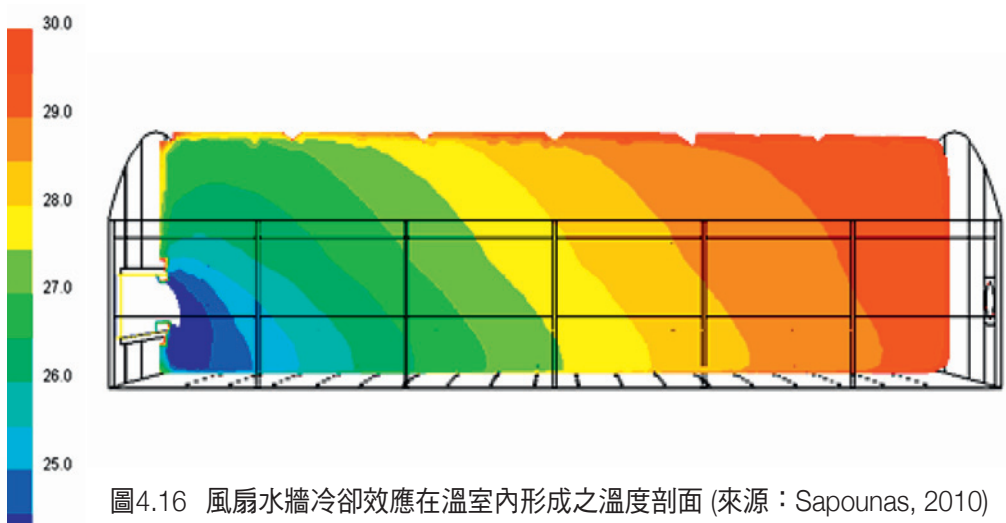


圖4.16 風扇水牆冷卻效應在溫室內形成之溫度剖面 (來源：Sapounas, 2010)

4.4.3 噴霧系統與風扇水牆耗能之比較

噴霧系統之耗電小於風扇水牆系統，(高壓) 噴霧之泵浦約需 $2\text{W}/\text{m}^2$ 之功率，風扇水牆系統大約需要 $7\text{W}/\text{m}^2$ 之功率，即風扇水牆的耗電為噴霧系統的3.4倍。使用地下水(水質差)的區域，需加裝逆滲透系統，使噴霧系統增加額外 $0.7\text{W}/\text{m}^2$ 之功率。

表4.7 噴霧與風扇水牆系統耗能之評估

1. $350\text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$ 噴霧	2.1	W/m^2
高壓泵浦之額定功率為 $50\text{ kW}/4\text{ ha}$		
逆滲透系統之耗能為 $2\text{ kWh}/\text{m}^3$	0.7	W/m^2
2. $80\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ 風扇水牆系統	7.1	W/m^2
風扇的耗能為 ¹ ：	6.9	W/m^2
泵浦的耗能為：	0.16	W/m^2

¹在 $50\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ， 250 Pa 壓差，風扇效率80%。

絕熱冷卻之結論

建議安裝一個容量約 $300\text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$ 的噴霧系統，這個系統將會降低溫室內的溫度及減緩作物逆境。因為高耗電及溫室內溫度分佈不均勻等缺點，我們不建議使用風扇水牆系統。

4.5 二氧化碳添加

植物的光合作用依光照、溫度、濕度、二氧化碳、水和肥料的量而決定。假設水和養分充足供給，則二氧化碳為光合作用之限制因子，如果在溫室內的空氣加入二氧化碳，作物產量將會增加。但是臺灣夏天的溫度和光照量很高，需要大量通風以減少積熱，而添加的二氧化碳可能因此快速散逸。如下圖顯示。

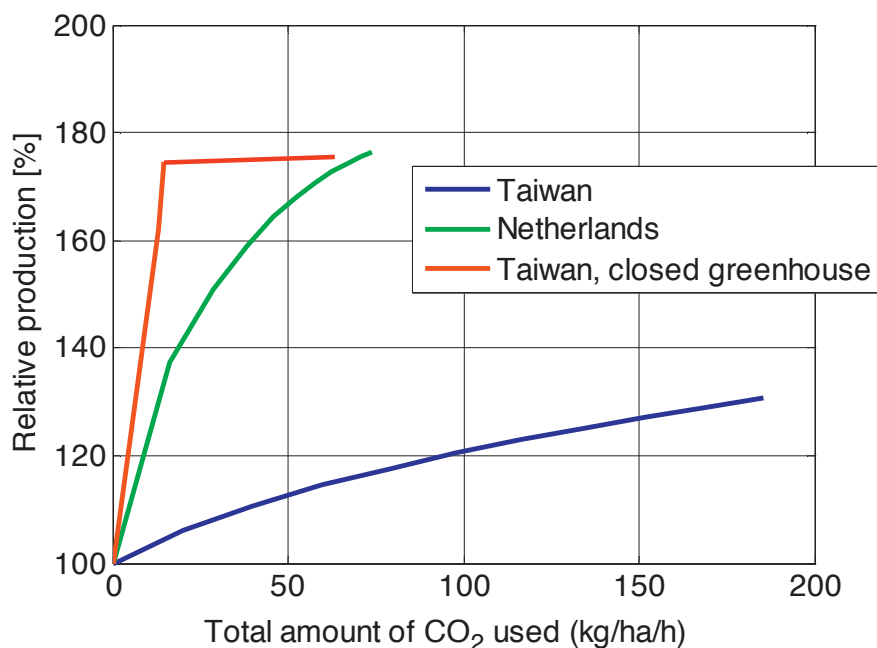


圖4.17 臺灣和荷蘭溫室添加二氧化碳的效果

上圖，我們看到使用二氧化碳可使臺灣溫室產量增加，與對照相比 (無二氧化碳)，投入 50 kg 二氧化碳 /ha/h (即每年施用二氧化碳 18 kg/m²) 能增產 8%，加倍用量至 100 kg 二氧化碳 /ha/h，即每年每平方公尺施用 45 公斤的二氧化碳，則增產 20% (資料未顯示於圖中)。施用高量的二氧化碳雖可增加產量，但也增加成本；額外施用二氧化碳有助於提高溫室產量，但效果不如在溫帶氣候區。此乃因為需大量的通風以達到降溫、維持適合的生長溫度，透過打開的天窗，二氧化碳逸散到溫室外，而減少添加二氧化碳的效果。為了說明這一點，下圖顯示一整年溫室天窗開口情形。

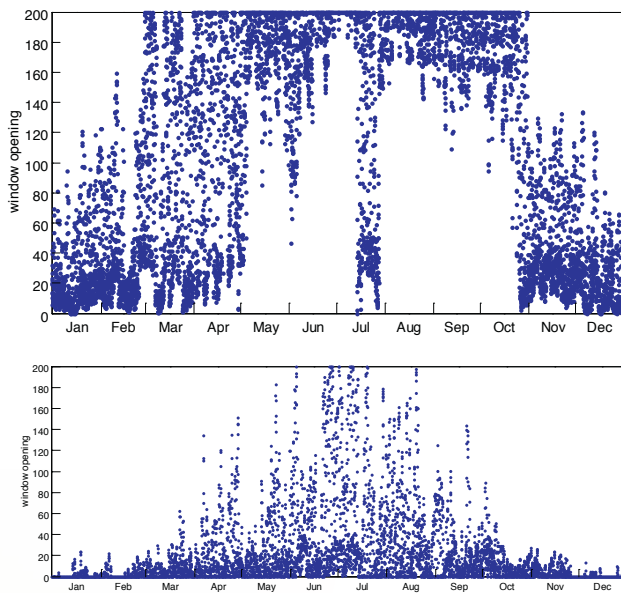


圖4.18 臺灣(上圖)和荷蘭(下圖)整年天窗開口狀況。在y軸上的值是在迎風和背風的溫室天窗開口的總和(兩者皆為0-100%)

圖4.19顯示二氧化碳添加的效果有限。該系統提供與室外濃度(400ppm)相近的溫室二氧化碳濃度，每年約需要18公斤，結果增產8%。

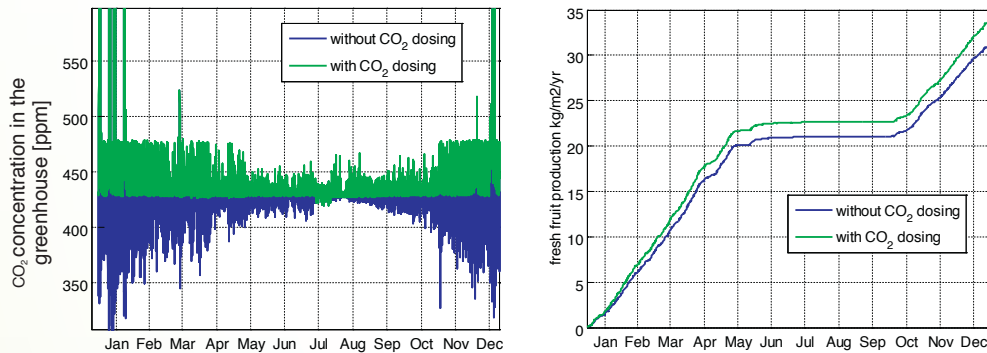


圖4.19 二氧化碳添加對臺灣氣候狀況開放型溫室的影響；當二氧化碳濃度添加到400ppm，作物產量增加8%

二氧化碳結論

二氧化碳是作物生長的必需的元素。雖然室外空氣亦含二氧化碳，但添加額外的二氧化碳時，窗戶是需要完全關閉的，以臺灣的開放型溫室而言，添加二氧化碳並不划算，除非二氧化碳免費或是價格便宜。若以後能使用工業(廢棄)二氧化碳，再重新評估可能性。在封閉或半封閉的溫室，添加二氧化碳是非常有用的，其產量增加超過150%。

4.6 光控和節能網

遮陰網和節能膜在夏季能遮陰和減少太陽輻射，在冬季可減少熱能損失，兩者互相結合運用。本節說明網子的考慮因素與選擇。

由於臺南地區夏季的日照強度相當高，適當遮陰有利於作物生長。當然，限制光照可能略降低產量，但遮陰確實能提高作物品質，減緩植株逆境。一般溫室使用兩種類型的遮陰網，內遮陰網和外遮陰網。內遮陰網較便宜，可以用於遮陰及夜間保溫，主要缺點是限制通風，因為阻絕了溫室和屋頂窗戶之間的空氣交換。外部遮陰網也會限制通風，但影響較小。

表4.8顯示不同類型的遮陰網對溫室與作物的溫度、能源利用與作物生產效果。當外界太陽輻射量超過 $500\text{W}/\text{m}^2$ ，張開內遮陰網，遮陰能減少溫室作物溫度，但也使作物的產量下降。下表同時分析作物的耗水量，較少水的使用意味著更少的蒸散，因而較少水分逆境。

表4.8 2009年臺南氣候下不同類型遮陰網的影響 (包括噴霧 ($300\text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$) 和0.5天窗比率)

遮陰網種類	啟動的時數	溫度高於 30°C 之總時數(h)		溫度高於 35°C 之總時數(h)		濕度高於91%及95%之時數(h)		生長量 (%)
		氣溫	葉溫	氣溫	葉溫	91%	95%	
對照	0	864	1202	1	394	4250	2378	100
內遮陰								
500W, 30%遮陰	1504	1011	1199	2	314	4249	2463	80
600W, 30%遮陰	1042	976	1201	3	329	4241	2441	86
700W, 30%遮陰	538	933	1190	4	335	4232	2414	91
外遮陰								
500W, 20%遮陰	1504	985	1268	2	427	4304	2414	86
600W, 20%遮陰	1042	937	1232	1	404	4301	2409	92
700W, 20%遮陰	538	891	1213	0	388	4293	2394	97
500W, 30%遮陰	1504	923	1170	0	330	4324	2442	9
600W, 30%遮陰	1042	888	1167	0	334	4313	2426	94
700W, 30%遮陰	538	868	1173	0	351	4305	2410	97
500W, 40%遮陰	1504	867	1101	0	270	4327	2465	90
600W, 40%遮陰	1042	859	1123	0	302	4316	2442	94
700W, 40%遮陰	538	853	1146	0	322	4307	2419	97

