

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國小組 生活與應用科學科(一)

082817

以樹為師～探究兼顧發電效能及土地利用多樣性的太陽能板立體空間排列型式

學校名稱： 新北市汐止區秀峰國民小學

作者：  小六 伍肇安  小六 陳紀瑾  小六 黃宥勻  小六 游惟茜  小六 郭晉恩	指導老師：  顧芳祺  張凌翔
---	-----------------------------

關鍵詞： 仿生，太陽能板，立體空間排列

# 摘要

發展太陽能源是世界趨勢，然而在地狹人稠的台灣，更突顯出太陽光電與人類自然之間的土地利用衝突。為了兼顧太陽能發電效能及土地利用多樣性，我們想到讓太陽能板由平鋪式改為立體空間排列化身成太陽能樹，讓樹上方具有發電功能，樹下空間可供利用。

為求最佳發電效能，本研究仿生七種植物葉片排列方式，模擬三個季節太陽仰角與方位角進行光照實驗發現：影響夏至太陽能樹受光面積表現在於太陽能樹俯視視角的葉片排列分散程度；影響春分和冬至則於側視視角的葉片排列分散程度。再以太陽日照量理論值計算各樹型發電量，最後我們找出輪生樹為受光面積及發電效能最佳樹型，以提供發展能兼顧太陽能發電效能及土地利用多樣性的太陽光電方向。

## 壹、前言

### 一、研究動機

近年來台灣土地利用增加許多太陽光電使用，將農用地改成種綠電(呂國禎，2020)、魚塭改為鋪設太陽能板導致整體漁獲量減少而使魚價上漲(王紹宇、何正鳳，2022)，都突顯出在地狹人稠的台灣，太陽光電與人類自然資源競爭土地利用的窘境。

自然課我們學到自然界的爭取陽光大師就是「樹」，因此，我們想到讓太陽能板由平鋪式太陽能板改為立體空間排列化身成太陽能樹，而樹上方具有發電功能，樹下土地空間可供多樣性利用，希望在能源發展與土地利用需求之間取得平衡。

而自然界植物葉片排列方式影響植物光照利用效能，所以我們以樹為師仿生植物葉片立體空間排列方式，希望求得最佳發電效能的太陽能板立體空間排列樹型，以提供發展能兼顧太陽能發電效能及土地利用多樣性的太陽光電方向。

- 與課程相關單元：【三年級植物的身體】葉片在莖上生長的方式  
【五年級觀測太陽】一天及一年太陽的運行軌跡

### 二、研究目的

- (一) 探究太陽能樹於不同季節的受光面積表現
- (二) 探究七種太陽能板立體空間排列結構對受光面積的影響
- (三) 找出於不同季節受光面積表現穩定且佳的太陽能樹型
- (四) 以太陽日照量理論數值模擬發電量找出發電效能最佳樹型
- (五) 探究同樹型但擺放方位不同之受光面積及發電效能差異
- (六) 探究太陽能樹土地利用多樣性及經濟效益

### 三、文獻回顧

(一) 與本研究**主題直接相關**作品分析：含「晴」脈脈~葉片排列與受光面積對太陽能板效率之研究(第 57 屆中小學科展國中組生物科)

研究特色或探討	本研究特色
<ul style="list-style-type: none"> <li>以自然植物盆栽進行實驗。但自然植物除了葉序不同外，其葉片形式、大小、數量等也不相同，<b>難以進行變因控制</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>為控制變因，本研究以模擬樹進行實驗</b>，控制葉片大小及數量、葉形、樹高、樹寬..等變因。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>以對生、輪生、叢生和<b>互生</b>四種不同葉序進行實驗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>除原有葉序外，互生葉序參考陳柏宇(2009)研究，<b>增加 1/2、1/3、2/5 及 3/8 互生等四種與費氏數列相關互生樹型</b>。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>葉片受光區界定以人工將葉片塗漆區分，再摘下置放同一平面拍照。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>為減少人工塗漆產生的誤差，<b>本實驗將葉片拍照後，以 GIMP 軟體進行校正</b>。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>暗室內避免其他光源干擾，以手電筒照射凸透鏡模擬太陽平行光。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>本研究太陽能樹寬 25.6 公分，學校沒有等寬直徑的凸透鏡，故另尋平行光模擬方法</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>以模擬太陽仰角 90 度、60 度及 40 度照射。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新增<b>太陽方位角</b>對葉片受光面積的影響。</li> <li>選擇台北所在地<b>北緯 25 度實際的太陽仰角及方位角</b>進行實驗。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>沒有考量同樹型的擺放方位不同產生的影響。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>考量<b>同樹型</b>因為<b>擺放方位不同</b>產生不同受光面積。</li> </ul>

(二) 與本研究**研究方法**相關作品分析：

1. 真的全自動-全球免設定日光追蹤系統！(第 56 屆中小學科展國小組生活與應用科學科)

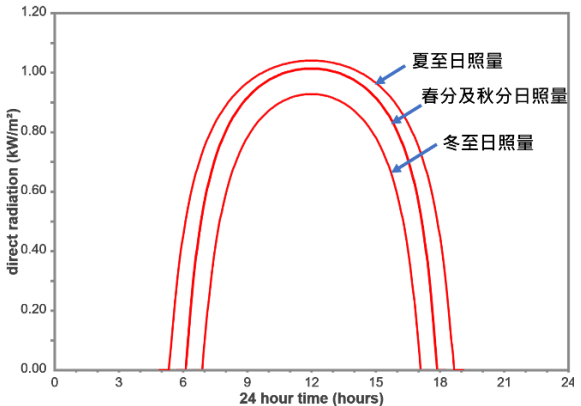
研究特色或探討	本研究更動或新增
<ul style="list-style-type: none"> <li>距離檯燈 30 公分會有類似平行光的效果</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>使用平行線條當平行光視覺衡量標準</b>，發現<b>距離光源 180 公分</b>有近似平行光效果。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>固定光源，以「角度調整器」改變實驗主體角度，模擬太陽仰角</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>沿用「角度調整器」，再<b>改良新增「方位盤」</b>，以同時模擬太陽仰角及方位角。</li> </ul>

2. 真的是 23.5 度嗎？—以天文及氣象資料探討固定型太陽能板最佳架設傾斜角(第 59 屆中小學科展國中組地球科學科)

研究特色或探討	本研究參考使用
<ul style="list-style-type: none"> <li>理論值計算太陽能板朝南方，傾斜角 18 度最佳；實際架設朝南方的太陽能板發現傾斜角 15 度為最佳角度</li> <li>訪談三家太陽能廠商，認為太陽能板最佳傾斜角度分別是 10 度、15 度、12 度，並無統一方法決定最佳架設傾斜角度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>訪談本校太陽能廠商認為太陽能板最佳架設傾斜角度是 <b>12~19 度</b>。</li> <li>因目前尚無最佳傾斜角度定論，綜合各項資訊，本研究<b>以葉片傾斜 15 度角模擬太陽能板設置傾斜角度</b>。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>根據進行一天太陽能發電系統實測與理論計算比較，發現大約 <b>10 時~14 時</b>為發電效率一天中較佳的時段</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>本實驗選擇 <b>10 時、12 時及 14 時之太陽仰角及方位角資料</b>進行模擬。</li> </ul>

### 3. 從 PVEducation 網站取得太陽日照量資料：

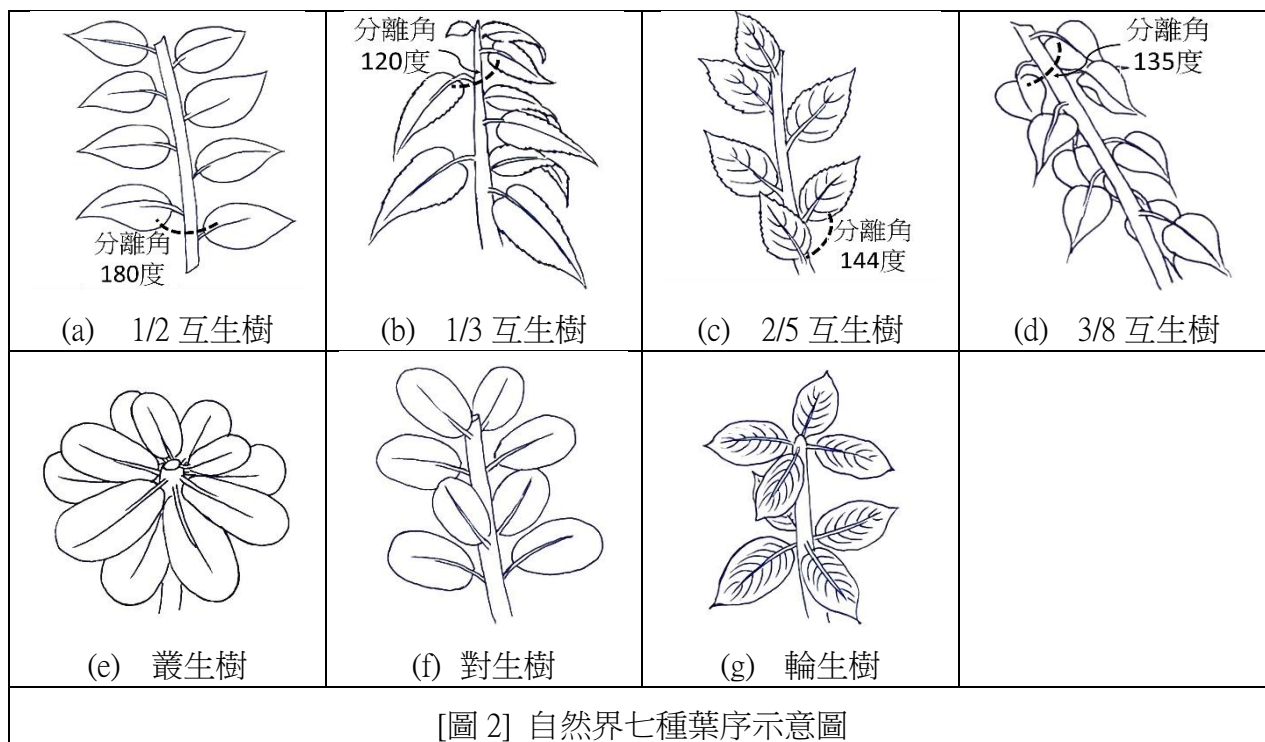
- (1) 參考選擇模擬太陽仰角及方位角的時間點，以進行光照實驗
- (2) 運用日照量資料進行太陽能樹的發電量模擬

研究特色或探討	本研究參考使用																			
<ul style="list-style-type: none"> <li>根據台北所在地北緯 25 度，春分、夏至、秋分及冬至太陽日照量資料，發現大約 10 時~14 時為發電效率一天中較佳的時段(圖 1)</li> </ul>  <p>[圖 1] 太陽日照量曲線圖</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>本實驗選擇春分、夏至及冬至的 10 時、12 時及 14 時共九個時間點之太陽仰角及方位角資料進行光照實驗，以求得不同樹型的太陽能樹之受光面積百分比。</li> <li>因春分和秋分數據接近，僅選擇春分進行實驗。</li> </ul>																			
<ul style="list-style-type: none"> <li>根據台北所在地北緯 25 度，取得春分、夏至及冬至的 10 時、12 時及 14 時共九個時間點日照量資料如表 1：</li> </ul> <p>[表 1]北緯 25 度九個時間點的太陽日照量</p> <table border="1" data-bbox="226 1261 759 1512"> <thead> <tr> <th rowspan="2">季節</th> <th colspan="3">太陽日照量 (kW/m<sup>2</sup>)</th> </tr> <tr> <th>10 時</th> <th>12 時</th> <th>14 時</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>夏至</td> <td>1.012</td> <td>1.042</td> <td>1.012</td> </tr> <tr> <td>春分</td> <td>0.9773</td> <td>1.016</td> <td>0.9773</td> </tr> <tr> <td>冬至</td> <td>0.8741</td> <td>0.9291</td> <td>0.8741</td> </tr> </tbody> </table>	季節	太陽日照量 (kW/m <sup>2</sup> )			10 時	12 時	14 時	夏至	1.012	1.042	1.012	春分	0.9773	1.016	0.9773	冬至	0.8741	0.9291	0.8741	<ul style="list-style-type: none"> <li>根據下列公式可得各時間點發電量：</li> </ul> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <math display="block">\text{發電量(kW)} = \text{太陽日照量(kW/m}^2\text{)} * \text{太陽能樹受光面積(m}^2\text{)}</math> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>註：計算太陽能樹受光面積(m<sup>2</sup>)的方法 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 本實驗一棵太陽能樹的八片模擬太陽能葉片，葉片總面積為 9cm*5.4cm*8= 0.03888 m<sup>2</sup></li> <li>✓ 再依據光照實驗後得到的各樹型受光面積百分比，可計算出各樹型於不同季節時間點的實際受光面積。</li> </ul> </li> </ul>
季節		太陽日照量 (kW/m <sup>2</sup> )																		
	10 時	12 時	14 時																	
夏至	1.012	1.042	1.012																	
春分	0.9773	1.016	0.9773																	
冬至	0.8741	0.9291	0.8741																	

### 四、名詞解釋：葉序

- (一) 葉序是指葉子在莖上的排列次序，葉序可使葉片有規律的向四面分布照到陽光，有利於植物吸收光能。
- (二) 本研究共採用七種自然界存在的葉序型式：1/2 互生、1/3 互生、2/5 互生、3/8 互生等四種互生樹型及叢生、對生、輪生。
  1. 互生：每一個莖節只生長一片葉子，葉片交互排列。
    - (1) 互生葉序參考陳柏宇（2009）研究，採用 1/2、1/3、2/5 及 3/8 互生等四種與費氏數列相關互生樹型，費氏序列特質是前兩項和等於第三項 1、1、2、3、5、8、13…。
    - (2) 各互生序列具有獨特的分離角，分離角是指互生樹上下相鄰葉片間的夾角。
    - (3) 本研究四種互生樹型敘述如下：

- 1/2 互生：每 2 片葉子沿著莖繞了 1 圈，分離角 180 度(圖 2a)。
  - 1/3 互生：每 3 片葉子沿著莖繞了 1 圈，分離角 120 度(圖 2b)。
  - 2/5 互生：每 5 片葉子沿著莖繞了 2 圈，分離角 144 度(圖 2c)。
  - 3/8 互生：每 8 片葉子沿著莖繞了 3 圈，分離角 135 度(圖 2d)。
2. 叢生：每一個莖節節間極短，葉子密集互生(圖 2e)。
  3. 對生：每一個莖節上著生二片葉子，且此二葉片相對面而生(圖 2f)。
  4. 輪生：每一個莖節著生三片以上的葉子，排成輪狀(圖 2g)。



## 貳、研究設備及器材

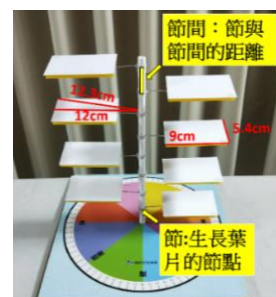
- 一、**實驗器材**：長硬質管(高 30 cm、管徑 1 cm)、白色名片紙(9 cm×5.4cm)、塑膠瓦楞板(9 cm×5.4cm)、1.5mm 線徑鋁線、膠帶、方位盤、木板、塑膠夾、棉線、木架、遠程手電筒、充電設備、鋁梯、紙盒、文具、手機、筆電。
- 二、**實驗軟體**：GIMP、Python、Excel。

