

日月潭地區彩虹天氣條件之分析與應用

許宸璋¹ 周昆炫*^{1,2}

¹中國文化大學地學研究所 ²中國文化大學大氣科學系

(中華民國 112 年 10 月 17 日收稿；中華民國 113 年 1 月 12 日定稿)

摘 要

彩虹是獨特的大氣光學現象，地球上許多地區因為不同的自然條件互相配合而容易形成彩虹，甚至成為當地觀光特色。在台灣南投的日月潭風景區因位處山區，夏季午後常有熱雷雨發生，雨後時常出現彩虹並被附近氣象觀測員及觀光客捕捉。因此若可利用氣象資料分析形成日月潭彩虹現象的氣象條件，甚或用於預測，不僅可促進當地大氣現象之學術研究價值，並對當地觀光提供更豐富特色。

本研究先將個案分為有彩虹、有熱雷雨無彩虹及無熱雷雨三類進行挑選，透過網路圖片先確認彩虹的現象發生，再使用日月潭測站、探空、雨量圖、雷達圖、日照時數等資料比對有彩虹及無彩虹個案中日月潭周遭降水情形及有無日照之大氣條件，並利用NCEP FNL全球模式分析資料合成CAPE值、K指數、850hPa高壓邊緣及風場進行三類個案分析，最後比對中央氣象署QPF預報資料分析其預報參考性。

從探空資料可看出大部分有彩虹及有熱雷雨無彩虹個案有較高的K指數，無熱雷雨個案則較低，有彩虹及有熱雷雨無彩虹差異較小，CAPE值也呈現相似結果。雷達分析結果顯示絕大部分有彩虹之個案，在日月潭東側有降水回波，同時在西側無回波或較弱回波，無彩虹個案則缺乏其中一項或均不滿足，此結果對於彩虹的形成扮演重要決定性因素。而比對日月潭測站日照時數及降水資料發現，有彩虹個案可同時觀測到微量日照及降水，無彩虹則兩者關係差異較大，同步性較低。從NCEP FNL模式分析資料分析K指數及CAPE值也近似於前述探空資料分析，有彩虹及有熱雷雨無彩虹個案有較高K指數，無熱雷雨則較低。高壓邊緣部分，無熱雷雨個案相較有熱雷雨及彩虹個案偏西；有熱雷雨及彩虹個案之近地面風向為南風至東南風，無熱雷雨則為偏東風。比對QPF預報資料則可看出有彩虹個案所預報之降雨類型較為零散，有熱雷雨無彩虹覆蓋性較廣，且雨量較大，無熱雷雨與實際觀測則容易有高估情形。

關鍵詞：彩虹、熱雷雨、K指數、CAPE值、QPF

* 通訊作者：周昆炫，E-mail: zkx@ulive.pccu.edu.tw

一、前言

彩虹是自然界中的壯麗光學現象，總能吸引人們的關注和欣賞。它們的形成需要光源（通常為太陽）照射到大氣中的水滴，陽光透過水滴內折射及反射等一系列物理過程，以特定的角度產生七色光譜，由於產生彩虹需要特定大氣物理過程，因此彩虹的在不同地區出現的頻率和呈現方式也有所差異。當陽光進入水滴時，先發生折射，然後在水滴內部反射，最後再折射出水滴，在這個過程中，由於太陽光是由七種不同顏色的光組合而成，不同顏色的光具有不同的折射角，形成我們看到的彩虹，而由於彩虹是經過水滴內部反射的太陽光，成像的位置會處於光源的反向，此外，包含水滴的大小，太陽的仰角等都是影響彩虹成像的因素，因此陽光、大氣中的水滴都是形成彩虹不可或缺的條件。

回顧過去的文獻，如 Können (2017) 研究大氣粒子的大小、形狀及成份等不同物理特性，並探討其產生多樣的大氣光學現象。Businger (2021) 研究對夏威夷地區彩虹現象進行深入探討，重點分析了綜觀尺度大氣環境、地形以及不同季節對彩虹形成的影響。該研究提出了一個全面的框架，

以評估大氣條件、地形特徵和降水型態如何共同影響彩虹出現的機率。此外，該研究還強調了利用觀測資料開發專業應用程式，應用程式可以在特定大氣條件下預測彩虹出現的機會，並即時通知民眾。周 (2020) 研究東北季風和台灣北部中尺度山脈形成之長延時彩虹，透過安裝定點式攝影機分析彩虹出現時間、地點及持續時間，並根據過去彩虹發生之大氣條件作為背景值，再使用台灣北部地面降雨、風向、風速及濕度等計算模式預測值，再根據其結果比對背景值的差異作為彩虹預測指標。雖然從上述可了解近期已有學者針對形成彩虹現象的條件進行研究，但研究數量及相關內容仍然有限。

台灣由於地理位置特殊，東臨太平洋，西臨歐亞大陸，四面環海，使其受季風影響顯著。加上台灣地勢變化劇烈，造就台灣多元的降雨條件，當然也提供了形成彩虹的理想環境。在夏季，由於盛行西南風，加上海陸加熱差異所產生局部環流，遇到陡峭的台灣地形舉升輻合後容易產生午後熱對流降水現象，而位於南投的日月潭由於地理位置位於中部山區且四面環山，容易受到午後熱對流系統影響，隨著接近傍晚日落，熱力驅動減緩使得對流逐漸消散，

降雨趨緩時，時常有彩虹現蹤。固本研究針對夏季 7 至 9 月期間，探討午後熱對流後形成彩虹相關天氣條件分析及統計，希望藉由不同天氣條件的研究比較，找出影響彩虹生成的主要原因，並探討應用中央氣象署作業單位預報資料作為參考指標的可行性。

在台灣夏季，尤其是 7~9 月，為台灣午後熱對流降雨最活躍的季節，陳等人(2009)針對中北台灣暖季弱綜觀午後熱對流氣候特徵分析，並分為梅雨季(5、6 月)，夏季(7、8 月)，發現中台灣夏季午後熱對流較北部活躍，梅雨季午後熱對流特性受到暖溼西南氣流影響，夏季則由局部環流扮演主要角色。林等人(2012)分析 2005~2008 年暖季(5~10 月)發現台灣地區對流活動受地形分佈影響，且中南部對流活動較北部地區活躍，持續時間較長，強度也較強。朱等人(2017)探討台南地區弱綜觀降雨特性，指出山區午後對流的強度變化受到風速、溼度、溫度等相關熱力機制影響。張和黃(2016)針對 2016 年梅雨季午後對流降水分析，亦指出由於 2016 年台灣周遭環境溫度增加，加強垂直熱力不穩定度，使得午後對流降水頻率增加，顯示大尺度環境場也是影響台灣地區午後對流

