

雙層透氣型鋁管溫室的設計

台灣大學生物產業機電工程學系

方煒

台灣發展設施園藝也有十餘年的時間了，栽培技術面普遍成熟，硬體設施的相關技術頗為陽春，兩者之整合則更是欠缺。多年來由農友與溫室業者的自行摸索，雙方的經營可用慘澹兩字形容。溫室製造業者曾有如雨後春筍的蓬勃，由鐵工廠的從業人員以鐵皮屋般的搭建方式所蓋的溫室不在少數。農友在這樣的溫室內要想能獲益，溫室業界在削價競爭的惡性循環下要想能永續經營，兩邊實在都辛苦。溫室業界少與學術界共同討論；學術界在溫室工程領域僅有少量人力的投入，又普遍缺乏實務經驗的輔助；農友只問單價、不顧需求與不問功能等恐怕都是原因。

農友在蓋溫室之前，應該會問自己蓋設施的目的是什麼？想賺錢！沒錯吧！蓋設施需額外的成本，所以設施必須提供露天栽培者所達不到的功能。對吧！是遮風、擋雨、防蟲、防颱、防淹水或是要能調節溫度、溼度、補光或補充二氧化碳？所要的功能愈多，所需的固定成本愈高，溫室通常也需愈密閉。愈是密閉的溫室通常操作成本也愈高。

一分錢一分貨是商場上的鐵律，就怕花了冤枉錢，把錢用在解決不會發生的問題上，更怕花冤枉錢卻蓋了達不到需求的溫室，對吧！蓋了溫室之後，你能提高產量，能提高品質嗎？能縮短產期嗎？能將產期提早或延遲一段時間嗎？你能搶到颱風天後一個月內的「菜金」時刻嗎？你能掌握「物以稀為貴」的原則來創造利潤嗎？設施能幫你多少？你問過自己這些問題嗎？

蓋了設施之後，你會因溫室排水不良，造成梅雨季或颱風季溫室內一樣淹水嗎？你會因颱風天的強風吹壞設施，造成無法收成嗎？你會因夏天溫室內太熱而無法栽培，隨後的颱風天就算溫室沒被吹壞，但溫室內也沒作物可收成嗎？如果以上問題的答案有任何一個是肯定的，你知道自己因為少了一個適當的溫室，損失多少商機嗎？

在台灣的溫室有頗多不合理的設計或用法，此些不合理的部分多半是因為對作物、資材、設施或設備的不瞭解或對投資效益未評估，或一昧相信施工者視是而非的說法，或直接由國外引進卻不知其所以然所造成，有些則是在生產管理上規劃不當的結果。簡單列舉如下(括號內為筆者的看法)：

1. 蝴蝶蘭溫室使用較貴的透光性高的玻璃卻予以經常性的遮蔭 50% 或更高；(矛盾)
2. 明知熱空氣往上昇，加熱管路卻安裝於溫室上方；(仿自國外的做法，但國外的目的是要溶雪)
3. 需降溫的溫室卻選擇具紅外線阻隔層的塑膠布做被覆資材；(較新、較貴的材質不一定是最適宜，其設計的目的在保溫)
4. 選擇 PC 做被覆資材，但仍使用蜜蜂做授粉；(PC 會濾掉紫外線而蜜蜂靠紫外線找路)

5. 風扇與水牆各在溫室的兩端，採負壓方式的溫室卻是太子樓式上方具開口的建築，最後卻怪水牆無效；(採負壓方式需維持氣密性)
6. 風扇與水牆各在溫室的兩端，採負壓方式的溫室卻常有人員進出溫室卻又不關門，最後還是怪水牆無效；(仍是氣密性問題)
7. 溫室屋簷高四米以上，作物卻只栽培在地面上；(浪費)
8. 寧可蓋高的溫室，卻不考慮屋頂留散熱天窗；(浪費)
9. 溫室內可栽培作物的面積比例偏低；(規劃不當，浪費)
10. 全年可用卻全年利用率低的溫室；(規劃不當，浪費)
11. 內循環風扇採由上向下吹風方式的溫室；(反而將上方熱空氣抽下來)
12. 可蓋大樓的鋼構建材用來蓋只栽培蔬菜的溫室；(浪費，回收難)
13. 同一溫室內不大的空間中同時栽培多種不同的作物；(自找麻煩)
14. 使用遮蔭網替代防蟲網的溫室；(無效，且較貴)
15. 溫室所有開口加裝防蟲網，人員進出卻無管制；(防蟲無效，增加風阻)
16. 溫室所有開口加裝防蟲網，仍使用原設計的風量；(風阻增加，通風量不足)
17. 直接引進北歐地區可耐大雪壓力卻不耐中級風的溫室；(錢用錯地方)
18. 遇強風一定被吹壞的簡易溫室；(喪失商機)
19. 會淹水的溫室；(喪失商機)
20. 可遮風擋雨的簡易溫室在夏天卻變成烤箱。(喪失商機)