## 參、研究過程與方法

### 一、實驗裝置製作及設計

#### (一) 模擬太陽能樹基本規格(圖 3)：

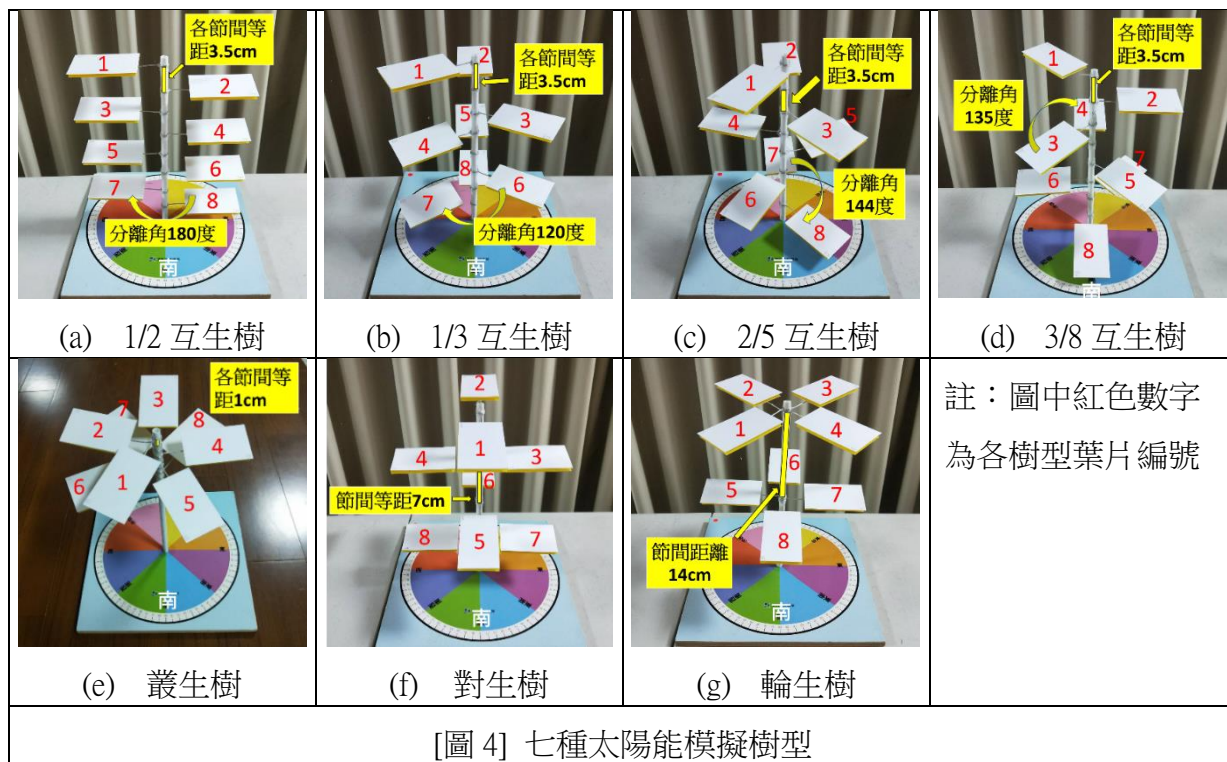
1. 模擬樹幹：長硬質管，高 30 cm、管徑 1 cm。
2. 模擬太陽能板葉片：白色名片紙平貼於塑膠瓦楞板 (9cm×5.4cm) 模擬太陽能板葉片，每棵樹皆為 8 片葉片。
3. 模擬枝幹：1.5mm 線徑鋁線模擬枝幹，各葉片邊緣距離樹幹垂直距離皆為 12 cm，每棵樹最大樹寬為 25.6cm。



[圖 3] 太陽能模型樹 (1/2 互生樹為例)

(二) 依葉片排列方式不同，本研究採用七種太陽能模擬樹型進行實驗：

1. 本研究七種樹型為 1/2 互生、1/3 互生、2/5 互生、3/8 互生、叢生、對生及輪生(圖 4)。
2. 每棵樹皆為八片葉片，從上到下依序編號，本文中葉片編號 1 簡稱葉 1，其餘編號依序類推，如圖 4 之紅色數字。



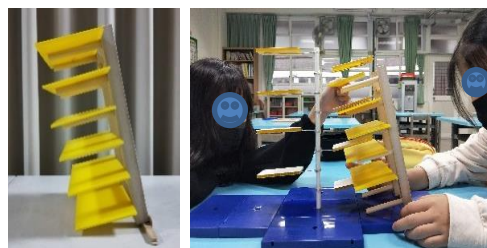
3. 每種樹型依俯視圖的幾何對稱特性，分別選用了 2~6 種不等的擺放方位進行該樹型重複實驗，各樹型重覆實驗株數及選用的擺放方位見表 2 及附錄一。

[表 2] 七種樹型依俯視圖幾何對稱特性選用 2~6 種擺放方位進行該樹型重複實驗

樹型	光照實驗	葉 1 方位角朝向	樹型	光照實驗	葉 1 方位角朝向
1/2 互生	第一株	180 度	3/8 互生	第一株	180 度
	第二株	270 度		第二株	202.5 度
	第三株	0 度		第三株	270 度
1/3 互生	第一株	180 度		第四株	292.5 度
	第二株	240 度		第五株	315 度
	第三株	300 度		第六株	0 度
	第四株	0 度	叢生	第一株	180 度
2/5 互生	第一株	180 度		第二株	216 度
	第二株	216 度	對生	第一株	180 度
	第三株	288 度		第二株	225 度
	第四株	0 度	輪生	第一株	180 度
		第二株		225 度	

### (三) 立體空間 15 度角度調整器：

1. 太陽能樹所有葉片皆需朝南方傾斜 15 度角。
2. 一般量角器測量角度適合於平面測量，但要調整立體空間排列的八片葉片傾斜 15 度角就有困難。於是我們製作立體空間 15 度角度測量器，以減少角度調整的誤差 (圖 5)。



[圖 5] 立體空間 15 度角度調整器

### (四) 太陽仰角與方位角選擇：

1. 參考陳弈霖等人(2019)研究及 PVEducation 網站太陽日照量資料顯示：10 時~14 時為一天中發電效率最佳時段。
2. 從中央氣象局網站取得臺北(東經 121°31' 北緯 25°02')太陽仰角與方位角資訊如表 3。
3. 本實驗選擇夏至、春分及冬至的 10 時、12 時及 14 時共九個時間點的太陽仰角及方位角進行模擬光照。
4. 因春分和秋分數據接近，僅選擇春分進行實驗。

[表 3] 臺北四季太陽仰角與方位角

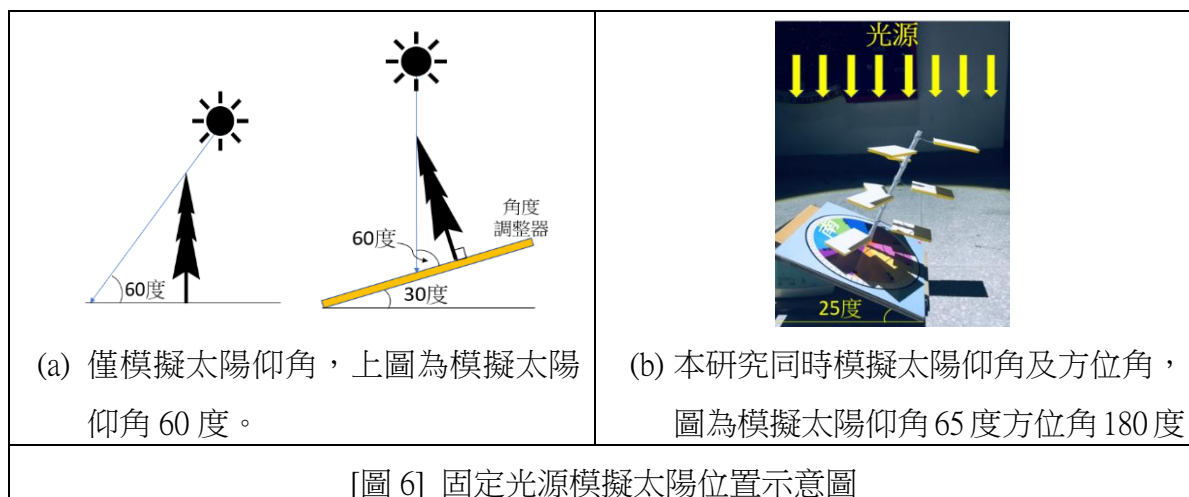
季節	時	10 時	12 時	14 時
夏至	仰角	63.6	88.4	61.7
	方位角	87.4	180	273.4
春分	仰角	51.5	65	52
	方位角	125.9	180	233.5
冬至	仰角	34.4	41.5	32.5
	方位角	148.5	180	215.1

註 1：仰角以地平為 0 度，天頂為 90 度；方位角以正北為 0 度。

註 2：12 時的資料取自當天太陽仰角最高的時候。

### (五) 太陽仰角及方位角調整器：

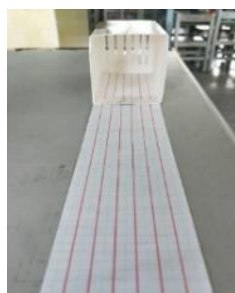
1. 參考孫意涵等人(2016)研究，固定光源並利用角度調整器調整實驗物品角度進行太陽仰角模擬(圖 6a)。
2. 本研究以角度調整器再加上方位盤進行改良為太陽仰角及方位角調整器，以同時能模擬太陽仰角及方位角(圖 6b)。



[圖 6] 固定光源模擬太陽位置示意圖

## (六) 模擬太陽平行光測試：

1. 參考孫意涵等人(2016)研究發現距離檯燈 30 公分可有類似平行光效果。我們以手電筒及燈泡進行實測，發現距離光源 70 公分仍無法模擬出平行光，更遠則亮度驟減無法量測。
2. 改以遠程手電筒實測並以平行線條當平行光的視覺衡量標準(圖 7)，希望能更精準找到模擬平行光的光源距離。
3. 經過實測發現距離光源 180 公分後，可以達到模擬太陽平行光效果(圖 8)。



[圖 7] 平行線條當平行光視覺衡量標準。



[圖 8] 距離光源 180 公分達到平行光效果。

## (七) 照片校正軟體：GIMP 自由軟體

1. 葉片拍成相片產生梯形變形(圖 9)導致無法正確計算受光面積，故以 GIMP 軟體進行校正(圖 10)。
2. 簡要操作步驟：(1)選取工具列「統一變換」；(2)移動四個控制點後進行變換。



[圖 9] 原始葉片照片梯形變形



[圖 10] GIMP 軟體校正後圖檔

## (八) 程式語言 Python 程式 (節錄) 計算受光面積百分比：

```
for item, line in enumerate(lines):
    try:
        this_image_name = line[:-1]
        image_fp = open(this_image_name, 'rb')

        with image_fp:
            image_in = cv2.imread(this_image_name)
            height = image_in.shape[0]
            width = image_in.shape[1]
            k = 0

            for i in range(height):
                for j in range(width):
                    if image_in[i, j].mean() < 230:
                        k = k + 1

            shadow = k*100/(height*width)
            bright = 100 - shadow

            fcsv.write("{}{},{:.4f},{:.4f}\n".format(
                this_image_name.split(sep='.')[0],
                shadow,
                bright))

            image_fp.close()
```

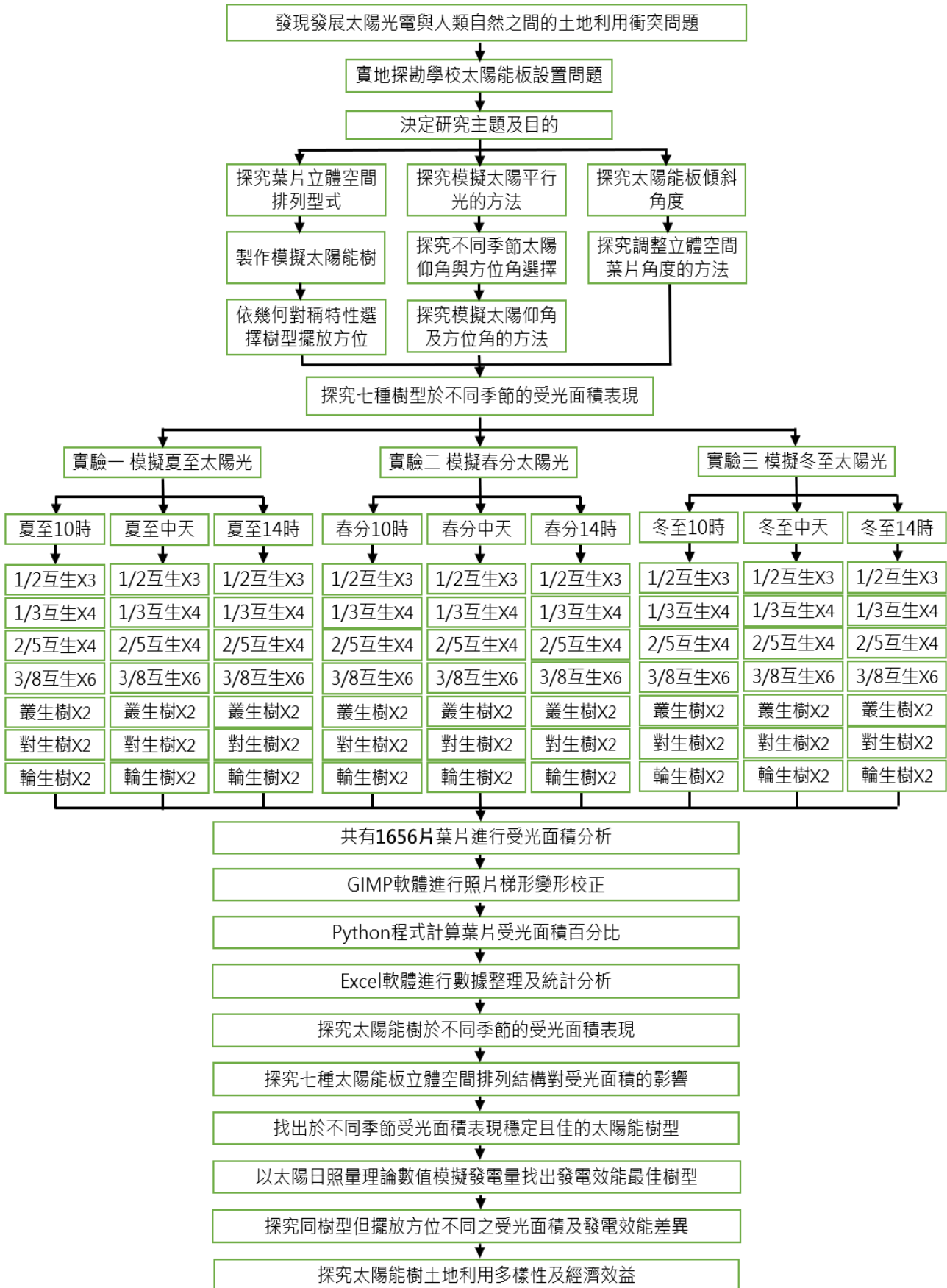
## (九) 以 EXCEL 軟體進行受光面積百分比數據整理及統計分析

## (十) 從 PVEducation 網站取得太陽日照量資料，計算太陽能樹的模擬發電量。



## 二、實驗流程

### (一) 研究架構流程圖，見圖 11



[圖 11] 研究架構流程圖

## (二) 實驗步驟

1. 於暗室進行，避免其他光源干擾影響實驗結果。
2. 手電筒固定天花板使光源距離樹超過 180 公分模擬平行光。
3. 調整太陽仰角方位角調整器模擬太陽在天空的位置。
4. 放置太陽能樹於調整器方位盤上，以鉛錘從光源中心垂降至樹幹中心點，確認樹於光源正下方(圖 12)。
5. 轉動太陽能樹使其葉片編號 1 對準所要擺放的方位角，進行各樹型重複實驗。
6. 光源照射太陽能樹，拍下每一片葉片(圖 13)。
7. 以 GIMP 進行照片校正。
8. 以 Python 進行受光面積百分比計算。
9. 以 Excel 軟體進行數據整理及統計分析。
10. 以太陽日照量模擬數值，計算太陽能樹各樹型在夏至、春分及冬至平均發電量，進行比較分析及討論。



[圖 12] 鉛錘確認太陽能樹置於光源正下方



[圖 13] 分工合作進行調整仰角方位、拍照、上傳檔案歸檔整理

## 三、實驗變因

實驗設計主要考量兩大方向：生物因子—樹型；環境因子—太陽仰角與方位角。

1. 生物因子選擇使用七種樹型，每種樹型依俯視圖的幾何對稱特性，選用 2~6 種不等擺放方位進行該樹型重複實驗(表 2、附錄一)。
2. 環境因子選擇夏至、春分及冬至的 10 時、12 時及 14 時共九個時間點的太陽仰角與方位角進行模擬太陽光照射。每次實驗以一個時間點為控制變因進行實驗。
3. 以『1/3 互生樹為操縱變因進行夏至 10 時光照實驗』為例，說明實驗變因如下：
  - **操縱變因**：七種樹型（表 4 僅以『1/3 互生樹』舉例）
  - **控制變因**：太陽的位置（表 4 控制變因為『夏至 10 時的太陽仰角及方位角』）；太陽能樹的高度、樹的寬度、葉片樹量、葉片大小…等皆一致相同。
  - **應變變因**：受光面積百分比

樹型	光照實驗	受光面積百分比
1/3 互生	第一株	85%
	第二株	85%
	第三株	81%
	第四株	84%
	平均值	83.5%
	標準差	2.0%

註：表中每個受光面積百分比數值為一棵樹的八片葉片之受光面積平均值

#### 四、資料整合方式說明

本實驗共有 1656 片葉片資料進行分析，由於資料量大，我們將資料整合以進行討論。整合方式以『1/3 互生樹型於夏至 10 時』實驗為例，說明如下：

##### (一) 各樹型於不同季節的受光面積表現

- 為了解各樹型於不同季節的受光面積表現，我們將該季節的 10 時、12 時及 14 時三個時間點的受光面積進行平均，計算出該樹型的季節平均受光面積百分比。
- 以『1/3 互生樹型於夏至受光面積表現』實驗為例(表 5)，1/3 互生樹夏至平均受光面積百分比為 69.1%，標準差為 2.2%：

