

**GREENPEACE** 綠色和平



**AgriWeather**  
阿龜微氣候

# 氣候變遷對台灣農業生產影響分析—文旦柚

---

委託單位：阿龜微氣候



## 氣候變遷對台灣農業生產影響分析—文旦柚

此研究結合 2000 年到 2019 年行政院農委會文旦柚生產資料、中央氣象局測站歷史氣象觀測值進行追蹤資料分析並建立全台各鄉鎮區文旦單位面積產量與天氣因子間固定型效應模式，分析中篩選出關鍵天氣因子共有 9 項，分別為：2、4、9、11 月日高溫、2、6、11 月日低溫、4、9 月降雨量。

將 TCCIP 所釋出 2021 年到 2060 年逐日氣象推估數值帶入前述模式中進行未來產量推估。推估結果，文旦柚單位面積產量將較歷史數據平均提升 25~35%、單位面積產量年變動率四分位距較歷史變動率擴大 10%。表示未來文旦柚整體生產效率提升外，每年產量變動擴大，不穩定性上升。9 項天氣因子中，推估產量與 6 月日低溫、11 月日低溫有較強關聯性，6 月日低溫為負相關，11 月日低溫則為正相關。

在氣候變遷不同情境下(rcp26、rcp60、rcp85)，rcp85 在 2023~2024 年整體推估產量趨勢達最高，但 2029~2032 年間大幅衰退，爾後雖有第二波上升但並未回升前期水準。後期則逐年下降，2040 年後推估產量為三情境中最低者；rcp26 則無明顯上升或下降，雖有小波動但推估產量趨勢仍維持在固定位置；rcp60 在 2040 年前推估產量長期趨勢維持在 rcp26 及 rcp85 之間，中間波動與 rcp85 類似但較為和緩，2040 年後趨勢也有出現下降，但仍高於 rcp26。

此研究透過固定型效應模式估算鄉鎮區個別效應，反映調查資料的地區差異性，提升天氣因子與單位面積產量關聯性。在氣候變遷情境下，推估氣候數值並未在鄉鎮區間具明顯差異，使推估結果中各鄉鎮區間產量變動方向一致。台灣整體文旦單位面積產量雖會提升，在市場中，產量增加並不代表生產者收入可以增加，若供過於求，則可能導致價格崩跌。再者，每年產量的不穩定性使執政者及生產者難以調節栽種面積，文旦柚為多年生果樹增加種植面積需要較長時間，無法每年隨之調整。目前台灣文旦柚消費市場集中於中秋節前，並沒有分散產期及特殊加工品誘因，將會是另一面對氣候變遷下文旦柚生產難以調適的不利因素。





## 目錄

壹.	目標作物環境因子生理文獻研究 .....	3
貳.	鄉鎮生產資料蒐集與分析 .....	5
參.	氣象資料蒐集與分析 .....	8
一.	研究方法 .....	8
二.	結果與討論 .....	9
1.	日高溫 .....	9
2.	日低溫 .....	12
3.	日夜溫差 .....	14
4.	月累積雨量 .....	16
肆.	追蹤資料分析及模型建立 .....	19
一.	研究方法 .....	19
二.	結果與討論 .....	20
三.	產量推估方法建立 .....	21
伍.	2021-2060 單位面積產量推估 .....	22
一.	方法 .....	22
二.	結果與討論 .....	23
陸.	總結 .....	27
柒.	附件 .....	28
捌.	參考文獻 .....	33



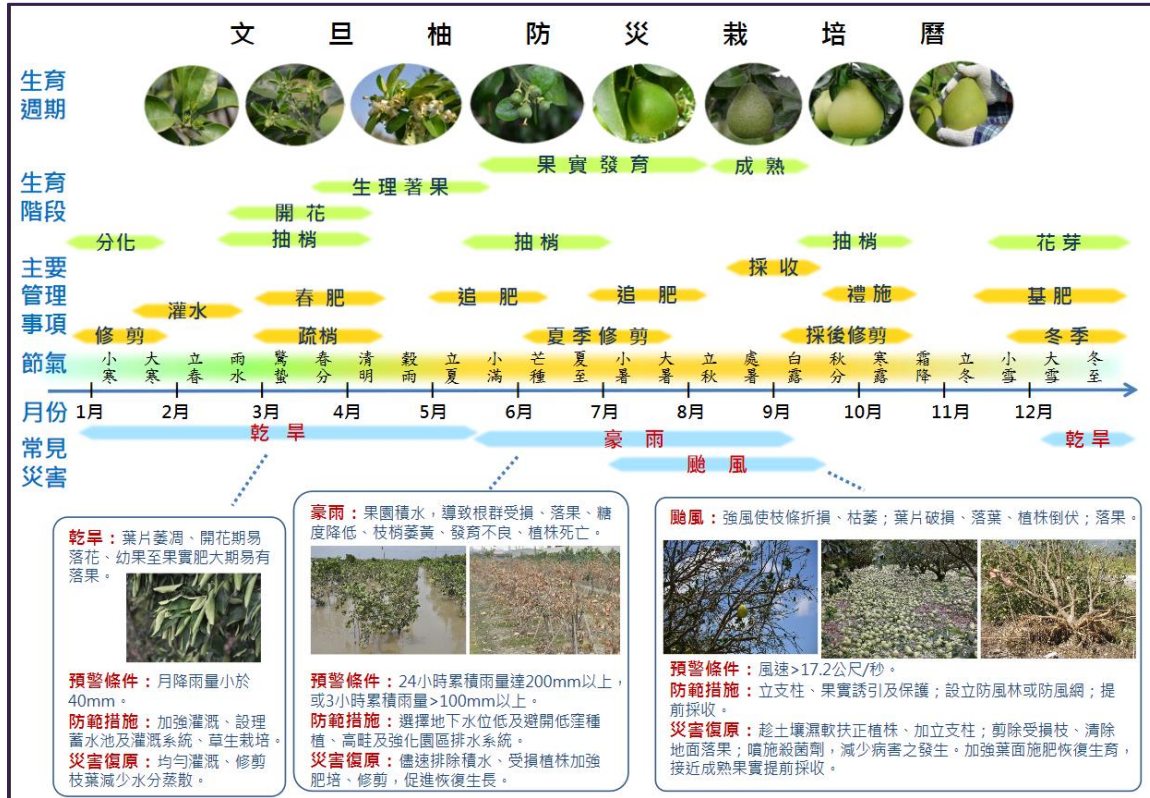


## 壹. 目標作物環境因子生理文獻研究

文旦屬亞熱帶柑橘樹中柚類家族一員，原產於馬來西亞及東印度群島一帶(陳溪潭, 2000)。台灣柚類栽培中面積最廣的為麻豆文旦，喜高溫、雨水及日照充足(陳溪潭, 1998)。台灣周年栽培，生產方式多為一年一穫且會搶在中秋節前採收，市場需求量大價格也最好。因此，多數農民在秋冬會抑制其抽梢、促進花芽分化，待春季後抽梢、3、4月開花後接著進入著果及果實肥大期。

- 高溫逆境：文旦適合生長溫度為 23~29°C。喜歡高溫環境，在台灣鮮少發生高溫逆境。
- 低溫逆境：文旦為亞熱帶果樹，耐寒性較差。然而，台灣文旦產區僅 2016 年初遭遇霸王級寒流時有較多新聞產出，其他並未過多文旦低溫逆境紀錄。通常熱帶、亞熱帶果樹低溫休眠多在 10~15°C 以下，若要造成樹體損害則需要到 5°C 以下或是 0°C 以下時霜害或凍害發生。
- 乾旱逆境：冬季休眠期間應維持 60 公分深土壤含水率 10~15%，過低會促使樹體落葉過多、影響春梢發育及花芽分化；春季枝梢生長及開花期間、果實肥大期土壤含水率則適宜維持在 15%，若過於乾旱建議灌溉維持土壤含水穩定(陳溪潭, 1998)。
- 雨量逆境：冬季乾旱後，若春季或夏季下雨或灌溉量大使土壤含水率大於 20%，則根系乾溼落差過大易造成落花落果；採收前一個月應停止灌溉，維持土壤含水率 10%，增加果實糖分累積(陳溪潭, 1998)。
- 光照逆境：台灣少有文獻針對文旦樹日照需求做試驗研究，多數栽培手冊僅建議利用修剪確保光照充足，但並未有具體日照強度數值。國外文獻提及其他品種的柚類果樹光飽和點落在 1026~1656  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、光補償點落在 16~46  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  (Ganjiu, 2003)。

# 氣候變遷對台灣農業生產影響分析—文旦柚



圖表 1 文旦柚防災栽培曆(農作物災害預警平台, 2021)



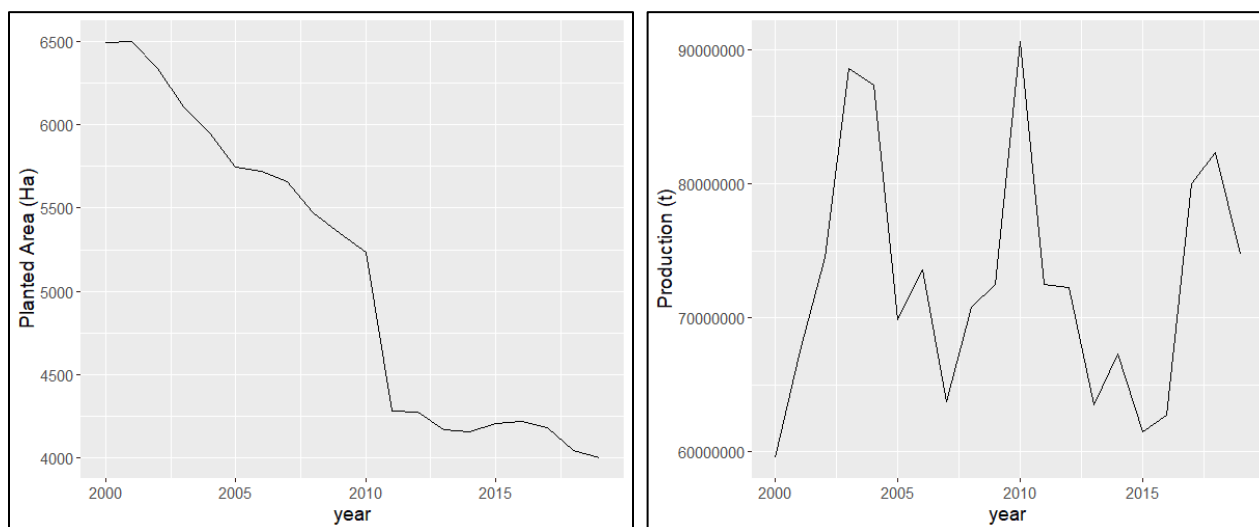
## 貳. 鄉鎮生產資料蒐集與分析

本次研究作物(除水稻外)歷年鄉鎮區生產資料取得自行政院農委會農糧署之農情報告資源網 ([https://agr.afa.gov.tw/afa/afa\\_frame.jsp](https://agr.afa.gov.tw/afa/afa_frame.jsp)) 及行政院農委會農業資料開放平台之農情調查資料集 ([https://agridata.coa.gov.tw/open\\_detail.aspx?id=038](https://agridata.coa.gov.tw/open_detail.aspx?id=038))。資料清洗後作物生產資料表中欄位項目有：年度、期作別、縣市名稱、鄉鎮區名稱、種植面積(公頃)、收穫面積(公頃)、單位面積產量(公斤/公頃)等。額外再從收穫面積及單位面積產量計算出總產量(公斤)。由於中央氣象局於 2020 年 11 月底擴增公開氣象資料庫為西元 2000 年至今，又每年農情調查報告發布為後一年的 5 月~7 月，因此，本次作物資料蒐集時間範圍設定為 2000 年至 2019 年，共 20 年。

2000 年到 2019 年文旦柚各鄉鎮區生產資料共有 4612 筆，多集中於 2015 年之後，筆數有 1224，2015-2019 每年約有 244 筆，2015 年以前之其餘年份，每年約 224 筆。為了解文旦柚近年在台灣的生產情形，分別以全台產區總種植面積和總生產量做圖呈現 (圖表 2)。全台文旦柚種植面積近 20 年來下降約 38%，但整體產量並無明顯增加或減少之趨勢，每年間總產量波動大。

表格 1 台灣文旦柚鄉鎮區 2000-2019 年農情調查資料統計(4612 筆)