鋼構溫室結構強，不怕強風，溫室屋簷可較高，高的好處之一是將熱氣與作物遠離，降低向下的熱輻射；之二是可保留空間，允許安裝各類自動化設備如內遮蔭、自動洒水、噴霧、搬運系統等。歐美日各設施園藝先進國家的連棟溫室多採此型設計，有很大的原因是基於前述後者的考量。在台灣，自動化程度高的溫室一般也是採此設計。但有些溫室未見有任何自動化設備，單純只是為了防止作物在熱天產生熱緊迫(thermal stress)或缺水逆境(water stress)，就將溫室蓋得頗高；高的溫室要抗風，結構就需加強許多，造成固定成本的大幅提高。事實上可有其他的散熱方式。

台灣常見的使用 PE 或 PEP(或稱 PO)塑膠布被覆的溫室，一般可分為使用立管的鉸管溫室(圖 1a)與使用立柱的鉸管溫室(圖 1b)。溫室上方以塑膠布被覆，四周常見以防蟲網圍住，再加一層可捲揚或固定的塑膠布。立管式鉸管溫室較不耐風且夏天太熱頗難全年栽培是兩大缺點，防蟲能力也普遍欠佳，便宜則是最大優點。立柱式鉸管溫室本身就是立管式鉸管溫室在結構上的改良，其價格比前者高，也仍然有防蟲效果差且夏天太熱的問題。



圖 1a. 立管式鉸管溫室



圖 1b. 立柱式鉸管溫室

農用塑膠布與防蟲網的使用壽命通常不超過三年，這是另一缺點但也可將之視為設施回收年數的上限。農友應衡量投入的成本、可能的風險及設施可望帶來的利潤。最簡單的計算說明如下：

假設土地為自有，所需額外投入的成本通常包括：1.建構設施的固定成本，2.若未投資，將錢存入銀行可賺取的定存，3.若未投資，將人力投入其他就業市場可賺取薪資，4.若未投資，該筆土地出租可賺取的金額。

假設固定成本為 3000 元/每坪，分三年回收，設施折舊相當於 1000 元/坪/年。如果不投資，將錢存入銀行定存尚有 6%的利潤，相當於 180 元/坪/年；原打算投入的人力若外出工作可賺取其他收入，假設為月薪 3 萬，年收入 36 萬分攤至打算投資的溫室(1 分地約 300 坪，由 1 人管理)，相當於 1200 元/坪/年(溫室面積愈大，使用人數愈少，此金額愈小)。另外亦假設若未投資，該筆土地將荒廢，額外的收入為 0 元/坪/年。以上四筆金額是投資溫室後應投入或少賺到的金額，應納入整體考量。

假設栽培過程在三年中不會有什麼風險，則不論種什麼作物，每年的淨收益至少要高於以上四個數字的總和 2380 元/坪/年。若存在風險，譬如可能的淹水，風災等，可能造成的損失也應一併納入評估，重新計算每單位面積每年至少要有的淨收益，若不划算，不如不投資；若可行，該有的利潤空間有多少也可預先瞭解。對在一年中單價並不穩定的產品，如何掌握出貨的時機與數量，往往是能否賺錢的關鍵。如何掌握價格高，迴避價格低的時段，是管理者應千方百計謀求因應之道的目標。這通常涉及栽培管理的技術、生產管理的規劃、設施對環境的調節能力與市場的資訊等。誰說農業只能靠勞力、直覺與經驗，農業也是一個要動腦的產業，正如其他想要獲利的產業。