的重要因素之一。陳和吳(2019)使用高解析三維雲解析模式及陸地模式模擬都市、牧場、草地三種不同總地面通量與蒸發比的理想島嶼，其陸地與大氣之交互作用對於對流強度及日降水變化強度的影響，初步結果顯示歷經都市化及砍伐過程的情況下，降水日變化強度及極端降水事件對於陸地大氣交互作用更為敏感。對於本研究主要探討的日月潭地區之午後對流降水，張(2017)分析台灣中部地區雷雨特性，指出日月潭測站不論平均雷暴日數或平均降雨量，均以 7~9 月的颱風及午後對流為大宗。Sun(2023)提出 CAPE 在不同型態的天氣系統中，其在動力驅動下扮演角色的重要性也有所不同。提出在可壓縮大氣中保守總能量的 Bernoulli function 優於 CAPE 或 Froude number，因為風暴可以在沒有 CAPE 的情況下發展，而下坡風是由於抵抗正浮力的情況下所形成。

本研究除針對午後對流對於彩虹現象形成進行背景條件分析，也將探討目前相關預報資料應用的可行性。賴與洪(2021)從中央氣象署實際預報作業的應用分析及時可用的定量降水預報的客觀指引，包含 QPEQPF、iTEEN、RWRF、LETKF、WRFD 與 TWRF 在高影響天氣的預報特性，結果

顯示中央氣象署以即時雷達回波觀測做為預報外延基礎的 QPEQPF，在作業預報時間第一小時具有最高的校驗分數和可偵測率。以雷達回波影像辨識技術對系集模式預報進行資料探勘和後處理的 iTEEN 在第 2-3 小時預報優於 QPEQPF，但同時伴隨高的誤報率。快速循環更新同化雷達資料和地面觀測的 RWRF 及 LETKF 在第 1-5 小時即時預報的效能評分僅稍低於 iTEEN，第 6-12 小時的極短期預報仍維持不錯的分數。豪雨事件分析中呈現與觀測有中等的相關性，表示在預報降雨區域與型態有不錯的掌握。WRFD 和 TWRF 是中央氣象署的決定性區域模式預報，其即時預報校驗評分大致較低，但偶有優於 RWRF 或 LETKF 的機會，而整體預報能力亦呈現隨著預報時間增加而降低的趨勢。

在暖季時期，台灣中部山區中午過後出現熱對流降水是常見的天氣現象，通常從中午持續至日落，而隨著熱對流降雨進入尾聲，在特定大氣條件配合下容易形成彩虹，並被附近居民、觀光客及日月潭氣象站人員捕捉，並上傳至社群媒體及新聞報導。由於彩虹的出現已經成為日月潭風景區的特色之一，但目前對於其出現的氣

象條件和預測方法的研究仍舊不足，本研究的動機是透過分析日月潭地區午後熱雷雨之降水特徵和大氣條件，來區分有無彩虹現蹤時的午後熱雷雨特性。透過本研究將藉此能夠找出彩虹出現的客觀指標氣象條件，並探討開發相關預測系統的可能性，不僅可以提高對彩虹現象的理解，促進學術研究價值，並且也能為當地觀光注入新的價值和特色。

二、資料與方法

(一) 個案選取

為探討日月潭地區因午後熱雷雨形成彩虹所具備的大氣條件，將按照以下步驟篩選個案：(1)以日月潭氣象站雷雨報告表及新聞媒體報導為依據；(2)剔除外來降雨系統(如:西南氣流、颱風等)影響，以台灣本島發展之午後對流系統為主；(3)將個案分為有彩虹日、有熱雷雨無彩虹及無熱雷雨個案共 3 組，每組共選取 9 日，選取時間為 2019 至 2021 年的 7 月至 9 月，總個案數 27 日。有彩虹個案定義主要以社群或新聞媒體之照片為證，如圖 1；有熱雷雨無彩虹個案為無社群或新聞媒體之照片，但日月潭雷雨報告表有相關雷雨記錄；無熱雷雨為兩者均無相關記錄。



圖 1：有彩虹個案日引用 Facebook 網友授權及自由時報報導之圖像。(a)~(i)分別為 2019 年 7 月 22 日、8 月 14 日，2020 年 7 月 19 日、8 月 6 日、8 月 8 日、8 月 13 日，9 月 11 日，2021 年 7 月 12 日、7 月 28 日。

(二) 使用資料

本研究分析採用時間為 2019 年至 2021 年的 7 月至 9 月，為了分析對流發展前綜觀大氣環境條件，使用台灣內陸較常用於分析午後對流的板橋、澎湖及屏東探空資料，選取時間點為 00UTC。其他觀測資料採用日月潭氣象站雷雨報告表、中央氣象署整合雷達及南屯降雨雷達、累積雨

量、署屬日月潭氣象站逐時降水及日照時數資料。採用 NCEP FNL 全球分析資料作為模式與觀測的比對，並使用中央氣象署定量降水預報資料 (Quantitative Precipitation Forecast, QPF) 作為彩虹預報的參考指標。

(三) 分析方法

1. 探空資料

使用 2019 年至 2021 年澎湖、板橋及屏東 00UTC 探空資料，並分析其 K 指數 (K-index, KI) 及對流可用位能 (Convective Available Potential Energy, CAPE)，K 指數反應大氣對流運動的強弱，當 K 指數越大，對流活躍度越高，CAPE 值為衡量大氣對流運動可獲得之最大潛能，當 CAPE 值越高，則容易有更劇烈之對流活動，因此從不同種類個案數值之差異，以了解個案當日之大氣對流條件。其公式如下：

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (2.1)$$

其中， T_{850} 是 850 hPa 的溫度， T_{500} 是 500 hPa 的溫度， T_{d850} 是 850 hPa 的露點溫度， T_{700} 是 700 hPa 的溫度， T_{d700} 是 700 hPa 的露點溫度，溫度單位為 $^{\circ}\text{C}$ 。

$$CAPE = \int_{z_f}^{z_n} g \left(\frac{T_{v,parcel} - T_{v,env}}{T_{v,env}} \right) dz \quad (2.2)$$

其中， z_f 為自由對流高度 (Level of free convection, LFC)， z_n 為平衡高度 (Equilibrium level, EL)， $T_{v,parcel}$ 為氣塊虛溫， $T_{v,env}$ 為環境虛溫，單位為 J/kg。

2. 雷達資料

使用 2019 至 2021 年的 7 月至 9 月中央氣象署整合雷達及南屯降雨雷達資料，除 2019 年南屯降雨雷達尚未啟用，僅以中

央氣象署整合雷達資料呈現，2020 年及 2021 年個案均以南屯降雨雷達資料作為主要分析資料，並從 9 個案中依類別各挑選一個做為代表。由於彩虹出現時間以接近日落前為主，因此擷取南投地區下午 5 點 30 分之雷達資料，以分析當地降水回波分布情形。

(四) 降雨資料

本研究使用中央氣象署累積雨量圖並擷取當地時間下午 6 時之前 (00-18 LST) 的累積雨量圖，個案代表同雷達資料，以當天日落前的降雨之分布情形，分析並探討彩虹個案與無彩虹個案間降水分布差異。