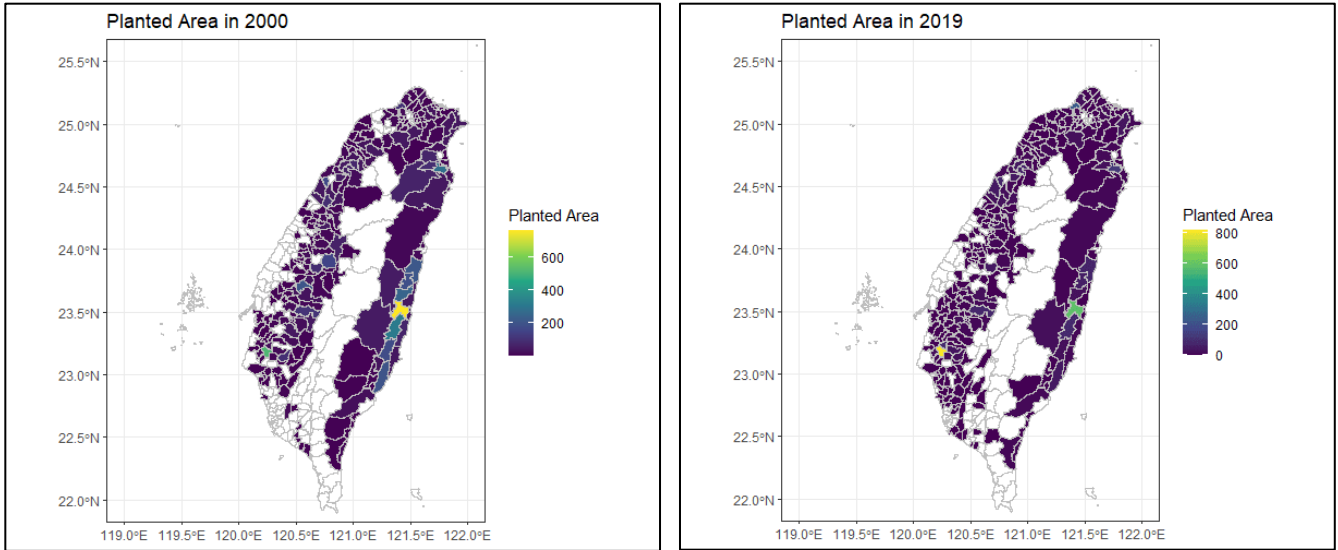
	種植面積	收穫面積	單位面積產量
最小值	0.00	0.00	0.00
平均數	22.14	21.66	11,847.00
中位數	4.76	4.64	11,400.00
最大值	827.54	843.21	45,000.00



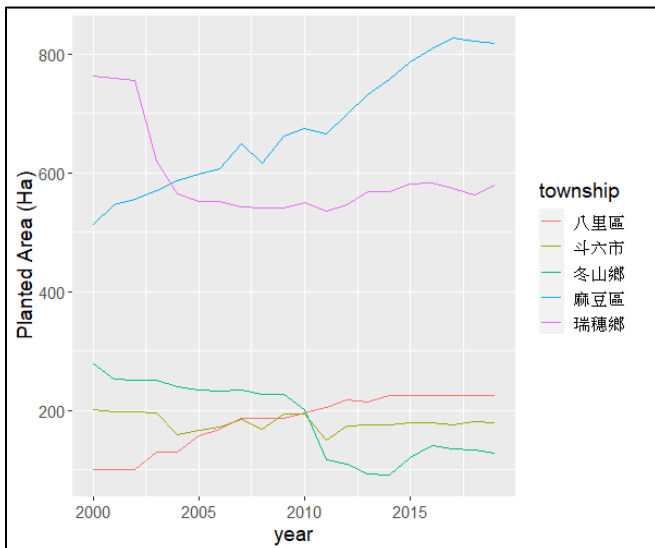
圖表 2 左: 台灣文旦柚年種植面積 2000-2019 年; 右: 台灣文旦柚年產量 2000-2019 年



比較 2000 年和 2019 的種植地區分布情形(圖表 3)，可發現在總種植面積下降的趨勢下，分布範圍有向西及向南擴增的現象，但主要種植區域仍以台南麻豆及花蓮瑞穗為主。其中，台南麻豆的種植面積增加最多，2000 年原為花蓮瑞穗為全台文旦柚種植面積第一之鄉鎮，由圖表 3 可看到近 20 年花蓮瑞穗及宜蘭冬山的種植面積為下降趨勢，而麻豆的種植面積成長約 60%。2019 年文旦柚的主要產區，主要分布在台南市、花蓮縣、宜蘭縣、新北市、雲林縣，五個行政區佔全台文旦柚總種植面積的五成(圖表 4)。



圖表 3 左:台灣文旦柚 2000 年種植鄉鎮區面積分布; 右:台灣文旦柚 2019 年種植鄉鎮區面積分布



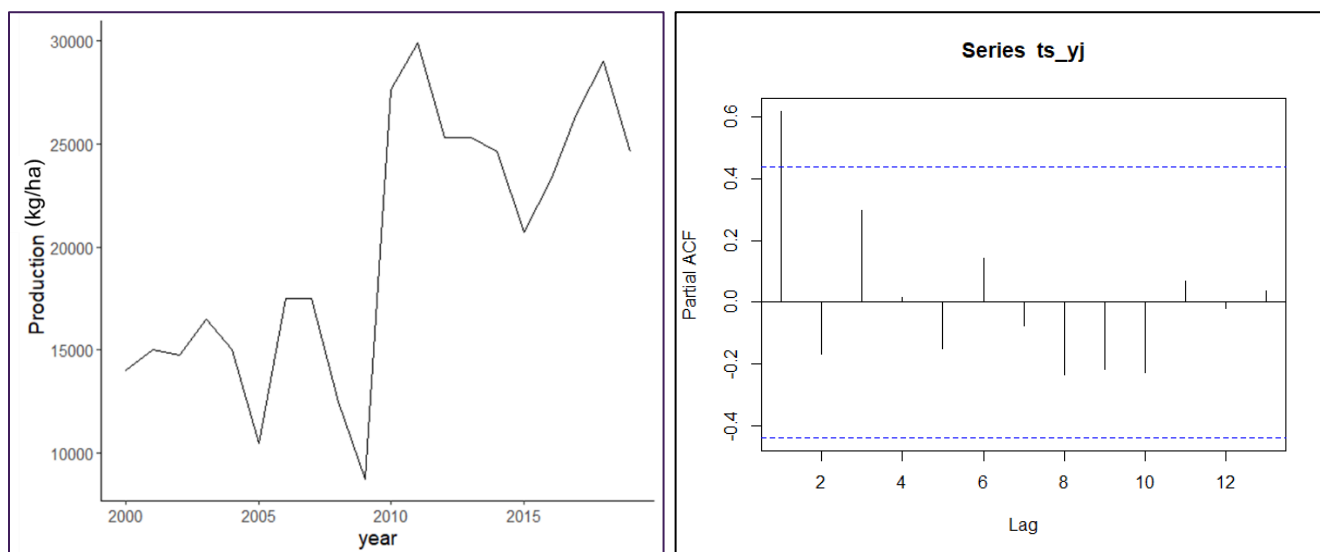
圖表 4 台灣文旦柚主要產區 2000-2019 年種植面積



表格 2 2019 台灣文旦柚鄉鎮區種植面積排名

地區	種植面積(公頃)	累積比例
台南市麻豆區	817.25	20.42%
花蓮縣瑞穗鄉	579.36	14.47%
宜蘭縣冬山鄉	127.45	3.18%
新北市八里區	224.82	5.62%
雲林縣斗六市	178.28	4.45%
全台種植面積	2040	100%

從台灣最大產區台南市麻豆區歷年單位面積產量變化中，可看出在 2010 年後文旦柚單位面積產量有大幅度跳升(圖表 5)。由於 2010 年後單位面積產量均維持在較高區段，推測為長期性因素所導致，如：栽培技術革新或調查樣本更換。以 Augmented Dickey-Fuller Test 檢定是否為定態(stationary)，指時間序列資料的平穩性，即資料是否長期趨向一常數或線性函數；結果顯示 P-value > 0.05，麻豆區文旦柚單位面積產量成非定態。再利用 PACF 模型繪圖，觀察當期產量與前期產量之相關性，發現無明顯相關。以前六期產量資料為 X 變量進行迴歸分析，Adjusted R<sup>2</sup> 值僅達 0.07，解釋力不足。表 2019 年產量與前幾年產量並無相關，應有其他影響因素，如後續欲分析之天氣因子。



圖表 5 左：台南市麻豆區歷年文旦柚單位面積產量；右：偏自我相關函數圖(PACF)



## 參. 氣象資料蒐集與分析

### 一. 研究方法

由於中央氣象局於 2020 年 11 月底擴增公開西元 2000 年後氣象資料，本研究團隊自中央氣象局公開資料中蒐集了自 2000 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日間共 497 個測站的逐時氣象資料，資料欄位包含大氣溫度、大氣濕度、降雨量、風向、風速、日輻射量等。本次因作物相關生產資訊尺度為鄉鎮區，雖日輻射量為作物生長之重要參數，但資料中僅有 33 座一級測站有日輻射量測值，部分縣市甚至無日照測值資料，因此無法取得具代表性之日照資料。後將與作物生長具重要關聯的參數項目進行氣象資料清洗、整理成逐日資訊，資料欄位有日高溫、日低溫、日均溫、日高濕、日低濕、日均濕、日累積雨量，以利後續分析進行，而用日高溫與日低溫相減可得日溫差。其中，與產量具直接關聯為日高溫、日低溫、日累積雨量等三個參數。

由於作物歷年生產資料為鄉鎮區尺度，在進行每一作物分析前，本研究團隊按所蒐集的作物生產資料中的鄉鎮區列表再與資料庫中測站經緯度位置進行計算(圖表 6)，挑選出每一鄉鎮區代表氣象測站作為該區氣象資料來源並進行後續分析。

county	township	year	lat	lon	top1_station_id	top1_station_na	top1_altitude	top1_lat	top1_lng	top1_distance	top1_start_time	top2_station_id	top2_station_name	top2_
宜蘭縣	三星鄉	2000	24.66781008	121.6642967	COU890	三星		116	24.66812	121.65302	1.14036348	2017/12/01	COU900	內城
宜蘭縣	五結鄉	2000	24.68912942	121.8060864	COU780	五結	15	24.68637	121.79794	0.8786562102	2010/04/17	COU940	羅東	
宜蘭縣	壯圍鄉	2000	24.75188969	121.8017655	467080	宜蘭	7.2	24.763975	121.756528	4.762897485	1935/01/01	COU970	大福	
桃園市	中壢區	2000	24.98003444	121.2147101	COC700	中壢	151	24.977661	121.256375	4.209188961	2017/12/27	COC540	大園	
苗栗縣	竹南鎮	2000	24.69924816	120.8760093	COE420	竹南	19	24.708978	120.888897	1.693291649	1987/06/01	COE730	頭份	
台中市	后里區	2000	24.3097433	120.7145946	COF9L0	后里	253	24.310436	120.729725	1.535659126	2011/03/09	COF9Q0	外埔	
台中市	西屯區	2000	24.1830819	120.6267286	COF9T0	西屯	111	24.179494	120.641275	1.529015771	2011/05/10	COF9X0	大雅(中科園區)	
雲林縣	虎尾鎮	2000	23.71670957	120.4293032	COK330	虎尾	38	23.719183	120.442036	1.325510291	1992/12/12	COK580	高鐵雲林	
雲林縣	斗南鎮	2000	23.67076799	120.4826259	COK460	斗南	60	23.678734	120.478359	0.9869303475	2015/03/11	COK450	大埤	
雲林縣	莿桐鄉	2000	23.77859134	120.3339634	COK250	莿桐	12	23.75555	120.318925	2.985280023	2015/06/08	COK440	二崙	
嘉義縣	鹿草鄉	2000	23.40820668	120.3045398	COM780	鹿草	30	23.41134	120.30835	0.5222310138	2015/03/27	COM680	大保	
嘉義縣	東石鄉	2000	23.46860421	120.1738137	COM710	東石	15	23.458927	120.15385	2.303863894	2015/04/20	COK291	宜梧	
嘉義縣	義竹鄉	2000	23.34585216	120.2239442	COM520	東後寮	15	23.369908	120.248065	3.636791957	2015/07/03	COM750	布袋	
嘉義縣	溪口鄉	2000	23.59361847	120.4010223	COM660	溪口	40	23.604131	120.403569	1.197772677	2015/04/29	COM760	民雄	
台南市	下營區	2000	23.2311427	120.2648371	COX060	下營	19	23.22695	120.256261	0.9929215993	2015/07/01	COX230	鹽水	
台南市	西港區	2000	23.12501362	120.2002358	COX140	西港	17	23.125608	120.203108	0.3011463202	2013/03/01	COX150	安定	
台南市	鹽水區	2000	23.29808546	120.2482991	COX230	鹽水	29	23.272621	120.247641	2.833205447	2015/04/15	COX250	新營	
台南市	佳里區	2000	23.16708946	120.1785965	COX080	佳里	2	23.173039	120.145086	3.490037689	1992/12/09	COX140	西港	