樹型	光照實驗	夏至三個時間點的受光面積百分比			夏至平均受光面積百分比
		10 時	12 時	14 時	
1/3 互生	第一株	85%	41%	87%	70.7%
	第二株	85%	39%	84%	69.2%
	第三株	81%	39%	79%	66.0%
	第四株	84%	43%	85%	70.6%
	平均	83.5%	40.2%	83.7%	69.1%
	標準差	2.0%	2.0%	3.4%	2.2%

##### (二) 樹型結構分析~以同樹型編號 1~8 的八片葉片分別的受光面積百分比進行樹型結構分析

- 為進行各樹型結構分析，我們將該樹型八片葉子(樹葉排列由上到下編號為 1~8)分別的受光面積百分比列出，以進行同一樹型上、下層葉片受光面積比較。
- 以『1/3 互生樹型於夏至受光面積表現』實驗為例(表 6)，列出各葉片受光面積百分比：

樹型	光照實驗	1/3 互生樹 8 片葉片於夏至之受光面積百分比 (樹葉排列由上到下編號為 1~8)								夏至平均受光面積百分比
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1/3 互生	第一株	100%	100%	99%	67%	51%	43%	68%	38%	70.7%
	第二株	100%	100%	99%	49%	68%	33%	43%	62%	69.2%
	第三株	100%	100%	100%	47%	47%	66%	33%	35%	66.0%
	第四株	100%	100%	100%	69%	52%	41%	67%	37%	70.6%
	平均	100%	100%	99.4%	57.9%	54.4%	45.6%	52.7%	43.1%	69.1%

註：表中各葉片受光面積百分比數值為夏至三個時間點的受光面積平均

## 肆、研究結果

一、實驗一：夏至七種樹型平均受光面積百分比及標準差見表 7

- (一) 夏至受光面積百分比季節平均值為 76.7%，標準差為 12.04%。
- (二) 夏至七種樹型平均受光面積百分比大小依序為(表 7)：叢生(86.4%) > 3/8 互生(84.9%) > 輪生(84.8%) > 2/5 互生(81.4%) > 對生(77.2%) > 1/3 互生(69.1%) > 1/2 互生(53.0%)。
- (三) 夏至七種樹型受擺放方位不同之受光面積影響分析(表 7)：『1/2 互生樹』受光面積表現會因擺放方位不同而產生較大差異(標準差 11.28%)；其他六種樹型受光面積受擺放方位影響相對較小(標準差介於 0.35%~2.30%)。

[表7] 夏至七種樹型的受光面積百分比					
樹型	光照實驗	受光面積百分比			各樹型平均受光面積百分比
		10時	12時	14時	
1/2互生	第一株	71%	27%	81%	59.5%
	第二株	48%	27%	45%	39.9%
	第三株	75%	26%	78%	59.4%
	平均	64.5%	26.2%	68.2%	53.0%
	標準差	14.2%	0.6%	20.1%	11.28%
1/3互生	第一株	85%	41%	87%	70.7%
	第二株	85%	39%	84%	69.2%
	第三株	81%	39%	79%	66.0%
	第四株	84%	43%	85%	70.6%
	平均	83.5%	40.2%	83.7%	69.1%
	標準差	2.0%	2.0%	3.4%	2.19%
2/5互生	第一株	93%	65%	87%	81.6%
	第二株	94%	63%	87%	81.4%
	第三株	89%	65%	86%	80.1%
	第四株	88%	67%	92%	82.3%
	平均	91.2%	64.9%	88.0%	81.4%
	標準差	2.8%	1.3%	2.8%	0.92%
3/8互生	第一株	86%	92%	77%	84.8%
	第二株	85%	91%	78%	85.0%
	第三株	84%	92%	81%	85.5%
	第四株	86%	92%	78%	85.1%
	第五株	86%	92%	76%	84.5%
	第六株	77%	92%	85%	84.7%
	平均	84.0%	91.8%	79.1%	84.9%
	標準差	3.3%	0.3%	3.4%	0.35%
叢生	第一株	79%	87%	89%	85.2%
	第二株	87%	89%	87%	87.6%
	平均	83.2%	88.2%	87.8%	86.4%
	標準差	5.3%	1.5%	1.6%	1.75%
對生	第一株	92%	53%	92%	78.9%
	第二株	87%	52%	88%	75.6%
	平均	89.3%	52.2%	90.2%	77.2%
	標準差	3.3%	0.6%	3.1%	2.30%
輪生	第一株	83%	91%	84%	86.2%
	第二株	79%	92%	80%	83.3%
	平均	81.0%	91.6%	81.7%	84.8%
	標準差	3.5%	0.1%	2.9%	2.08%
季節平均值					76.7%
標準差					12.04%

## 二、實驗二：春分七種樹型平均受光面積百分比及標準差見表 8

(一) 春分受光面積百分比季節平均值為 84.9%，標準差為 5.12%。

(二) 春分七種樹型平均受光面積百分比大小依序為(表 8)：對生 (90.4%) > 1/3 互生 (88.0%) > 輪生 (87.2%) > 2/5 互生 (86.4%) > 3/8 互生 (84.3%) > 叢生 (83.1%) > 1/2 互生 (74.6%)。

(三) 春分樹型擺放方位不同之受光面積分析(表 8)：春分七種樹型的平均受光面積百分比標準差介於 0.07%~2.10%，顯示春分受光面積表現受擺放方位影響相對較小。

樹型	光照實驗	受光面積百分比			各樹型平均受光面積百分比
		10時	12時	14時	
1/2互生	第一株	87%	44%	89%	73.5%
	第二株	81%	69%	81%	77.0%
	第三株	85%	48%	87%	73.4%
	平均	84.3%	53.9%	85.7%	74.6%
	標準差	3.4%	13.6%	4.3%	2.04%
1/3互生	第一株	87%	79%	92%	86.1%
	第二株	95%	84%	92%	90.0%
	第三株	90%	84%	91%	88.1%
	第四株	89%	81%	93%	87.8%
	平均	90.2%	81.9%	91.9%	88.0%
標準差	3.3%	2.2%	1.1%	1.60%	
2/5互生	第一株	82%	91%	86%	86.4%
	第二株	89%	88%	80%	85.7%
	第三株	88%	93%	79%	86.7%
	第四株	83%	92%	85%	86.7%
	平均	85.5%	91.1%	82.5%	86.4%
標準差	3.4%	2.3%	3.5%	0.50%	
3/8互生	第一株	84%	81%	83%	82.8%
	第二株	87%	74%	81%	80.8%
	第三株	87%	85%	84%	85.6%
	第四株	87%	87%	84%	86.0%
	第五株	89%	83%	85%	85.9%
	第六株	82%	84%	88%	84.8%
	平均	86.1%	82.5%	84.3%	84.3%
標準差	2.4%	4.4%	2.4%	2.10%	
叢生	第一株	77%	86%	86%	83.1%
	第二株	80%	86%	84%	83.0%
	平均	78.5%	86.0%	84.7%	83.1%
	標準差	1.7%	0.5%	1.3%	0.07%
對生	第一株	90%	92%	88%	89.9%
	第二株	92%	87%	94%	91.0%
	平均	91.0%	89.3%	90.9%	90.4%
	標準差	1.7%	3.3%	3.8%	0.75%
輪生	第一株	87%	82%	89%	86.2%
	第二株	92%	80%	93%	88.3%
	平均	89.6%	81.0%	91.2%	87.2%
	標準差	3.4%	2.0%	2.8%	1.44%
季節平均值					84.9%
標準差					5.12%

### 三、實驗三：冬至七種樹型平均受光面積百分比及標準差見表 9

(一) 冬至受光面積百分比**季節平均值**為 **87.5%**，標準差為 5.96%。

(二) 冬至七種樹型平均受光面積百分比大小依序為(表 9)：**輪生 (95.2%) > 1/3 互生 (91.1%) > 3/8 互生 (89.7%) > 1/2 互生 (89.0%) > 對生 (86.1%) > 2/5 互生 (85.1%) > 叢生 (76.3%)。**

(三) 冬至七種樹型受擺放方位不同之受光面積影響分析(表 9)：『**1/2 互生樹**』受光面積表現會**因擺放方位不同而產生較大差異**(標準差 9.57%)；其他六種樹型受光面積受擺放方位影響相對較小(標準差介於 0.23%~2.62%)。

[表9] 冬至七種樹型的受光面積百分比					
樹型	光照實驗	受光面積百分比			各樹型平均受光面積百分比
		10時	12時	14時	
1/2互生	第一株	96%	55%	97%	82.4%
	第二株	100%	100%	100%	100.0%
	第三株	94%	61%	98%	84.6%
	<b>平均</b>	<b>96.7%</b>	<b>72.0%</b>	<b>98.4%</b>	<b>89.0%</b>
	<b>標準差</b>	<b>3.0%</b>	<b>24.5%</b>	<b>1.6%</b>	<b>9.57%</b>
1/3互生	第一株	87%	100%	87%	91.0%
	第二株	88%	93%	88%	89.7%
	第三株	91%	98%	88%	92.4%
	第四株	87%	94%	93%	91.1%
	<b>平均</b>	<b>88.0%</b>	<b>96.4%</b>	<b>88.9%</b>	<b>91.1%</b>
<b>標準差</b>	<b>2.0%</b>	<b>3.1%</b>	<b>2.6%</b>	<b>1.11%</b>	
2/5互生	第一株	86%	82%	82%	83.5%
	第二株	86%	81%	90%	85.6%
	第三株	88%	85%	87%	86.4%
	第四株	80%	83%	90%	84.7%
	<b>平均</b>	<b>85.2%</b>	<b>82.8%</b>	<b>87.2%</b>	<b>85.1%</b>
<b>標準差</b>	<b>3.3%</b>	<b>1.6%</b>	<b>4.0%</b>	<b>1.27%</b>	
3/8互生	第一株	89%	80%	85%	84.8%
	第二株	92%	91%	89%	90.8%
	第三株	89%	86%	92%	88.9%
	第四株	89%	92%	93%	91.3%
	第五株	91%	88%	93%	90.7%
	第六株	93%	93%	90%	91.9%
	<b>平均</b>	<b>90.5%</b>	<b>88.3%</b>	<b>90.4%</b>	<b>89.7%</b>
<b>標準差</b>	<b>1.8%</b>	<b>4.9%</b>	<b>3.0%</b>	<b>2.62%</b>	
叢生	第一株	76%	78%	76%	76.5%
	第二株	74%	77%	78%	76.1%
	<b>平均</b>	<b>74.5%</b>	<b>77.2%</b>	<b>77.1%</b>	<b>76.3%</b>
	<b>標準差</b>	<b>1.4%</b>	<b>0.7%</b>	<b>1.3%</b>	<b>0.23%</b>
對生	第一株	83%	89%	83%	85.1%
	第二株	87%	83%	91%	87.1%
	<b>平均</b>	<b>85.4%</b>	<b>85.9%</b>	<b>87.0%</b>	<b>86.1%</b>
	<b>標準差</b>	<b>2.7%</b>	<b>4.8%</b>	<b>6.3%</b>	<b>1.40%</b>
輪生	第一株	96%	97%	97%	96.5%
	第二株	93%	95%	93%	94.0%
	<b>平均</b>	<b>94.6%</b>	<b>96.2%</b>	<b>94.8%</b>	<b>95.2%</b>
	<b>標準差</b>	<b>1.7%</b>	<b>1.1%</b>	<b>2.5%</b>	<b>1.76%</b>
<b>季節平均值</b>					<b>87.5%</b>
<b>標準差</b>					<b>5.96%</b>

## 伍、討論

### 一、太陽能樹在不同季節平均受光面積的比較與發現

- (一) 季節平均受光面積百分比大小依序為冬至(87.5%)>春分(84.9%)>夏至(76.7%)。
- (二) 將三個季節受光面積百分比以單因子變異數分析(One-way ANOVA)進行檢驗，發現三個季節的受光面積之間有顯著差異( $p < 0.001$ )(表 10)。

[表 10] 三個季節的太陽能樹葉片受光面積之單因子變異數分析(One-way ANOVA)摘要表

變異來源	離均差平方和(SS)	自由度(df)	均方和(MS)	檢定(F)
群組之間	0.153	2	0.076	11.950***
群組內	0.421	66	0.006	
總計	0.574	68	0.008	

\*\*\* $p < 0.001$

- (三) 為進一步了解哪些季節之間有顯著差異，進行單因子變異數分析的事後檢定，以 Tukey - Kramer method 進行比較分析(表 11)顯示：

- 夏至分別和春分、冬至之間的受光面積百分比有顯著差異( $p < 0.001$ )。
- 春分和冬至兩季節間的受光面積百分比並無顯著差異。

[表 11] ANOVA 事後檢定比較表

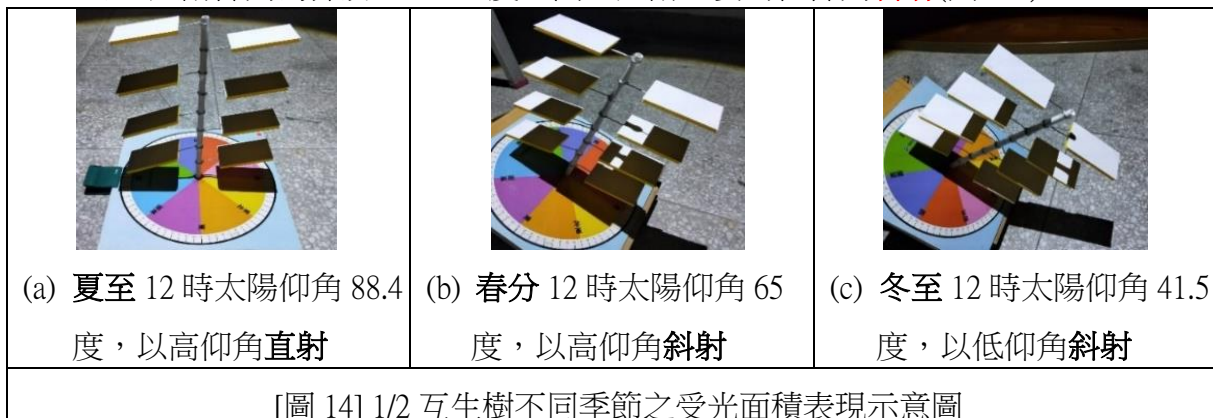
組別 1	組別 2	平均數差異
夏至	春分	0.0788**
夏至	冬至	0.1121***
春分	冬至	0.0333

\*\* $p < 0.01$ ; \*\*\* $p < 0.001$

- (四) 我們從分析三個季節太陽仰角嘗試對上述統計結果進行分析詮釋：

1. 各季節 10~14 時的太陽仰角分析：

- 夏至太陽仰角約介於 60~90 度之間，太陽主要為高仰角**直射**(圖 14a)。
- 春分太陽仰角約介於 50~65 度之間，太陽主要為高仰角**斜射**(圖 14b)。
- 冬至太陽仰角約介於 30~41.5 度之間，太陽主要為低仰角**斜射**(圖 14c)。



2. 綜合三個季節的太陽仰角及統計結果分析，我們推論：

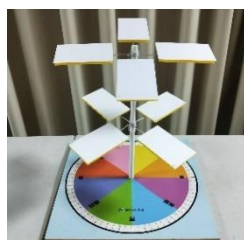
- 影響夏至太陽能樹的受光面積表現，在於太陽能樹上方投影俯視視角(圖 15、16)
- 影響春分和冬至的受光面積表現，在於太陽能樹側面投影的側視視角(圖 17、18)



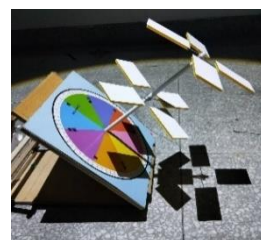
[圖 15]樹俯視視角



[圖 16]太陽直射圖



[圖 17] 樹側視視角



[圖 18]太陽斜射圖

(五) 檢視「影響夏至太陽能樹的受光面積表現，在於太陽能樹上方投影俯視視角」推論：

1. 從研究一得知夏至七種樹型平均受光面積百分比大小依序為：叢生>3/8 互生>輪生>2/5 互生>對生>1/3 互生>1/2 互生 (表 7)。

2. 檢視七種樹型俯視視角圖分析：

(1) 叢生、3/8 互生、輪生：為夏至樹型平均受光面積前三名(表 7)，由俯視視角圖(圖 19~21)發現此三種樹型因為葉片排列方式錯開分散，俯視視角的總葉片面積明顯較其他樹型大，所以在太陽光直射為主的夏至可以獲得較佳的受光面積。

(2) 2/5 互生及對生：夏至樹型平均受光面積表現普通(表 7)，從俯視視角圖發現 2/5 互生樹葉片集中於葉 1~5 (圖 22)；對生樹葉片集中於葉 1~4 (圖 23)，葉片不夠分散，導致於夏至受光面積表現普通。