(五) 日月潭氣象站

由於日照及降水是形成彩虹的重要條件，因此使用個案當日的日月潭氣象站 12LST~18LST 逐時降水及日照時數資料，並將三組個案分別進行逐時日照及時雨量平均，得出個案日每小時日月潭降水及日照情形，以探討三組個案在日照及降水差異。

(六) NCEP FNL 全球分析資料

在本研究中，我們利用美國國家環境預報中心全球分析資料 (NCEP FNL) 所提

供之變數，包含 K 指數，CAPE 值進行模式資料與實際觀測之比對，以評估模式在預測天氣狀況方面的準確性，此外，透過分析 850hPa 高度場及風場，了解不同種類個案間於模式表現之差異。

(七) 定量降水預報資料

運用中央氣象署的定量降水預報資料(QPF)，並選用上午 11 點 30 分發佈之預報資料，有效時間為 08LST~20LST，個案代表同雷達資料，以此預報資料來探討是否可用來區分日月潭地區在三種分類下的預報降水差異，了解預報資料在預測熱雷雨及彩虹上的可用性和準確度。透過對這些資料的深入分析，我們能更了解不同氣象模式在實際應用中的表現，為未來氣象預報的改進提供有益的參考依據。

三、資料分析結果

彩虹形成的天氣條件需滿足太陽在觀察者的位置且高度不超過地平線 42° 、觀察者前方降雨、空氣中有小水滴漂浮及需要足夠晴朗的天氣。以下將針對對流條件、雷達回波、地面降雨及日照量等條件進行分析。

(一) 觀測資料分析

1. 探空資料分析

為了解個案日大氣穩定度，本研究使用探空資料 K 指數與對流可用位能(CAPE)為分析指標。K 指數依據不同等壓面上的氣溫及露點溫度參數計算得出，普遍應用於雷暴預測指標，K 指數越大發生雷暴機率越高，大於 20 即有機會產生雷暴，大於 25 可產生零星雷暴，大於 30 可產生較密集雷暴；CAPE 值則用於推估引發對流的強度指標，CAPE 值越高代表提供發展對流活動能量越大，有利於產生強烈對流活動，但仍需其他大氣條件配合。圖 2 分別為板橋、澎湖及屏東於有彩虹、有熱雷雨無彩虹及無熱雷雨三類個案日 00UTC 探空資料。若從區域角度，板橋探空 K 指數在有彩虹個案僅有一個案小於 25，其餘均大於 25 (圖 2a)。有熱雷雨無彩虹僅有兩個案小於 30，其餘均大於 30 (如圖 2b)。圖 2c 顯示無熱雷雨有四個案小於 25，其餘大於 25；澎湖探空於有彩虹個案，五個案大於 30，一個案大於 40 (圖 2d)，有熱雷雨無彩虹個案所有個案大於 30 (圖 2e)。無熱雷雨個案則有四個案大於 30，四個案大於 20，一個案小於 20 (圖 2f)；屏東探空於有彩虹個案六個案大於 30，其餘均大於 25 (圖 2g)，有熱雷雨無彩虹一個案小

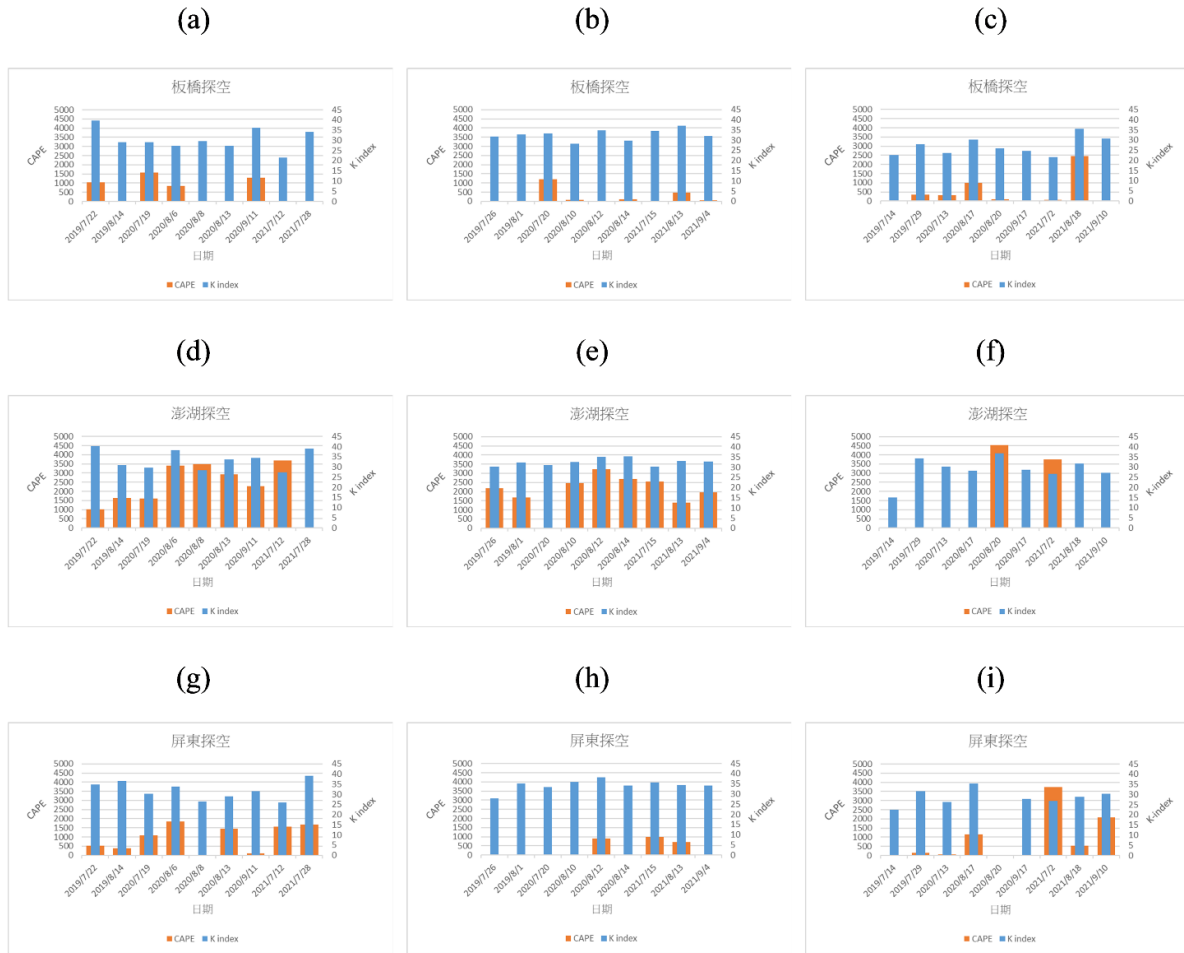


圖 2：各探空三類別個案日 00UTC 探空資料。(a)~(c)為板橋探空，由左至右依序為有彩虹、有熱雷雨無彩虹及無熱雷雨；(d)~(f)同(a)~(c)，但為澎湖探空；(g)~(i)同(a)~(c)，但為屏東探空。