一般而言，節能網應用於夜間保溫，用來與溫室屋頂隔絕，形成較小的加熱空間，同時減少溫度散失。儘管在臺灣地區夜間溫度並不低，裝置節能網確實能減少加熱空間進而減少加熱所需的能源。假設裝設加熱效能為 $40\text{W}/\text{m}^2$ 的鍋爐，溫室內溫度低於攝氏15度的時數可由每年150小時降至100小時；若以太陽能為加熱能源，能節省更多能源。

光控及節能網小結

在高輻射的環境下利用遮陰網，能夠達到減少溫度上升的目的，但因同時阻絕光線進入溫室中，會對產量造成影響。遮陰網同時也會減少氣體交換，而噴霧降溫需要較高的通氣量，因此在使用噴霧降溫時會使降溫效果受限，因此我們建議使用遮光率30%的外遮陰網，降低對通氣量及作物生長的影響。

4.7 作物生產

KASPRO模型使用光合作用模式來估算作物的生長和溫室內蒸發散量，這是模擬溫室微氣候和作物產量潛力的好方法。產量潛力指在設定的氣候條件下(溫度和太陽輻射)及其他因素均是最佳條件時，作物產量可以達到的估計值，這包括沒有病蟲害、最佳作物管理與高度熟練的栽培者。在現實中，要達到預期的產量與品質，需要參與的人(工人、種植者等)有足夠的知識與豐富的經驗，並能充分運用目前的可行技術。本章節介紹對植物生長最重要的影響因素，以及如何管理這些因素，以達成高的作物生產水平。

4.7.1 如何提高生產力

本節說明達到預期產量與品質的因素。與荷蘭目前的產量($33\text{ kg}/\text{m}^2/\text{year}$)比較，臺灣普遍產量($8\sim 10\text{ kg}/\text{m}^2/\text{year}$)仍有很大差距。有諸多原因可能造成這樣的結果，若改善這些原因即能提高產量，特別是臺灣地區冬季的輻射量遠高於荷蘭，顯示臺灣地區的產量有優於荷蘭的生產潛力。

● 光

臺南地區每年的輻射量大約是 $5\sim 5.5\text{GJ}$ (即50~55億焦耳)，在荷蘭則是 3.6 GJ (即36億焦耳)。當所有影響溫室生產的條件(溫度、相對濕度、二氧化碳濃度)為最適合作物生長時，光量決定產量。在此基礎上，臺灣溫室的生產可高於荷蘭50%。在亞利桑那州輻射量高於臺灣30%，番茄生產水平達到 $100\text{kg}/\text{m}^2$ 。臺南在輻射量介於荷蘭和亞利桑那之間，產量也應該在兩者之間。這表示臺灣的番茄產量應該能達到 $60\sim 80\text{kg}/\text{m}^2$ 。

● 介質替代土壤

傳統上臺灣作物都種植在土壤中。使用介質栽培具有土壤病害少且灌溉及營養供給更有效率等優點。過去幾十年的資料顯示，介質栽培至少增加15%至20%的產量。在原本產量就低的狀況下(約15 kg/m²)，可能增產50%。估計平均產量可增加20%。(係數1.2)

● 溫度控制

臺灣溫室通常不會額外增設加溫或降溫系統。因此：(1)在溫室中的濕度不能被適當控制，導致真菌性病害發生，進而造成減產。(2)冬季低溫導致作物生長緩慢。(3)夏季藉由冷卻或遮光降低溫度，可提高作物生長。番茄最佳的平均生長溫度在18-22°C左右，但也取決於光的水平和品種。在輻射較高時，轉換乾物質生產到成熟的番茄需要較高的溫度，但過高的溫度會增加著果困難，也造成植物逆境。對溫度的研究顯示，適當的溫度控制可提高產量30%。(係數1.3)

● 生產週期

由於夏天溫度過高，臺灣的溫室番茄生長期侷限在5個月內(通常夏季用於生產瓜類)。番茄定植後至生產階段需兩個月。實際生產期(果實收穫期)只有3個月。使用現代化環控系統和介質栽培，則幾乎可周年生產，而溫室的休閒期只有4-8週，扣除作物初期生長階段的兩個月，則實際生產週期至少8個月，大約是臺灣的傳統生產週期的2.6倍以上(係數2.6)。

● 溫室的結構/透光率

臺灣傳統的溫室透光率低，歸因於建材、被覆材料和作物輪作種植結構。現代溫室要求最理想/最小化的架構，有時以白色塗料來增加透光率，更高的透光率(估計30%)能提高產量。根據經驗法則，在其他因素最理想化下，增加1%透光率可增加1%產量(係數1.3)。

● 結合以上論述，各生長因子與產量增加的關係估算為：

生長因子	產量增加
光	1.5
介質	1.2
溫度控制	1.3
生產週期	2.6
透光結構	1.3
合計	7.9

如果把目前每平方公尺生產小果番茄的4 kg當成基本產量，現代化的溫室預估產量約為 $7.9 \times 4 = \text{約}30 \text{ kg/m}^2$ ，然而，我們必須強調，技術本身雖然能夠達到高產及高品質的目標，但是要真正達到這些目標，人員的栽培技術是成功的關鍵因素。這些栽培技術包括豐富的知識，例如：修剪和除葉、找到營養生長和生殖生長之間的平衡，及選擇最好的品種等。

4.8 加溫需求

對亞熱帶氣候地區的溫室而言，加溫需求相當小。以下的圖表（圖4.20及表4.9）顯示需要加熱的時數。如果沒有任何加熱系統，在非積熱型塑膠布被覆的溫室內，每年有200小時低於 12°C （表4.9, 2009年及2010年兩年資料平均值）。而 100 W/m^2 的加熱系統（圖中淺藍色線），其容量足夠提供熱源來降低上述的低溫時數。此外，加熱系統有助於減少溫室內處於過高相對濕度（超過98%）的時數。

種植週年生產的作物，沒有加熱系統的溫室與具備加熱系統的溫室相較，產量約減少6%。對於從12月到5月種植的作物，低溫造成減產8%左右。

加熱小結

加熱系統可用以避免低溫對作物生長產生之負面影響，加熱系統內容量大小則取決於所選擇系統類型及該容量所需之安全閾值。若沒有蓄熱桶，在大多時間需要啟用至少 100 W/m^2 容量的鍋爐以維持溫室溫度高於 12°C 。

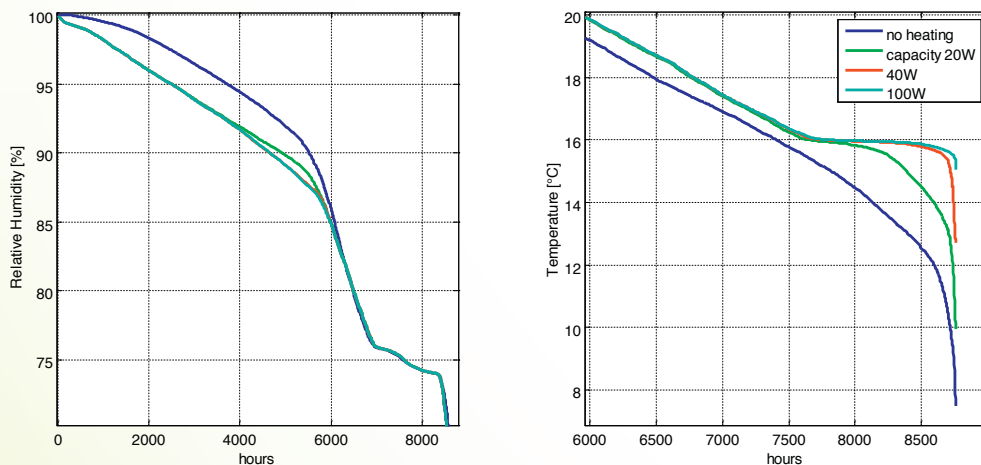


圖4.20 提高加溫系統的容量對室內溫溼度的影響

表4.9 2009年到2010年於臺灣氣候下加熱系統的容量資料

加熱能源 (W/m ²)		加熱系統 啟動時數	年耗能量 (MJ/m ²)	低於10°C、12°C及15°C的小時數		
				10°C	12°C	15°C
0	2009	0	0	107	231	756
20		1568	109	39	108	488
40		1281	156	12	44	218
60		1189	173	0	10	85
80		1167	179	0	5	45
100		1160	183	0	1	32
40	2010	1548	186	112	182	475
60		1464	221	76	143	274
80		1446	242	48	127	216
100		1424	256	4	70	180

4.9 人工光源

本節利用電腦模擬研究人工光源對溫室生產的影響。為此，我們結合KASPRO溫室模擬及INTKAM作物生長模型，以模擬兩種人工光源強度 (85 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 、195 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$) 及不外加光源等三種光源條件下作物的生長情形。而不同光源的模擬又增加二氧化碳施肥的變因進行評估，並評估同樣溫室光源下，荷蘭與臺灣兩地氣候所造成的差異。

結果顯示人工光源在臺灣番茄生產應用效果有限 (表4.10；即便在高光強度 (195 μmol) 下，產量僅提升5%，而在荷蘭產量卻可提升約30%)。因為荷蘭冬天戶外的低光強度，使用人工光源可增加作物產量。

成本

一個600瓦的光源可產出約1050 μmol 的光合作用有效輻射，成本僅需265~350歐元 (包含電線及控制系統)。而每平方公尺的費用則依所需光強度而異，光強度達85 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 的溫室，每平方公尺大概造價21~28歐元，若為195 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ，則需要49~65歐元。以架設85 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 人工光源的溫室，從成本及增加的作物產量來簡單計算投資回收率，假設產量1公斤賣1.5歐元，每年2公斤生產所獲利潤是3歐元，估且不計維護成本，大概需要7~9年才能回本。

表4.10 在臺南及荷蘭氣候下，不同條件模擬人工光源之效果

	臺南地區			荷蘭		
	使用能源 (kWh/yr)	產量 (鮮重kg/yr)	產量 (與對照 相比之%)	使用能源 (kWh/yr)	產量 (鮮重kg/yr)	產量 (與對照 相比之%)
添加二氧化碳						
對照	0	71	100%	0	69	100%
85 $\mu\text{mol/m}^2$	26	73	103%	115	78	114%
195 $\mu\text{mol/m}^2$	46	74	105%	242	89	130%
未添加二氧化碳						
對照	0	54	100%	0	51	100%
85 $\mu\text{mol/m}^2$	26	56	103%	115	59	115%
195 $\mu\text{mol/m}^2$	46	56	103%	242	65	126%

人工光源小結

使用人工光源促使作物增產的效果有限，最高僅增產5% (約每年每平方公尺增加3公斤)，而投資成本相對偏高 (每平方公尺20~65歐元)，且成本得以回收的時間也很長(7~9年)。為此，建議臺灣蔬菜生產不需使用人工光源。

4.10 太陽能

提供溫室能源的另一個替代方案就是使用太陽能。而可以收集並利用太陽能的最簡單系統，只需要一個集熱器、一個蓄熱桶及一組溫室內的加熱系統 (圖4.21)。本節將討論太陽能，並詳細討論不同容量的集熱器及蓄熱桶。

4.10.1 可利用的太陽輻射熱

在亞熱帶及熱帶氣候下，每年的太陽輻射熱能很明顯遠高於溫室內實際需要的熱能。所以，如果能設置一個蓄熱桶來儲存收集到的太陽熱能，就可以簡單地達到加溫溫室的目的。然而，長期儲藏熱能的緩衝容器需要很大且絕緣佳，且造價昂貴，佔的空間也大。

本研究中著重相對便宜，且使用短期循環太陽熱能儲存 (最多兩日) 及簡易集熱器的系統。圖4.22顯示具有40 W/m²加熱容量鍋爐溫室之能量需求與直接太陽輻射。從圖可知，幾