圖表 6 作物生產之鄉鎮區對應氣象測站距離計算及篩選



時間序列是在一段時間內追蹤的一系列值的順序。標準的時間序列有三種成分：1 趨勢成分：現象在較長時期內受某種根本性因素作用而形成的總的變動趨勢；2 循環成分：循環效果為時間數列的週期變化，季節性包括在內；3 隨機波動(又稱殘值 remainder)：移除上述兩種成分後，剩下的隨機干擾項。本次研究在進行時間序列分析及異常偵測會有以下兩個步驟，第一步為萃取時間序列的趨勢、循環、殘值三種成分，產生時間序列分析的殘值；第二步則為檢測殘值的異常數據。

本研究使用 Seasonal Decomposition of Time Series by Loess (STL 分解) 來將天氣因子的時間序列資料分解為趨勢(Trend)、週期性(Seasonal)以及殘值(Remainder)，如此做我們可以看出天氣變數是否在長期的趨勢下有變動，亦或是在季節週期變化上可以有無異動，最後再以殘值檢測異常數據 (IQR method)，並對照趨勢以及季節資料的時間點，可以得知哪個時間點或季節有發生特殊氣象異常。

建立好時間序列分析並且清楚殘值具有的特性，即可以對殘值進行分析。而殘值分析的困難點在於異常值是高槓桿點，會扭曲整體殘值分佈，因此將異常值找出，即可維持整體殘值分佈。本研究使用 IQR 方法來檢測殘值的異常值，此方法使用四分位距範圍確定殘值的分佈。默認情況下，限制設置為四分位距範圍上下的 3 倍，超出限制的任何餘數都被視為異常值。

天氣參數我們選用產區日高溫、日低溫、日夜溫差及月累積雨量共四種與作物產量關連性較高的因素來做時間序列及異常偵測分析。

文旦產區集中在台南市、花蓮縣、宜蘭縣、新北市、雲林縣，五個行政區佔全台文旦柚總種植面積的五成；其中又以台南市麻豆區、花蓮縣瑞穗鄉為主要產區，種植面積占全台的三成以上。本研究以麻豆區（佔 20.42%）、瑞穗鄉（14.47%）和新北市八里區（5.62%）為分析對象，觀察南部、東部和北部柚子主要產區之天氣因子時間序列及異常偵測分析。

## 二. 結果與討論

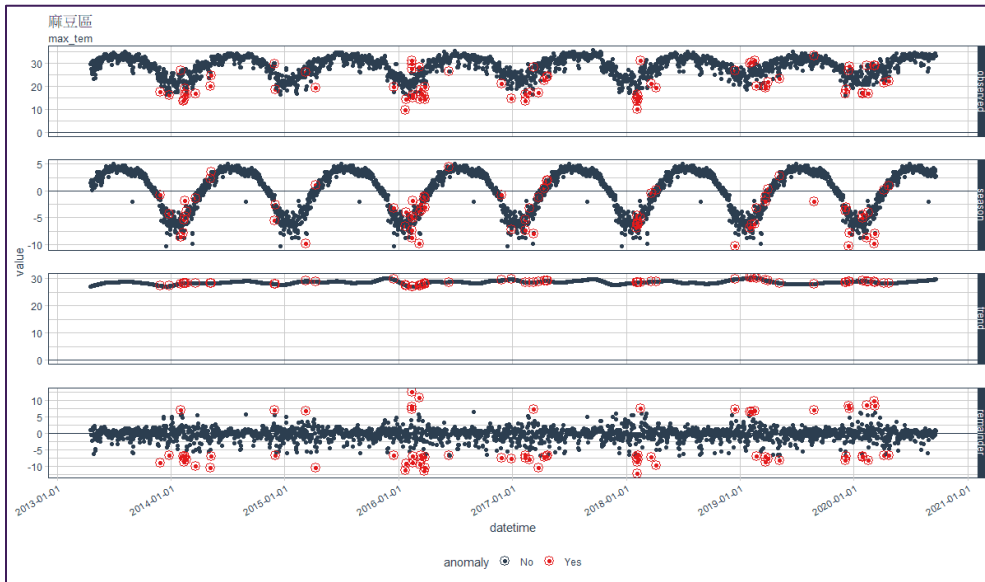
### 1. 日高溫

#### 台南市麻豆區

麻豆區可取得的天氣資料從 2013 年開始，資料量較少。日高溫的季節性波型較不集中，尤其在冬季相對分散，全年季節效應的落差約在-10~5 度之間。全年的趨勢波動穩定，多落在 26-30 度之間，近五年則



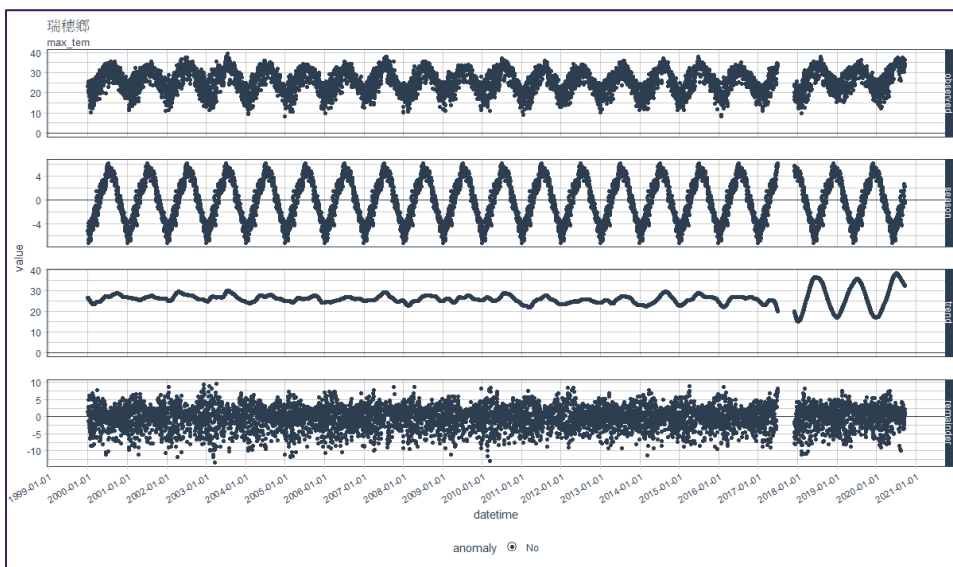
開始出現超過 30 度的情形。麻豆區日高溫出現異常值的次數明顯較其他地區多，主要為異常低溫，多集中於 12~3 月，並零星分布在上半年，可見在冬季到春季，麻豆區的日最高溫容易有異常值。



圖表 7 台南市麻豆區日高溫時間序列分析

### 花蓮縣瑞穗鄉

瑞穗鄉日高溫的季節性波型集中，季節性效應約在-6~6 度之間。全年趨勢在 20 年間未有明顯上升或下降，只有些微波動，整體而言大多落在 20~30 度間，在 2018 年之後開始出現較大的波型變化，落差範圍擴大至 15-40 度之間。異常值在季節性、趨勢和殘差中都沒有出現，顯示瑞穗鄉的日高溫變化有一定規律，無特別高溫或低溫的情形。

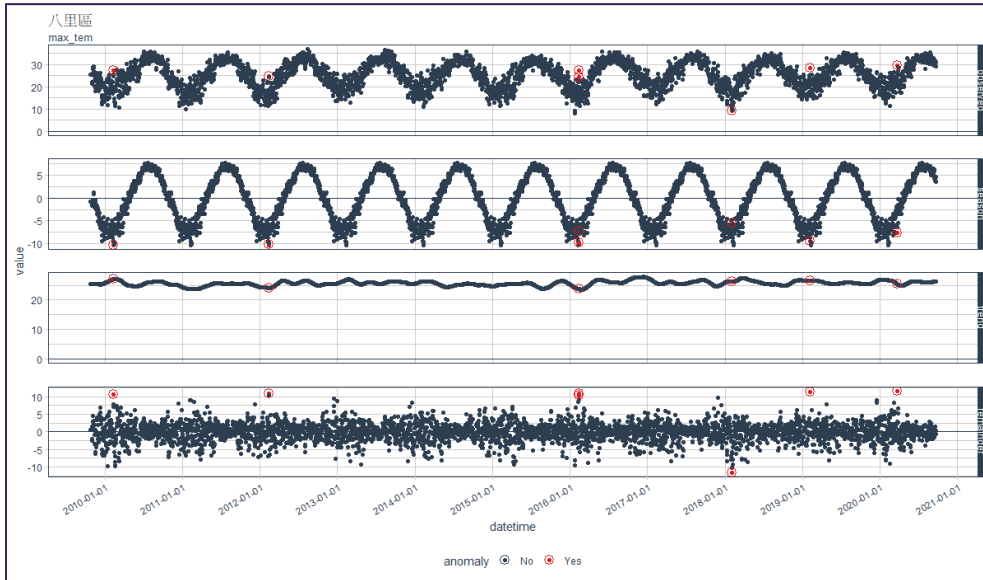


圖表 8 花蓮市瑞穗鄉日高溫時間序列分析



### 新北市八里區

八里區的天氣從 2010 年開始，資料年限較短。日高溫的季節性波型在年中較集中，冬季則波型相對分散，顯示季節性效應在春夏秋季較集中，整體而言落在-10~8 之間。全年趨勢僅有小幅度波動，10 年間也無明顯上下變化，大體落在 23-29 度之間。有偵測到零星異常值，大部分為發生在 2 月左右的冬季異常高溫。



圖表 9 新北市八里區日高溫時間序列分析

三地區的日高溫季節性波形都相當集中，僅在冬季相對分散；趨勢也僅有小程度波動，大致上無上升下降變化。在異常值的部分，台南市麻豆區可能因資料量較少，異常值非常多，新北市八里區也有偵測到零星幾筆；異常值主要分布在 12~3 月之間，顯示冬季的日高溫較不穩定。

表格 3 三地區日高溫統計值

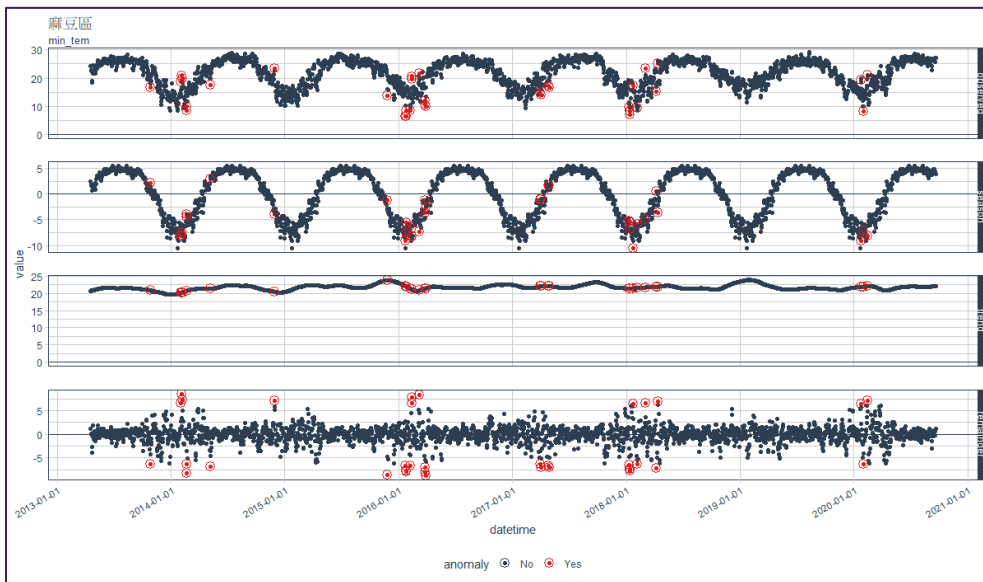
	台南市麻豆區	花蓮縣瑞穗鄉	新北市八里區
最小值	9.60	8.30	8.10
平均值	28.57	25.94	25.58
最大值	35.60	39.40	36.90
資料時間	2013/4/18- 2020/9/20	2000/1/1~2020/9/20	2009/10/26~2020/09/20