以下的內容，擬針對國內外的一些採用自然通風為主要降溫手段的溫室進行討論，並針對鈹管溫室提出新的設計。

國內外各種自然通風溫室設計

屋頂有開口(天窗)的溫室以太子樓式與展翼式為較常見，後者常見的設計是在屋脊處的兩側每隔一段距離以交錯方式分別向外展開；以荷蘭的 Venlo 型溫室為例，其天窗開口面積只佔地表面積的 18.75%，屋頂與水平方向之夾角為 22 度，展翼式天窗與屋頂之夾角為 44 度。後續有改良為連續式開口者，夾角不變，如圖 2a 所示，天窗開口面積佔地表面積的比例增加，但仍屬有限。



圖 2a. 連續式展翼型天窗(屋脊)



圖 2b. 連續式單翼型天窗(屋簷)

天窗在屋脊者，較不耐強風，通常開放的面積較少，一般不會超過屋頂的 $1/3$ 面積(圖 2a)。有強風的地方，溫室的天窗改為開在屋簷處(圖 2b)，以煙囪效應而言，散熱效果雖比在屋脊者稍差，但開口面積可加大而稍有補償，一般開口面積可達屋頂面積的 $1/2$ 。如圖 2b 所示為只有開放單邊的溫室，其開口面積只達屋頂面積的 $1/4$ 。

筆者在日本千葉大學(Chiba University, Japan)園藝部見到的整片屋頂滑動式溫室(圖 3b, 圖 4a)與美國范溫格登溫室製造公司(Van Wingerden Greenhouse Co., USA)的屋頂向上展開式溫室(圖 3c, 圖 4b; MXII 型)均為屋頂全開的設計，就屋頂的開口面積而言是一大進步。圖 3a 所示是兩者的屋頂關閉時的狀況，屋頂與屋簷水平方向之夾角一般為 30 度，圖 3b 與 3c 所示實線箭頭為屋頂打開或關閉的移動方向，打開時開口處分別在屋簷(圖 3b, 圖 4a)與屋頂(圖 3c, 圖 4b)；後者因為空氣的入口與出口之距離(虛線箭頭)較大，有較佳的自然通風效果。此時屋頂與屋簷水平方向之夾角增加至 83 度。此種大面積天窗開口的溫室通常在屋頂移動部位的結構上需加強抗風的設計，亦可配合風速的感測，在強風時予以自動關閉。

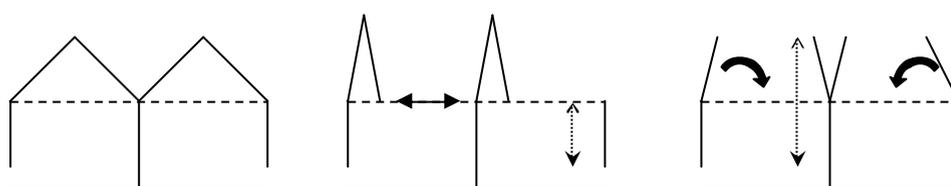


圖 3. 加強自然通風效果的新型溫室屋頂。a. 屋頂關閉時，b. 滑動式屋頂，c. 向上展開式屋頂。



圖 4a. 圖 3b 的實體圖



圖 4b. 圖 3c 的實體圖

筆者在國內有見到在溫室的屋頂上方安裝免電力排風器的單層塑膠布溫室，如圖 5 所示，免電力排風器可提供熱氣的出口，比起安裝前可明顯改善溫室內熱環境，但安裝太少顆則熱空氣向外逸出的出口面積少，安裝太多顆又增加成本且擋光(目前已有使用可透光材質製成的免電力排風器問世，雖透光程度有限，但已改善擋光的缺點)。當上下溫差大與室外風速高時，可加速免電力排風器的抽風能力。使用此類產品需注意出風口與入風口的高度若相差不大，則煙囪效應的效果會打折扣，如圖 5 所示的設計有最大的空氣入出口高度差。