乎每日太陽光輻射量足以滿足加熱需求。在某些時間上，直接太陽光的總輻射量低於總體加熱需求 (圖4.22上方圖，綠線低於藍線處)。而儲存量增至二日，則可減少這些不足的天數 (圖4.22下方圖)。

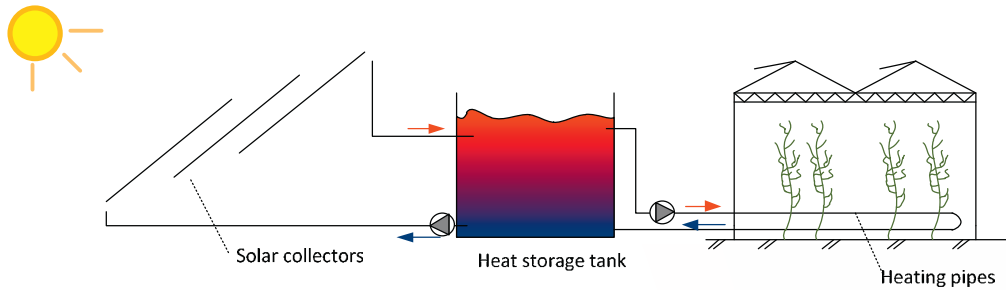


圖4.21 太陽能收集系統之示意圖

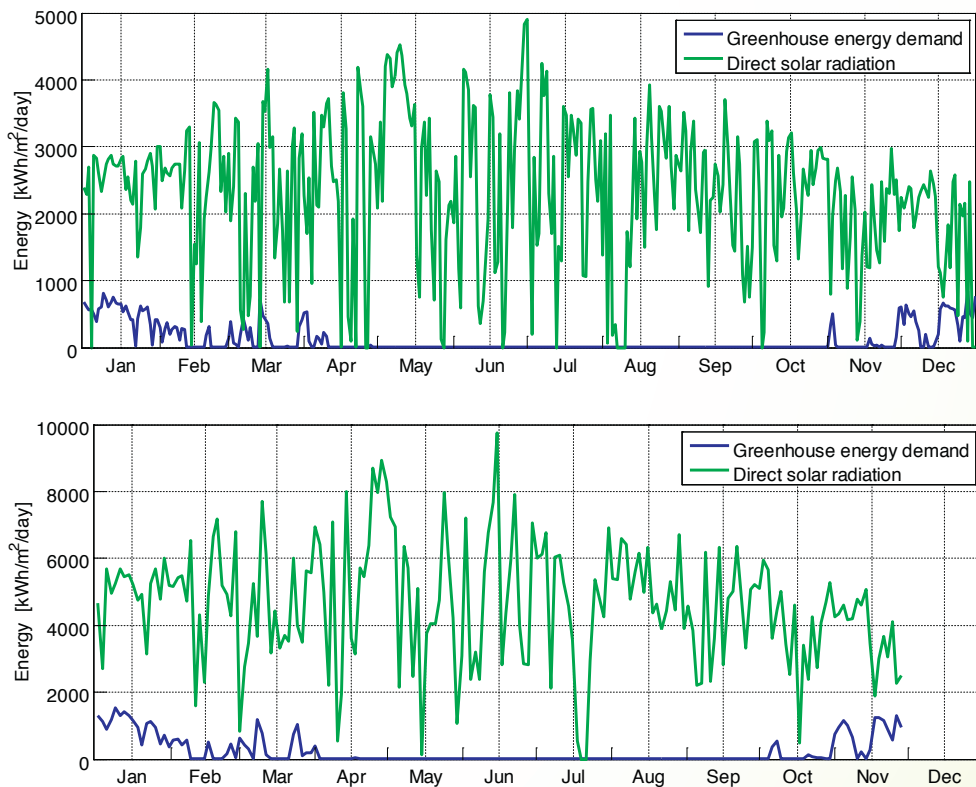


圖4.22 單日 (上圖) 及二日 (下圖) 溫室內加熱需求 (藍線) 及直射陽光輻射能 (綠線) 之總量分佈 (2009年臺南地區氣候資料)



圖4.23 用於溫室加熱系統之集熱器 (左圖, www.certhon.com) 及熱能儲存桶 (右圖)

● 蓄熱桶及集熱器之大小

集熱器連接蓄熱桶，儲藏熱水（日間由太陽能加熱）並在夜間使用。而蓄熱桶大小的選擇，則必須考量是否符合集熱器及溫室的加熱需求，集熱器的大小也會影響實際可捕捉到並可用於溫室加熱的太陽輻射熱量，影響情況可參照圖4.24。該圖說明增加蓄熱桶大小（左圖）及增加集熱器（右圖）之影響。

集熱器及蓄熱桶很明顯必須有相容的大小。表4.11顯示各式模擬條件的結果，表列的數據是以「低於 10°C 之時數」（第三欄）分類。從這張表，我們可以得知，為使溫室內溫度在一年內隨時保溫，至少需要一個約溫室面積70%的集熱器及一個 $200\text{ m}^3/\text{ha}$ 的蓄熱桶才有足夠容量。

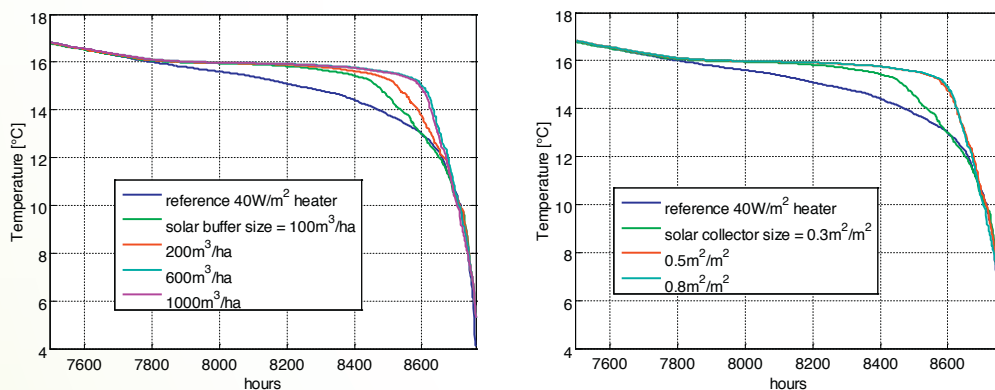


圖4.24 不同蓄熱桶容量 (左) 及集熱器大小 (右) 對溫室內溫度之負載期間曲線

集熱器結論

溫室加熱可以化石燃料或太陽能（或兩者的結合）來進行。利用太陽能具有環境永續和低運作成本。集熱系統由蓄熱桶和集熱器組成，在一定範圍內，這兩個系統的大小是可以互換的。即當蓄熱桶容量增加時，集熱器可以選擇面積較小的（反之亦然）。

如果溫室選擇以太陽能加熱，我們建議安裝集熱器為原溫室面積之0.7倍 (0.7 m² 集熱器/m²溫室面積)，在這種情況下，蓄熱桶的大小應該是200 m³/ha溫室面積，且蓄熱桶需要絕緣，保持內部溫度在48小時內降低不超過3°C。然此投資成本相當可觀：預估每平方公尺溫室面積的相關造價約40歐元 (1500新臺幣)，投資回收期超過10年。單純就經濟效益而言，太陽能加熱溫室實非最好的選項。

表4.11 蓄熱桶及集熱器的大小對溫室內部溫度和作物產量之影響。本表以溫室內的溫度低於10°C的小時數排序

蓄熱桶大小 (m ³ /ha)	集熱器大小 (m ³ /溫室面積m ²)	溫度低於10°C之時數	溫度低於12°C之時數	溫度低於15°C之時數	作物產量 (%)	投資 (歐元/m ²) ¹	回收期 (年)
0	0；未加熱	131	258	760	100		
0	0；40W鍋爐	46	102	524	104	3.5	
0	0；100W鍋爐	0	1	32	106	4	
200	0.7	1	19	72	107	39	11
400	0.7	4	20	51	107	43	12
600	0.7	6	23	55	107	47	13
200	0.6	12	31	101	107	34	10
200	0.6	12	31	101	107	34	10
400	0.6	14	34	80	107	38	11
600	0.6	17	38	83	106	42	12
100	0.7	22	60	217	106	37	11
100	0.6	23	63	230	105	32	9
200	0.5	28	56	153	106	29	9
400	0.5	31	54	115	106	33	10
600	0.5	33	57	121	106	37	11
200	0.4	49	95	233	105	24	7
100	0.4	51	108	292	104	22	7
100	0.3	80	145	361	103	17	5
200	0.3	80	138	315	104	19	6
50	0.4	83	155	436	103	21	6
50	0.3	85	160	449	103	16	5
50	0.2	95	175	489	102	11	4
100	0.2	95	169	449	102	12	4
200	0.2	95	165	413	103	14	5

注意事項：價格基準參考為基本型的大型集熱器 (每平均公尺50歐元)；大型蓄熱桶 (每平方公尺200歐元) (kwin, 2010)
¹2公頃溫室鍋爐或集熱器的預估投資成本 (歐元/每平方公尺)，而本項估算未含溫室內安裝成本及設備。

4.11 密閉和半密閉溫室

為降低溫室內的每日平均溫度，基本上有三種可能選項：

- 完全密閉溫室：天窗整年關閉，溫室內完全採用空調設施控制微氣候。施用二氧化碳以增加作物產量。
- 半密閉溫室，白天期間降溫：藉由只在白天降溫，降溫的總能量需求較低。高產量，白天期間施用二氧化碳增加作物產量。
- 半密閉溫室，夜間降溫：由於每日平均溫度對植物生理是重要的，只在夜間降溫以降低24小時之平均溫度是比較便宜的方法。此選項白天採用自然通風(與噴霧)降溫，而於夜間採用機械降溫。二氧化碳施用的效益微小，如非密閉溫室。

本章節上述三種選項的氣候和作物產量，結果摘總如下：

密閉溫室提供作物最佳生長環境，作物產量非常高。只在白天使用降溫設備的半密閉溫室，能源的使用並不會少於全密閉溫室。只在夜間降溫可降低每日均溫(相對於開放式溫室)，但這個概念尚未被研究證實及實踐。因此，如果以高產為目標，完全密閉溫室似乎是臺灣氣候條件下之最佳選項。

由於這類溫室的投資成本很高(需要昂貴溫室及降溫設備)，同時栽培者必須能完全掌控環境設備及最佳栽培管理技術，以臺灣蔬菜栽培者之平均程度，由現行設施轉型到密閉溫室的差距(或許太)大，密閉溫室概念較適合在不久的將來當成示範及研究計畫。

表4.12 在臺灣氣候條件下三種不同形式密閉溫室特色之總結

	作物產量 (kg/m ²)	作物 產量 (%)	加溫需求 ¹ (kWh)	降溫需求 ² (kWh)	二氧化 碳需求 (kg/m ²)	超過30°C 之時數	超過98% 相對溼度 之時數
開放溫室	29	100	44	0	0	943	1457
密閉溫室	93	321	122	642	18	30	597
半封閉溫室白日降溫	73	255	124	742	20	39	1779
半封閉溫室夜間降溫	39	134	99	35	41	1634	333

¹ 加溫需求數據為必須供應給溫室之熱源總量，其並非電力消耗。如果採用熱泵，電力消耗可以本數值除以4計算(能源性能係數COP為4)

² 降溫需求數據為必須供應給溫室冷源之總量，其並非電力消耗。如果採用熱泵，電力消耗可以本數值除以3計算(能源性能係數COP為3)

4.11.1 密閉溫室

密閉溫室使用空調以控制溫室內部的溫度及溼度，溫室內部和外部氣候完全區隔，即作物能在最佳的環境條件下生長，在這種條件下，作物的產量取決於陽光（臺灣光照環境佳），然而密閉溫室需要投資機械設備及偏高的能源成本（機械降溫）。