於 30，其餘均大於 30 (圖 2h)，無熱雷雨個案僅兩個案大於 30，一個案無資料，其餘均小於 30 (圖 2i)。CAPE 值部分，板橋探空 (圖 2a-c)及屏東探空 (圖 2g-i)在三類別個案呈現上無明顯差異，僅澎湖探空 (圖 2d-f)在有彩虹及有熱雷雨無彩虹多數個案觀測較明顯 CAPE 值，無熱雷雨個案則多數個案 CAPE 值較低。

2. 雷達資料分析

圖 3a-c 為有彩虹個案 17:30 LST 雷達

回波資料，紅黃等暖色系代表較強降水回波，綠藍等冷色系代表較弱降水回波。從有彩虹發生之個案的觀察，可發現日月潭周遭降水回波較弱，顯示較低的降雨強度。此外，降水回波於日月潭東側的強度較西側強，加上陽光此時位於日月潭西側，與構成彩虹現象所需的光學條件相符。相較於有彩虹個案，在有熱雷雨無彩虹個案(圖 3d-f)之雷達回波可看出日月潭周遭有較強降水回波，顯示較高降雨強度，且降水回

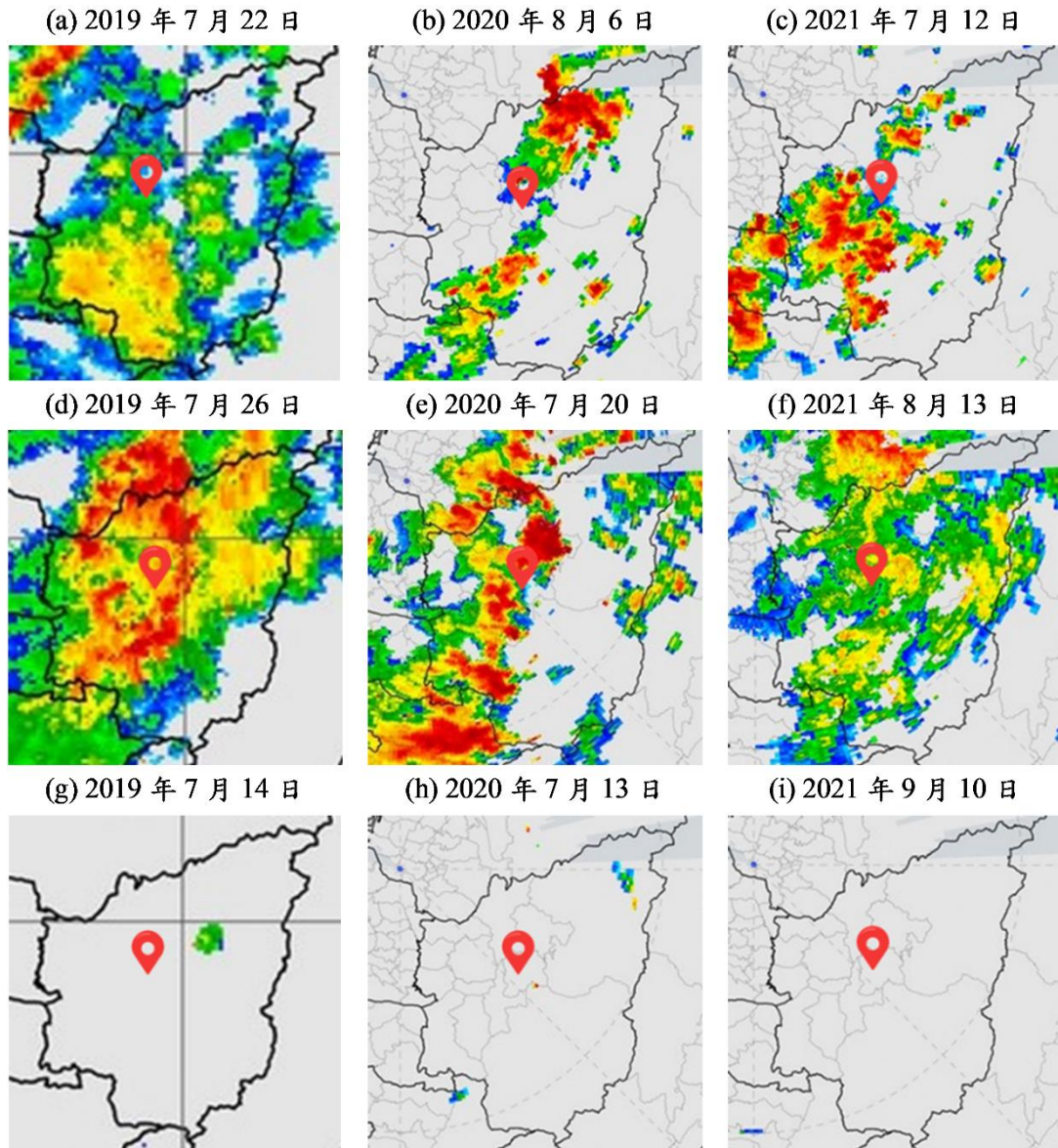


圖 3：三類別個案雷達回波。第一列為有彩虹、第二列為有熱雷雨無彩虹及第三列無熱雷雨個案。(a)~(i)個案時間分別為 2019 年 7 月 22 日、2020 年 8 月 6 日、2021 年 7 月 12 日、2019 年 7 月 26 日、2020 年 7 月 20 日、2021 年 8 月 13 日、2019 年 7 月 14 日、2020 年 7 月 13 日、2021 年 9 月 10 日。

波面積明顯較廣，並直接覆蓋於日月潭上空。部分個案降水回波分佈集中於日月潭西側，如此的對流空間分布對於陽光射入容易造成遮擋，不易滿足形成彩虹的條件。無熱雷雨個案，如圖 3g-i 所示，則無

降水回波分佈。對照前述彩虹形成所需之光學條件，降水回波的強度及分佈對於彩虹的形成具有決定性因素。

3. 午後對流之降雨分布及降雨頻率分析

由於彩虹出現需要足夠陽光，因此使

用當日時間下午 6 點為止之中央氣象署累積雨量 and 日月潭氣象站逐時降雨量資料，用以觀察降雨分布和時間與有無彩虹個案的關聯性。從中央氣象署累積降雨量資料(圖 4a-c)可看出南投地區(紅色框處)多數有彩虹個案區域降雨量約略落在 20 mm 以內，雖有部分降雨較明顯地區，但分佈較

零星，區域較小；有熱雷雨無彩虹累積降雨(圖 4d-f)可看出南投大部分地區均有明顯降水情形，部分個案出現超過 30 mm 之累積降雨，且影響區域較有彩虹個案廣；無熱雷雨個案，如圖 4g-i 所示，則於南投境內無降水情形。