## 2. 日低溫

### 台南市麻豆區

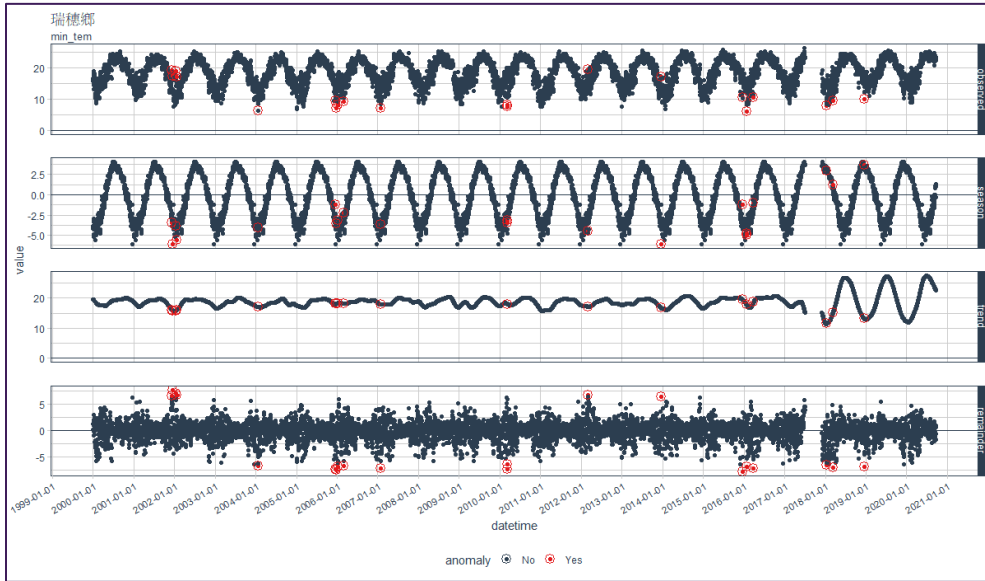
麻豆區日低溫的季節性波型在冬季和隔年的上半年度相對分散，季節性效應較不集中，全年落差約在-10~6 度之間，和日高溫呈現的季節性效應類似。全年的趨勢波動平緩，約落在 19-30 度之間，冬季高峰值有上升趨勢，顯示冬日日低溫逐漸增高。麻豆區日低溫出現異常值的次數較其他地區多，多集中於 12~3 月，其餘月份也有零星異常值，異常高溫和低溫的情形都有出現。



圖表 10 台南市麻豆區日低溫時間序列分析

### 花蓮縣瑞穗鄉

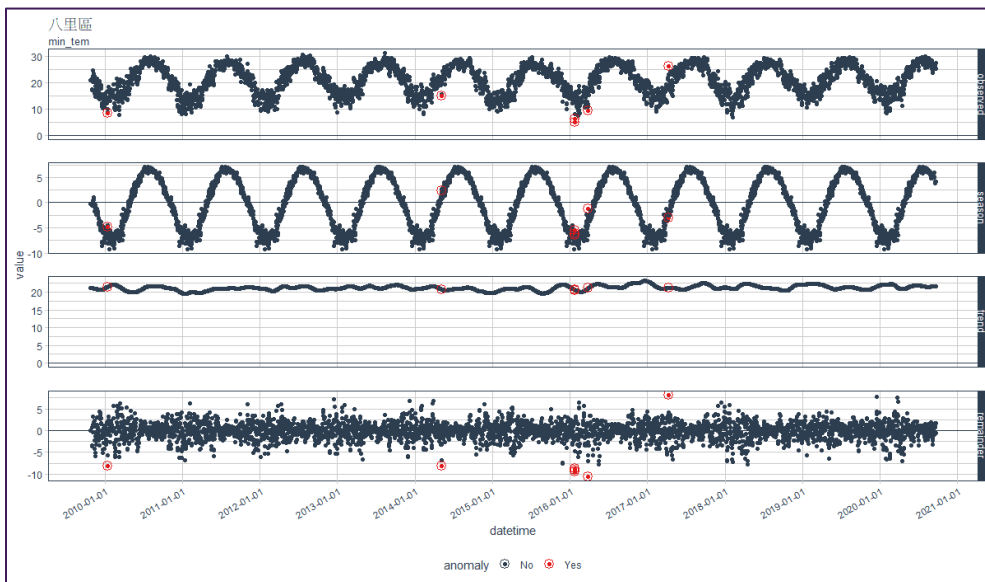
瑞穗鄉日低溫的季節性波型在冬季較分散，其餘季節相對集中，全年落差約在-6~4 度之間，和其他地區相比，季節落差較小。全年的趨勢波動幅度大，呈現一向上凸的曲線，2018 年以前約落在 15-20 度之間，進三年則擴大到在 10-25 度間波動。日低溫的異常值皆出現在年底和隔年年初，以異常低溫為主，顯示瑞穗鄉的冬季容易出現異常低溫的日低溫。



圖表 11 花蓮市瑞穗鄉日低溫時間序列分析

### 新北市八里區

八里區日低溫的季節性波型在冬季相對分散，其他季節則較集中，全年落差約在-10~7.5 度之間。全年的趨勢波動穩定，約落在 19-22 度之間，10 年間無明顯上升或下降情形。有偵測到零星異常值，分布在 1~5 月之間，主要為異常低溫的情形。



圖表 12 新北市八里區日低溫時間序列分析



三地區的日低溫季節性波形都相當集中，僅在冬季相對分散；趨勢也僅有小程度波動，大致上無上升下降變化。台南市麻豆區偵測到多筆異常值，新北市八里區也有零星幾筆，在 12~5 月之間都有，顯示異常情況分布較分散，冬春季都有日低溫不穩定的情形，尤以異常低溫為主。

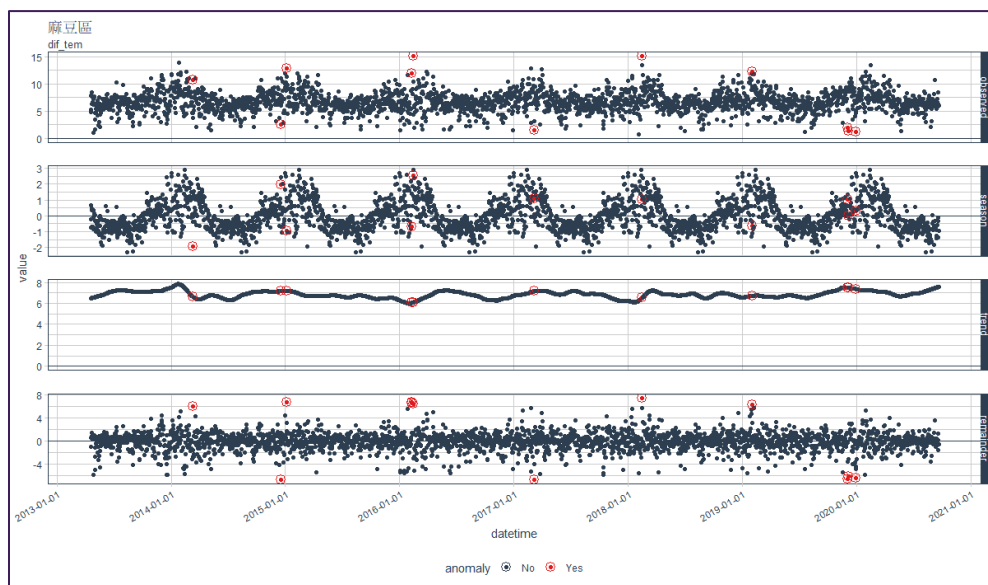
表格 4 三地區日低溫統計值

	台南市麻豆區	花蓮縣瑞穗鄉	新北市八里區
最小值	6.30	5.90	5.10
平均值	21.85	18.56	21.10
最大值	29.20	26.20	31.30
資料時間	2013/4/18- 2020/9/20	2000/1/1~2020/9/20	2009/10/26~2020/09/20

### 3. 日夜溫差

#### 台南市麻豆區

麻豆區日溫差的季節性波型分散，尤其冬季更是明顯，全年落差約在-2~3 度之間，冬季溫差較大。全年的趨勢有小幅波動，約落在 6-8 度之間，10 年間無明顯上升或下降情形。有偵測到數筆異常值，主要分布在冬季。

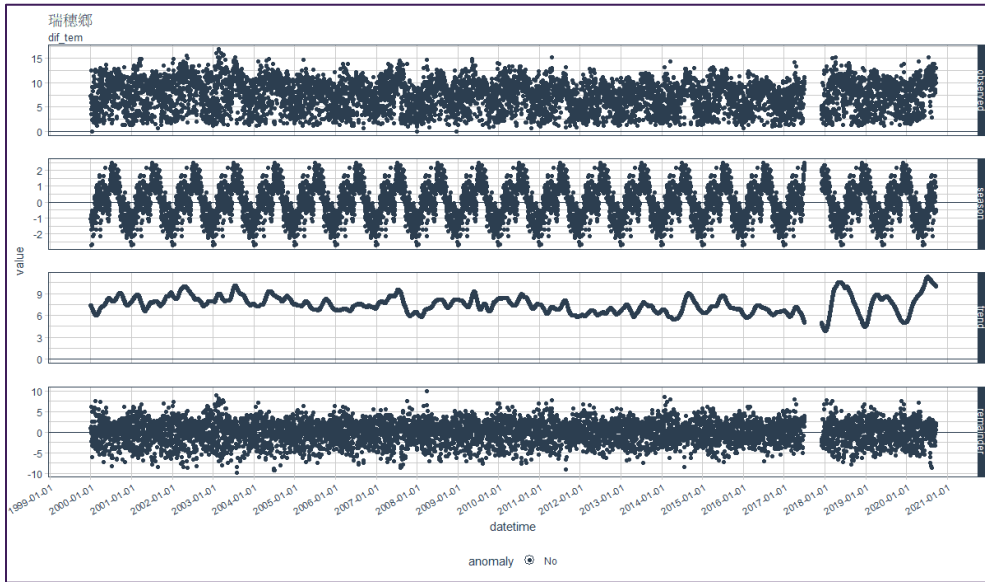


圖表 13 台南市麻豆區日夜溫差時間序列分析



### 花蓮縣瑞穗鄉

瑞穗鄉的日溫差季節性波型是三地區中最集中的，大體上波形明顯，全年落差約在-3~3 度之間。全年的趨勢有小幅度波動，在 2018 年以前約落在 5-10 度之間，並呈現微幅下降趨勢，不過日夜氣溫落差仍相對其他地區明顯。瑞穗鄉日溫差無偵測到異常值，表示日溫差波動較有規律。

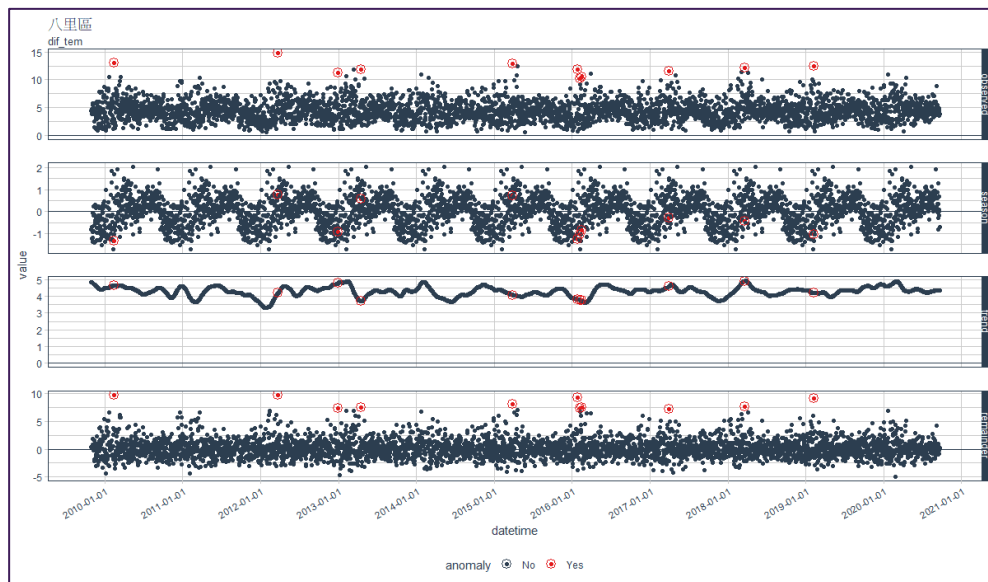


圖表 14 花蓮縣瑞穗鄉日夜溫差時間序列分析

### 新北市八里區

八里區日溫差的季節性波型十分分散，顯示季節性效應不集中，全年落差約在-2~2 度之間。全年的趨勢有上下波動，落差在 3-5 度間，為三個地區中最小的。有偵測到多筆異常值，主要分布在 1-3 月，多數為溫差異常大，顯示八里區的氣溫在冬季容易出現較大的日夜落差。