(3) 1/2 互生及 1/3 互生：夏至樹型平均受光面積表現最差的兩種樹型(表 7)，由俯視視角圖發現 1/3 互生樹集中於葉 1~3 (圖 24)；1/2 互生樹葉片集中於葉 1、2 (圖 25)，造成此兩種樹型由上方投影俯視視角的總葉片面積明顯較其他樹型減少許多，導致於夏至受光面積表現最差。



[圖 19] 叢生樹俯視



[圖 20] 3/8 互生樹俯視



[圖 21]輪生樹俯視



[圖 22] 2/5 互生樹俯視



[圖 23] 對生樹俯視



[圖 24] 1/3 互生樹俯視



[圖 25] 1/2 互生樹俯視



(六) 季節受光面積平均百分比依序為冬至(88.1%)>春分(84.7%)>夏至(76.8%)，推測形成原因：

- 夏至太陽以高仰角直射為主，所以下方葉片容易受到上方葉片遮陰影響，導致夏至整體受光面積比例降低。
- 冬至太陽以低仰角斜射為主，下方葉片反而較少受到上方葉片遮陰影響，能從斜射的太陽獲得光照，進而提高了整體受光面積表現。

## 二、七種樹型葉片立體空間排列結構於不同季節的受光面積表現

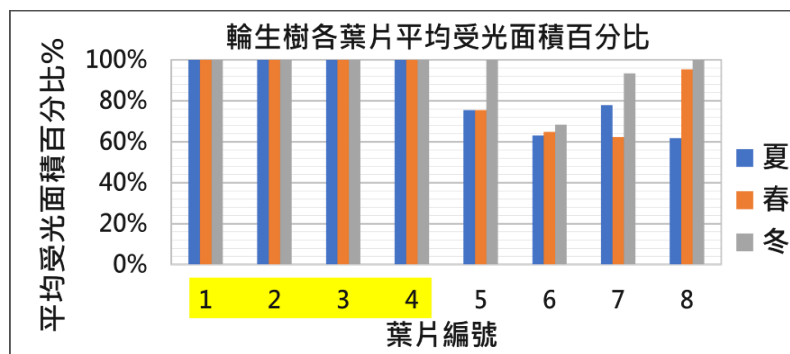
根據討論一結論：『影響夏至太陽能樹的受光面積表現在於太陽能樹上方投影俯視視角的葉片排列分散程度；影響春分和冬至受光面積表現在於太陽能樹側面投影側視視角的葉片排列分散程度』，進一步進行七種樹型結構分析。

我們將各樹型八片葉子(樹葉排列由上到下編號為 1~8)於不同季節的受光面積分別列出(附錄二)，並將一棵樹的八片葉片根據受光面積比例分為光照層及陰暗層，定義如下：

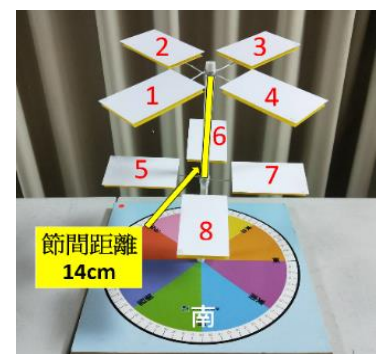
- **光照層**：葉片在三個季節受光面積百分比皆大於 90%，代表太陽無論直射或斜射皆能獲取相對較大光照量。
- **陰暗層**：葉片在三個季節受光面積百分比至少有一個季節小於 90%，代表陰暗層葉片會被上方葉片遮擋形成不同程度的陰影。

### (一) 太陽直射及斜射有相對穩定且佳的受光面積樹型－輪生樹

1. 依實驗一~三結果得知：輪生樹三個季節受光面積排序都在前三名，整體受光面積表現佳；季節平均受光面積百分比介於 84.8%至 95.2%之間(表 7~9)。
2. 葉片立體空間排列結構分析(圖 26、27)：



[圖 26] 輪生樹各葉片平均受光面積百分比長條圖

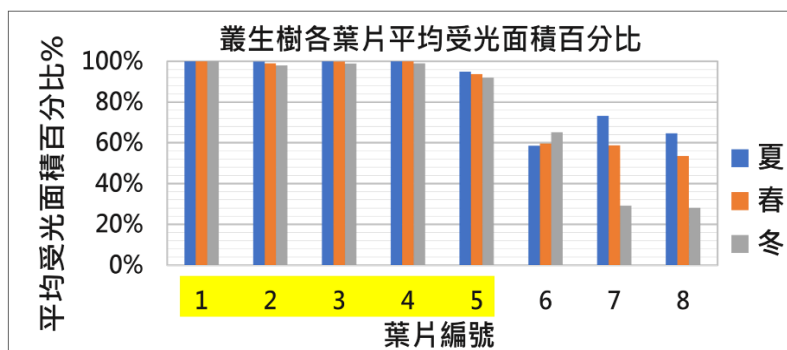


[圖 27] 輪生樹側視圖

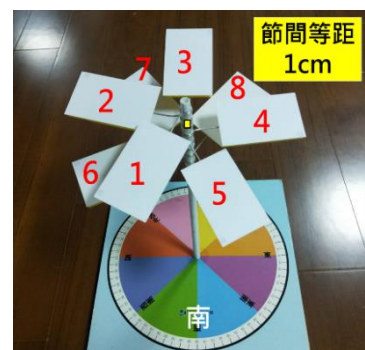
- (1) **光照層**：葉 1~4 共四片，平均受光面積百分比皆達 100%(圖 26)。
- (2) **陰暗層**：葉 5~8，受光面積百分比皆在 60%以上，部分達 100%，表示陰暗層受光面積仍有相當程度不錯的表現(圖 26)。
- (3) **立體結構分析**：俯視視角葉片分散排列(圖 21)以及陰暗層和光照層間隔距離較遠(圖 27)，降低陰暗層的遮陰效果，因此有效提升了整體表現。
- (4) **結論**：輪生樹葉片的立體結構排列能適應不同角度的太陽仰角，以得到整年度相對穩定且佳的受光面積表現。

## (二) 太陽直射有較佳的受光面積樹型－叢生樹

1. 依實驗一~三結果得知：叢生樹受光面積季節表現極端，夏至排序第一，春分和冬至排序倒數；季節平均受光面積百分比介於 76.3%~86.4%之間(表 7~9)。
2. 葉片立體空間排列結構分析(圖 28、29)：



[圖 28] 叢生樹各葉片平均受光面積百分比長條圖

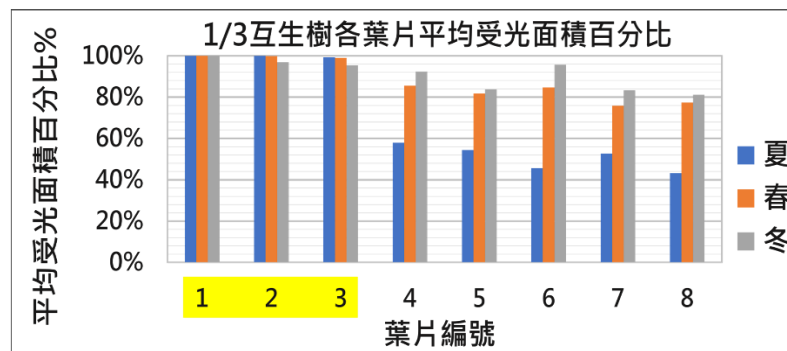


[圖 29] 叢生樹側視圖

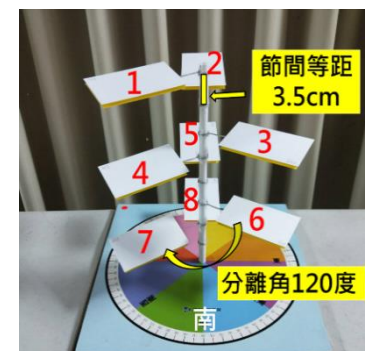
- (1) 光照層：葉 1~5，共五片(圖 28)。
- (2) 陰暗層：葉 6~8，多數受光面積百分比低，嚴重影響整體受光面積表現(圖 28)。
- (3) 立體結構分析：光照層有 5 片葉片有效提升受光面積；但陰暗層與光照層之間的間隔距離很短，導致低角度斜射的光線無法提升陰暗層的受光面積(圖 29)。
- (4) 結論：叢生樹適合太陽高仰角直射的低緯度地區，較不適合太陽低仰角斜射的高緯度地區。台灣太陽仰角季節差異大，因此叢生樹的季節受光面積有較極端的表現。

## (三) 太陽斜射有較佳的受光面積樹型－1/3 互生樹

1. 依實驗一~三結果得知：1/3 互生樹受光面積季節表現極端，春分和冬至排序第二，夏至排序倒數；季節平均受光面積百分比介於 69.1%~91.1%之間(表 7~9)。
2. 葉片立體空間排列結構分析(圖 30、31)：



[圖 30] 1/3 互生樹各葉片平均受光面積百分比長條圖

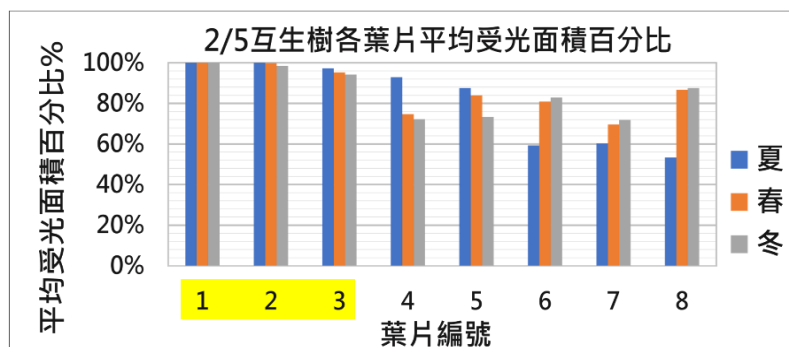


[圖 31] 1/3 互生樹側視圖

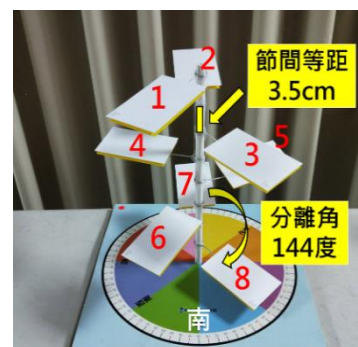
- (1) 光照層：葉 1~3，共三片(圖 30)。
- (2) 陰暗層：葉 4~8。陰暗層夏至受光面積表現差；春分和冬至受光面積較佳(圖 30)。
- (3) 立體結構分析：由俯視圖發現葉片集中於三個區域(圖 24)；由側視圖發現陰暗層葉片在排列上反而有分散效果(圖 31)。
- (4) 結論：1/3 互生樹較適合太陽以斜射為主的地區，較不適合太陽以高角度直射為主地區。台灣太陽仰角季節差異大，因此不同季節的受光面積有較極端的表現。

#### (四) 受光面積表現普通的樹型—2/5 互生樹

1. 依實驗一~三結果得知：2/5 互生樹受光面積夏至及春分表現普通，冬至排序倒數；季節平均受光面積百分比介於 81.4%~85.1%之間(表 7~9)。
2. 葉片立體空間排列結構分析(圖 32、33)：



[圖 32] 2/5 互生樹各葉片平均受光面積百分比長條圖

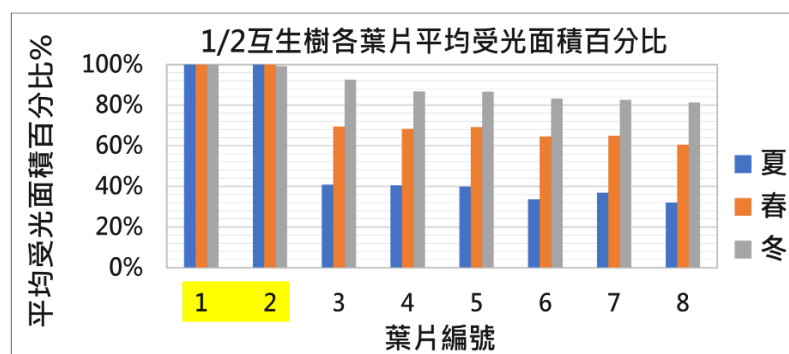


[圖 33] 2/5 互生樹側視圖

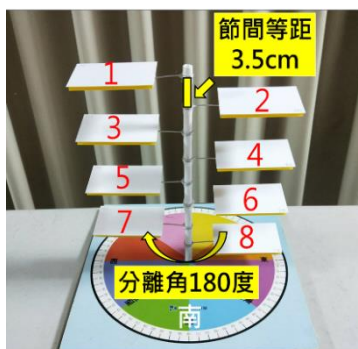
- (1) 光照層：葉 1~3，共三片(圖 32)。
- (2) 陰暗層：葉 4~8，夏至陰暗層受光面積表現較差，顯示太陽高仰角直射對於陰暗層受光面積有較大的影響(圖 32)。
- (3) 立體結構分析：2/5 互生樹從俯視圖可見葉片集中葉 1~5 區域不夠分散(圖 22)；從側視圖發現葉片之間常有互相遮陰情形，葉片分散程度不足(圖 33)，導致整體表現普通。
- (4) 結論：2/5 互生樹為整年度受光面積表現普通樹型。

#### (五) 受光面積表現不佳的樹型—1/2 互生樹

1. 依實驗一~三結果得知：1/2 互生樹受光面積夏至及春分排序倒數，冬至表現普通；季節平均受光面積百分比介於 53.0%~89.0%之間(表 7~9)。
2. 葉片立體空間排列結構分析(圖 34、35)：



[圖 34] 1/2 互生樹各葉片平均受光面積百分比長條圖

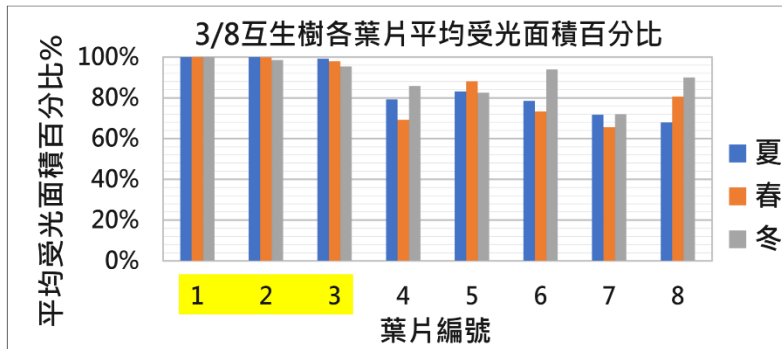


[圖 35] 1/2 互生樹側視圖

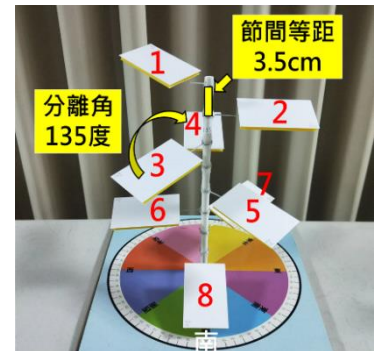
- (1) 光照層：葉 1~2，光照層僅有 2 片(圖 34)。
- (2) 陰暗層：葉 3~8，陰暗層整體受光面積表現不佳(圖 34)。
- (3) 立體結構分析：從俯視圖(圖 25)發現所有葉片集中於葉 1、2 兩個區域，造成受光面積表現不佳；從側視圖看(圖 35)，葉片排列線性集中，造成擺放方位對於受光面積影響很大，且也導致斜射光線無法有效提升陰暗層受光面積。
- (4) 結論：1/2 互生樹為整年度受光面積表現較差的樹型。

(六) 夏至及冬至受光面積表現佳的樹型－3/8 互生樹：

1. 依實驗一~三結果得知：3/8 互生樹受光面積夏至及冬至表現佳，春分略低於平均；季節平均受光面積百分比介於 84.3%~89.7%之間(表 7~9)。
2. 葉片立體空間排列結構分析(圖 36、37)：



[圖 36] 3/8 互生樹各葉片平均受光面積百分比長條圖

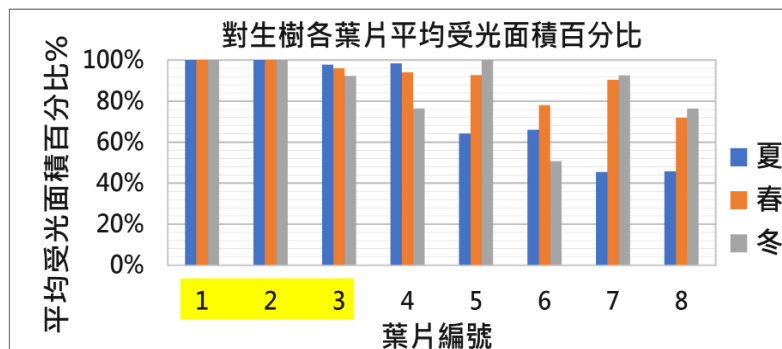


[圖 37] 3/8 互生樹側視圖

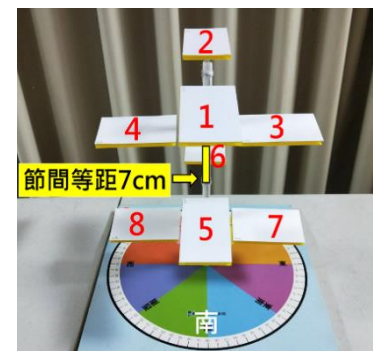
- (1) 光照層：葉 1~3，光照層共 3 片(圖 36)。
- (2) 陰暗層：葉 4~8，陰暗層葉片受光面積有相對不錯的表現(圖 36)。
- (3) 立體結構分析：無論是俯視視角 (圖 20) 或是側視視角 (圖 37)，都趨向分散排列，代表 3/8 互生樹能適應不同太陽仰角，以得到整年度相對較穩定的受光面積。
- (4) 結論：3/8 互生樹在太陽仰角季節差異大的台灣，會有較穩定的受光面積表現。