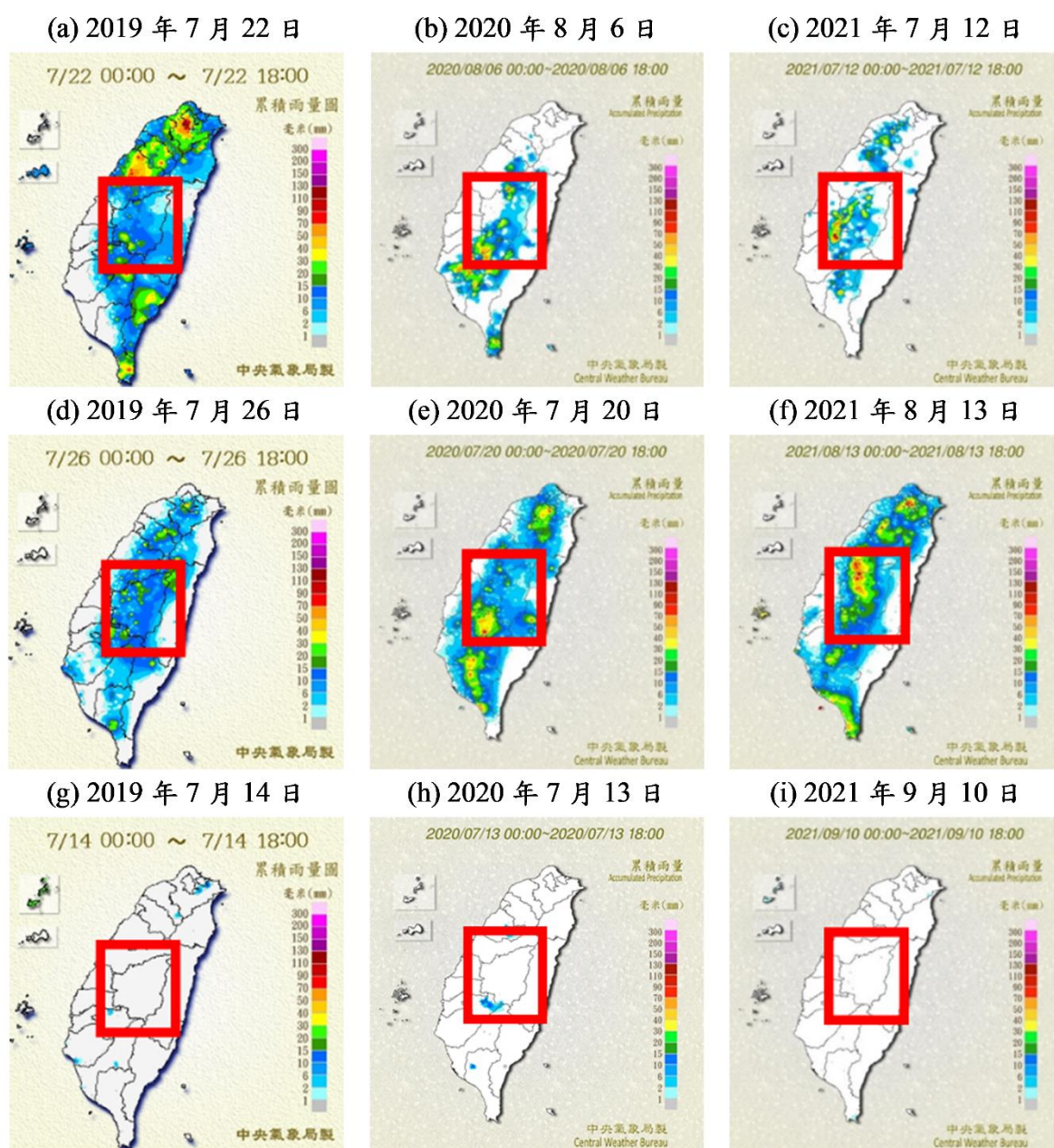


圖 4：同圖 3，但為三類別個案當日 18 小時累積雨量。

4. 日月潭測站逐時降水及日照分析

根據日月潭氣象站平均逐時降雨量與日照時數資料可發現，有彩虹個案(圖 5a)，降雨時間始於 15 LST，且大部分降雨頻率低於每小時 10 mm，尤其在日落前 17~18 LST，每小時降雨不到 1mm，可推測個案之降雨情形較為微弱，傍晚日落前降雨趨緩僅剩微量降雨。有熱雷雨無彩虹個案，

如圖 5b，降雨時間始於 13 LST，並於 15 LST 達最大值，雖然降雨量隨著日落趨緩，與有彩虹個案相似，但降雨強度平均最大值達 7~8 mm，日落前(17~18 LST)也有 1~4 mm，明顯較有彩虹個案高，顯示有熱雷雨無彩虹個案降雨情形較有彩虹個案更為顯著。無熱雷雨個案，如圖 5c 所示，則無降雨觀測值。

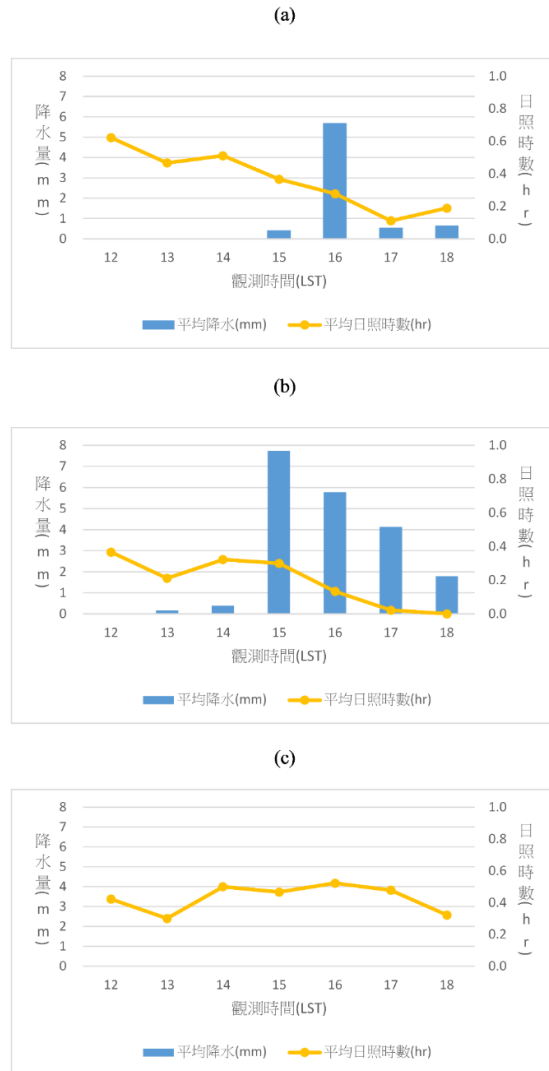


圖 5：日月潭測站逐時降雨量及日照時數。(a)~(c)分別為有彩虹個案、有熱雷雨無彩虹、無熱雷雨。

使用日月潭氣象站平均逐時日照時數可發現，有彩虹個案(圖 5a)在日落前的日照時數約 0.1~0.3 小時，配合前述微弱的降雨，是形成彩虹有利的環境條件。有熱雷雨無彩虹個案(圖 5b)在日落前(17~18 LST)日照時數趨近於零，較大的降水可預期雲層也比較深厚，降低了陽光穿透的機率。無熱雷雨個案(圖 5c)儘管有充足的日