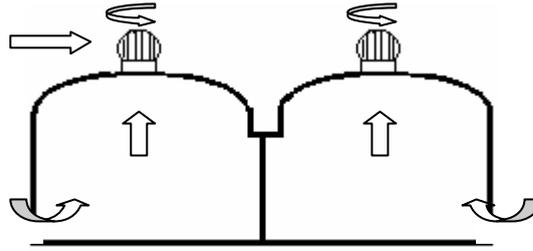


圖 5. 安裝免電力排風器的單層塑膠布溫室示意圖

如圖 6 的溫室有雙層屋頂，但仍延續太子樓式屋頂的設計理念。雙層的屋頂中，上層只有中央部分有擋雨用的塑膠布，下層全為塑膠布被覆只有中央部分為開口。下層的開口部分再安裝防蟲網。開口面積小是本設計的缺點，自然通風的效果與太子樓式建築相同，加上防蟲網則開口面積更少，降溫效果則變差，但在建築成本上則省下許多。溫室兩側為防蟲網，外加可捲揚的塑膠布。



圖 6. 同太子樓式通風的雙層鋸管溫室

另有一型更簡易的溫室天窗的設計，其為簡易的鋸管溫室，一半被覆塑膠布，一半被覆防蟲網；安裝防蟲網的那一半外面再安裝可捲揚式塑膠布，屋頂與側邊各一組。此設計造價最便宜，但在雨天需人工將塑膠布捲下，較為不方便。自然風較難貫穿整棟溫室為另一個缺點。

雙層透氣型鋸管溫室的設計

筆者在此提出「雙層透氣型鋸管溫室」的設計提供業界參考，目前只是紙上談兵，但個人認為在自然通風的效果上應該可優於上述的幾種設計，且兼具造價低、防蟲、抗風與善用自然風等優勢。以下介紹設計內容與相關的理念：

雙層透氣屋頂：

將傳統使用的立管式鋸管溫室或立柱式鋸管溫室的頂蓬拆掉，改安裝 52 孔目的白色防蟲網(一般壽命為 3 年)，如此即可提供散熱的管道，此為內層屋頂。在防蟲網上方 30 公分處再加裝塑膠布頂蓬來擋雨，此為外層屋頂。雙層屋頂的鋸管應使用套件鎖在同一垂直方向的鋸管上，鋸管上的鑽洞以最少為原則。

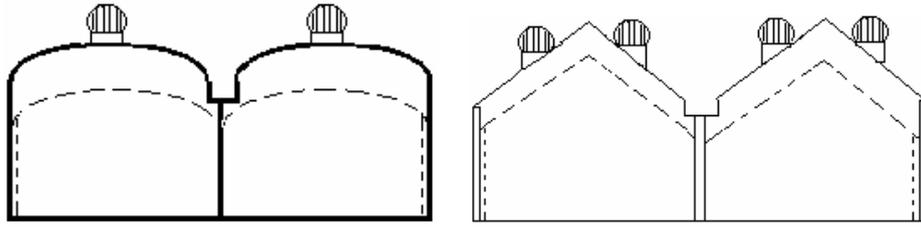


圖 7. 有雙層透氣屋頂的 a.左圖：拱型溫室，b.右圖：山型溫室
(虛線部分代表 52 孔目的防蟲網)

只要有適當的散熱通道，在植床栽培作物的溫室之屋簷高度在 2-2.5 米即可；在地面栽培作物的溫室之屋簷高度可在 1.5-2 米範圍內。不高的設施抗風能力強，在迎風面再加上一層破風網更佳。連棟溫室可在塑膠布中央大約每 30 坪的面積安裝一具免電力的渦輪排風器（採塑料材質可透光者尤佳），用來抽走夾層（上層塑膠布與下層防蟲網）中的熱氣。如圖 7 所示，拱型或山型溫室均可採用此設計，虛線部分代表 52 孔目的白色防蟲網。單棟溫室則不需另外安裝渦輪排風器。

溫室四周：

溫室四壁同樣安裝 52 孔目的白色防蟲網，溫室四周 10-15 公分距離外應挖防蟲溝。整地時整平的面積要大於溫室的面積，溫室四周至少 30 公分以內應避免雜草叢生。四周底部至少 30 公分以下範圍以塑膠布包覆。