(七) 春分受光面積表現佳的樹型－對生樹：

1. 依實驗一~三結果得知：對生樹受光面積春分表現突出，但夏、冬季節表現普通；季節平均受光面積百分比介於 77.2%~90.4%之間(表 7~9)。
2. 葉片立體空間排列結構分析(圖 38、39)：



[圖 38] 對生樹各葉片平均受光面積百分比長條圖



[圖 39] 對生樹側視圖

- (1) 光照層：葉 1~3，光照層共 3 片(圖 38)。
- (2) 陰暗層：葉 4~8，夏至陰暗層受光面積差，顯示太陽直射不利受光面積表現(圖 38)。
- (3) 立體結構分析：對生樹俯視圖所有葉片集中於葉 1~4 四個區域(圖 23)，導致夏至陰暗層受光面積表現不佳；從側視圖發現因節間距離較長(圖 39)，在太陽高仰角斜射下有較佳的受光面積表現。
- (4) 結論：雖然對生樹受光面積在春分表現佳，但在夏至及冬至差，整體而言對生樹不適合太陽仰角差異大的台灣。

### 三、找出於不同季節受光面積表現穩定且佳的太陽能樹型

依實驗一~三結果得知三個季節並沒有一致且最佳受光面積樹型(表 7~9)，考量各季節的太陽日照量不同，因此各季節受光面積百分比無法直接進行加總求得平均值比較。

所以，我們以下列兩個條件進行篩選，尋找在三個季節受光面積表現較佳的樹型：

- (一) 以季節平均值為篩選條件：輪生樹是唯一三個季節受光面積皆高於季節平均值的樹型。
- (二) 以各季節樹型平均受光面積百分比前三名的樹型為篩選條件：發現輪生樹也是唯一一個在三個季節受光面積排序皆在前三名的樹型。
- (三) 綜合以上，我們認為輪生樹為全年度葉片受光面積表現最佳的樹型。

### 四、從 PVEducation 網站取得日照量資料模擬發電量，找出發電效能最佳樹型為輪生樹。

- (一) 從 PVEducation 網站取得台北(北緯 25 度)太陽日照量資料進行模擬，此模擬數值並沒有考慮雲層覆蓋等影響，日照量資料見表 12。

[表 12] 北緯 25 度太陽日照量

季節	太陽日照量 (kW/m <sup>2</sup> )		
	10 時	12 時	14 時
夏至	1.012	1.042	1.012
春分	0.9773	1.016	0.9773
冬至	0.8741	0.9291	0.8741

- (二) 一棵太陽能樹八片葉片總面積為  $9\text{cm} \times 5.4\text{cm} \times 8 = 0.03888 \text{ m}^2$ ，再依各樹型受光面積百分比計算各樹型於夏至、春分及冬至的 10 時、12 時及 14 時的實際受光面積。
- (三) 除了七種樹型，另以平鋪式太陽能板為對照組。平鋪式太陽能板為太陽能樹的八片葉子平鋪地面，太陽能板之間無遮陰情形，受光面積為 100%。
- (四) 根據下列公式可得各季節時間點的發電量：

$$\text{發電量(kW)} = \text{太陽日照量(kW/m}^2\text{)} * \text{太陽能樹受光面積(m}^2\text{)}$$

- (五) 七種樹型及對照組平鋪式太陽能板於夏至、春分及冬至的 10 時、12 時及 14 時發電量見表 13。

[表13] 七種太陽能樹型及平鋪式太陽能板於不同季節的發電量

樹型	光照實驗	發電量(KW)									各樹型平均發電量(KW)
		夏至			春分			冬至			
		10時	12時	14時	10時	12時	14時	10時	12時	14時	
1/2互生	第一株	0.0278	0.0108	0.0320	0.0332	0.0174	0.0338	0.0325	0.0198	0.0329	0.0267
	第二株	0.0190	0.0107	0.0177	0.0307	0.0274	0.0307	0.0340	0.0361	0.0340	0.0267
	第三株	0.0293	0.0103	0.0308	0.0322	0.0190	0.0332	0.0321	0.0221	0.0334	0.0269
	平均	0.0254	0.0106	0.0268	0.0320	0.0213	0.0326	0.0329	0.0260	0.0334	<b>0.0268</b>
	標準差	0.56%	0.03%	0.79%	0.13%	0.54%	0.16%	0.10%	0.88%	0.05%	<b>0.01%</b>
1/3互生	第一株	0.0334	0.0164	0.0342	0.0330	0.0314	0.0350	0.0295	0.0360	0.0295	0.0309
	第二株	0.0333	0.0157	0.0332	0.0360	0.0331	0.0348	0.0298	0.0338	0.0299	0.0311
	第三株	0.0317	0.0157	0.0310	0.0341	0.0331	0.0344	0.0309	0.0356	0.0299	0.0307
	第四株	0.0331	0.0174	0.0333	0.0340	0.0319	0.0354	0.0294	0.0340	0.0315	0.0311
	平均	0.0329	0.0163	0.0329	0.0343	0.0324	0.0349	0.0299	0.0348	0.0302	<b>0.0310</b>
標準差	0.08%	0.08%	0.13%	0.13%	0.09%	0.04%	0.07%	0.11%	0.09%	<b>0.02%</b>	
2/5互生	第一株	0.0367	0.0262	0.0342	0.0312	0.0359	0.0328	0.0294	0.0297	0.0278	0.0315
	第二株	0.0369	0.0257	0.0343	0.0339	0.0348	0.0304	0.0292	0.0292	0.0306	0.0317
	第三株	0.0352	0.0264	0.0338	0.0333	0.0368	0.0301	0.0299	0.0306	0.0294	0.0317
	第四株	0.0347	0.0270	0.0363	0.0316	0.0364	0.0322	0.0273	0.0301	0.0307	0.0318
	平均	0.0359	0.0263	0.0346	0.0325	0.0360	0.0314	0.0289	0.0299	0.0296	<b>0.0317</b>
標準差	0.11%	0.05%	0.11%	0.13%	0.09%	0.13%	0.11%	0.06%	0.14%	<b>0.01%</b>	
3/8互生	第一株	0.0337	0.0371	0.0304	0.0320	0.0321	0.0315	0.0303	0.0288	0.0290	0.0317
	第二株	0.0336	0.0369	0.0309	0.0330	0.0294	0.0308	0.0314	0.0330	0.0301	0.0321
	第三株	0.0330	0.0373	0.0318	0.0332	0.0337	0.0321	0.0302	0.0312	0.0311	0.0326
	第四株	0.0337	0.0373	0.0306	0.0329	0.0344	0.0320	0.0302	0.0332	0.0318	0.0329
	第五株	0.0338	0.0373	0.0297	0.0340	0.0328	0.0324	0.0311	0.0316	0.0316	0.0327
	第六株	0.0305	0.0372	0.0335	0.0313	0.0331	0.0335	0.0315	0.0336	0.0306	0.0328
	平均	0.0330	0.0372	0.0311	0.0327	0.0326	0.0320	0.0308	0.0319	0.0307	<b>0.0325</b>
標準差	0.13%	0.01%	0.13%	0.09%	0.17%	0.09%	0.06%	0.18%	0.10%	<b>0.05%</b>	
叢生	第一株	0.0312	0.0353	0.0350	0.0294	0.0341	0.0326	0.0257	0.0280	0.0259	0.0308
	第二株	0.0342	0.0362	0.0341	0.0303	0.0338	0.0318	0.0250	0.0277	0.0265	0.0311
	平均	0.0327	0.0357	0.0345	0.0298	0.0340	0.0322	0.0253	0.0279	0.0262	<b>0.0309</b>
	標準差	0.21%	0.06%	0.06%	0.06%	0.02%	0.05%	0.05%	0.02%	0.04%	<b>0.02%</b>
對生	第一株	0.0361	0.0213	0.0363	0.0341	0.0362	0.0335	0.0284	0.0322	0.0280	0.0318
	第二株	0.0342	0.0210	0.0346	0.0351	0.0344	0.0356	0.0296	0.0298	0.0311	0.0317
	平均	0.0352	0.0212	0.0355	0.0346	0.0353	0.0346	0.0290	0.0310	0.0296	<b>0.0318</b>
	標準差	0.13%	0.02%	0.12%	0.07%	0.13%	0.15%	0.09%	0.17%	0.21%	<b>0.01%</b>
輪生	第一株	0.0328	0.0371	0.0330	0.0331	0.0325	0.0339	0.0325	0.0350	0.0328	0.0336
	第二株	0.0309	0.0371	0.0313	0.0350	0.0314	0.0354	0.0317	0.0345	0.0316	0.0332
	平均	0.0319	0.0371	0.0322	0.0340	0.0320	0.0346	0.0321	0.0348	0.0322	<b>0.0334</b>
	標準差	0.14%	0.01%	0.11%	0.13%	0.08%	0.11%	0.06%	0.04%	0.09%	<b>0.03%</b>
平鋪式		0.0393	0.0405	0.0393	0.0380	0.0395	0.0380	0.0340	0.0361	0.0340	<b>0.0376</b>

註:平鋪式太陽能板為太陽能樹的八片葉子平鋪地面,太陽能板之間無遮陰情形,受光面積為100%

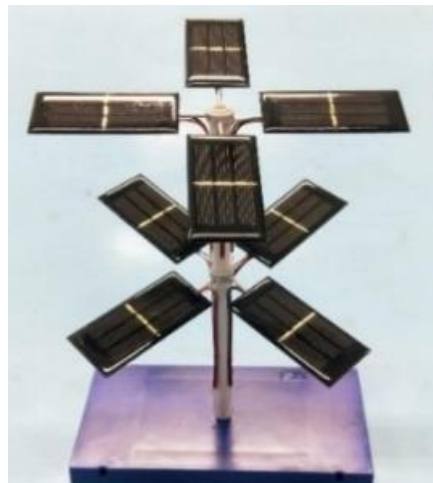
(六) 結論：

1. 根據表 13 整理各樹型平均發電量大小排序見表 14，表 14 中以平鋪式太陽能板發電量為對照組(以平鋪式太陽能板發電量 100%為基準)，計算各樹型發電量損失百分比。

[表14] 七種太陽能樹型及平鋪式太陽能板平均發電量大小排序				
排序	樹型	平均發電量(KW)	發電量比例(%)	發電量損失(%)
對照組	平鋪式	0.0376	100.00%	0.00%
1	輪生	0.0334	88.82%	11.18%
2	3/8互生	0.0325	86.21%	13.79%
3	對生	0.0318	84.36%	15.64%
4	2/5互生	0.0317	84.15%	15.85%
5	1/3互生	0.0310	82.22%	17.78%
6	叢生	0.0309	82.18%	17.82%
7	1/2互生	0.0268	71.14%	28.86%

註:平鋪式太陽能板為太陽能樹的八片葉子平鋪地面，太陽能板之間無遮陰情形，受光面積為100%

2. 七種樹型中發電效能最佳樹型為輪生樹(圖 40)。
3. 輪生樹因太陽能板立體空間排列造成的發電量損失為 11.18%。



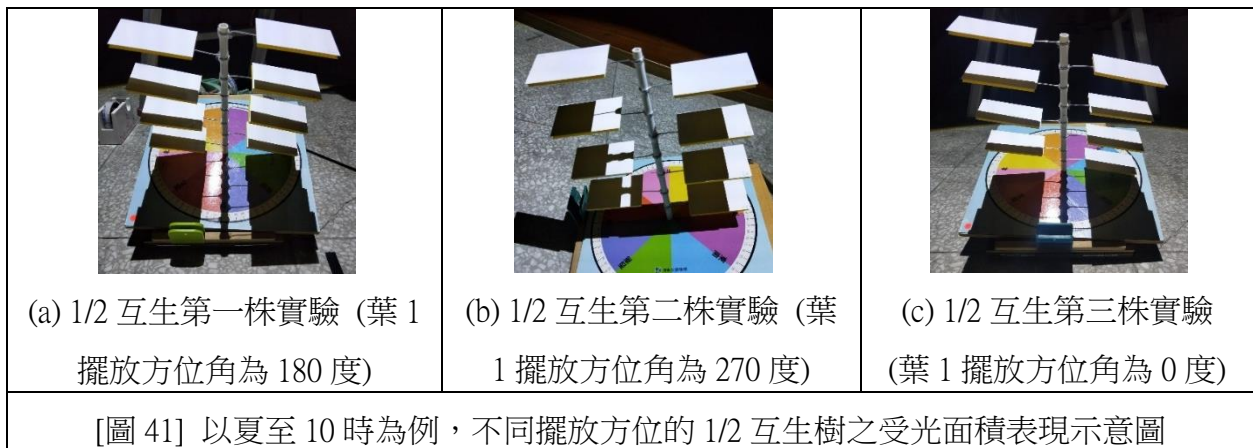
[圖 40] 輪生太陽能仿生樹

## 五、同樹型但擺放方位不同之受光面積及發電效能差異分析

(一) 根據表 13 七種樹型於不同季節的**發電量結果**發現：七種樹型平均發電量標準差介於 0.01%~0.05%，顯示同樹型的發電量較不會因為擺放方位不同而產生差異。

(二) 對照表 7~9 七種樹型於不同季節的**受光面積結果**發現：

1. 『1/2 互生樹』受光面積表現受不同擺放方位差異影響較顯著(圖 41)，根據表 7~9 影響較顯著的時間點在夏至 10 時及 14 時、春分 12 時、冬至 12 時(標準差介於 14.2%~24.5%)。
2. 其他六種樹型(1/3 互生、2/5 互生、3/8 互生、叢生、對生及輪生)受光面積表現在各季節時間點受擺放方位不同影響相對較小。



(三) 結論：



1. 雖然『1/2 互生樹』受光面積表現在部分時間點受擺放方位差異影響較顯著，但經過發電量轉換成總發電量後，『1/2 互生樹』**年度發電量受擺放方位影響小**；而其他六種樹型無論在受光面積百分比及年度發電量來看，樹型受不同擺放方位影響小。
2. **選擇種植太陽能樹時，要優先考慮樹型本身葉片排列形式的發電效能**(1/2 互生、1/3 互生、2/5 互生、3/8 互生、叢生、對生或輪生)，而同樹型中的各不同擺放方位對發電效能影響較小。

## 六、太陽能板立體空間排列可增加土地利用多樣性及經濟效益

台灣地狹人稠，發展太陽能源同時，如何增加土地利用效益更是重要課題，而太陽能樹能夠提供土地複合式利用，增加土地利用效能。

(一) 我們實際探勘學校太陽能板設置，了解太陽能板設置形式及優缺點如下：



<p>地點/ 利用形式</p>	 <p>[圖 42] 平鋪式~平鋪於頂樓平面</p>	 <p>[圖 43] 棚架型~架設五樓走廊空地</p>
<p>附加優點</p>	<p>具遮陰效果，降低頂樓教室的室內溫度</p>	<p>取代原本的透明遮雨棚，具有兼顧雨遮實用性的太陽能板</p>
<p>缺點</p>	<p>原本種植於頂樓的植物需移除；平鋪地面也減少了頂樓的避難空間</p>	<p>導致原本光線明亮、視線清楚的走廊空地變得很昏暗，需增加照明設備</p>