圖表 15 新北市八里區日夜溫差時間序列分析

相對於日高溫 and 日低溫，三地區的日溫差季節性波形都相對分散，顯示季節性的影響較不集中。趨勢線波動程度較大，花蓮縣瑞穗鄉更有長期趨勢下降的情形。在異常值的部分，台南市麻豆區可和新北市八里區都有偵測到幾筆多筆，主要分布在 11~3 月之間，顯示冬季的日溫差變化較大，並以溫差變大為主。

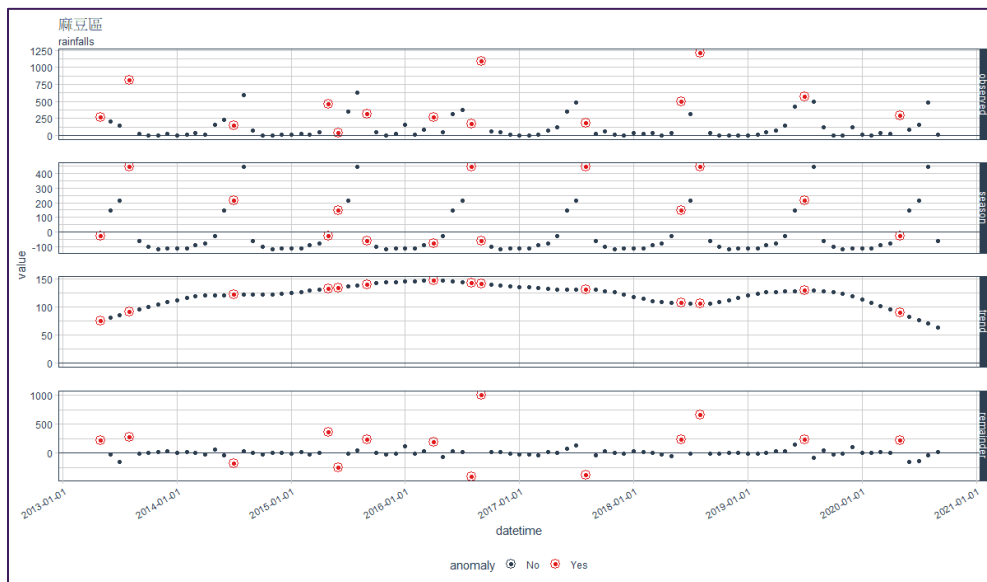
表格 5 三地區日夜溫差統計值

	台南市麻豆區	花蓮縣瑞穗鄉	新北市八里區
最小值	0.70	0.00	0.60
平均值	6.72	7.32	4.48
最大值	15.10	16.90	14.80
資料時間	2013/4/18- 2020/9/20	2000/1/1~2020/9/20	2009/10/26~2020/09/20

#### 4. 月累積雨量

##### 台南市麻豆區

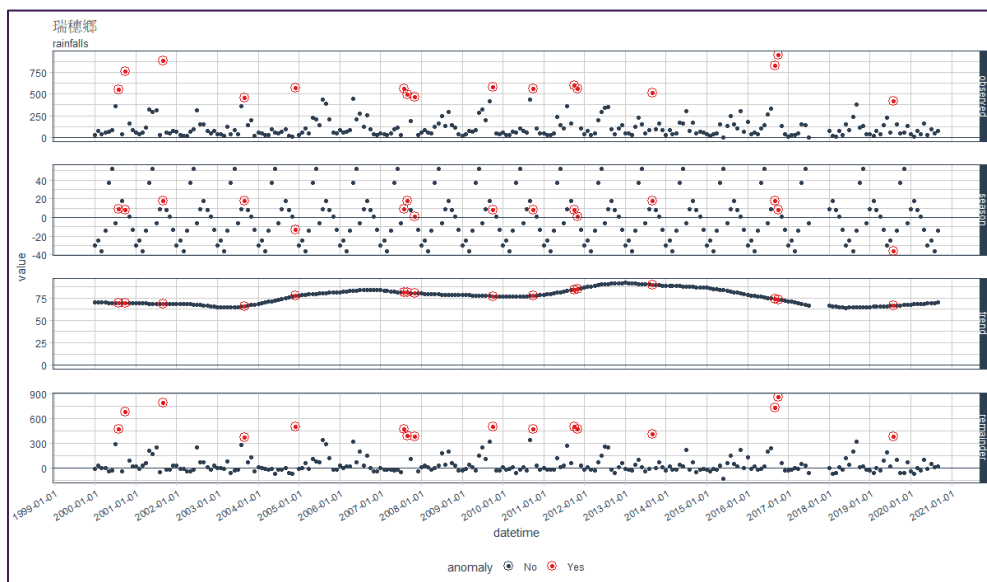
麻豆區月雨量的季節性效應有很大的季節性差異，只有在 6-8 月的盛夏期間為正值，其餘月份皆為負值，符合台灣南部下雨冬乾、降雨集中的特性。這九年來的趨勢落在 50-150 毫米之間，呈現先上升後下降的圓滑曲線，並於 2021 年降至新低點，和今年的缺水情形吻合。月雨量有多筆異常值，分布在 4~9 月之間，以異常多雨的情況較多。



圖表 16 台南市麻豆區月降雨量時間序列分析

### 花蓮縣瑞穗鄉

瑞穗鄉月雨量的季節性效應有明顯季節性差異，在 5-11 月間為正值，其餘月份多為負值，為三地區中降雨月份最多的。月雨量趨勢落在 60-90 毫米之間，波動程度相對穩定，差異不大。月雨量有多筆異常值，分布在 8~11 月之間，皆為異常多雨的情況，可見瑞穗鄉在秋冬季有較不穩定的降雨。

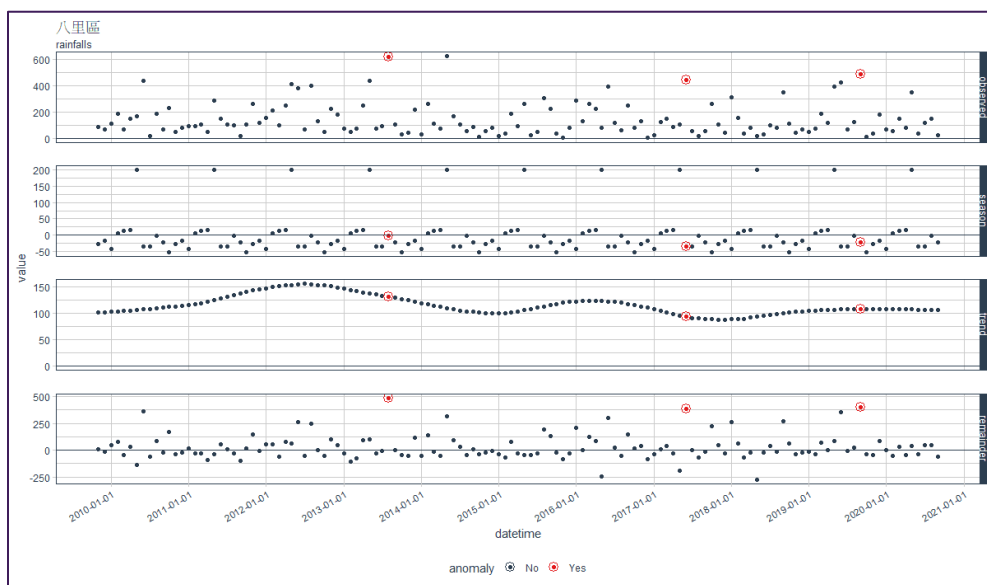


圖表 17 花蓮縣瑞穗鄉月降雨量時間序列分析



### 新北市八里區

八里區月雨量的季節性效應呈現季節落差，在 2-5 月為正值，5 月的降雨量尤其豐沛，而其餘月份皆為負值，符合台灣北部冬季迎東北季風，降雨較多的特性。全年度月雨量趨勢落在 80-160 毫米之間，稍有上升下降。一共有 3 筆異常值，分布在 6~9 月之間，皆為異常多雨的情形。



圖表 18 新北市八里區月降雨量時間序列分析

從月雨量資料來看，三個地區中以新北市八里區的降雨分布最平均，台南市麻豆區的降雨則多集中於夏季。從趨勢來看，長期下來都有平緩的波動，麻豆區在近年似乎呈現下降趨勢，並在今年來到新低點。三地區都有偵測到異常值，並以花蓮縣瑞穗鄉最多；時間上分布於 4~11 月，多為降雨季節雨量異常多的情形。

表格 6 三地區月累積雨量統計值

	台南市麻豆區	花蓮縣瑞穗鄉	新北市八里區
最小值	0.00	0.00	0.00
平均值	5.12	4.656	4.79
最大值	445.50	452.50	291.50
資料時間	2013/4/18- 2020/9/20	2000/1/1~2020/9/20	2009/10/26~2020/09/20



## 肆. 追蹤資料分析及模型建立

### 一. 研究方法

追蹤資料(Panel Data)特性為其綜合時間序列(Time series)資料及橫斷面(Cross-over)資料兩者特性，可同時考慮個體間差異及時間變化。追蹤資料模型中又可分為兩種：固定型效應模型、隨機型效應模型。固定型效應模型如下：

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta X_{it} + u_{it}$$

其中，i 為個體代號；t 為時間代號； $Y_{it}$  為 i 鄉鎮區、第 t 年的產量調查資料； $X_{it}$  為 i 鄉鎮區、第 t 年的氣象觀測資料； $\alpha_i$  為個體效應，將其當作截距項，不受自變數及時間影響； $u_{it}$  則為隨時間及個體改變的隨機變數。

而隨機型效應模型如下：

$$Y_{it} = \mu + \beta X_{it} + (\alpha_{it} + e_{it})$$

其中，與固定型效應模型僅差在個體效應並非固定值，而為每年變動的隨機型變數。

若忽略個體效應，即為一般普通最小平方法模型(OLS)。這三種模式間選用，OLS 模式跟固定型效應模式間可透過 F 檢定檢定 $\alpha_i$ 是否相等，若檢定結果為拒絕虛無假說，則應選擇固定型效應模式；固定型效應及隨機型效應模式間則透過 Hausman 檢定進行，檢定結果若拒絕虛無假說，則應選擇固定型效應模式。

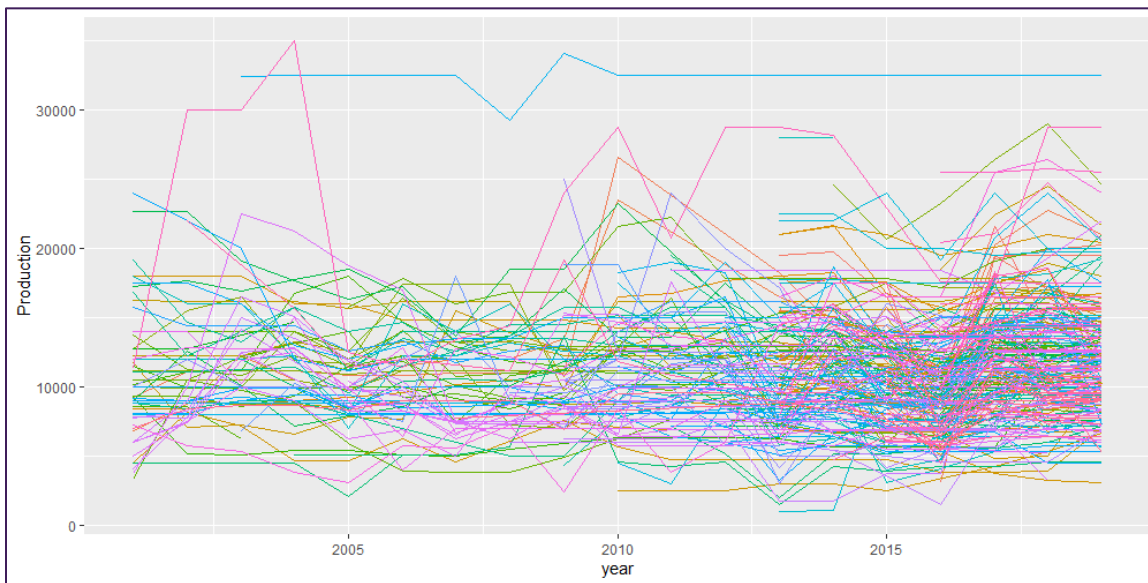
作物產量除氣候因素以外，該地區土壤、栽培品種、栽培管理方式均會影響作物產量。另外，此次作物資料來自於各地方單位調查結果，各地區調查人員取樣調查方式亦可能有所不同，追蹤資料可透過個體效應估算評估各地區特性。比起單純時間序列分析方法或橫斷面資料分析方法，追蹤資料分析應更能符合本次資料特性。