照，但未有降水發生，因此沒有機會產生彩虹。此外，針對有彩虹及有熱雷雨無彩虹個案，進一步將其每一筆逐時雨量及日照時數進行相關性分析(圖 6)，可發現有彩虹個案的降水及日照間相關性較有熱雷雨無彩虹個案低，亦可看出有彩虹個案有較多資料點同時有觀測到降水及日照時數。

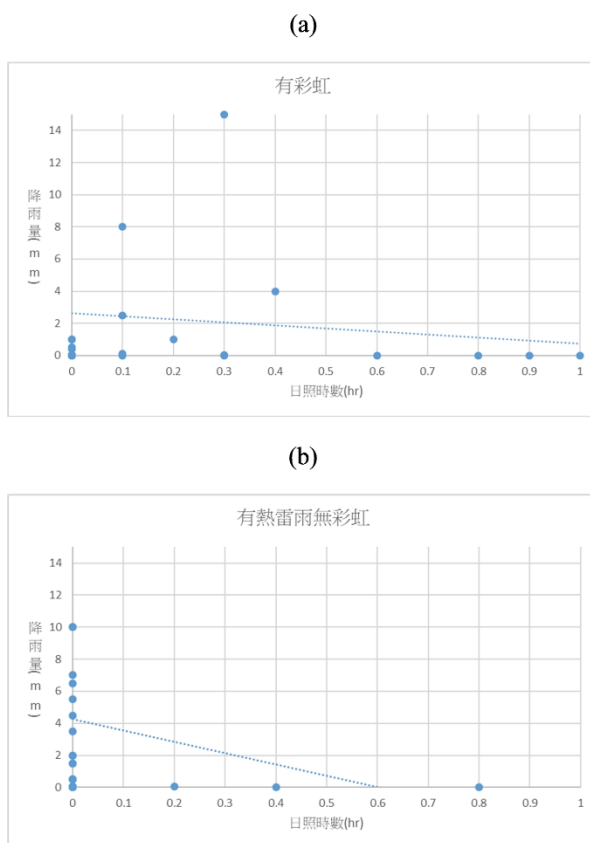


圖 6：降雨量與日照時數散布圖及線性趨勢線。(a)~(b)分別為有彩虹及有熱雷雨無彩虹個案 16 及 17 LST 資料。

5. 日月潭彩虹之觀測條件分析及討論

綜合上述觀測分析結果，可發現形成彩虹的關鍵因素包括適當的降雨和日照條件。首先，從板橋、澎湖及屏東三地探空

分析中，有彩虹及有熱雷雨無彩虹兩類在大部分個案中有較高 K 指數，無熱雷雨則明顯較低。CAPE 值在三個地區的略有不同，澎湖的探空在無熱雷雨個案 CAPE 值

較低，有彩虹及有熱雷雨無彩虹則明顯較高，但板橋及屏東兩地探空則在三種分類都沒有明顯差異。在雷達分析中，有彩虹個案最主要的特徵就是降水回波多分布於日月潭東側，西側降水回波側弱，甚至無降水回波；反觀有熱雷雨無彩虹個案的降水回波分布明顯較廣，且回波強度也較大；無熱雷雨個案則無降水回波。從累積雨量圖呈現之降雨分佈情形可發現，有彩虹個案之累積降雨在南投地區多為零星分佈，雖有部分區域有明顯降雨，但範圍較小；有熱雷雨無彩虹則出現較顯著降雨，且分佈範圍較大，累積雨量也較高；無熱雷雨則無出現降雨情形。另外，從日月潭氣象站觀測之平均降雨及日照時數，大部分有彩虹個案在逐時降雨頻率較有熱雷雨無彩虹低，顯示有彩虹個案之雷雨降雨強度較弱，無熱雷雨個案則無觀測到降雨，此外，有彩虹個案較有熱雷雨無彩虹更容易觀測到日照，進一步結合逐時降雨頻率可發現，有彩虹個案在日落前 1 至 2 小時容易觀測到少量的降雨及短暫時間之日照；有熱雷雨無彩虹則容易觀測較多降雨，但日照時數較低並趨近於零；無熱雷雨個案則僅有日照而無降雨。

(二) NCEP FNL 模式資料合成分析

將上述分析個案依類別進行合成分析，如圖 7a-c 為 K 指數合成分析場。有彩虹(圖 7a)及有熱雷雨無彩虹個案(圖 7b)K 指數在台灣附近及上空均超過 30，其中，有熱雷雨無彩虹合成值在中南部山區及平原均較有彩虹高，這顯示有熱雷雨無彩虹個案在午後對流活動的活躍度上，明顯高於有彩虹的個案。無熱雷雨個案合成值則較前兩者低，顯示環境場較不利於午後對流發展，進一步針對台灣中部地區進行區域平均，可發現 K 指數由高至低為有熱雷雨無彩虹、有彩虹、無熱雷雨個案，對應前段探空觀測資料分析，在澎湖探空及屏東探空也反應出類似差異。圖 7d-f 為 CAPE 合成分析場，雖然在有熱雷雨無彩虹個案中，中部山區較低 CAPE 值的區域範圍較小，但在台灣其他區域，三類別個案並未呈現明顯差異，進一步針對台灣中部地區進行區域平均，可發現 K 指數由高至低為有熱雷雨無彩虹、無熱雷雨、有彩虹個案，但三者個案數值差距不大，對應前段探空觀測資料分析，澎湖探空及屏東探空在三類別個案間呈現之差異也較小。圖 8a-c 為 850hPa 合成高度場及風場，有彩虹及有熱雷雨無彩虹個案高壓邊界較靠近台灣，風場主要為南風至東南風；無熱