1. 一般**平鋪式太陽能板**(圖 42)，雖然發電量相較太陽能樹效能高(表 14)，但土地僅用於太陽能發電使用，**土地利用效益低**。
  2. 若將其架高為棚架型太陽能板(圖 43)，太陽能板下方空間多了利用效益，但空間變得昏暗需增加照明設備，而陰暗的空間對於作物種植也有影響，所以，**若要種植咖啡、香莢蘭…等經濟作物，太陽能板之間需要存在透光空間，也直接增加土地使用面積**。
- (二) 太陽能樹下方能夠種植半日照等較多樣性的經濟作物，以提高土地利用經濟效益。
1. 太陽能樹仿生植物，自然界植物葉片排列方式就存在一定的透光度，讓下方葉片也能獲得一定程度的光合作用效能，甚至樹下方土地也能取得部分光照。
  2. 相較密集排列的棚架型太陽能板(圖 43)，**太陽能樹下方較能夠種植半日照等較多樣性的經濟作物，以提高土地利用經濟效益**，例如：「香料之后~香莢蘭」，國際價格最高每公斤達 600 元美元(游昇俯，2022)，而香莢蘭為半日照植物，不能直曬陽光，因此太陽能樹下土地成為可能適合的種植空間。
  3. **雖然因太陽能板立體空間排列造成的發電量損失，但樹下種植經濟作物提高土地利用整體價值**。
- (三) 本研究七種太陽能樹型提供不同遮光率以符合日照需求不同的植物。
1. 近年來推動農電共生，發現太陽能板遮蔽率普遍過高，導致植物產量減少(蔡佳珊，2020)；而在漁電共生方面，遮光率高對池塘的水溫、藻類濃度等有影響，進而影響文蛤生長(周昱翰等，2017)。
  2. 而植物都需要進行光合作用，不同植物對於日照量需求不同，**像大豆的需光性在 90% 以上**(蔡佳珊，2020)；釋迦、玉米、空心菜..等在**透光率 60%**的條件下生長狀況良好(胡華勝，2022)；**香莢蘭透光率 30%**(游昇俯，2022)。
  3. 而我們的**七種太陽能樹型各自有不同的受光面積，也代表著有不同的遮光率，不同的太陽能樹型底下適合種植不同日照需求的植物**，例如：遮光率低的 1/2 互生樹型的太

陽能樹底下，就可以種植日照需求高的植物或經濟作物；遮光率較高的輪生樹型太陽能樹底下，就可以種植日照需求較低的植物或經濟作物。

4. 但植物生長除了考量遮光率，還有光線分布均勻程度等因素，未來需要經過實際生產調查評估才能有更準確的結果。

#### (四) 都市土地利用多樣性

除了農用地的土地利用多樣性，我們也關注在都市中的土地利用多樣性，舉例如下：

1. 公園步道的太陽能路燈，多為 1~2 片太陽能板型式，若能發展太陽能樹，增加單位體積的太陽能板數量，在下方步道仍維持原有功能前提下，還可增加發電效能。
2. 部分行道樹若能改種太陽能樹，除了增加發電效能外。還可發展不同裝置藝術造型的太陽能樹，以達到都市美化的效果。
3. 將現有公園涼亭、公車候車亭..等設施，上方改種植太陽能樹，就能兼顧發電及土地利用多樣性。

- (五) 結論：太陽能板化身成太陽能樹，雖然需犧牲部分發電量，但也提供了更多樣化的土地利用效能，甚至增加了土地經濟效益。本研究向樹學習，希望能提供一個方向，解決發展太陽能源與人類及自然資源競爭土地利用的問題。

### 七、以樹為師~探究輪生樹在自然界的表現

- (一) 綜合結果發現：輪生樹為全年度葉片受光面積及發電效能最佳樹型，但在自然界中輪生葉序所佔植物比例卻是少數；受光面積表現最差的 1/2 互生葉序所佔植物比例反而較高(陳柏宇，2009)。
- (二) 探究原因：
  1. 植物為了適應不同環境發展多樣的競爭策略，以受光面積表現差的 1/2 互生樹來說，策略為以數量取勝，發展多樣的競爭策略以求得物種生命的延續；而受光面積表現佳的輪生樹，就不需發展以量取勝的生存策略。
  2. 舉例來說，一棵輪生樹所需使用的土地面積，1/2 互生樹在適當排列或者發展不同的競爭策略下(例如纏繞莖)，同樣土地面積可供不只一棵 1/2 互生樹使用，所以在相同單位土地面積下要擁有相同的受光面積表現，1/2 互生樹勢必需要以量取勝，才能達到與輪生樹具有相同受光面積表現。因此，1/2 互生樹運用增加數量的競爭策略，可提升其競爭能力，但相對的就需較多葉片以接受光源。
- (三) 本研究希望為太陽光電與人類及自然之間土地利用衝突問題尋找解決方向，加上考量太陽能板設置經濟及環保面向，希望能找到使用最少的太陽能板，並在單位體積上獲得發電效能最佳樹型。因此，以輪生樹型進行太陽能樹仿生樹型，能有效解決目前的問題。

## 陸、結論

- 一、影響夏至太陽能樹的受光面積表現在於太陽能樹上方投影俯視視角的葉片排列分散程度；影響春分和冬至受光面積表現在於太陽能樹側面投影側視視角的葉片排列分散程度。
- 二、季節平均受光面積排序為冬至(88.1%)>春分(84.7%)>夏至(76.8%)。夏至太陽高仰角直射，所以陰暗層葉片容易受到遮陰影響降低整體受光面積；冬至太陽低仰角斜射，陰暗層葉片反而能從斜射的太陽獲得光照。
- 三、七種樹型葉片立體空間排列結構分析：
  - (一) 太陽直射及斜射有相對穩定且佳的受光面積樹型：輪生樹
  - (二) 太陽直射有較佳的受光面積樹型：叢生樹
  - (三) 太陽斜射有較佳的受光面積樹型：1/3 互生樹
  - (四) 受光面積表現普通的樹型：2/5 互生樹
  - (五) 受光面積表現不佳的樹型：1/2 互生樹
  - (六) 夏至及冬至受光面積表現佳的樹型：3/8 互生樹
  - (七) 春分受光面積表現佳的樹型：對生樹
- 四、輪生樹為全年度葉片受光面積及發電效能最佳樹型。
- 五、選擇種植太陽能樹時，要優先考慮樹型本身葉片排列形式的發電效能，而同樹型中的各不同擺放方位對發電效能影響較小。
- 六、讓太陽能板化身成太陽能樹，雖然需犧牲部分發電量，但也提供了更多樣化的土地利用效能，甚至增加了經濟效益。
- 七、自然界植物為了適應不同環境發展多樣的競爭策略，以輪生樹作為仿生樹型，能在單位體積上獲得最佳受光面積表現及發電效能，本研究向樹學習，希望能為太陽光電與人類及自然之間土地利用衝突問題尋找解決方向。
- 八、未來研究方向繼續以樹為師：植物之間競爭陽光的方式，除了以葉序排列方式之外，還可用葉片大小、形狀、複葉型態等；另外，也可從莖的變化，例如纏繞莖可藉由攀附在其他樹種上，藉由向上攀爬以獲得更多陽光。未來，希望能繼續以樹為師，找到更佳發電效能的太陽能仿生樹。
- 九、本研究關注在太陽能板於不同季節的受光面積表現，並以太陽日照量理論數值進行太陽能樹發電量比較。但影響太陽能板發電效能，還有日照時間、溫度...等，未來可將相關條件加入進行進一步研究，以求得更準確的結果。

## 柒、參考文獻資料

中央氣象局。臺灣各地四季太陽仰角與方位角。

<https://www.cwb.gov.tw/Data/astronomy/season.pdf>

王紹宇、何正鳳 (2022 年 9 月 3 日)。只能久久吃一次了台南阿堂鹹粥 9 個月漲 2 次一碗從 180 漲價到 260 元業者:主要是反映成本,有錢都買不到虱目魚。三立 LIVE 新聞。

<https://www.youtube.com/watch?v=qmFB8Ubi590>

呂國禎 (2020 年 6 月 17 日)。砍樹種綠電。天下雜誌網路文章。<https://web.cw.com.tw/climate-2020/deforestation/>

周昱翰、何雲達、葉信利 (2017)。文蛤池結合太陽能光電之新養殖模式研發。行政院農委會水產試驗所。[https://www.fhri.gov.tw/News\\_Content.aspx?n=4049&s=225869](https://www.fhri.gov.tw/News_Content.aspx?n=4049&s=225869)

胡華勝 (2022 年 5 月 21 日)。太陽能板下雞蛋香? 這模式不僅「來電」還解決農地痛點。ESG 遠見網路文章。<https://esg.gvm.com.tw/article/5339>

陳柏宇 (2009)。臺灣常見被子植物葉序之研究。國立中興大學生命科學院。

陳弈霖、李聞碩、洪千雅 (2019)。真的是 23.5 度嗎? —以天文及氣象資料探討固定型太陽能板最佳架設傾斜角。第 59 屆全國中小學科展說明書(國中組地球科學科)。

孫意涵、謝佳岑、閔子庭、楊宇翔 (2016)。真的全自動-全球免設定日光追蹤系統!。第 56 屆全國中小學科展說明書(國小組生活與應用科學科)。

黃晉揚、黃正葆、蔡明貴 (2017)。含「晴」脈脈 ~葉片排列與受光面積對太陽能板效率之研究。第 57 屆全國中小學科展說明書(國中組生物科)。

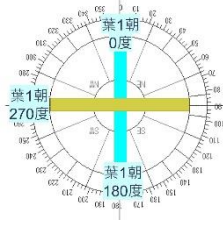

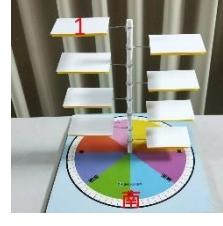

游昇俯 (2022 年 01 月 13 日)。光電板下種香莢蘭 3 年 屏東林仔邊協會去年底迎接首度收成。農傳媒網路文章。<https://www.agriharvest.tw/archives/73970>

蔡佳珊 (2020 年 7 月 23 日)。農電共生可行嗎? 前車之鑒不可不慎。上下游網路文章。<https://www.newsmarket.com.tw/solar-invasion/ch07/>



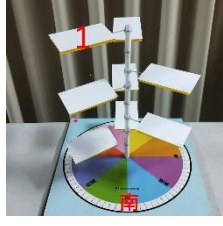

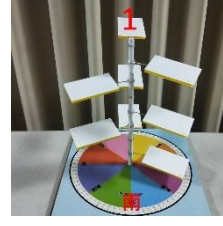
PVEducation。Calculation of Solar Insolation。<https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/calculation-of-solar-insolation>

附錄一 七種樹型依俯視圖幾何對稱特性選用 2~6 種擺放方位進行該樹型重複實驗


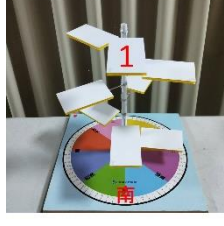

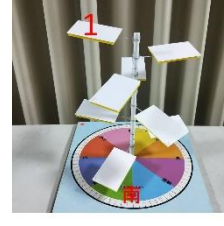
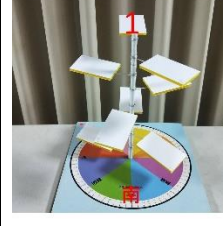
一、1/2 互生樹的三種不同擺放方位示意圖

 <p>依俯視幾何特性 選用擺放方位角</p>	 <p>(a)第一株：葉 1 朝方位角 180 度</p>	 <p>(b)第二株：葉 1 朝方位角 270 度</p>	 <p>(c)第三株：葉 1 朝方位角 0 度</p>
--	--	--	---

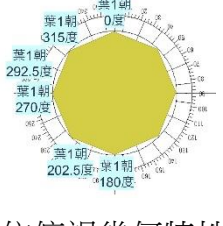
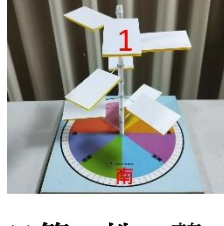
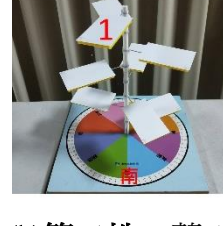
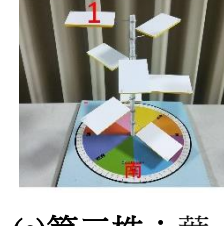
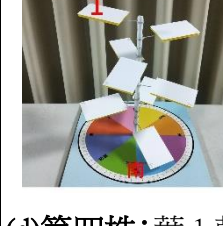
二、1/3 互生樹的四種不同擺放方位示意圖

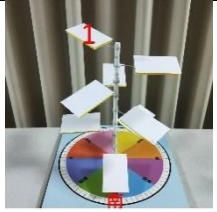
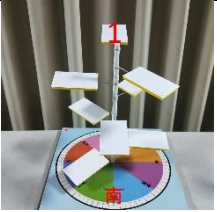
 <p>依俯視幾何特性 選用擺放方位角</p>	 <p>(a)第一株：葉 1 朝方位角 180 度</p>	 <p>(b)第二株：葉 1 朝方位角 240 度</p>	 <p>(c)第三株：葉 1 朝方位角 300 度</p>	 <p>(d)第四株：葉 1 朝方位角 0 度</p>
---	---	---	--	---



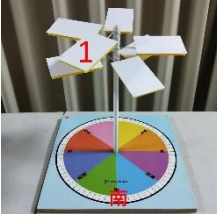
三、2/5 互生樹的四種不同擺放方位示意圖

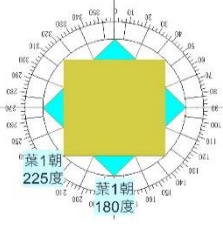


 <p>依俯視幾何特性 選用擺放方位角</p>	 <p>(a)第一株：葉 1 朝方位角 180 度</p>	 <p>(b)第二株：葉 1 朝方位角 216 度</p>	 <p>(c)第三株：葉 1 朝方位角 288 度</p>	 <p>(d)第四株：葉 1 朝方位角 0 度</p>
--	--	--	---	--

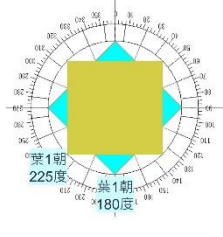

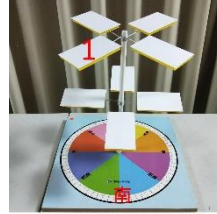
四、3/8 互生樹的六種不同擺放方位示意圖

 <p>依俯視幾何特性 選用擺放方位角</p>	 <p>(a)第一株：葉 1 朝方位角 180 度</p>	 <p>(b)第二株：葉 1 朝方位角 202.5 度</p>	 <p>(c)第三株：葉 1 朝方位角 270 度</p>	 <p>(d)第四株：葉 1 朝 方位角 292.5 度</p>
--	--	--	---	---

	 <p>(e)第五株：葉 1 朝方位角 315 度</p>	 <p>(f)第六株：葉 1 朝 方位角 0 度</p>		
--	--	---	--	--

<b>五、叢生樹的兩種擺放方位示意圖</b>				
 <p>依叢生樹特性選 用擺放方位角</p>	 <p>(a)第一株：葉 1 朝方位角 180 度</p>	 <p>(b)第二株：葉 1 朝方位角 216 度</p>	<p>註：叢生樹葉序定義為節間距離短，因此並無固定的俯視幾何特性。考量本實驗叢生樹俯視排列，接近五邊型，故除了以葉 1 朝向方位角 180 度為基礎外，再以朝向方位角 216 度進行實驗。</p>	

<b>六、對生樹的兩種擺放方位示意圖</b>				
 <p>依俯視幾何特性 選用擺放方位角</p>	 <p>(a)第一株：葉 1 朝方位角 180 度</p>	 <p>(b)第二株：葉 1 朝方位角 225 度</p>	<p>註：對生樹具幾何對稱特性，葉 1 朝向方位角 180 度和葉 1 朝向方位角 0 度擺放一樣，因此，僅再以朝向方位角 225 度進行實驗。</p>	

<b>七、輪生樹的兩種擺放方位示意圖</b>				
 <p>依俯視幾何特性 選用擺放方位角</p>	 <p>(a)第一株：葉 1 方位角 180 度</p>	 <p>(b)第二株：葉 1 方位角 225 度</p>	<p>註：輪生樹具幾何對稱特性，葉 1 朝向方位角 180 度和葉 1 朝向方位角 0 度擺放一樣，因此，僅再以朝向方位角 225 度進行實驗。</p>	

附錄二 各樹型的八片葉片於不同季節受光面積百分比

樹型	季節	8片葉片之受光面積百分比(樹葉排列由上到下編號為1~8)								平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1/2互生	夏	100.0%	100.0%	40.8%	40.5%	39.9%	33.6%	36.9%	32.0%	53.0%
	春	100.0%	100.0%	69.5%	68.4%	69.2%	64.6%	64.9%	60.5%	74.6%
	冬	100.0%	99.2%	92.5%	86.7%	86.7%	83.2%	82.6%	81.3%	89.0%
1/3互生	夏	100.0%	100.0%	99.4%	57.9%	54.4%	45.6%	52.7%	43.1%	69.1%
	春	100.0%	99.9%	99.0%	85.5%	81.7%	84.7%	75.9%	77.4%	88.0%
	冬	100.0%	96.8%	95.3%	92.5%	83.7%	95.7%	83.3%	81.2%	91.1%
2/5互生	夏	100.0%	100.0%	97.3%	92.9%	87.6%	59.4%	60.3%	53.4%	81.4%
	春	100.0%	99.9%	95.2%	74.7%	84.0%	80.9%	69.5%	86.7%	86.4%
	冬	100.0%	98.4%	94.2%	72.2%	73.3%	82.9%	71.8%	87.6%	85.1%
3/8互生	夏	100.0%	100.0%	99.2%	79.2%	83.1%	78.4%	71.7%	67.9%	84.9%
	春	100.0%	99.9%	97.9%	69.2%	88.1%	73.3%	65.6%	80.5%	84.3%
	冬	100.0%	98.5%	95.4%	85.8%	82.5%	93.9%	71.9%	90.0%	89.7%
叢生	夏	100.0%	99.9%	99.9%	100.0%	95.0%	58.5%	73.3%	64.7%	86.4%
	春	100.0%	99.0%	99.9%	100.0%	93.8%	59.6%	58.8%	53.5%	83.1%
	冬	100.0%	97.9%	98.8%	99.0%	92.0%	65.2%	29.3%	28.1%	76.3%
對生	夏	100.0%	100.0%	97.8%	98.4%	64.3%	66.1%	45.5%	45.8%	77.2%
	春	100.0%	100.0%	96.2%	94.1%	92.7%	78.1%	90.4%	71.9%	90.4%
	冬	100.0%	100.0%	92.3%	76.6%	100.0%	50.8%	92.6%	76.4%	86.1%
輪生	夏	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	75.5%	63.0%	77.9%	61.8%	84.8%
	春	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	75.4%	64.8%	62.3%	95.4%	87.2%
	冬	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	68.3%	93.4%	100.0%	95.2%