將文旦柚全年產量資料與氣象資料合併後，刪除不完整資料後(如：單位面積產量或種植面積為 0、氣象資料有長期缺值之樣本)，剩餘樣本數共有 2359 筆。中央氣象局測站多數為 2013~2015 年後設置，因此，繪製合併後資料中各鄉鎮區歷年產量折線圖(圖表 19)中明顯看出 2013~2015 年後線條數量明顯增加。從圖表中可看出，有部分鄉鎮區調查數據遠高於其他地區，由於全台文旦柚平均產量為 11,000



kg/ha，單位面積產量在 25,000 kg/ha 以上的數據認定為較不合理產量，將之排除，共計有 38 筆，剩餘樣本數為 2321 筆。

本次氣候變遷對台灣作物產量影響研究，應變數為作物產量、自變數則為氣象資料。由於作物產量資料一年一筆，而氣象資料為逐日觀測資料，一年一個氣象參數即有 365(閏年則有 366)筆觀測值，兩者維度相差過多。為篩選出關鍵區間，先將氣象資料中日高溫及日低溫進行逐月平均；降雨量則是逐月累加。



圖表 19 文旦柚追蹤資料中各鄉鎮區單位面積產量逐年變化折線圖

## 二. 結果與討論

將一般線性模式、固定型效應模式、隨機型效應模式三者結果整理於附件 1。在三種模式中均顯著的因子有：11 月日高溫、11 月日低溫、9 月累積雨量，其中，11 月日高溫、9 月累積雨量與產量為負相關，11 月日低溫則是與產量為正相關。模式檢定結果為兩者均顯著 (附件 2)，因此固定型效應模式為佳。

與文獻相比，9 月為文旦採收月份，降雨較多影響產量符合預期，然而，11 月為文旦樹枝條修剪留養時期，一般不會認為為主要影響產量月份。如同芒果，果樹一般產量關鍵期為開花後到採收之間，文旦柚為 2 月~9 月間。

除上述因子外，固定型效應模式中尚有 2、4、9 月日高溫、2、6 月日低溫 4、6、7、12 月累積雨量呈顯著。除 12 月雨量之外，其他因子月份均落在預期區間內。



### 三. 產量推估方法建立

為下一階段利用 TCCIP 推估未來 20 年氣候資料帶入模型中模擬未來產量變化，使用兩種方式進行自變數因子篩選，第一種為正面表列，納入在三種模式中均顯著因子及同時在固定型效應及隨機型效應顯著的因子；第二種為逐步刪去法，在模式中從係數最小且不顯著的因子逐一刪除，每刪除一個因子就重做一次迴歸分析，直到所有天氣因子均為顯著。模型驗證方式為將現有產量資料分為 2 份，2016 年前資料用於建立模型，2017~2019 年資料用來檢驗模型效果，並排除栽種面積低於 1 公頃的鄉鎮區，避免單位面積調查產量誤差過大。剩餘樣本數為 2321 筆，其中訓練資料有 1634 筆、測試資料有 687 筆，測試資料中又有 26 筆為無鄉鎮區估計值的樣本。

方法一選擇因子有：2、4、9、11 月日高溫、2、6、11 月日低溫、4、9 月降雨量，共 9 項因子。模式預測值及實際值分布繪製散佈圖如下 (圖表 20)，模式預測效能指標 RMSE 為 0.192、nRMSE 為 0.247。



圖表 20 文旦柚產量預測模型預測值及實際值散佈圖(左：選擇法；右：刪去法)

固定型效應模式利用刪去法後剩下天氣因子有：1、2、5、6、8、9、11、12 月日高溫、2、4、5、6 月日低溫、2、3、4、6、7、11、12 月累積雨量，共 19 個天氣因子；一般線性模式則是篩選出 1、2、10 月日高溫、4、6、9、10、12 月日低溫、2、3、5、8、11 月累積雨量，共 13 個因子。結合兩模型進行測試資料驗證，模型效能指標 MAPE 為 0.233、nRMSE 為 0.298。兩指標均比方法一稍差。



## 伍. 2021-2060 單位面積產量推估

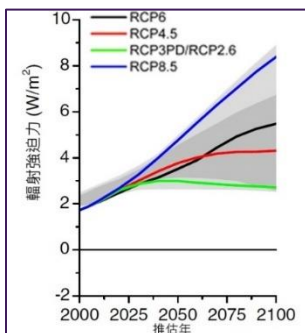
### 一. 方法

依據前章結果，產量推估模型將使用方法一所篩選出因子：2、4、9、11 月日高溫、2、6、11 月日低溫、4、9 月降雨量，共 9 項因子。利用 2000-2019 年所有歷史產量及氣象資料估算模式係數值 (去除種植面積小於 10 公頃、單位面積產量為 0 或大於 25000 kg/ha 之極端樣本)。

後代入 2021 年到 2060 年間氣象推估值進行產量推估，氣象推估值使用自 TCCIP 所釋出資料集中三個氣候推估資料集：GFDL-CM3、MIROC5、inmcm4，分別包含 rcp26、rcp60、rcp85；rcp26、rcp45、rcp60、rcp85；rcp45、rcp85 等情境，共可得 9 種推估產量值。由於文旦生長期為 10 月到隔年 9 月，因此，產量推估為 2022 年開始直到 2060 年止，共 39 年，每年所推估鄉鎮區數量為 83 個。

GFDL-CM3 與 MIROC5 在大氣—海洋耦合環流模式 (AOGCM) 皆有高頂大氣分析，INMCM4 則未包含高頂大氣分析；GFDL-CM3 在地球系統模式 (ESM) 可看到氣溶膠與大氣化學的完全交互作用，INMCM4 則是在地表碳循環與海洋循環有半交互作用，MIROC5 僅在氣溶膠有完全交互作用 (Flato et al., 2014)。

4 種 rcp 情境代表未來四種輻射強迫力 (Radiation Forcing) 變化曲線 (圖表 21)。輻射強迫力可簡單視為太陽能穿透到地表所接收到的能量，其中，rcp85 為接收到能量增長速度最快，代表暖化最嚴重情境；rcp26 則相反，輻射強迫力先些微上升，但長期則為下降的曲線，代表暖化改善情境；rcp45 及 rcp60 則介於兩種極端之間，雖輻射強迫力會增加，但增長速度較為平緩，rcp45 為近期增長速度快、後期趨緩，rcp60 則為增長速度放緩時間較晚的曲線。若單看本次推估時間只到 2060 年，rcp45 略高於 rcp60，但兩者差異不大。



圖表 21 rcp26、rcp45、rcp60、rcp85 下逐年輻射強迫力變化 (Van Vuuren et al., 2011)

## 二. 結果與討論

整體而言，推估產量均較歷史產量來的高。從附件 5 中可見 MIROC5 各情境間長期趨勢線波形差異不大，而 inmcm4 則是只有兩個 rcp45 及 rcp85 兩種情境，因此後續討論以 GFDL-CM3 推估結果為主。

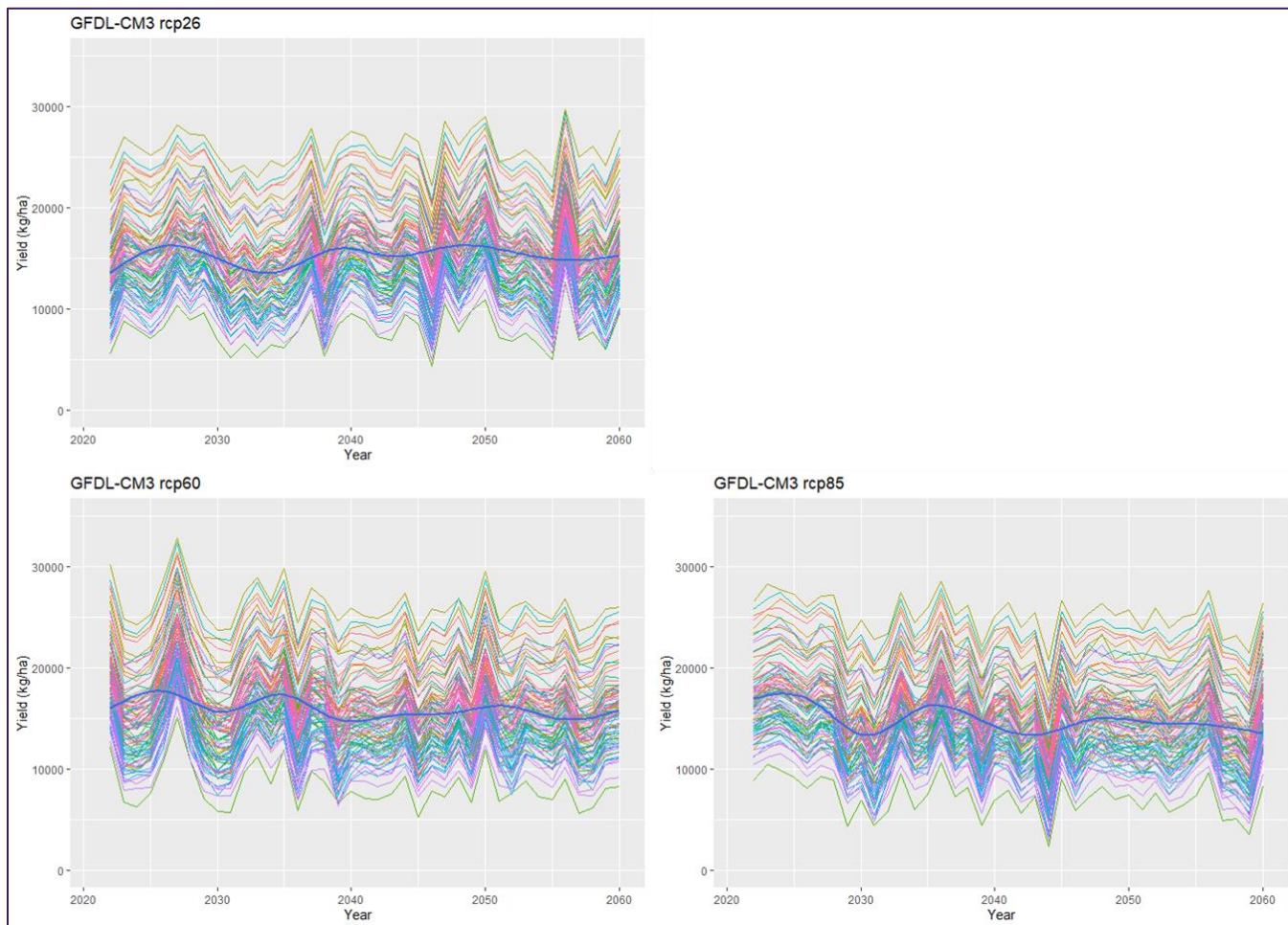
2000-2019 年 20 年間歷史產量平均值為 11,766 kg/ha、標準差為 4,204。GFDL-CM3 模式數值推估 2022~2060 年產量 39 年平均為 14,887~15,953 kg/ha，較歷史平均增加 26.5~35.6%；標準差為 4,282~4,352，均高於歷史數據 (表格 7)。未來產量推估無論在哪種情境下，推估產量平均值及標準差均高於歷史數據，表示未來產量雖會增加但產量落差也會變大。

表格 7 歷史產量及推估產量敘述統計值

產量	最小值 (Min)	第一四分位數 (Q1)	中位數 (Q2)	平均值 (Mean)	第三四分位數 (Q3)	最大值 (Max)	標準差 (Sd.)
2000-2019 年歷史	2422	8750	11200	11766	14400	24750	4204
GFDL_CM3/rcp26	4303	12176	14867	15232	17789	29706	4313
GFDL_CM3/rcp60	5241	12801	15496	15953	18644	32855	4352
GFDL_CM3/rcp85	2329	11924	14562	14887	17442	28581	4282

進一步比較 rcp26、rcp60、rcp85 情境下逐年推估產量(圖表 22)，GFDL-CM3 中 rcp26 推估產量長期趨勢線持平在 15,000 kg/ha 上下，推估期間內有三個小波動，但振幅為三情境間較小者；rcp60 推估產量在前期(2040 年前)長期趨勢略高於 15,000 kg/ha、後期(2040 年後)則略為降低且貼近 15,000 kg/ha，推估期間內亦有三個波動，明顯波動集中於前期、週期較小；rcp85 推估產量與 rcp60 雷同，一樣在前期長期趨勢高於 15,000 kg/ha、波動集中於前期、週期類似，但 rcp85 特徵為波動振幅較大且在 2040 年後長期趨勢則逐年下降且多低於 15,000 kg/ha。從圖形中可推論未來產量推估在 rcp26 情境下最為穩定持平；rcp60 則在 2040 年產量雖提升但變動較大，2040 年後產量較前期下降，但趨勢為穩定且略高於 rcp26；rcp85 在 2022~2027 年產量雖最高但後遇大幅減產，2040 年後產量並未回升，長期趨勢下降且數值低於 15,000 kg/ha，為三情境中最低者。