保溫：

除了進出口側之外的溫室三側（至少兩側邊）由屋簷高度處加裝手動捲揚式塑膠布，允許將塑膠布由屋簷降至地面，平時捲收於屋簷高度，側邊完全開放（仍有防蟲網保護）。此捲揚式塑膠布的目的除保溫外尚可防風，但真正颱風來時還是應捲收起來，避免加大受風面。此設計會增加成本，有些地區或許根本用不上，可參酌使用。

分隔空間：

溫室應採分隔空間的設計，應有兩道門，人員進出先進「出入區」，關好門後再開另一道門進入「栽培區」。應訓練並要求員工，兩道門不可同時開啟。

結構補強：

鋁管溫室頂蓬的結構不強，不宜安裝太重的懸吊系統，筆者傾向於使用立柱型鋁管溫室的結構；立管型鋁管溫室在四周應有鋼纜來加強結構的抗風力，尤其要針對最上層塑膠布的支撐結構做補強；另外，在縱向與橫向的結構上也應有連結。

新設計的優點

造價便宜是第一個優點，結構簡單、施工與維修容易是第二個優點。四周只以防蟲網包覆受風面小，整棟溫室較低，立管式鋁管溫室輔以鋼纜定錨抗風能力更強是第三個優點。上方採用防蟲網，相當於天窗的開口面積大幅增加，使熱

氣能向上自然逸出，不會在溫室中累積是第四個優點。雙層屋頂下層的防蟲網兼具遮蔭的功能，可省下額外的內或外遮蔭網的安裝成本是第五個優點。

雙層屋頂之夾層中的熱氣可促進免電力排風器的轉動，抽風效果更佳，下層防蟲網同時充當隔熱網是第六個優點。整棟溫室以防蟲網包覆可降低蟲害的發生機率是第七個優點。自然通風效果良好，可大幅降低風扇的使用時機，節省電費是第八個優點。四周開放只以防蟲網包覆，上方仍保持通氣暢通，自然對流效果良好，善用自然風是第九個優點。內外空氣流通良好，可保持溫室內外溫差在 2 度 C 以內是第十個優點。

為了使溫室在夏天仍能維持低於室外的溫度，使用蒸發冷卻方式降溫是必須的。使用雙層透氣屋頂的溫室就無法使用傳統習用的負壓式風扇與水牆降溫系統，但可改為使用正壓式風扇與水牆降溫系統，仍能享受蒸發冷卻的優點，而不需維持高氣密性。雙層透氣型鋁管溫室的造價會稍微高於習用的鋁管溫室，但所增有限，且考慮所提供的功能應是物超所值的。

結論

「設施農業」要能蓬勃發展，設施的合理化設計是頗為重要的，能適度防蟲、適度抗颱風且可全年栽培是對設施的最基本需求。然而，除了功能之外，尚需兼顧價格。簡易溫室的初始投資不能高，因為簡易設施只能生產「簡易」作物，通常利潤空間較為有限，但若能在「菜土」時調節產量，且能掌握「菜金」的時刻，則利潤可期。

自然通風是免費的溫室降溫手段，目前台灣習用的簡易溫室多半未能善用此優勢，本文所提出的雙層透氣型鋁管溫室對熱空氣上升的基本原理做更合理的安排並盡量兼顧防蟲、抗風等基本需求。本設計造價便宜，對現有鋁管溫室做局部改建所需的成本更低，期望能成為農友選擇的參考。如前所述，此設計目前僅止於紙上談兵的階段，後續當做進一步探討。另外，施工細節雖未在此說明，但絕對與系統成敗息息相關，千萬不能忽略。

雙層透氣型鋁管溫室可進一步配合其他降溫設施做逆向操作的選擇適當的作物栽培。掌握「物以稀為貴」的原則，農友應當能在合理的投資金額與時間內創造利潤。期望能再由累積的利潤中重新投入增加經營的規模與提昇設施內可調控的功能。所能調控的因子愈多，就愈不需靠天吃飯。由露天栽培的農業進展到「設施農業」再進展到「環控農業」是全球農業現代化的發展趨勢，「環控農業」可以不是弱勢的產業。