註：黃色塗滿為各樹型的光照層

## 【評語】 082817

植物的葉子已經通過數百萬年的自然選擇，發展出了高效利用太陽能的方式，此出發點具有創意與價值。此作品實驗照光面積，得出各緯度最佳的排列方式，具科學精神。此裝置的優勢可用農地漁塭使用，增加土地使用效益，創新想法值得鼓勵。建議考量後續維修的難易程度做討論。實驗中僅探討照光面積，但太陽能板大平面模式發電效益與切成小葉片的發電效益應有不同，建議考慮實際發光效益做討論。



# 作品海報

# 以樹為師～

探究兼顧發電效能及土地利用多樣性

的太陽能板立體空間排列型式



## 摘要

- 1.發展太陽能源是世界趨勢，但**地狹人稠的台灣**存在太陽光電與人類自然之間的**土地利用衝突問題**。
- 2.本研究讓太陽能板由平鋪式改為立體空間排列化身**太陽能樹**，樹上方具有發電功能，樹下空間可供利用。
- 3.太陽能板上下堆疊勢必影響受光面積及發電效能，本研究**仿生七種植物葉片排列**，模擬太陽仰角與方位角進行光照實驗，再以日照量理論值計算各樹型發電量，最後找出**輪生樹型**為受光面積及發電效能最佳樹型。
- 4.計算一年的發電效益及經濟作物效益發現：**輪生型太陽能板總經濟效益可達平鋪式太陽能板的 2 倍**。

## 壹、研究動機及目的

### 一、研究動機

幫助**地狹人稠的台灣**，尋找**兼顧太陽能發電效能及土地利用多樣性**的光電方向，以解決**土地利用衝突問題**。

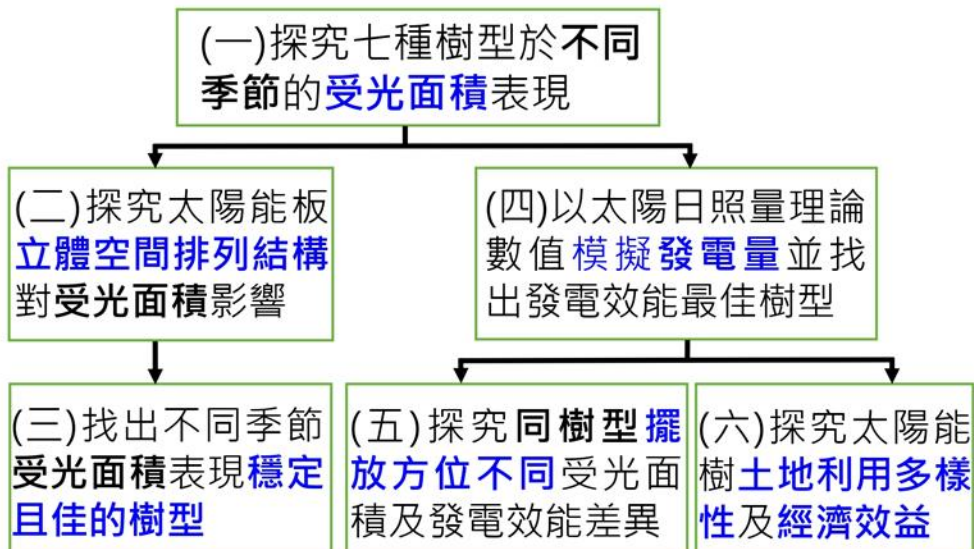


[圖 1] 平鋪式太陽能板示意圖



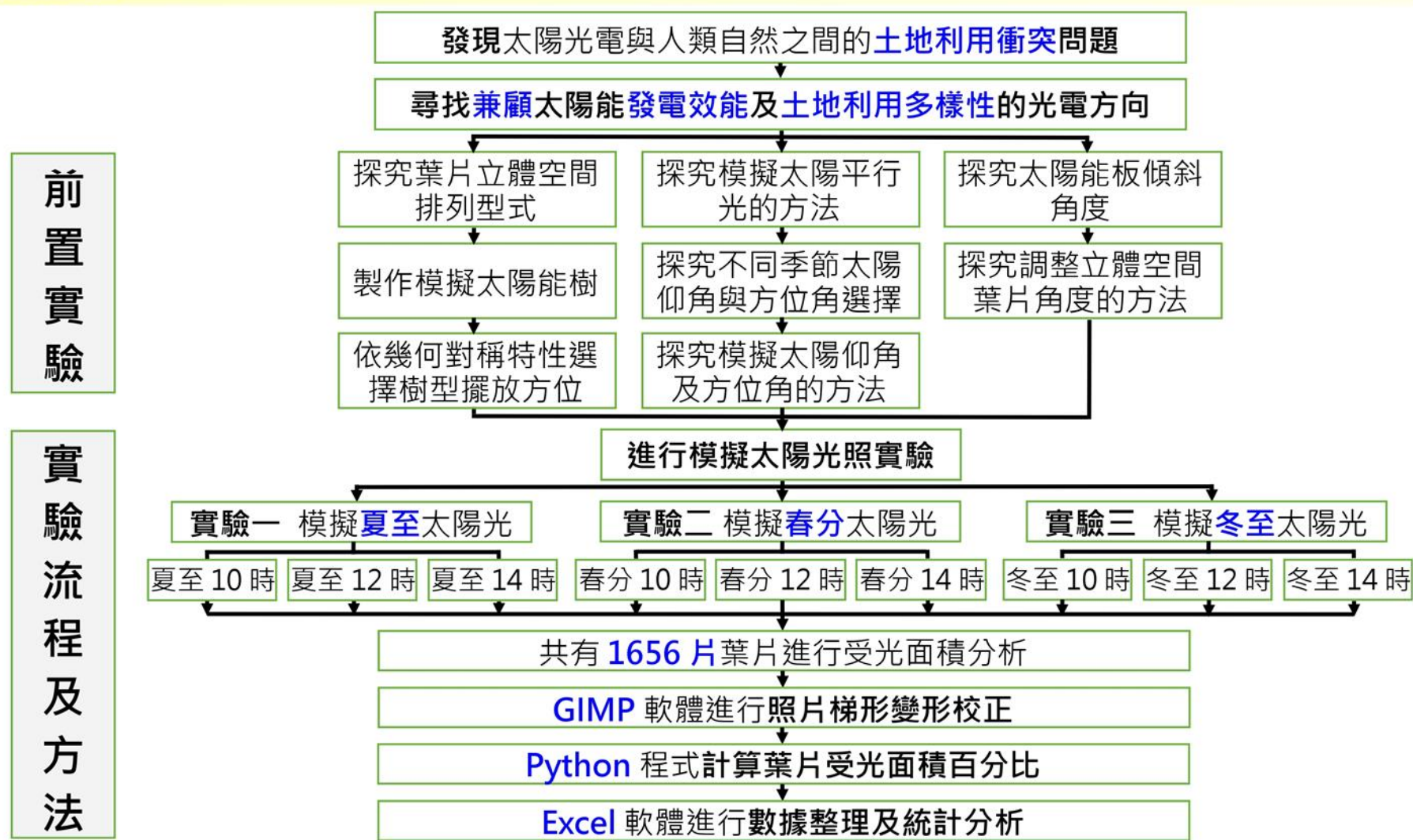
[圖 2] 太陽能樹下種植作物示意圖

### 二、研究目的



## 貳、研究過程與方法

### 一、研究架構圖



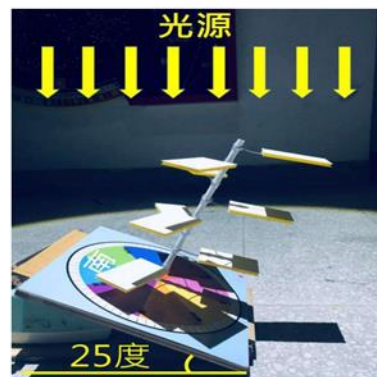
### 二、實驗裝置設計說明



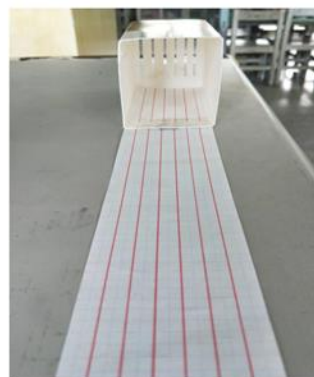
[圖 3] 太陽能模擬樹：**控制**各樹型樹寬、高、葉片數量大小等**變因**。



[圖 4] 立體 15 度角調整器**減少**量測誤差。



[圖 5] 仰角方位角調整器同時模擬太陽仰角及方位角。



[圖 6] 以平行線條當**平行光**的視覺衡量標準。



[圖 7] 距離光源 180 公分可達**模擬平行光**效果。

### 三、發電量計算說明

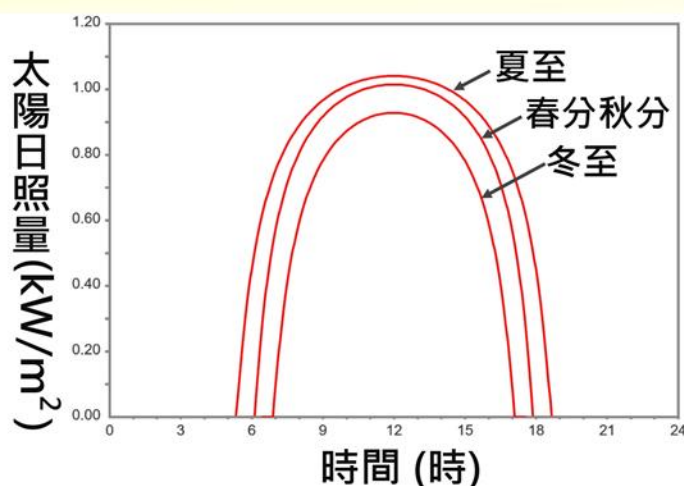
(一) **太陽仰角與方位角選擇**：選擇臺北的夏至、春分及冬至日照量較佳時段 10 時、12 時及 14 時太陽仰角方位角進行模擬(圖 8)。

(二) **PVEducation 網站**取得日照量資料，計算太陽能樹模擬發電量。

- 1.一棵太陽能樹的八片葉片總面積為  $9\text{cm} \times 5.4\text{cm} \times 8 = 0.03888 \text{ m}^2$ ，再依據光照實驗得到受光面積百分比計算各樹型實際受光面積。

2.公式換算各時間點發電量：

$$\text{發電量 (kW)} = \text{太陽日照量 (kW/m}^2\text{)} \times \text{太陽能樹實際受光面積 (m}^2\text{)}$$



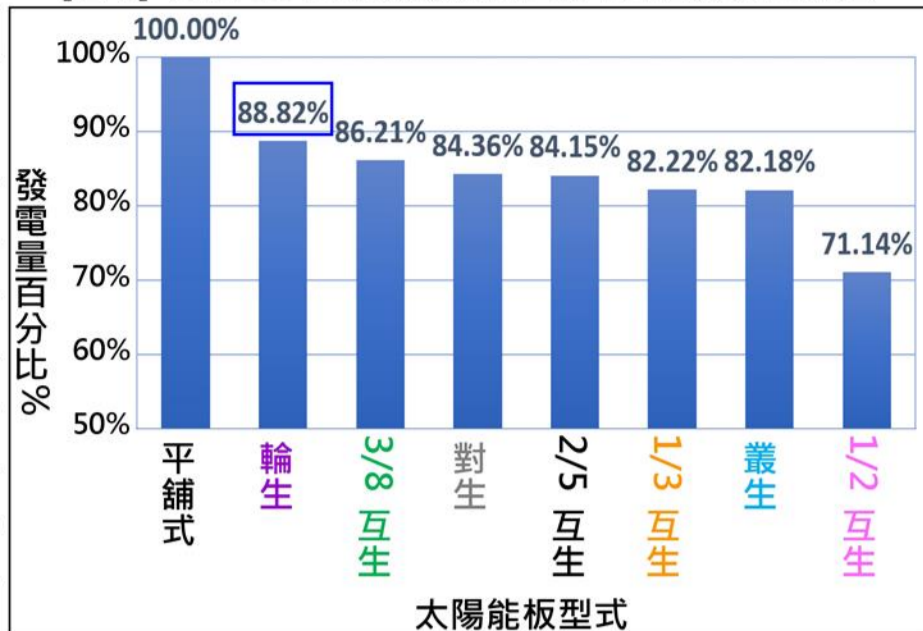
[圖 8] 臺北所在地北緯 25 度太陽日照量曲線圖

# 參、研究結果

[表 1] 七種樹型不同季節受光面積百分比排序整理

夏至			春分			冬至		
排序	樹型	樹型平均受光面積%	排序	樹型	樹型平均受光面積%	排序	樹型	樹型平均受光面積%
1	叢生	86.4%	1	對生	90.4%	1	輪生	95.2%
2	3/8互生	84.9%	2	1/3互生	88.0%	2	1/3互生	91.1%
3	輪生	84.8%	3	輪生	87.2%	3	3/8互生	89.7%
4	2/5互生	81.4%	4	2/5互生	86.4%	4	1/2互生	89.0%
5	對生	77.2%	5	3/8互生	84.3%	5	對生	86.1%
6	1/3互生	69.1%	6	叢生	83.1%	6	2/5互生	85.1%
7	1/2互生	53.0%	7	1/2互生	74.6%	7	叢生	76.3%
季節平均		76.7%	季節平均		84.9%	季節平均		87.5%
標準差		12.04%	標準差		5.12%	標準差		5.96%