圖表 22 GFDL-CM3 模式中 rcp26、rcp60、rcp85 情境下各鄉鎮區推估產量逐年變化折線圖

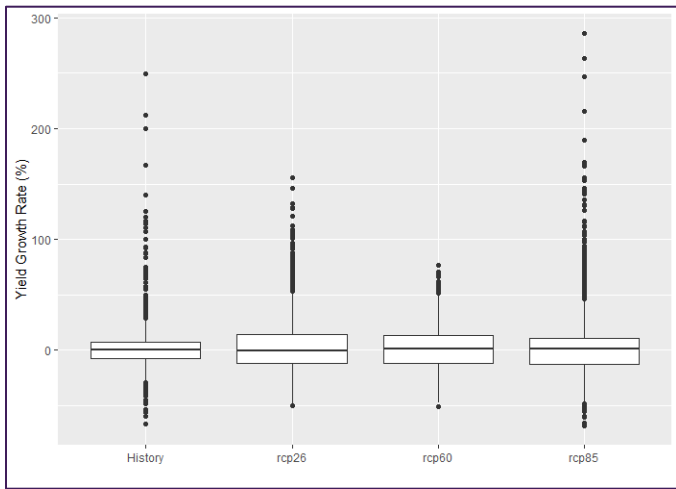
我們進一步計算前後年產量變動率，變動率由今年產量與前一年產量相減後除以前一年產量所計算出(<式 1>)，產量變動率能呈現出每年產量的增減比例及穩定性。歷史 20 年產量變動率中位數為 0.00%、四分位距為 14.28；推估產量變動率中位數為-0.89~1.56%、四分位距為 23.76~25.13 (表格 8)。rcp26 變動率中位數為負值，表示減產年份多於增產年分，而 rcp60 及 85 的變動率中位數為正值，代表多數年份為增產，但三情境數值差異不大。較值得注意的是三種情境的四分位距均大於歷史數據，多出 10%，表示未來年產量變動率分布更為分散、不穩定性提高。進一步細看，rcp85 情境下雖四分位距最小，但其第一四分位數及第三四分位數均為三種情境中最低者，顯示在 rcp85 情境下，減產比例多會比其他兩種情境來的大，但增產比例卻是會比其他兩個情境來的小。



$$\text{Yield Growth Rate (\%)} = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{Y_{n-1}} \times 100\% \quad \text{<式 1>}$$

表格 8 歷史及推估產量年變動率敘述統計值

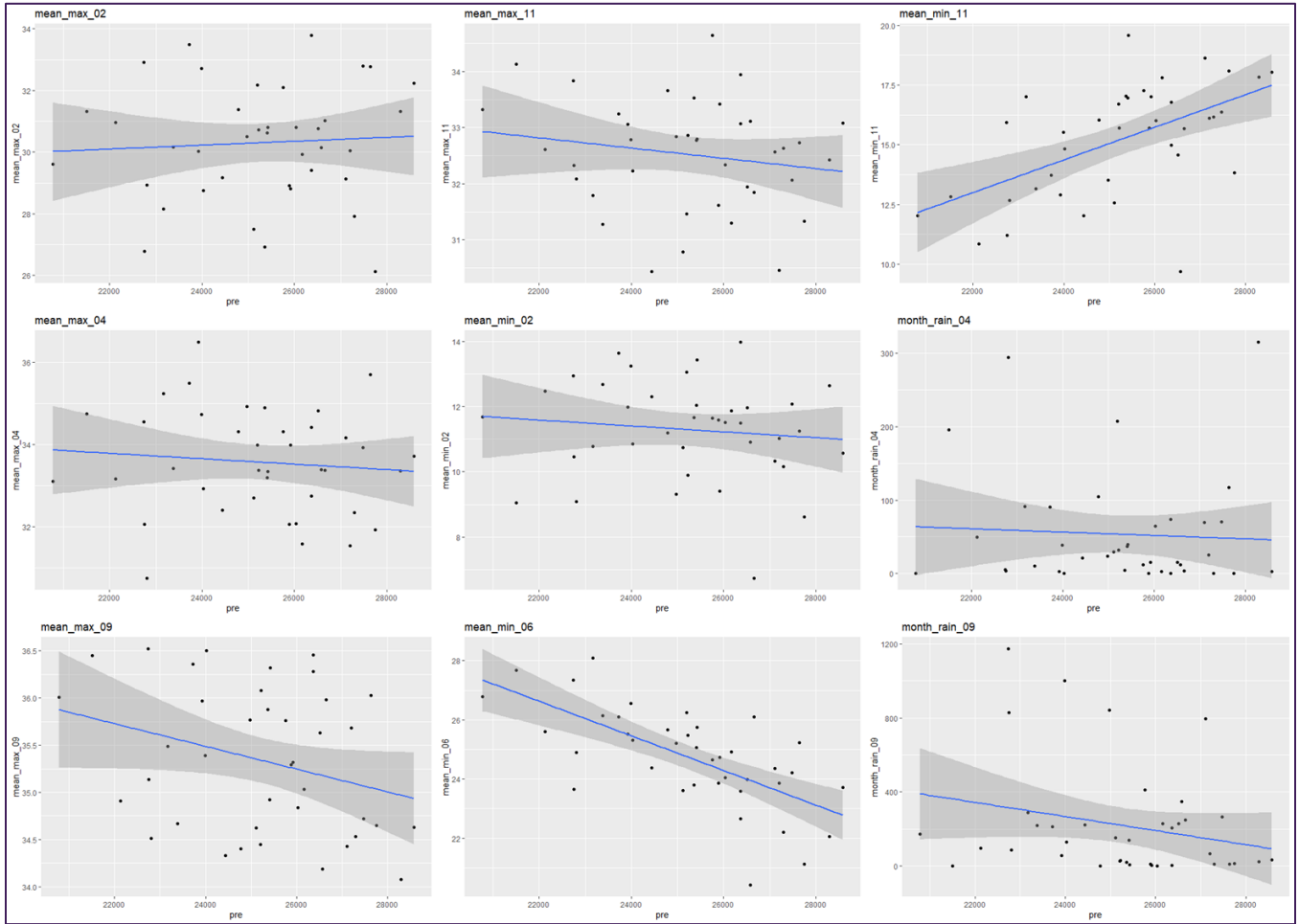
變動率	最小值 (Min)	第一四分位數 (Q1)	中位數 (Q2)	平均值 (Mean)	第三四分位數 (Q3)	最大值 (Max)	四分位距 (IQR)
2000-2019 年歷史	-66.67	-7.14	0.00	3.76	7.14	249.71	14.28
GFDL_CM3/rcp26	-50.30	-11.49	-0.89	3.03	14.26	155.72	25.75
GFDL_CM3/rcp60	-50.67	-11.51	1.25	1.25	13.62	76.74	25.13
GFDL_CM3/rcp85	-67.96	-12.97	1.56	2.57	10.70	285.85	23.67



圖表 23 歷史及推估產量年變動率盒鬚圖

為確認 9 天氣因子中哪一因子對於產量推估最為相關，分別繪製推估產量結果與天氣因子散佈圖。由圖表 22 可看出所有鄉鎮區產量每年變動方向一致，我們只取最大產區：台南市麻豆區為例，進行分析 (圖表 24; 附件 6)。無論何種情境，明顯與推估產量相關性較高的天氣因子為 6 月日低溫及 11 月日低溫。

# 氣候變遷對台灣農業生產影響分析—文旦柚



圖表 24 rcp85 下台南市麻豆區推估天氣因子與推估產量散佈圖(最右排由上到下為：2 月日高溫、4 月日高溫、6 月日高溫；中間排由上到下為：11 月日高溫、2 月日低溫、6 月日低溫；左排由上到下為：11 月日低溫、4 月累積雨量、9 月累積雨量)



## 陸. 總結

此研究結合 2000 年到 2019 年行政院農委會文旦柚生產資料、中央氣象局測站歷史氣象觀測值進行追蹤資料分析並建立全台各鄉鎮區文旦單位面積產量與天氣因子間固定型效應模式，分析中篩選出關鍵天氣因子共有 9 項，分別為：2、4、9、11 月日高溫、2、6、11 月日低溫、4、9 月降雨量。

將 TCCIP 所釋出 2021 年到 2060 年逐日氣象推估數值帶入前述模式中進行未來產量推估。推估結果，文旦柚單位面積產量將較歷史數據平均提升 25~35%、單位面積產量年變動率四分位距較歷史變動率擴大 10%。表示未來文旦柚整體生產效率提升外，每年產量變動擴大，不穩定性上升。9 項天氣因子中，推估產量與 6 月日低溫、11 月日低溫有較強關聯性，6 月日低溫為負相關，11 月日低溫則為正相關。

在氣候變遷不同情境下(rcp26、rcp60、rcp85)，rcp85 在 2023~2024 年推估產量趨勢會達最高，但 2029~2032 年間大幅衰退，爾後雖有第二波上升但未回到前期水準，後期則逐年下降，到 2040 年後推估產量為三情境中最低者；rcp26 則無明顯上升或下降，雖有小波動但推估產量長期趨勢仍維持在固定位置；rcp60 在 2040 年前推估產量長期趨勢維持在 rcp26 及 rcp85 之間，中間波動與 rcp85 類似但較為和緩，2040 年後趨勢也有出現下降，但仍高於 rcp26。

此研究透過固定型效應模式估算各鄉鎮區個體效應，反映調查資料的地區差異性，提升單位面積產量與天氣因子間相關性。在氣候變遷情境下推估氣候數值並未在鄉鎮區間具明顯差異，使得推估結果各鄉鎮區變動方向一致。台灣整體文旦單位面積產量雖會提升，在市場中，產量增加並不代表生產者收入可以增加，若供過於求，則可能導致價格崩跌。再者，每年產量的不穩定性使執政者及生產者難以透過調節栽種面積，文旦柚為多年生果樹增加種植面積需要較長時間，無法每年隨之調整。目前台灣文旦柚消費市場集中於中秋節前，並沒有分散產期及特殊加工品誘因，將會是另一面對氣候變遷下文旦柚生產難以調適的不利因素。

## 柒. 附件

附件 1 文旦柚三種模式迴歸結果

	Linear	Fixed	Random
Max1	90.733	-51.551	-43.834
Max2	30.78	501.551***	415.322***
Max3	206.312	46.272	193.836**
Max4	-102.269	253.479**	163.371
Max5	-6.375	164.188	107.318
Max6	275.523*	-95.015	-104.738
Max7	-167.799	-125.394	-143.294
Max8	-270.292	176.581	123.557
Max9	100.643	-266.548**	-159.031
Max10	252.370*	-96.913	15.361
Max11	-346.974**	-575.549***	-423.858***
Max12	169.437	-142.259	12.414
Min1	-169.662	118.303	20.459
Min2	-95.28	-359.563***	-363.809***
Min3	-201.572	-136.817	-239.559**
Min4	322.001*	-87.576	28.858
Min5	176.979	-173.544	-145.03
Min6	-660.620***	-307.776*	-277.234
Min7	-30.831	212.552	195.735
Min8	508.198**	78.035	164.557
Min9	-93.91	195.887	81.552
Min10	-351.872***	58.528	-44.754
Min11	468.232***	347.333***	383.992***
Min12	-203.797	74.961	-49.666
Rain1	0.963	-1.087	-0.969
Rain2	-4.847***	-0.947	-2.018**
Rain3	-2.366*	-1.81	-2.354**
Rain4	-0.916	-2.440***	-2.164**

氣候變遷對台灣農業生產影響分析—文旦柚



Rain5	1.058	-0.078	0.211
Rain6	1.596***	0.551*	0.658**
Rain7	-0.677	0.762*	0.529
Rain8	-1.052***	0.198	-0.021
Rain9	-1.646***	-0.613**	-0.806***
Rain10	-0.42	0.097	-0.113
Rain11	2.120***	0.367	0.587
Rain12	0.608	1.128*	0.603
Constant	12,903.000***		12,594.230***
Observations	2,321	2,321	2,321
R2	0.093	0.095	0.199
Adjusted R2	0.079	-0.038	0.186
F Statistic	6.493*** (df = 36; 2284)	5.909*** (df = 36; 2023)	197.542***