為評估密閉溫室的經濟可行性，以KASPRO模型進行模擬，模擬採用之溫室條件如下：

- 作物種植於12月，全年生長。
- 將溫室全年內部環境控制在作物最適生長條件，加溫啟動白天設定在20°C，夜間設定在17°C。
- 當陽光增加導致內部溫度超過加溫設定點4°C，則啟動降溫設備移除熱氣，天窗從不打開。
- 除了溫度控制之外，降溫設備也用來控制相對溼度，當溫室內溼度超過85%（白天）或90%（夜間）即啟動空調除溼，模擬溫室以單層塑膠膜覆蓋，內部無遮陰網以充份利用日照，白天施用二氧化碳使濃度達1000ppm。

結果

降溫之能源需求為每年2,800kWh/m²，能源使用效率為3（COP=3），因此空調電力需求大約為930kWh/m²以保持溫室內部冷涼，加熱系統主要用在夜間溼度的控制，加熱機能源總需求為1100kWh/m²。

灌溉用水量為中度（1000 L/m²）且空調的除溼冷凝水回收利用。二氧化碳維持在高濃度（1,000ppm），因為溫室為密閉狀態，所以無需施用大量二氧化碳，每年每平方公尺施用20公斤二氧化碳已足夠。

模擬產量之預測結果顯示密閉溫室之作物有很高的產量，小果番茄每年產量可達110公斤（收穫指數60%且乾物質含量8%），在實際狀況下，小果番茄每年每平方公尺不曾超過100公斤（大果番茄則有可能），因此在收益分析時產量調整為每年每平方公尺80公斤。

下列各圖顯示在密閉溫室下，各項設備功能試驗之詳細功能。圖4.25顯示整年（試驗時間以小時為單位共8760小時），圖4.26顯示7月時三個具代表性的日期，由圖形可得到之觀測資料包括：

- 溫室天窗總是關閉(左上圖)。
- 內部溫度正常地維持在30°C (白天) 和20°C (夜間) (左中圖)。
- 二氧化碳濃度維持在1000ppm上下。
- 白天最大降溫能力在450W/m²，夜間先啟動降溫以使空氣溼度冷凝除溼，再啟動加溫以使達到足夠溫度。

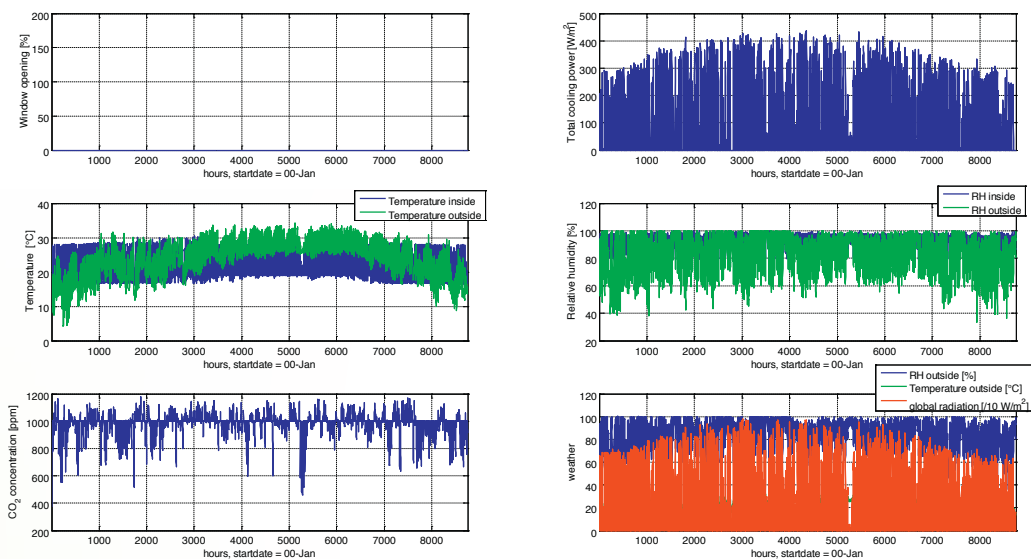


圖4.25 完全密閉溫室操作之全年環境數據 (自6月1日開始，以小時為單位)

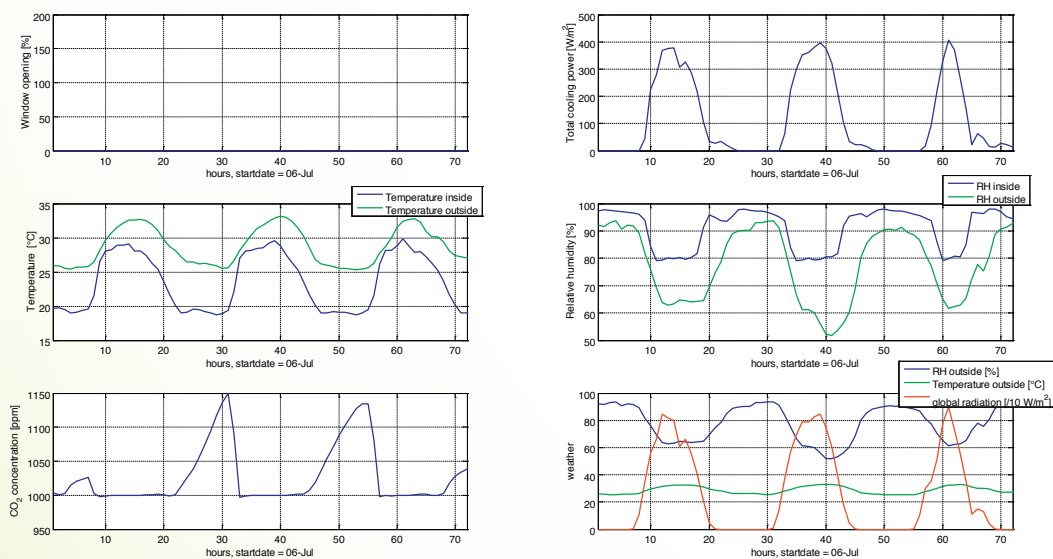


圖4.26 完全密閉溫室操作之3日環境數據 (自7月6日開始3天的資料)

供參考之開放溫室

為了對照，另外以開放溫室模擬相同的環境數據，溫室窗戶全年大部份的時間均為開啟，冷氣空調不運轉，內部溫度和相對溼度變動程度遠高於密閉溫室，最大相對溼度常常達到100%。

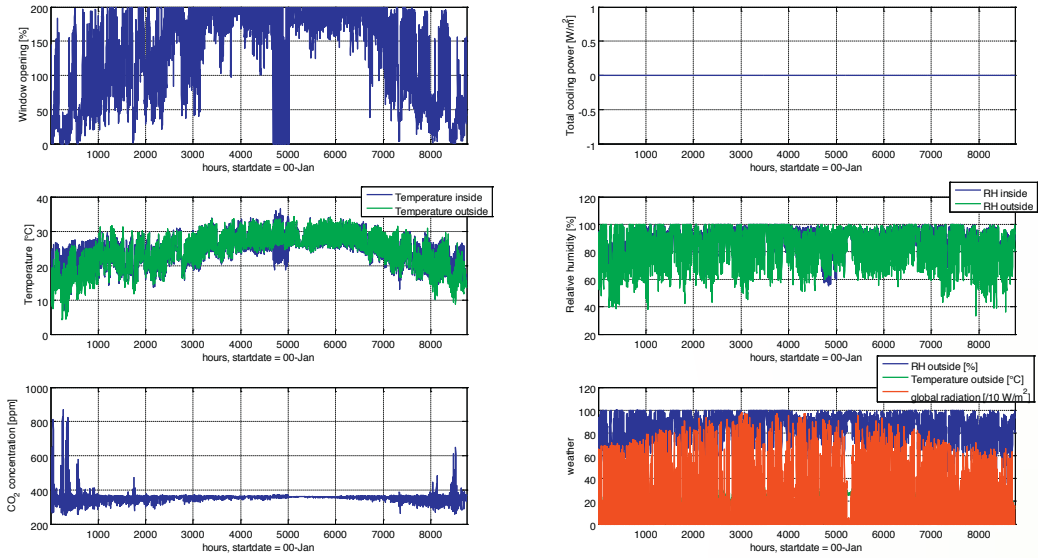


圖4.27 開放溫室操作之全年環境數據 (自6月1日開始，以小時為單位)

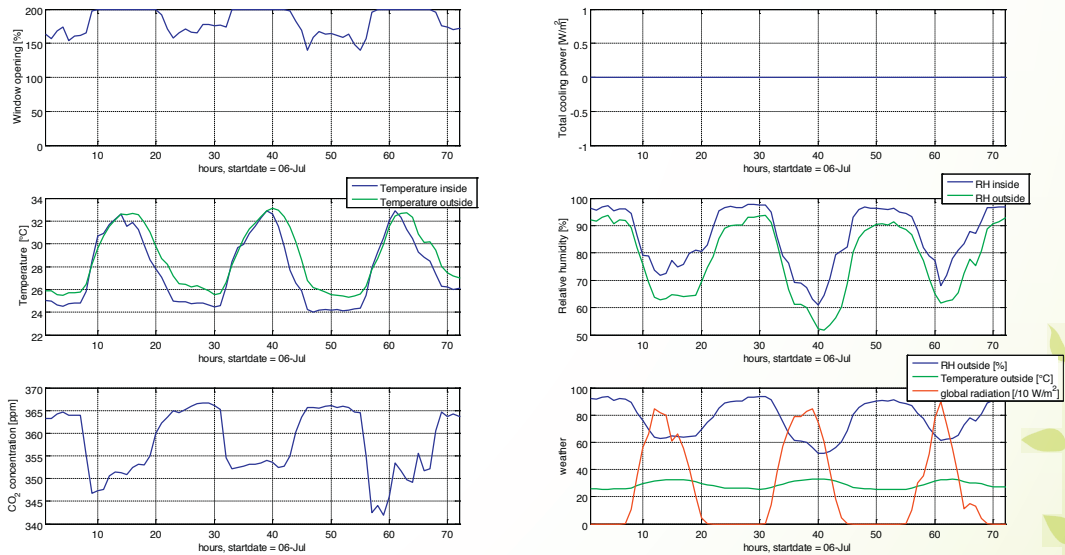


圖4.28 開放溫室操作之3日環境數據 (自7月6日開始3天的資料)

4.11.2 半封閉溫室日間降溫

因為白天二氧化碳濃度高，產量隨之提高，但降溫需求不會比密閉溫室少，可能是因為夜間潮溼的空氣進入溫室內，而在白天啟動空調除溼。此外，夜間相對溼度增加 (空調設備關閉時) 常達到100%，會有真菌病害發生的風險，這不是高科技溫室所能接受的情形，因此我們建議在臺灣氣候條件下不要採用這種控制策略。

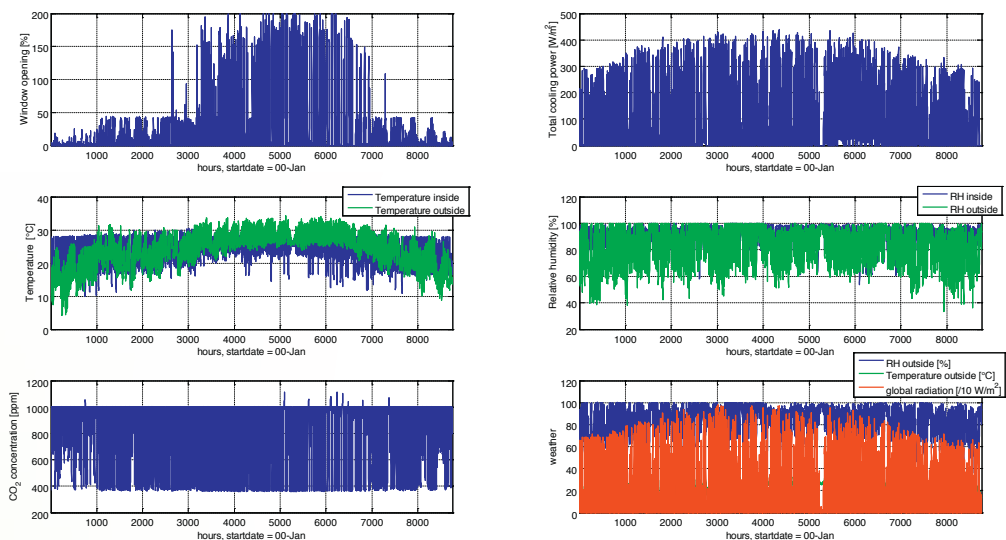


圖4.29 半封閉溫室日間降溫操作之全年環境數據 (自6月1日開始，以小時為單位)