[圖 9] 北緯 25 度各太陽能樹型發電量百分比長條圖

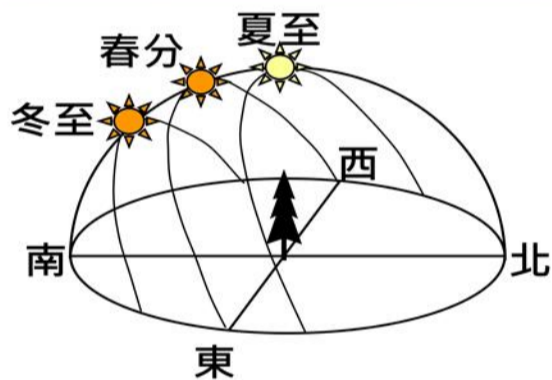


◆ 以平鋪式太陽能發電量 100% 為基準比較發電量百分比

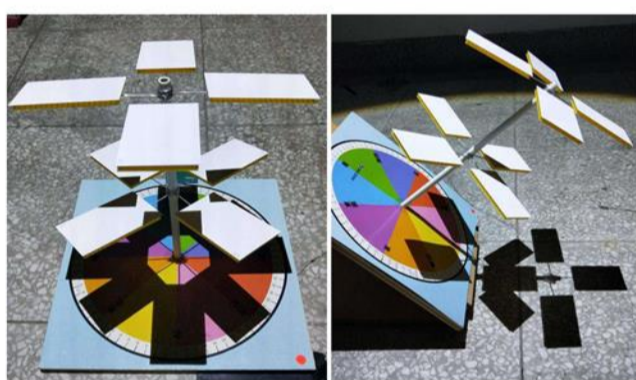
## 肆、討論



[圖 10a] 叢生俯視圖 [圖 10b] 3/8 互生俯視圖 [圖 10c] 輪生俯視圖 [圖 10d] 2/5 互生俯視圖 [圖 10e] 對生俯視圖



[圖 11] 四季太陽軌跡圖



[圖 12] 太陽直射圖 [圖 13] 太陽斜射圖



[圖 10f] 1/3 互生俯視圖 [圖 10g] 1/2 互生俯視圖

### 一、太陽能樹在不同季節平均受光面積的比較與發現

(一) 綜合統計及太陽軌跡圖推論：影響太陽能樹夏至受光面積為樹上方投影俯視視角；影響春分和冬至受光面積為側視視角

驗證：實驗一夏至受光面積排序結果(表 1)和七種樹型俯視圖葉片總面積排序(圖 10a~g)吻合。

(二) 季節平均受光面積大小依序冬至>春分>夏至：夏至太陽直射下方葉片受遮陰影響；冬至太陽斜射下方葉片能獲得光照。

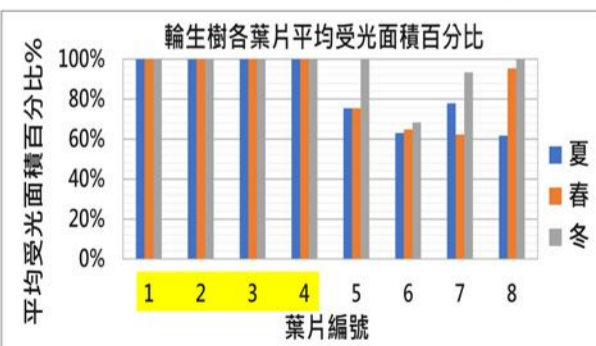
### 二、葉片立體空間排列結構於不同季節的受光面積表現

◆ 光照層：三個季節葉片受光面積百分比皆>90%。 ◆ 陰暗層：三個季節葉片受光面積百分比至少一個季節<90%。

#### (一) 太陽直射及斜射相對穩定且佳的受光面積樹型~輪生樹型



[圖 14] 輪生樹側視圖

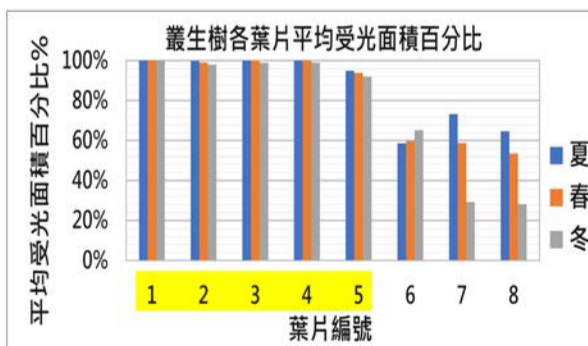


[圖 15] 輪生樹葉片受光面積百分比

#### (二) 太陽直射有較佳的受光面積樹型~叢生樹型



[圖 16] 叢生樹側視圖

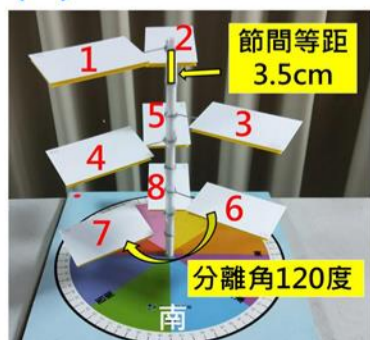


[圖 17] 叢生樹葉片受光面積百分比

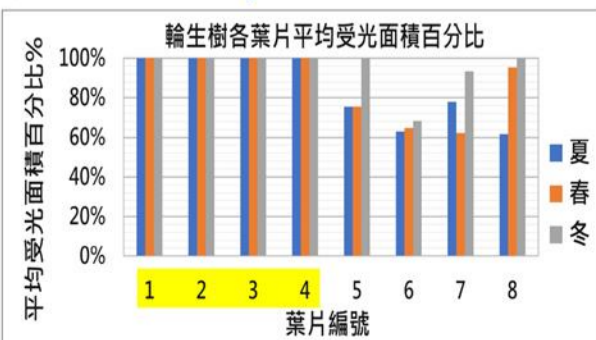
◆ 俯視及側視視角葉片分散。節間長，陰暗層能有效獲得光照。

◆ 光照層 5 片。節間短，斜射光線無法提升陰暗層受光面積。

#### (三) 太陽斜射有較佳的受光面積樹型~1/3互生樹型

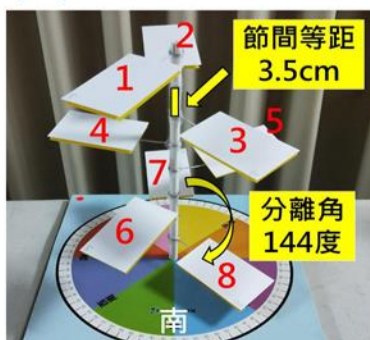


[圖 18] 1/3 互生樹側視

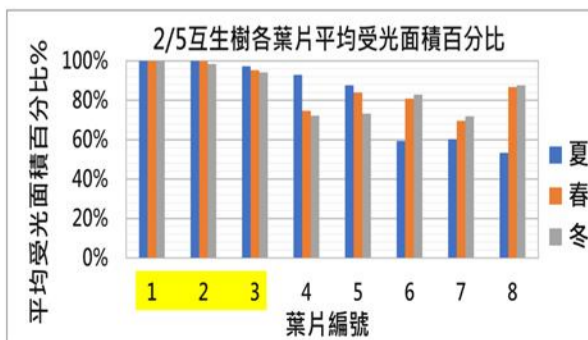


[圖 19] 1/3 互生葉片受光面積百分比

#### (四) 受光面積表現普通的樹型~2/5互生樹型



[圖 20] 2/5 互生樹側視

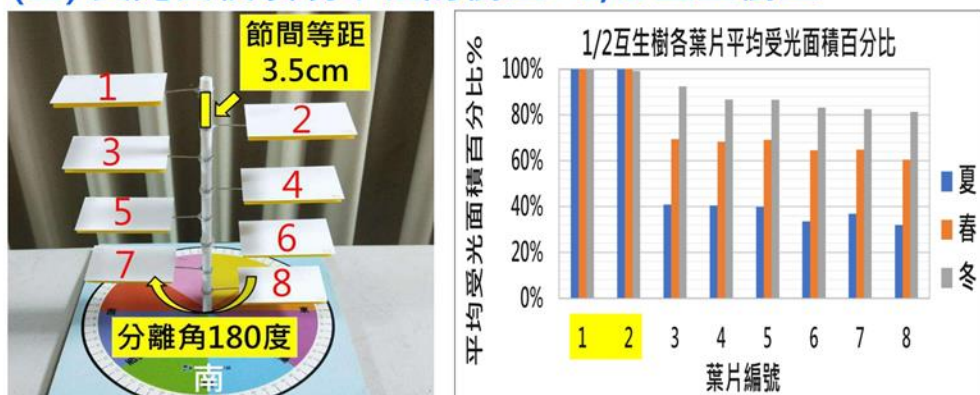


[圖 21] 2/5 互生葉片受光面積百分比

◆ 俯視葉片集中三個區域；側視可見陰暗層葉片分散排列。

◆ 從俯視及側視視角發現葉片分散程度不足導致受光不足。

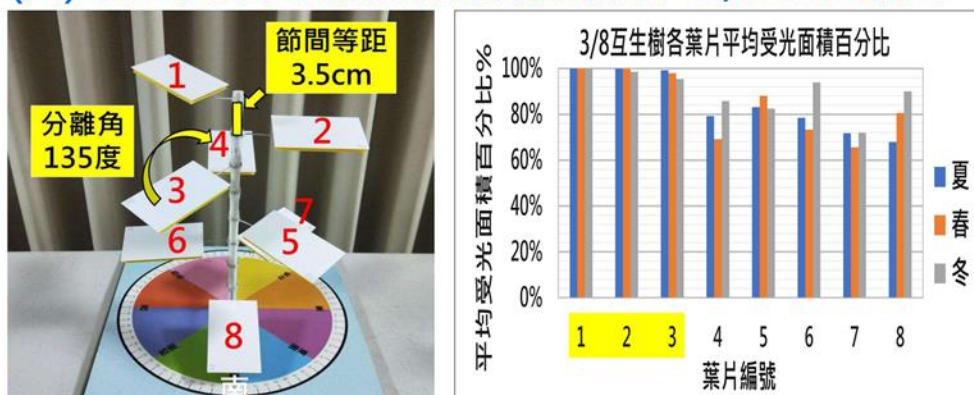
**(五) 受光面積表現不佳的樹型~1/2 互生樹型**



[圖 22]1/2 互生樹側視 [圖 23]1/2 互生受光面積百分比

◆俯視葉片集中，側視排列也線性集中，導致受光差。

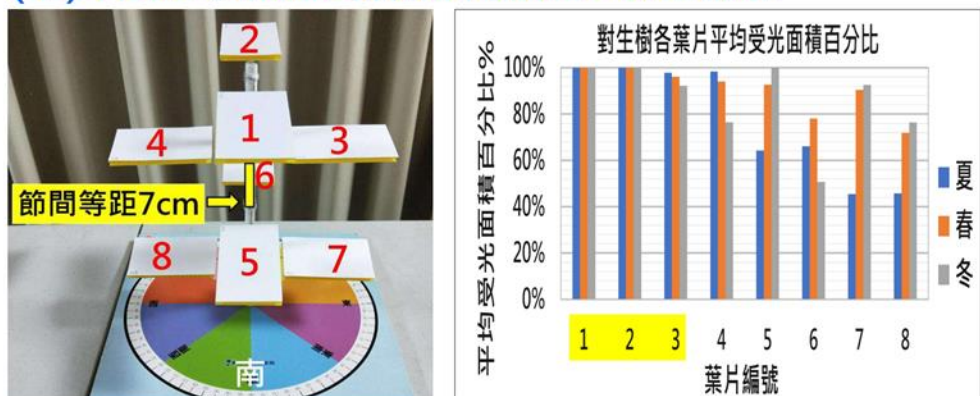
**(六) 夏至及冬至受光面積表現佳的樹~3/8 互生樹型**



[圖 24]3/8 互生樹側視 [圖 25]3/8 互生受光面積百分比

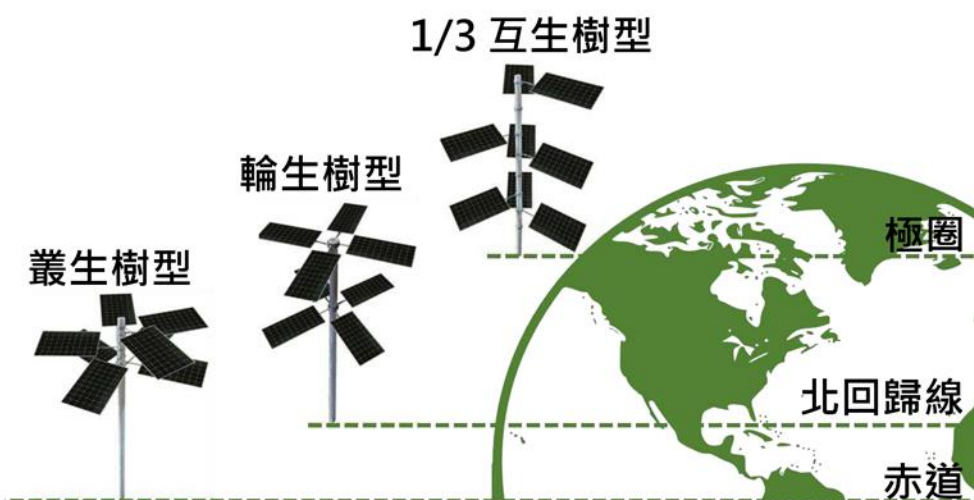
◆俯視及側視葉片分散排列，能適應不同太陽仰角。

**(七) 春分受光面積表現佳的樹型~對生樹型**



[圖 26] 對生樹側視圖 [圖 27]對生樹受光面積百分比

◆俯視葉片集中四區。節間長，太陽斜射有較佳受光。



[圖 28]各緯度最佳受光面積表現太陽能樹型示意圖

**三、找出不同季節受光面積表現穩定且佳的樹型~輪生樹型**

◆三個季節並無一致最佳受光面積樹型，以季節平均值及各季節受光面積前三名篩選，僅輪生樹符合篩選標準

**四、以日照量資料模擬發電量找出發電效能最佳為輪生樹型**

◆以平鋪式太陽能發電量 100%為對照組基準，計算七種樹型發電量百分比(圖 9)。

◆七種樹型中以輪生樹型發電效能最佳，輪生樹型因太陽能板立體空間排列造成的發電量損失為 11.18%。

**五、同樹型但擺放方位不同之發電效能差異小**

◆選擇太陽能樹優先考慮樹型葉片排列形式的發電效能，而同樹型中的不同擺放方位對發電效能影響較小。

**六、太陽能板立體空間排列可增加土地利用多樣性及經濟效益**

[表 2] 平鋪式及輪生樹型太陽能板土地利用經濟效益之比較

	平鋪式	輪生樹下	損益百分比 (平鋪式為基準)
發電效益(元)	13138	11669	-11.18%
經濟作物效益(元)	0	14735	-
總經濟效益(元)	13138	26404	100.97%



[圖 29] 平鋪式太陽能土地利用效益低



[圖 30] 棚架型太陽能日照量低

(一)雖然太陽能板立體空間排列造成發電效益損失，但樹下種植經濟作物能提高總經濟效益(表 2)。

1.發電經濟效益：研究得知輪生型為平鋪太陽能發電量 88.82%(圖 9)，依此結果進行發電效益計算(表 2)。

◆訪談廠商得知八片平鋪式太陽能板總面積 14 平方公尺一年發電量共 2856 度。北部一度電 4.6 元。

2.經濟作物效益：平鋪式下方無法種植作物；輪生型以種植半日照植物香菸蘭為例計算一年總經濟效益。

◆依林等(2016)及游(2022)報導計算出香菸蘭一年產值 1080 元/m<sup>2</sup>。再以面積 14m<sup>2</sup>計算經濟效益(表 2)

3.輪生型太陽能板下方種植香菸蘭總經濟效益可達平鋪式太陽能板的 2 倍(表 2)。

(二)本研究七種樹型提供不同透光率以符合不同日照需求的植物。如 1/2 互生樹型下方種日照需求高的植物。

(三)提高都市土地利用多樣性：如 2 片式太陽能路燈改為樹型增加單位體積發電效能；裝置藝術美化都市等。

**七、以樹為師探究輪生樹在自然界的表現~向輪生樹學習能在單位體積上有效獲得最佳受光面積**

◆受光面積及發電效能最佳的輪生樹佔自然界植物比例最少；受光面積最差的 1/2 互生樹佔植物比例高。

◆植物為適應不同環境發展多樣的競爭策略:1/2 互生樹以數量取勝；受光面積佳的輪生樹則不需以量取勝。

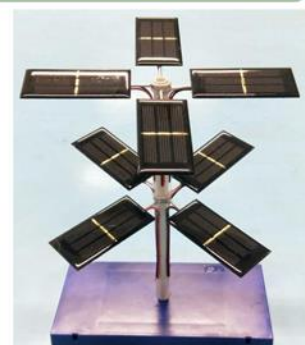
**伍、總結及未來研究方向**

一、平鋪式太陽能板化身成太陽能樹以解決地狹人稠的台灣土地利用衝突問題。但太陽能板上下堆疊形成陰影影響效能，本研究找出仿生輪生樹能有最佳受光面積及發電效能。

二、太陽能樹犧牲部分發電量，但能提供土地利用多樣性，樹下種植作物能增加經濟效益。

三、我們以樹為師研究出『輪生型太陽能仿生樹』能兼顧發電效能及土地利用多樣性。

四、未來研究：1.加入葉片大小與樹高的變化關係、多棵太陽能樹之間的擺放最佳距離等因素；2.繼續以樹為師加入葉片形狀、莖的型態等變因；3.加入日照時間、溫度等影響太陽能板發電效能等變因；4.以太陽能板進行日照實測。



[圖 31] 輪生型太陽能仿生樹

1. 黃智揚、黃正強、蔡明貴。2017。含「晴」脈脈-葉片排列與受光面積對太陽能板效率之研究。第 57 屆科展說明書。  
2. 孫意涵、謝佳孝、閔子庭、楊宇翔。2016。真的全自動-全球免設定日光追蹤系統！。第 56 屆科展說明書。  
3. 陳弈霖、李聞碩、洪千雅。2019。真的是 23.5 度嗎？-以天文及氣象資料探討固定型太陽能板最佳架設傾斜角。第 59 屆科展說明書。  
4. 陳柏宇。2009。臺灣常見被子植物葉序之研究。國立中興大學碩士論文。

5. 林鳳琪等人。2021.6.28。地方媽媽建電廠、香草小農創綠電、全民發電遍地開花！。ESG 遠見電子報。https://esg.gym.com.tw/article/2682  
6. 游昇俯。2022.1.13。光電板下種香菸蘭 3 年屏東林仔邊協會去年底迎獲首度收成。農傳媒網路文章。https://www.agriharvest.tw/archives/73970  
7. 中央氣象局。臺灣各地四季太陽仰角與方位角。https://www.cwb.gov.tw/Data/astronomy/season.pdf  
8. PVEducation。Calculation of Solar Insolation。https://www.pveducation.org/pvc/drom/properties-of-sunlight/calculation-of-solar-insolation