註：\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

附件 2 文旦柚模型檢定結果

	F 檢定		Hausman 檢定	
	檢定量	P value	檢定量	P value
OLS 及固定型效應比較	14.42(df:261,2023)	<2.2e-16***		
固定型及隨機型效應比較			172.18(df:36)	<2.2e-16***

註：\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

附件 3 文旦柚產量固定型效應預測模式(方法一)

Variables	Est.	Sd	T	P
Max_02	2.943e+02	9.220e+01	3.193	0.001442 **
Max_04	2.043e+02	7.757e+01	2.634	0.008533 **
Max_09	-1.737e+02	7.444e+01	-2.334	0.019745 *
Max_11	-6.509e+02	1.123e+02	-5.796	8.40e-09 ***
Min_02	-1.813e+02	1.242e+02	-1.459	0.144818
Min_06	-5.660e+02	9.962e+01	-5.682	1.62e-08 ***
Min_11	3.150e+02	1.035e+02	3.043	0.002386 **
Rain_04	-1.676e+00	8.825e-01	-1.899	0.057807



氣候變遷對台灣農業生產影響分析—文旦柚



Rain_06	-4.146e-01	2.315e-01	-1.790	0.073612
R2	0.6758			
Adjusted R2	0.6153			
F Statistic	11.16***(df:257;1376,P< 2.2e-16)			

註：\*p<0.05; \*\*p<0.01; \*\*\*p<0.001

附件 4 文旦柚產量一般線性預測模式(方法二)

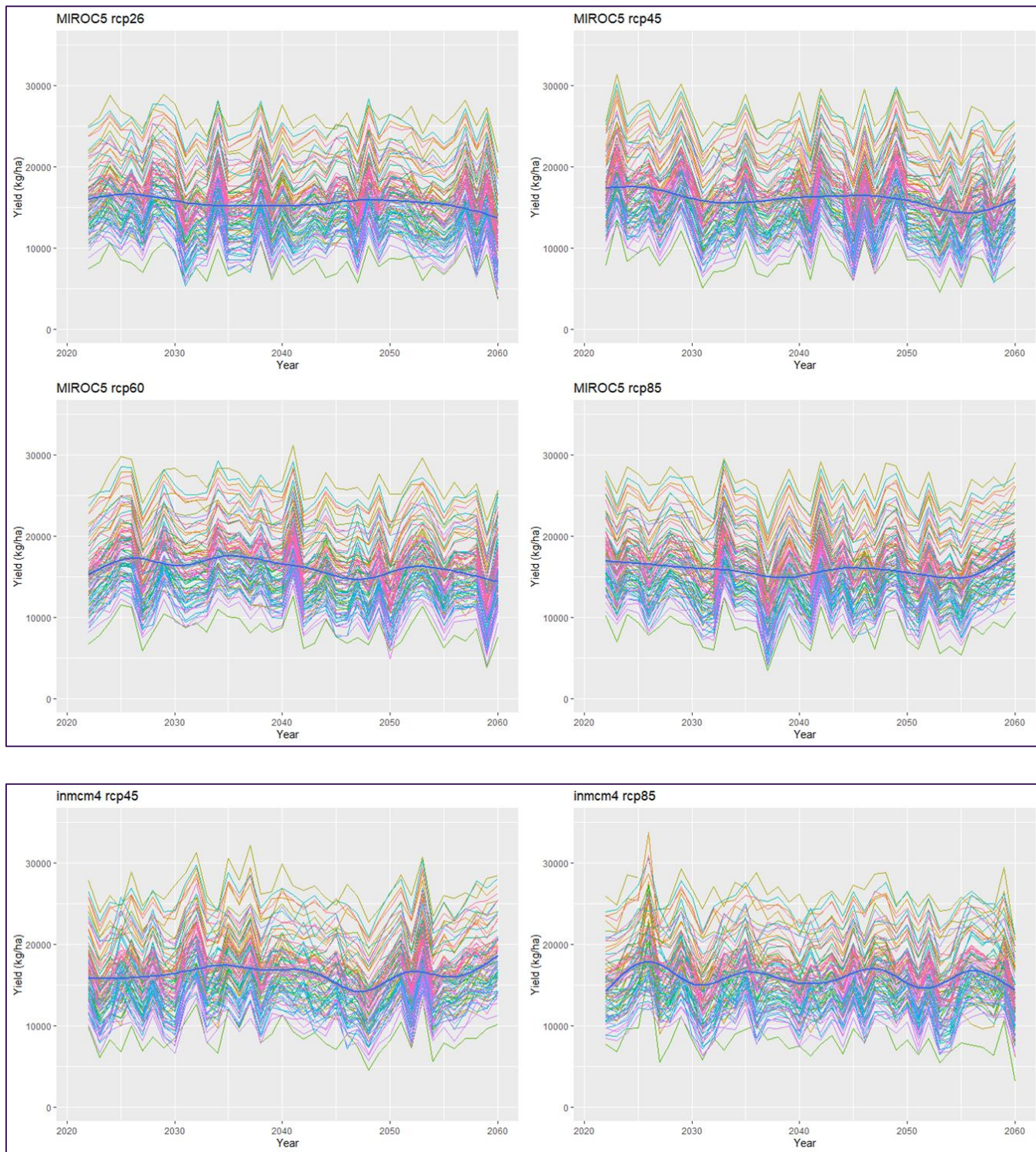
Variables	Est.	Sd	T	P
Intercept	11955.8923	1470.2064	8.132	8.29e-16 ***
Max_02	209.7768	101.9610	2.057	0.03980 *
Max_04	160.8781	88.2032	1.824	0.06834
Max_09	-55.8294	75.1938	-0.742	0.45791
Max_11	-43.0370	117.6073	-0.366	0.71446
Min_02	-153.1599	125.1307	-1.224	0.22113
Min_06	-120.3907	95.3791	-1.262	0.20705
Min_11	-72.9509	119.5735	-0.610	0.54189
Rain_04	-1.2264	1.1076	-1.107	0.26836
Rain_06	-0.8836	0.3238	-2.729	0.00642 **
R2	0.03039			
Adjusted R2	0.02502			
F Statistic	5.656***(df:9;1624,P=9.76e-08)			

註：\*p<0.05; \*\*p<0.01; \*\*\*p<0.001

# 氣候變遷對台灣農業生產影響分析—文旦柚



附件 5 上：MIROC5 模式中 rcp26、rcp45、rcp60、rcp85 推估各鄉鎮區產量逐年變化折線圖；下：inmcm4 模式中 rcp45、rcp85 推估各鄉鎮區產量逐年變化折線圖

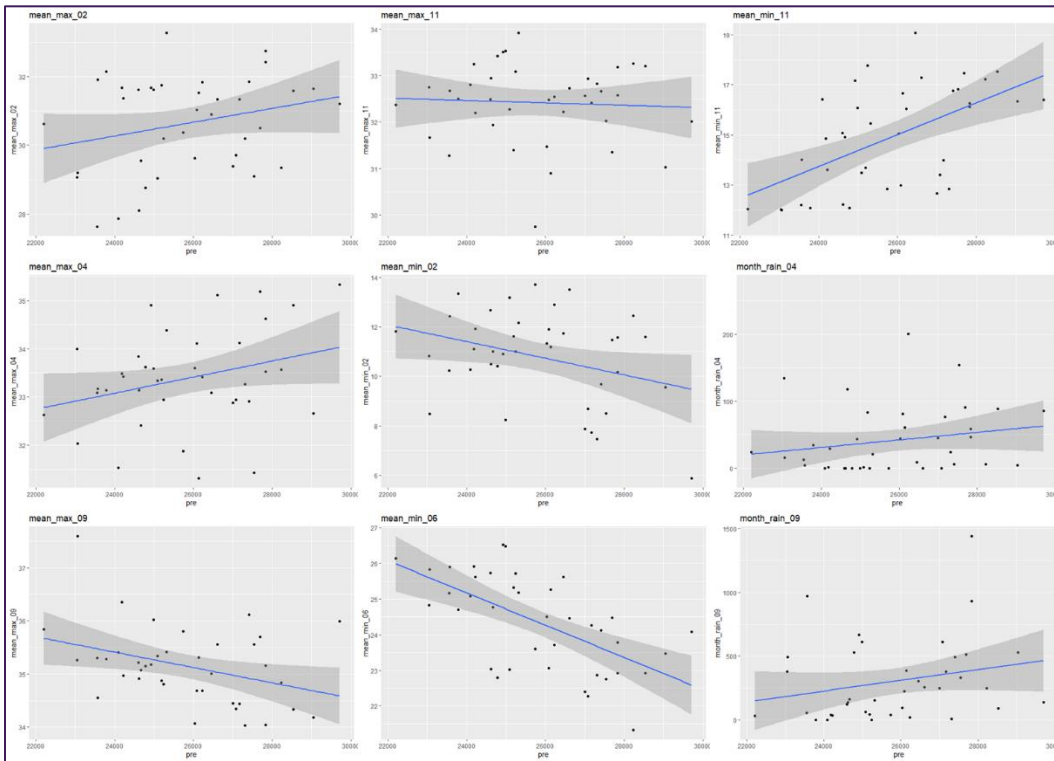
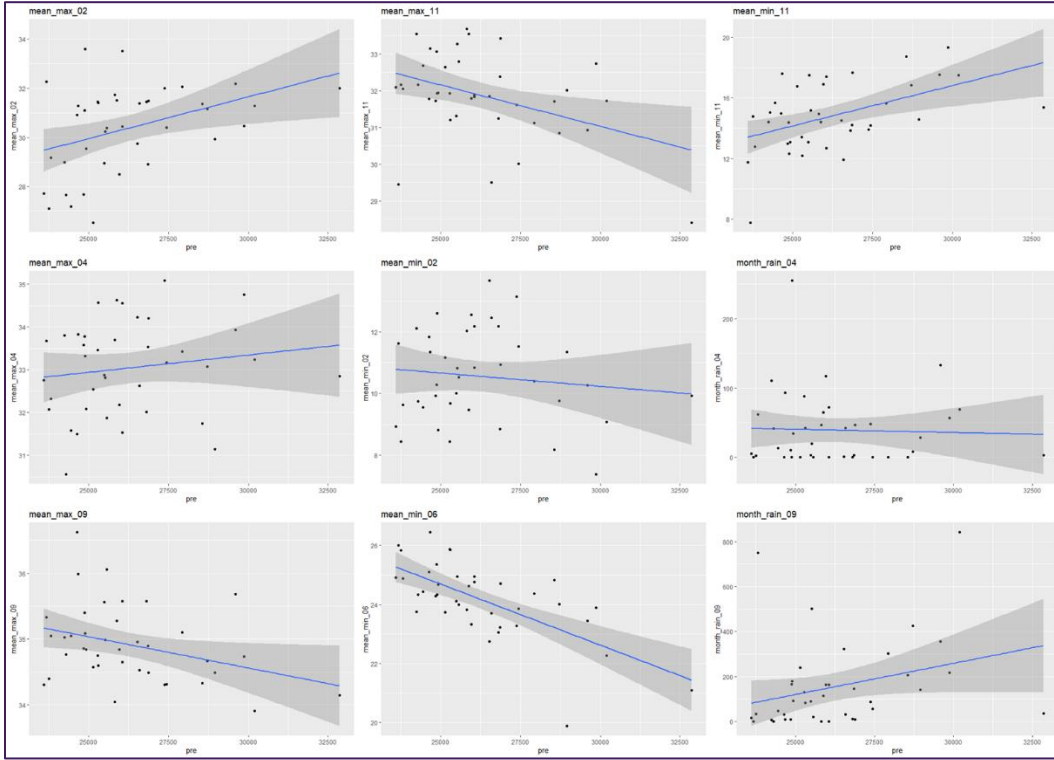




# 氣候變遷對台灣農業生產影響分析—文旦柚



附件 6 上：台南市麻豆區 GFDL-CM3 模式中 rcp60 推估產量及 9 天氣因子散佈圖；下：台南市麻豆區 GFDL-CM3 模式中 rcp26 推估產量及 9 天氣因子散佈圖





## 捌. 參考文獻

- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., . . . Eyring, V. (2014). Evaluation of climate models. In *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741-866). Cambridge University Press.
- Ganjiu, Y. (2003). Studies on photosynthetic characteristics of Guanximiyu pomelo variety. *Acta Horticulturae Sinica*, 30(5), 519-524.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Lamarque, J.-F. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1), 5-31.
- 農作物災害預警平台. (2021). <https://disaster.tari.gov.tw/ARI/>
- 陳溪潭. (1998). 麻豆文旦栽培管理. 臺南區農業改良場技術專刊(78), 2-11.
- 陳溪潭. (2000). 台灣柚類品種果實特性介紹. 臺南區農業專訊(33), 14-24.