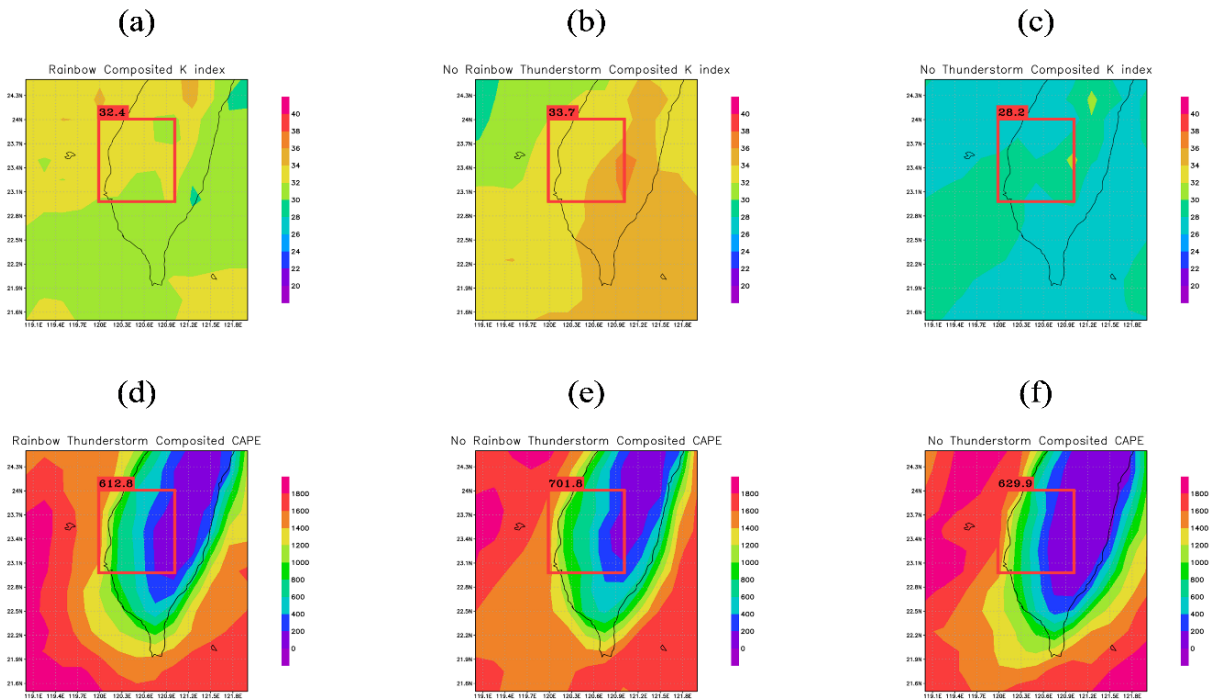


圖 7：NCEP FNL 三類別個案合成圖。(a)~(c)為 K 指數分佈圖，圖上數值為紅框範圍之平均 K 指數；(d)~(f)為 CAPE 值分佈圖，圖上數值為紅框範圍之平均 CAPE 值，單位為 J/kg。由左至右分別為有彩虹、有熱雷雨無彩虹、無熱雷雨個案。

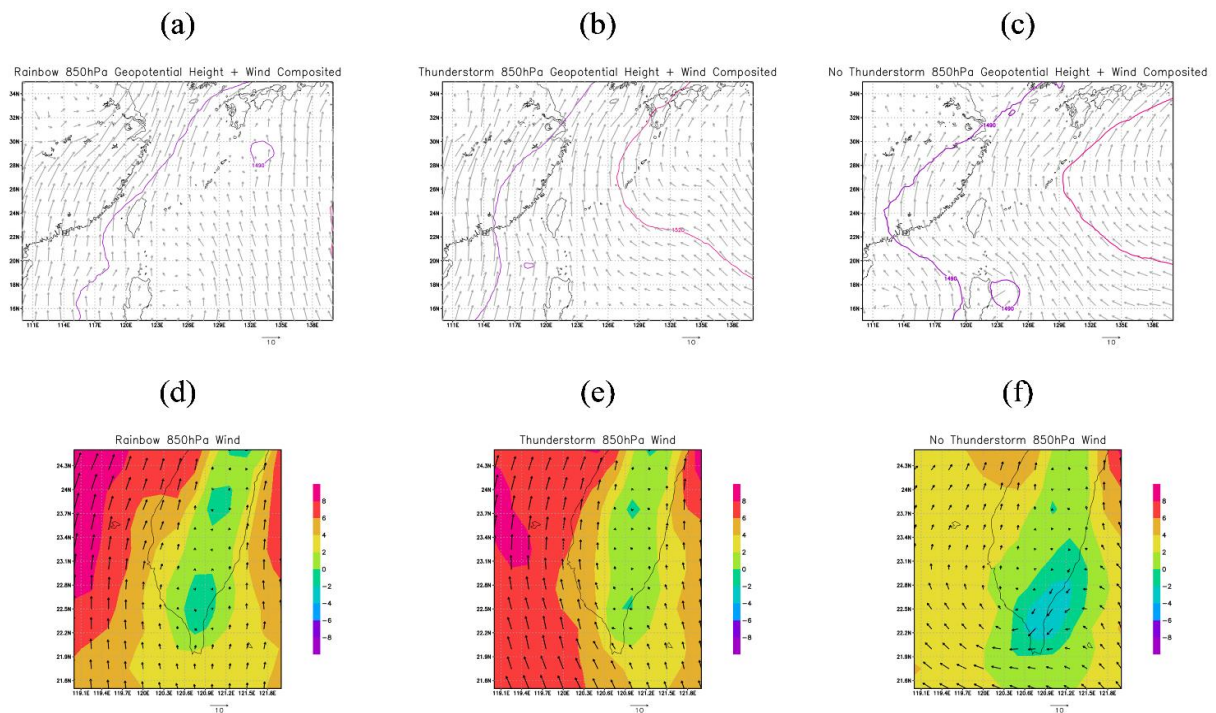


圖 8：NCEP FNL 三類別個案合成圖。(a)~(c)為 850hPa 重力位高度場及風場，紫色等值線為 1490 公尺高度，紅色等值線 1520 公尺高度。(d)~(f)850hPa 風場及南北風速分量(m/s)。由左至右分別為有彩虹、有熱雷雨無彩虹、無熱雷雨個案。

雷雨個案高壓邊界較為西伸，風場則有明顯東風分量。進一步分析將範圍放大至台灣中南部及周遭區域，如圖 8d-f，有彩虹個案及有熱雷雨無彩虹個案風場以偏南風為主，但有熱雷雨無彩虹個案風速較強，無熱雷雨則為偏東風，而由於台灣西南部吹偏南風為午後對流發展之重要因子。因此再針對南北風分量進行分析，此外，可看出有彩虹及有熱雷雨無彩虹在台灣西南部多數區域為正值，代表具有南風分量，且在有熱雷雨無彩虹個案中，正值範圍更廣，且風速較強，無熱雷雨個案多數區域正值較弱，且有部分區域呈現負值，代表出現北風分量。

(三) QPF 預報資料應用

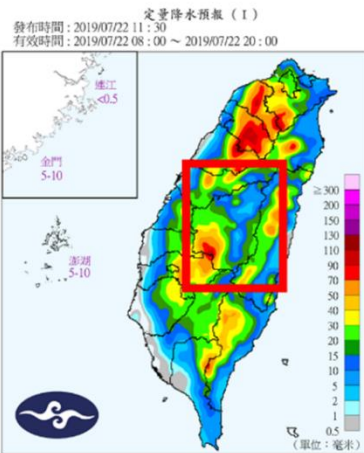
透過前段所述，可了解日月潭地區在有彩虹、有熱雷雨無彩虹及無熱雷雨之大氣環境差異，為探討現行模式預報資料對於彩虹形成條件預測是否有可行性，圖 9 為中央氣象署定量降水預報資料，選取發布時間 11:30LST 之 12 小時預報，在有彩虹個案降水預報(圖 9a-c)，除圖 8a 預報降雨較顯著外，其餘大部分區域呈現降雨量較低，約低於 20 mm，但仍有部分區域預報較明顯雨量，約大於 50 mm，但區域範