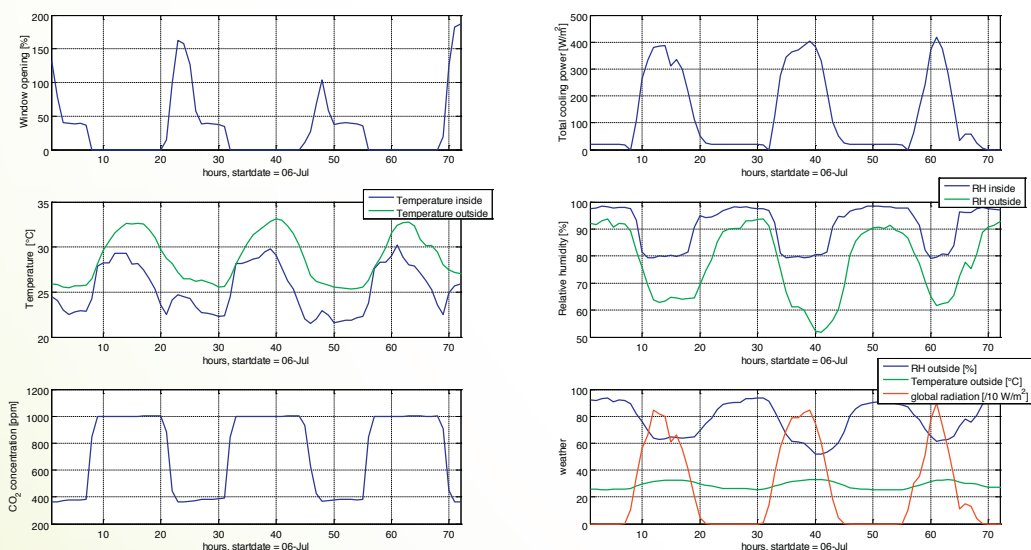


圖4.30 半封閉溫室日間降溫操作之3日環境數據 (自2009年7月12日至14日的資料)

4.11.3 半封閉溫室夜間降溫

夜間降溫之目的在降低每日平均溫度，理論上對於著果有正面效益，不幸的是，這種管理法之效益未見於正式的報告中，因此我們建議現階段商業溫室不要採用這種溫室控制，但夜間降溫管理方式或許是研究計畫的好題材。

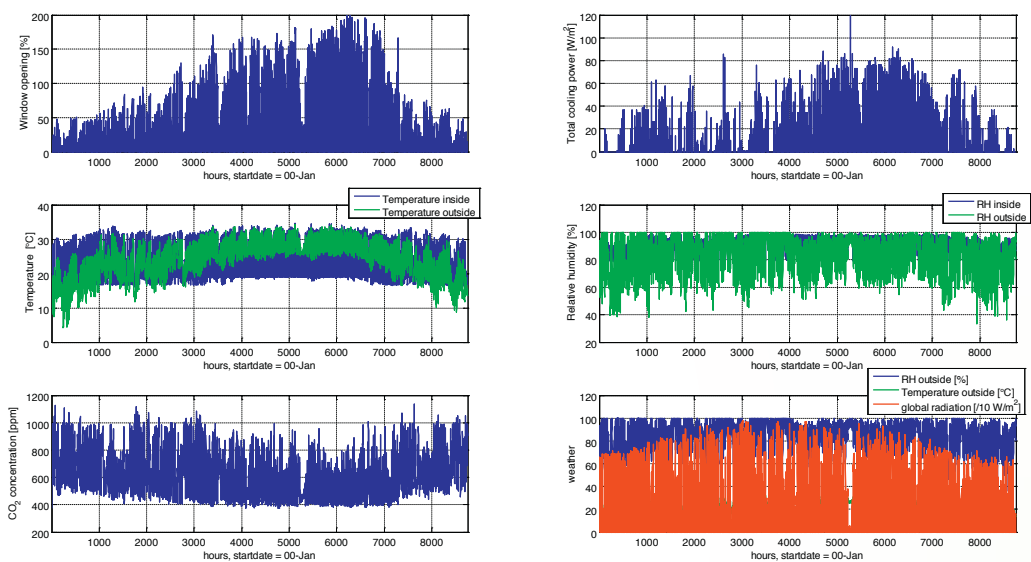


圖4.31 半封閉溫室夜間降溫操作之全年環境數據 (自6月1日開始，以小時為單位)

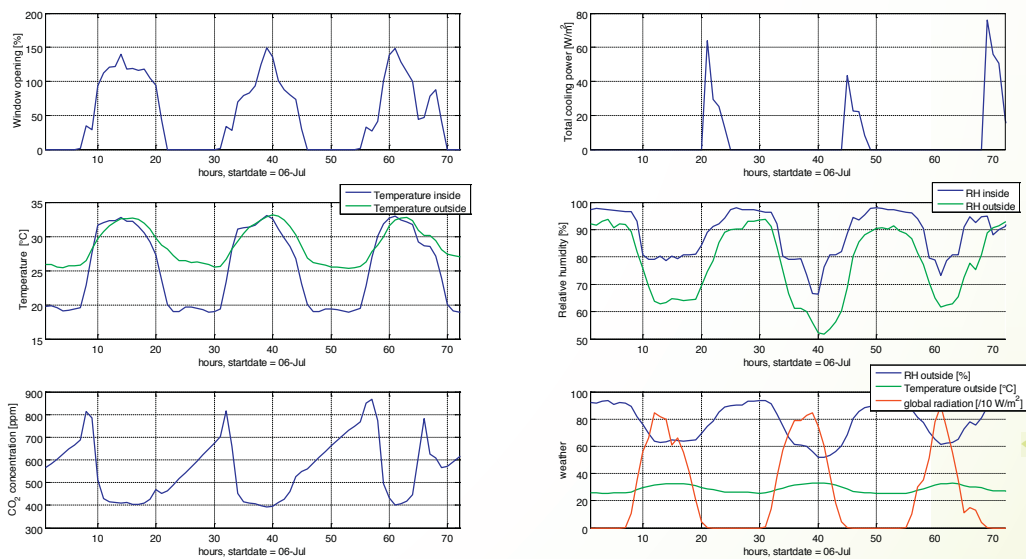


圖4.32 半封閉溫室夜間降溫操作之3日環境數據 (自2009年7月12日至14日的資料)

4.12 雨水儲存

臺灣的年降雨量足以提供溫室作物生產之利用，因此，雨水收集可被推薦嘗試利用。一般而言，雨水的水質佳，可以直接被用於農作物灌溉上，而其他水源往往有水質不佳的問題，所以需要額外的處理。而雨水可經過過濾後直接使用於噴霧系統。

雨水儲存的設計應能供應全年溫室用水，圖4.33為2009年和2010年臺南地區累計降雨量，顯示大部分的雨量在夏季，冬季則相對乾燥。而颱風能帶來很高的降雨量(由圖4.33可以清楚觀察到2009年8月颱風帶來的豐沛雨量)。透過雨水收集系統，能將颱風所帶來的豐沛雨量收集並儲存以供利用。圖4.34顯示一個具800L儲水/m²溫室地板面積容量溫室2年的模擬結果，此容量足以儲存溫室雨水以供灌溉與噴霧系統。

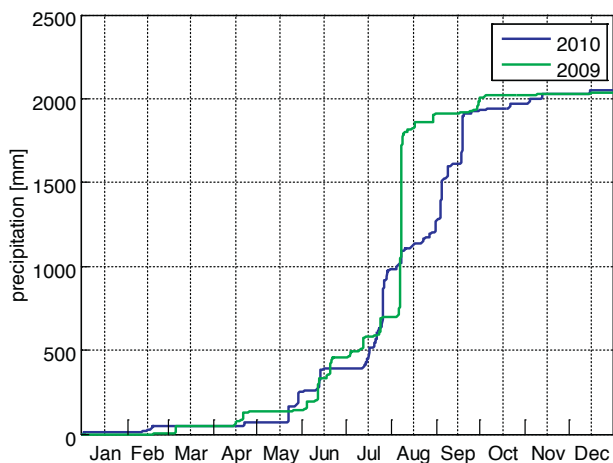


圖4.33 2009年和2010年臺南地區降雨量

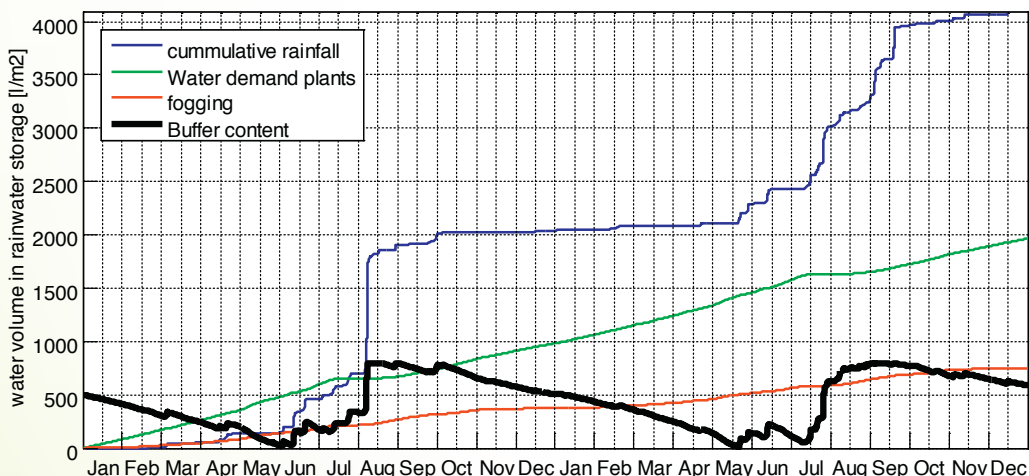


圖4.34 以500L/m²的開始容量及2009與2010兩年的年降雨量，兩年期間雨水儲存的水量，儲存容量被設定為800L/m²溫室地板面積

雨水儲存小結

800 L/m²的雨水儲存足夠供應溫室全年用水，但在溫室營運的初期必須注意缺水問題。

4.13 四個溫室類型比較經濟分析

在前面的章節中提到不同溫室種類對作物生長及溫室內微氣候的影響，我們利用這些模擬結果於新溫室的設計上。在本章中，我們以經濟學角度分析一些新的溫室設計，並與臺灣目前普遍使用的溫室進行比較。

- 中階塑膠布溫室，無二氧化碳施肥
- 中階塑膠布溫室，具二氧化碳施肥
- 高階，密閉溫室(荷蘭溫室)

為了方便參考，我們將進行模擬的溫室類型與特徵定義如下：

表4.13 此經濟分析中被比較的四個溫室類型特徵

主要特徵	低階溫室 (Low tech)	中階溫室 (Mid tech)	中階溫室 二氧化碳施肥	密閉型溫室 (closed greenhouse)
通風容量	低	高	無	
降溫	無	噴霧及自然通風	機械降溫	
二氧化碳添加	無	無	400 ppm 以上	維持在1000ppm
覆蓋	塑膠布	非積熱型、UV隔離、 散射塑膠膜	散射玻璃	
加熱	無	有	有	

植物生產

比較不同類型溫室中的產量，中階溫室作物的產量約是目前使用低階溫室的3.5倍(如表4.14，29kg/m²與8kg/m²)；配合二氧化碳施肥，中階溫室的產量甚至更高(33kg/m²)。而臺灣純二氧化碳的成本相當高的，相對於未施用二氧化碳，使用二氧化碳施肥之變動成本將提高為兩倍。密閉溫室雖然有很高的產量(～80 kg/m²)，因為降溫所需的能源成本較高，因此變動成本也很高。

以我們的溫室模式模擬不同溫室型式的植物生長，這些數據只在所有環境狀況為最佳管理下達到。因此，該溫室裝設最先進栽培系統、最佳作物管理與技術。在經濟性計算中，我們假設番茄是周年生產，以比較相同條件下的選項。我們知道實際上在目前所使用之低階溫室下，番茄周年生產是不可能的；而研究顯示使用中階溫室可延長產期。

表4.14 比較四種溫室類型的經濟分析摘要

經濟分析結果				
	低階溫室	中階溫室	中階溫室，具二 氧化碳施肥	密閉溫室
小果番茄產量 (kg/m ² /year)	8	29	33	80
番茄價格 (NTD/kg)	120	120	120	120
作物總值 (NTD /m ² /year) ①	960	3480	3960	9600
變動成本				
能源 (含二氧化碳)	0	162	712	1467
勞力	58	140	159	193
灌溉水及養液 (回收利用)	56	60	60	53
其他 (植株、藥劑、介質、包裝等)	87	136	136	136
總變動成本 ② (NTD/m ² /year)	201	498	1068	1848
設備				
溫室結構及覆蓋	684	1140	1140	1140
其他裝設成本 (加熱、二氧化碳、遮網、環控等)	279	1005	1032	3633
灌溉系統及雨水儲存	125	209	209	570
額外裝設成本 (運輸、包裝、機械設備)	79	131	131	262
地面基礎 (利息)	600	600	600	600
設備成本小計 (不含基礎, NTD/m ²)	1167	2485	2512	5605
每年平均生產成本 ③ (含基礎及折損)	223	450	459	813
淨成本(=①-②-③; NTD/m ²)	536	2531	2433	6938
回收期 (年)	2.2	1.0	1.0	1.0

投資與回收期

越高階的溫室設備相對需要較高的建造成本。密閉溫室的建造成本約是低階溫室的5倍，但密閉溫室的回收卻是最快的，因為密閉溫室的產量高，投資的成本可以在1年內回收；其次為中階溫室，理論回收期為1年。低階溫室雖然投入的成本最低，但產量也低，所以需要最長的時間才能回本。

二氧化碳施肥

二氧化碳施肥沒有顯著的優缺點。施用二氧化碳雖然可以提高作物產量，但相對增加栽培所需的成本，無法提高收益。基於此，且新溫室系統應盡量簡單，因此在此時建議不要使用二氧化碳施肥。

4.14 敏感度分析

透過重要參數的敏感度分析，可以了解設施作物在栽培過程中任一參數 (狀態) 帶來的影響，由此能提出適當的解決方案。在表4.15中，改變產量、能源成本 (電費及柴油)、產品價格及二氧化碳價格四項參數，每項參數的變化值範圍由60~140%。

表4.15 敏感性分析的參數變化

參數 \ 產量 (公斤)		一般值	最低值	最高值
低階		8	4.8	11.2
中階		29	17.4	40.6
中階+二氧化碳		33	19.8	46.2
高階		80	48	112
能源成本 (柴油, NTD/L)		29.5	17.7	41.3
能源成本 (電力, NTD /kWh)		3	1.8	4.2
作物價格 (NTD /kg)		120	72	168
二氧化碳價格 (NTD /kg)		16.5	27.5	38.5

圖4.35顯示每一類型溫室敏感性分析的結果。在所提出的方案中，改變能源成本對於縮短回收期效果有限，勞工成本也是相同狀況(資料未顯示)；能源與勞工成本對於總成本的影響不大，即使此兩項成本提高亦不會延長回收期。而產量與價格是主要影響因子，以中階無施用二氧化碳的溫室生產為例，如果產量或是售價減少至60%，則成本回收期需從1年延長至2年。而在中階施用二氧化碳的溫室成本回收期，則需從1年延長至3年(這也是不建議臺灣使用二氧化碳的原因之一)。而低階溫室的產量或價格減少，則有更劇烈的影響，成本回收期從2年延長至7年。

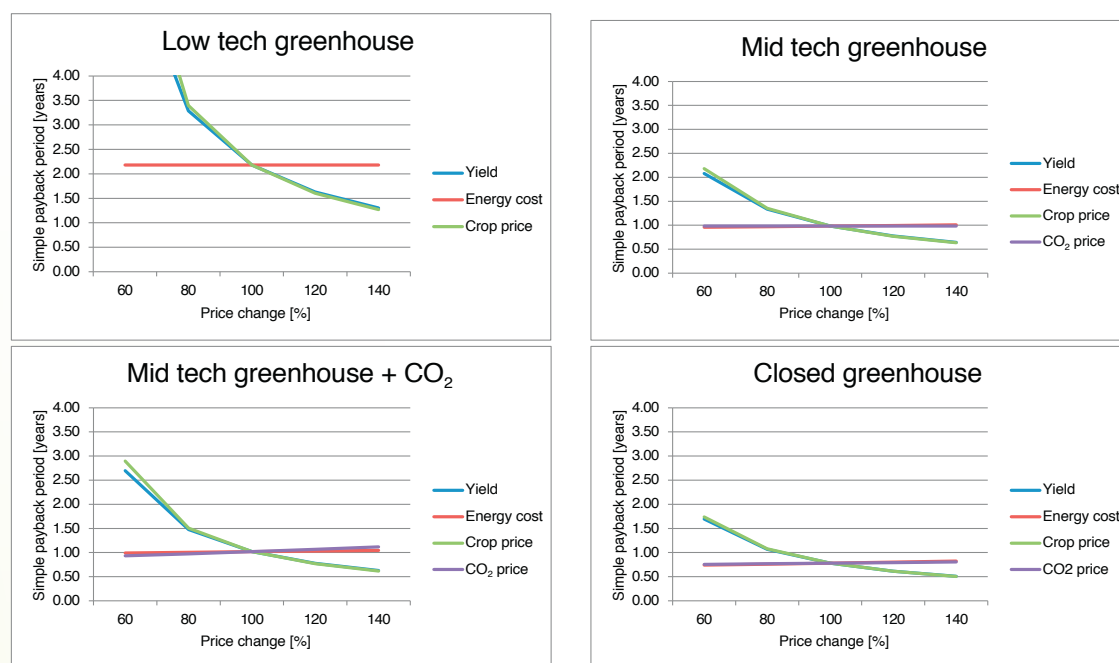


圖4.35 研究重要參數對回收期影響的敏感度分析

經濟分析結論

由分析結果，針對臺灣狀況以中階溫室(利用自然通風及噴霧降溫)為最佳選擇。這樣的溫室生產會比目前使用的溫室生產情形更佳，即使當產量減少或售價降低時，亦能在短時間內回收投資成本(如果產量減少為60%，回收期約2年)。目前並不建議使用二氧化碳施肥，因為並無法明顯提高收益。而密閉溫室的回收期雖然很短，但是投資成本很高，並不建議興建此類密閉溫室。

5 結論

正如前面所敘述，以動態的溫室模式模擬不同類型設備的影響。透過此經濟模式的模擬過程，提供以下建議：

● 通風和防蟲網

在臺灣亞熱帶氣候的溫室內應具備計算過的通風系統，避免高溫。機械通風的電費較高，所以建議使用自然通風。通風口應配備防蟲網以防止粉蝨侵入溫室內。為提供足夠的通風能力，即使是用防蟲網，在每平方公尺的溫室面積應至少有0.5平方公尺通風口面積。自然通風雖然不能讓溫室內溫度低於溫室外，但可接近溫室外溫度。

● 溫室覆蓋材料

我們建議使用的散射性並具有較高光透射性 (> 75%) 的塑料薄膜。它也應該有高的紅外線輻射穿透能力，減少溫室內的極端溫度發生。

● 絕熱冷卻

我們建議安裝噴霧系統的淨容量約為300 g/m²/h。該系統能降溫且對作物所造成逆境衝擊較低。我們不建議使用風扇水牆降溫系統，因為耗費能源成本較高，且無法均勻降低溫室內部的溫度。

● 二氧化碳施用

臺灣氣候條件下，溫室栽培需有足夠通風量，除非二氧化碳是免費或是很便宜，否則外加二氧化碳是不可行的。如果未來能連接工業廢棄二氧化碳，則重新評估其應用的可能性。

● 遮光網

遮光網在高光量照射期間可有效降低作物溫度，但減少光線穿透，也會同時減少作物產量。此外，遮光網亦會限制通風能力，與沒有使用遮光網的溫室比較，噴霧降溫效果並不會有明顯差異，因為溫室噴霧降溫只能在高通風率環境下執行。我們建議安裝外置遮光網，30%遮光及70%通風。這種類型的遮光網不會影響通風，且能減少高輻射對作物的損害。

● 加熱系統

使用加熱系統避免低溫時對作物生長產生負面影響。在缺乏加熱系統的溫室中，植物雖不致死，但若有加熱系統則有較高的產量。加熱系統的容量取決於所選擇的系統型式及該容量所需安全限度。若沒有設置熱緩衝桶，則需要具 100 W/m^2 加熱能力的鍋爐，以保持溫室內溫度在 12°C 以上；若有熱緩衝桶，鍋爐容量則可降低。

● 人工光源

使用人工光源提高作物產量效果相當有限，最高約能提高產量5% (約 $3\text{ kg/m}^2/\text{year}$)。因為投資成本高 ($20\text{-}65\text{ €/m}^2$ ；每平方公尺約需新臺幣800~2500元)，使得投資回收期會很長。基於這些原因，我們建議臺灣溫室蔬菜生產不要使用人工光源。

● 太陽能集熱器

溫室加熱可以化石燃料或太陽能 (或兩者的結合) 進行。透過太陽能加熱是永續並具低運轉成本。單純以經濟考量，太陽能加熱溫室並非最好的選項。然而，燃料價格不斷提高，太陽能集熱器價格逐年降低，所以在不久的將來應具有經濟效益的可行性。如果選擇使用太陽能加熱，建議每平方公尺溫室面積應安裝0.7平方公尺的太陽能集熱器，即每公頃溫室面積應有200立方公尺太陽能集熱器緩衝桶。

● 密閉溫室

密閉溫室提供作物最佳的生長條件，而達到高產目的。然而，這類溫室的投資成本相對也高 (需要昂貴的溫室及冷卻設備)，栽培者對於環控技術的技巧也必須完全掌控，依照目前臺灣蔬菜栽培之平均程度，由現行設施轉型到密閉溫室的差距仍大，密閉溫室概念比較適合在商業性蔬菜生產，或許以後能當成示範及研究計畫。



6 示範溫室營運現況及未來展望

臺灣地區小果番茄栽培面積約為2,000公頃，由於具有皮薄、糖度高及風味佳等特性，廣受消費者喜愛。目前設施栽培小果番茄面積約為500公頃，且逐年增加中；設施雖然提供作物屏障，防止豪雨、低溫及蟲害的危害，但設施內高溫高濕的微氣候，往往導致著果不易、品質下降及病害發生，設施內如何降溫及通風遂成為產官學界熱門課題。

● 示範溫室規劃

本場自101年起與荷蘭瓦赫寧根大學及其附屬之溫室園藝研究中心合作，建造一棟適合於臺灣地區生產小果番茄的生產溫室。臺荷雙方經過多次討論，決定以小果番茄為目標作物，且以不造成生長障礙為降溫目標，即溫室內高溫不超過35°C；荷方搜集雲嘉南地區連續三年之氣候資料進行分析，同時於嘉義縣六腳地區設立2處試驗點，調查不同溫式型態之溫室微氣候與小果番茄產量品質之相關性，為了讓示範溫室能順利推展至產業，更針對生產成本進行分析。

荷方利用KASPRO軟體模擬溫室內微氣候在不同氣候條件下之變化，包括在不同被覆材料、開窗面積等硬體設備改變下，溫室內之熱傳導變化，透過此軟體能計算任何一個因子改變對溫室內溫度造成之變化，並記錄每一小時之溫濕度，藉此了解溫室設計是否能達到需求。將KASPRO所模擬之溫室微氣候輸入INTKAM軟體，透過該軟體模擬作物生長，包括淨光合作用速率、葉溫、蒸發散量及產量等因子。將由KASPRO及INTKAM模擬所得之資訊，及臺灣設施番茄生產之成本資料，一併進行投資成本與回收期估算，以設計適合臺灣小果番茄生產之經濟可行性生產溫室。示範溫室由荷方於102年4月完成模擬規劃，103年3月完成驗收。

● 示範溫室硬體介紹

示範溫室經招標後，由臺灣溫室營造廠商依照荷方規劃設計搭建，實際栽培面積為684平方公尺，簷高5公尺；引入75%透光率及70%散射率 (Diffuse) 塑膠布為被覆材料，地面則以白色雜草抑制蓆覆蓋，讓光線在溫室中均勻分佈；為了達到溫室內溫度不高於35°C的目標，以大面積側窗及開窗率達地板面積50%的天窗進行通風，配合30%外遮陰網與噴霧量為350g/m²h之噴霧進行降溫。為達到節水目標，荷方原先規劃500公噸雨水儲存桶，溫室內灌

溉及噴霧用水均優先使用已處理過之雨水，但礙於經費及基地現況，改以18公噸儲存桶，配合溢流水回收系統，雨水經過過濾後直接進入溫室內使用，溢流水經過過濾、UV殺菌及EC檢測後，與灌溉水混合再利用。溫室內同時配置內循環風扇與植槽下通風管，增加溫室內氣體擾動。養液系統以A、B及酸桶混合後稀釋供應至溫室內，環控系統依照設定與天氣條件調控天窗、側窗、噴霧、灌溉、內循環風扇及外遮陰網的啟動，同時記錄溫室內外氣候與設備啟動狀況，以達到最適合小果番茄生長之環境。

● 小果番茄栽培體系

介質栽培具有肥分管理簡單、無雜草、病蟲害防治容易等優點，為世界之趨勢，示範溫室內以椰纖為栽培介質，以穴盤育苗後先移至小椰纖塊進行兩階段育苗，伺幼苗第一花序出現再定植至椰纖栽培袋，植株栽培密度為2.1株/平方公尺，採用栽培槽離地懸吊式栽培，採取單幹整枝；以養液進行滴灌，灌溉頻率則由控制系統依據當日太陽輻射強度調整，即於輻射強的晴天或中午時間縮短灌溉間距，陰天或傍晚則每次灌溉間距拉長，每日灌溉次數約為4~9次，期望每次灌溉後之溢流量為灌溉量之20%。(圖6.6)

● 驗證設備效能

為了模擬出最佳環控條件及設備效能驗證，於103年3月31日定植小果番茄「玉女」及「臺南亞蔬6號」，本次番茄栽培密度為1.6株/m²，單幹整枝，於5月22日第一次採收後便除去第3~5串花序，以促進植株營養生長，試驗進行至6月中旬結束，試驗期間溫室內平均溫濕度由Priva-Maximizer記錄之。試驗期間設定白天溫度高於27°C時啟動降溫設備(如：噴霧、天窗及側窗)，夜間溫度低於18°C時啟動保溫設備(如：天窗及側窗)。本次試驗期間5月份室外平均日溫為28.8°C，最高溫為33.7°C，設施微氣候上，試驗期間溫室內平均日間溫度介於28~29.2°C之間，夜溫介於23.6~25.8°C間，與溫室外氣溫十分接近，且達到規劃目標未高於35°C，而溫室內平均日間相對濕度介於68~84.8%，夜間濕度於86.5~93.4%之間。

● 面臨問題與解決對策

分析103年高溫期間所蒐集之溫室微氣候資料，利用噴霧將室內相對濕度達80%以上時，降溫效果明顯；但是當太陽輻射高於800W/m²時，現行噴霧量則無法有效提高溫室內濕度以達降溫效果。雖然溫室內外濕度相近，但溫室內夜間濕度偏高容易引起病害及生理障礙發生，由於溫室外夜間濕度高達90%以上，雖然配合天窗及內循環風扇運轉增加通風及溫室

內空氣流動，但溫室內濕度並不會因此降低。噴霧降溫原理是利用加壓經過噴頭噴出的細小霧滴，霧滴在飄散的過程中與空氣發生熱交換，達到蒸發降溫的效果，而高濕度栽培環境容易引起病害及生理障礙發生。因此，如何增加溫室內白天濕度與降低溫室內夜間濕度，為首要課題。

1. 增加噴霧量

荷方規劃中建議以噴霧量每小時 $350\text{g}/\text{m}^2$ 進行噴霧降溫，溫室內原裝設噴頭40個分佈於兩列，經討論於溫室內增加1列噴霧，20個噴頭，為因應增加之噴霧量，同時增加400 L之RO水儲存桶。於104年5月中旬數據顯示，在溫室內未種植作物情況下且設定溫室內目標溫度 27°C ，噴霧每日運轉時數約為5.5小時，每分鐘RO耗水量為4.0公升，即每日約需6公噸之原水。

2. 天窗與側窗調控

溫室設計大面積天窗與側窗以增加通風效能，但於噴霧啟動時過多通風使霧滴未進行熱交換即散逸，降低噴霧降溫效能。經過試驗，在天窗與側窗全開的情況下，溫室內溫度在起動噴霧時低於溫室外約 0.5°C ；未開啟天窗，僅以側窗進行通風的狀況下，噴霧處理提高溫室內濕度約5%，溫度較未噴霧處理低約 1°C ；天窗100%，30%側窗處理於高輻射熱期間，能使溫室內溫度降低於戶外約 0.5°C 。

3. 增加栽培密度

溫室內濕度除了透過噴霧與通風面積改善，溫室內植物蒸散作用亦是濕度主要來源，此外植物亦透過蒸散作用達到降低葉片溫度目的。2014年荷方專家建議於示範溫室內增加栽培行數及株數，建議由原本栽培密度為1.6株/平方公尺提高至3株/平方公尺，透過密植同時能減少光線直接照射於栽培袋上所造成的高溫危害。目前示範溫室栽培密度為2.1株/平方公尺，於2014年10月定植，配合噴霧與側窗調控，持續進行品質與產量調查。

4. 除濕設備

臺灣處於亞熱帶地區，高溫多濕的氣候環境常誘發小果番茄生理障礙，然即使是晴朗的夏天夜晚戶外濕度仍高於90%以上，而通風對於除濕並無明顯效果，因此由既有且鄰近的蘭花催梗房設備引入冷空氣，藉由熱交換降低空氣溫度，空氣中水蒸氣分子達到露點凝結成水而除去，進而達到除濕目的。除濕設備於2014年11月完工，初步試運轉能降低溫室內相對濕度約10%。

臺荷溫室以噴霧及大面積通風為降溫策略，透過大面積通風，溫室內溫度多與戶外溫度相近，根據2015年11月份溫度記錄顯示(圖6.7)，臺荷示範溫室溫度與戶外溫度相近，且溫度低於簡易型塑膠布溫室約8°C，顯示臺荷示範溫室之規劃設計達到預期目標，若配合良好的栽培與養液管理，勢必能達到延長產期的目標。

● 示範溫室未來展望

示範溫室為依據臺灣氣候條件及生產成本所規劃之溫室，然荷蘭與臺灣氣候條件有差異，如：在溫室環控策略上荷蘭以加熱加濕為主，臺灣則是需要降溫及除濕。示範溫室營運至今已經逾2年，除了在溫濕度調控上不斷修正與調整，在介質栽培體系建立上亦是持續進行中。

目前亞洲地區如南韓、日本及中國大陸等國家均以荷蘭為標竿，積極在溫室園藝領域尋求新的突破。示範溫室未來將持續與荷方交流，期望透過此示範溫室相關建造及栽培經驗，建立臺灣地區設施番茄周年栽培生產模式、養液灌溉系統、介質栽培管理模式及生產溫室規範，將整套栽培系統推廣至生產端。

表6.1 溫室內溫濕度資料 (4/11~6/15, 2014年)

期間	日夜	戶外溫度 (°C)	溫室溫度 (°C)	溫度差 (°C)	戶外濕度 (%)	溫室濕度 (%)	濕度差 (%)
4/11~4/30	日間	27.44	28.07	-0.62	66.99	67.94	-0.95
	夜間	22.92	23.57	-0.65	85.09	86.42	-1.33
5/1~5/30	日間	28.75	28.84	-0.09	74.92	79.29	-4.38
	夜間	24.28	24.46	-0.18	90.53	91.58	-1.04
6/1~6/15	日間	29.15	29.22	-0.07	79.56	84.79	-5.23
	夜間	25.72	25.88	-0.17	92.58	93.40	-0.81

註：溫度差及濕度差為戶外減去溫室內所得差值



圖6.1 示範溫室外觀



圖6.2 溫室內採用懸吊式植槽，配合養液滴灌系統以椰纖為介質建立栽培模式



圖6.3 示範溫室內以噴霧、大面積天窗及側窗降溫



圖6.4 灌溉系統主機及養液桶



圖6.5 噴霧系統主機及RO水設備

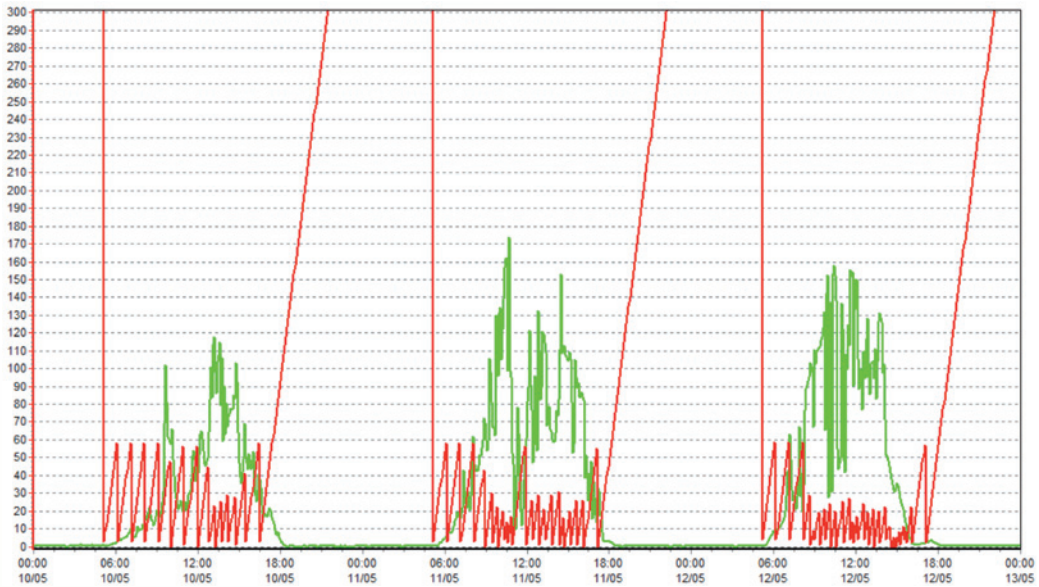


圖6.6 利用光積值決定灌溉頻率。綠色線條表示太陽輻射量；紅色線條表示灌溉間隔，一個高峰代表一次灌溉

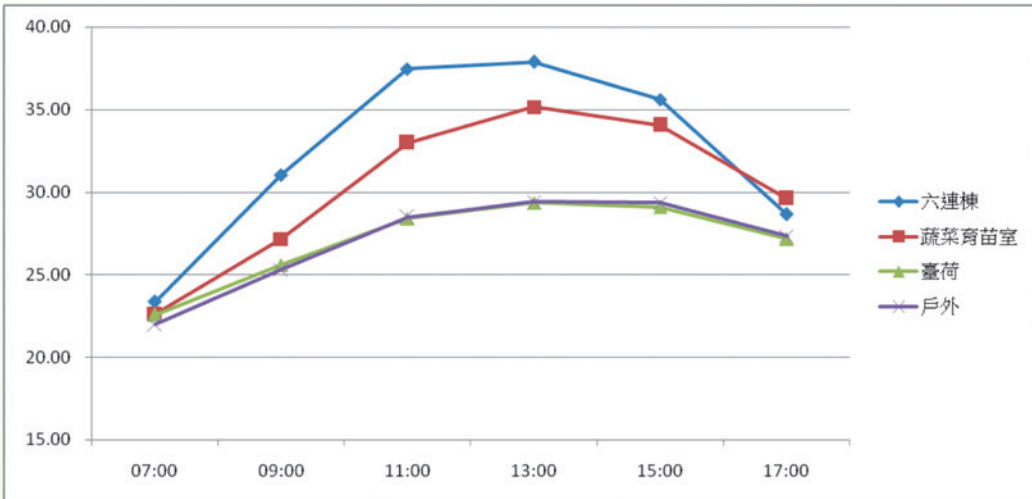


圖6.7 比較臺荷溫室與本場其他溫室於2015年11月1~7日平均溫度，臺荷溫室與戶外溫度相近

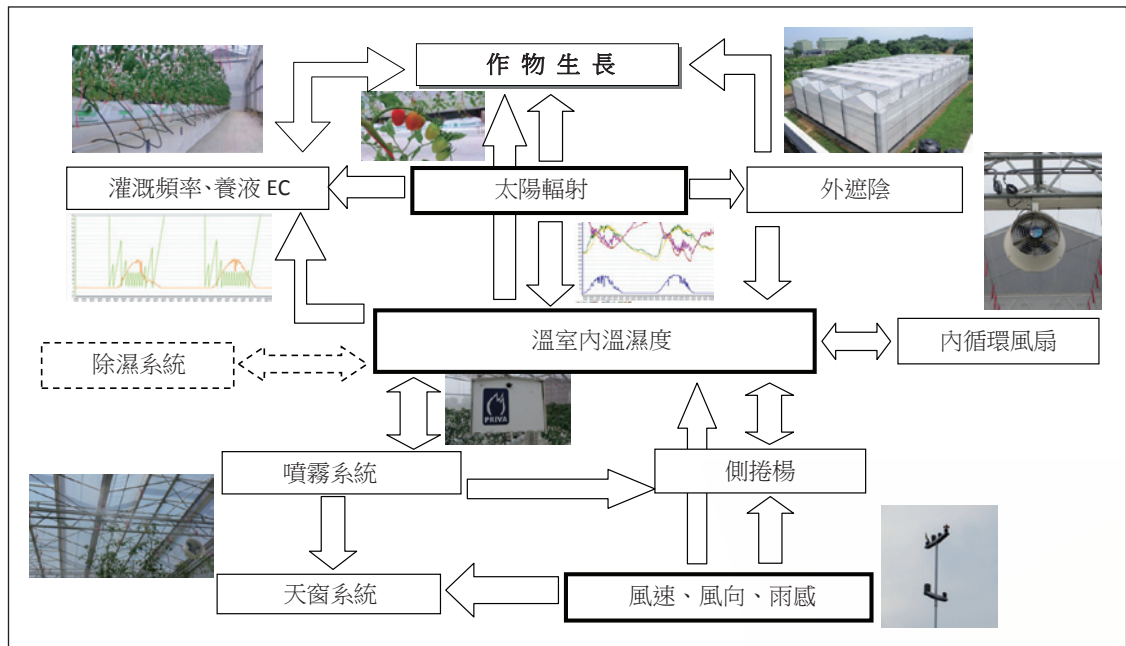


圖6.8 示範溫室環控系統示意圖

參考文獻

1. Bailey, B. Screens stop insects. *Fruit&Veg Tech*, Vol3, nr 2, 2003.
2. Bakker, J. C., Bot, G. P. A., Challa, H., Van de Braak, N. J., *Greenhouse climate control-an integrated approach*. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands, 1995.
3. Bot, G. P. A. 1983. *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*. Ph. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
4. Dueck, T. A., Poudel, D., Janse, J., Hemming, S. *Diffuus licht-wat is de optimale lichtverstrooiing?* Wageningen UR glastuinbouw, research report nr. 308. 2009.
5. De Zwart, H. F. *Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model*. Thesis Agricultural University of Wageningen. Publication 96-5 IMAG-DLO. ISBN 90-5485-533-9, 1996.
6. Elings, A. & Marcelis, L. *Temperatuurregeling in komkommer, met gebruik van het INTKAM gewasmodel*. Accessible via <http://edepot.wur.nl/22639>. 2010.

7. Garcia, J. L., De la Plaza, S., Navas, L. M., Benavente, R. M., Luna, L., Evaluation of the feasibility of alternative energy sources for greenhouse heating. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69: 107-114, 1998.
8. Gieling, Th. H., Control of water supply and specific nutrient application in closed growing systems. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2001.
9. Hemming, S., D. Waaijenberg, J. B. Campen, Impron en G. P. A. Bot. Development of a greenhouse system for tropical lowland in Indonesia. Paper and lecture International Symposium on greenhouses, environmental controls and in-house mechanization for crop production in the tropics and sub-tropics, Cameron Highlands, Malaysia, 15-17 June 2006, *Acta Horticulturae* 710: 135-142, 2004.
10. Hemming, S., Eldert van Henten, Bram Vanthoor, Bert van't Ooster, Sjaak Bakker. Systematic design of greenhouse production systems. Conference proceedings CD INCOSE Systems Engineering for the Plant, 15-19 June, The Netherlands, 2008.
11. Hemming, A. Sapounas, A. De Zwart, F. Ruijs, M. Maaswinkel, R. Design of a Sustainable Innovation Greenhouse system for Turkey , 2010. Report GTB-1009.
12. Impron, Hemming S., Bot G P A. Effects of Cover Properties, Ventilation Rate and Crop Leaf Area on Tropical Greenhouse Climate. Accepted for publication in *Biosystems Engineering*, 2007.
13. Jong, T. de 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Ph. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
14. KWIN 2010. Kwantitative informatie voor de glastuinbouw. WUR Glastuinbouw.
15. Perez Parra J, Baeza, E., Montero, J. I., Bailey, B. J., 2004. Natural ventilation of parral greenhouses. *Biosystems Engineering* 87(3), 355-366.
16. Rath, T. Einsatz wissensbasierter Systeme zur Modellierung und Darstellung von gartenbautechnischem Fachwissen am Beispiel des hybriden Expertensystems HORTEX. Thesis University of Hannover, Germany, 1992.
17. Sapounas A. A, Bartzanas T., Nikita-Martzopoulou C., Kittas C. 2008. Aspects of CFD modelling of a fan and pad evaporative cooling system in greenhouses *International Journal of Ventilation* 6: 379-388.
18. Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Ph. D. Thesis, Agricultural University Wageningen, The Netherlands.

19. Tchamitchian M, Martin-Clouaire R, Lagier J, Jeannequin B, Mercier S. SERRISTE: A daily set point determination software for glasshouse tomato production. *Computers & Electronics in Agriculture* 50, 25-47, 2006.
20. Von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., Von Zabeltitz, Chr., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R., Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European union countries: Part I, Design requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75: 1-16, 2000a.
21. Von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., Von Zabeltitz, Chr., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R., Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European union countries: Part II, Typical designs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75: 111-126, 2000b.
22. Van Henten, E. J., J. C. Bakker, L. F. M. Marcelis, A. van't Ooster, E. Dekker, C. Stanghellini, B. Vanthoor, B. van Randerat, J. Westra. The adaptive greenhouse-an integrated systems approach to developing protected cultivation systems. Paper at ISHS Hortimodl congres, november 2006 in Wageningen, will be published in *Acta Hort.*, 2006.
23. VanThoor, B.H.E. A model based greenhouse design method. Thesis, Wageningen University, Wageningen, Netherlands. 2011.
24. Van't Ooster, A. Case study instructions. In: A. van't Ooster, E. Heuvelink, C. Stanghellini (eds). *Greenhouse Technology*, course reader, Wageningen University, 2006.
25. Zaragoza, G., M. Buchholz, P. Jochum, and J. Perez-Parra. Watergy project: Towards a rational use of water in greenhouse agriculture and sustainable architecture. *Desalination* 211: 296-303, 2007.



In Taiwan open field vegetable production is threatened by subtropical climatic disasters, such as high wind speeds and heavy rainfall, which can cause the destruction of whole crops. Next to that vegetable production is threatened by pest and diseases resulting a high need for pesticides. Greenhouse production systems are able to provide protection for the crop. However, in current protected tomato production in Taiwan yields are low, however with good taste. Modern crop management has not yet been introduced in most vegetable productions in Taiwan. A study has been conducted to find out the optimum design of greenhouse production systems for modern vegetable growing in Taiwan.

Greenhouse design has been shown to be a multifactorial problem, which can be approached with a systematic design method (e.g. van Henten et al., 2012). The method is based on the use of different models, which predict a suitable greenhouse design. The local climatic conditions (outside radiation, temperature, humidity, wind speed) are used as input for the greenhouse climate model, with which different greenhouse designs with different technologies can be evaluated. The climate and crop growth inside the greenhouse can be simulated. These data serve as input to an economic model, which can be used to come to the economic suitable greenhouse design. In the current study this greenhouse design approach was applied for Taiwanese climate conditions, which are characterised by a radiation sum of 6 GJ m^{-2} , high temperatures up to an average maximum of 35°C and high humidity levels up to 100%. The greenhouse climate model of de Zwart (1996) and the crop model of Vanthoor (2011) were used for evaluation of different technologies, economic data was collected in Taiwan and used as input for the economic model.

A greenhouse design for the sub-tropical climate and local economic conditions was made for Taiwan for cherry tomato production with high sweetness. The main elements of the proposed greenhouse design are a naturally ventilated greenhouse with a capacity of 50% and insect nets to repel whitefly. The greenhouse cover consists of a highly diffuse plastic film with high light and high transmission for thermal heat radiation. Furthermore, the greenhouse should be equipped with a fogging installation with a capacity of at least $300 \text{ g/m}^2/\text{h}$. Research on additional cooling during the night s currently conducted. Air circulation decreases the risk of high humidity. A demonstration greenhouse has been realised at Tainan DARES, Tainan, on a scale of 680 m^2 . A description of the design is given in this book. Research in the demonstration greenhouse will increase the knowledge of modern greenhouse horticulture in Taiwan.

Dr. Silke Hemming



國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

亞熱帶地區果菜栽培溫室之設計 / Bas Speetjens等
原作；江汶錦等譯.-- 臺南市：農委會臺南農改場，
民105.05

面；公分

ISBN 978-986-04-8772-5 (平裝)

1.果菜類 2.溫室 3.栽培

435.2

105008591

- 書名 | 亞熱帶地區果菜栽培溫室之設計
- 原作者 | Bas Speetjens, PhD, Wageningen UR greenhouse horticulture
Silke Hemming, PhD, Wageningen UR greenhouse horticulture
Dennis Wang, PhD, Tainan DARES
Jyh-Rong Tsay, PhD, Taiwan Agricultural Research Institute
- 譯者 | 江汶錦、李健、吳雅芳、林明瑩、張元聰、張嵐雁、
許涵鈞、黃士晃、楊清富、黃瑞彰、黃圓滿、劉依昌、
盧子淵、鍾瑞永、謝明憲 (依照姓氏筆畫排序)
- 審稿 | 王仕賢、蔡致榮 (農業試驗所副所長)
- 發行人 | 王仕賢
- 主編 | 許涵鈞、鍾瑞永
- 出版機關 | 行政院農業委員會臺南區農業改良場
- 地址 | 712 臺南市新化區牧場70號
- 網址 | <http://www.tndais.gov.tw>
- 電話 | (06)5912901
- 印刷 | 農世股份有限公司
- 出版日期 | 105年5月
- 編印本數 | 1,000本
- 定價 | 160元
- 展售書局 | 國家書坊台視總店
臺北市松江路209號1樓 TEL:(02)25180207
五南文化廣場
臺中市中山路6號 TEL:(04)22260330轉36
- G P N | 1010500789
- I S B N | 978-986-04-8772-5 (平裝)





ISBN: 978-986-04-8772-5



9 789860 487725

GPN:1010500789
定價：新臺幣160元