圍小且分散；有熱雷雨無彩虹個案(圖 9d-f)在預報呈現為降水量較高且區域範圍較大；無熱雷雨個案(圖 9g-i)，則呈現僅有部分地區有預報降雨，但與實際觀測南投境內無累積降雨情況有較大差異，僅圖 9f 在南投地區無預報降水與實際觀測相符。綜合以上，有彩虹及有熱雷雨無彩虹個案雖然在降水較明顯區域略有差異，但整體降雨類型相近，且不同種類個案間預報呈現之差異與觀測之差異趨於一致；無熱雷雨個案雖然預報降水範圍為三者最小，但有明顯高估情形。

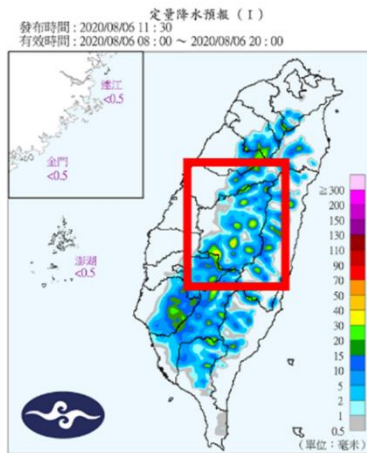
(四) 2019~2021 年夏季熱雷雨探空分析

為了瞭解夏季熱雷雨在不同地區探空表現上的差別，以日月潭雷雨報告表為依據，篩選澎湖探空 2019~2021 年 7 月至 9 月每日 K 指數及 CAPE 值，並分為有雷雨日及無雷雨日(圖 10-11)。在 K 指數分析部分，多數有熱雷雨個案日具有較大 K 指數，多數個案日大於 25，而無熱雷雨個案日容易出現較低 K 指數。CAPE 值方面，有熱雷雨個案多數觀測到 CAPE 值大於 1000 J/kg，而無熱雷雨個案多數則觀測到小於 1000 J/kg。進一步利用 T 檢定分析其差異，得到 K 指數有熱雷雨個案平均為 32.5，無

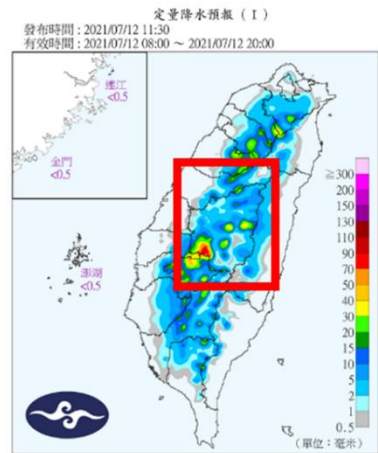
(a) 2019 年 7 月 22 日



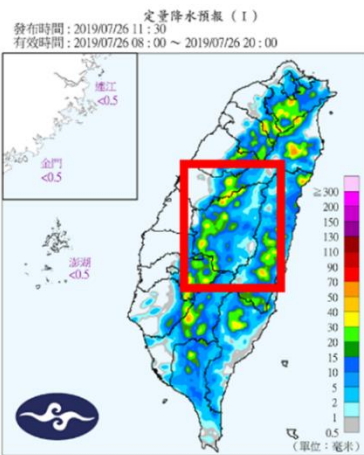
(b) 2020 年 8 月 6 日



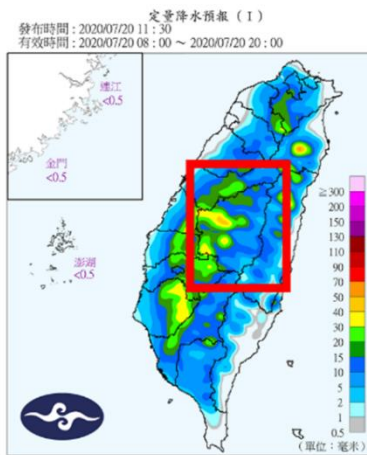
(c) 2021 年 7 月 12 日



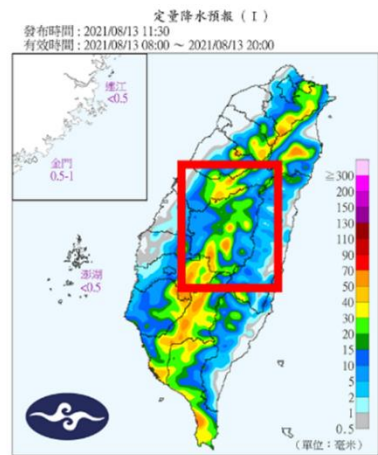
(d) 2019 年 7 月 26 日



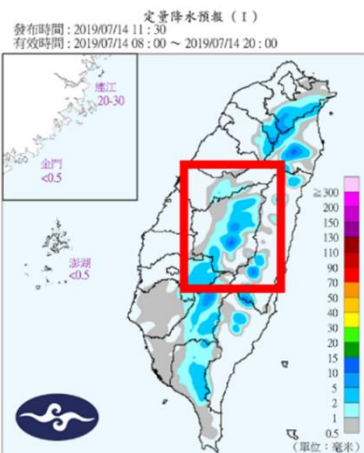
(e) 2020 年 7 月 20 日



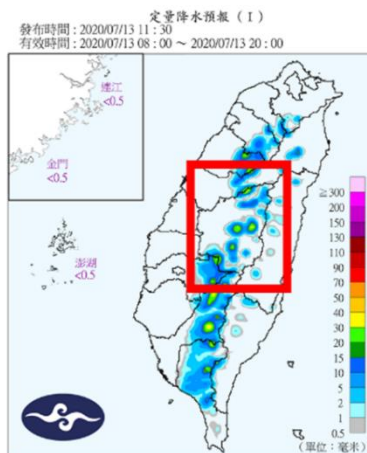
(f) 2021 年 8 月 13 日



(g) 2019 年 7 月 14 日



(h) 2020 年 7 月 13 日



(i) 2021 年 9 月 10 日

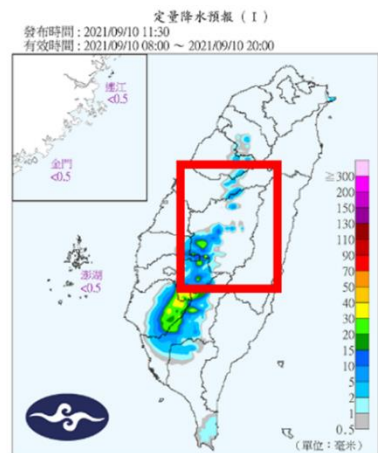


圖 9: 同圖 3, 但為中央氣象署於每日 11 點 30 分發布於官方網站的小時降水預報(QPF), 紅色框處為南投地區。

熱雷雨個案為 30.2, P 值為 0.007; CAPE 值有熱雷雨個案平均為 1659.1 J/kg, 無熱

雷雨個案為 996.1 J/kg, P 值為 0.0003, 由此可知, 澎湖探空資料對日月潭地區有

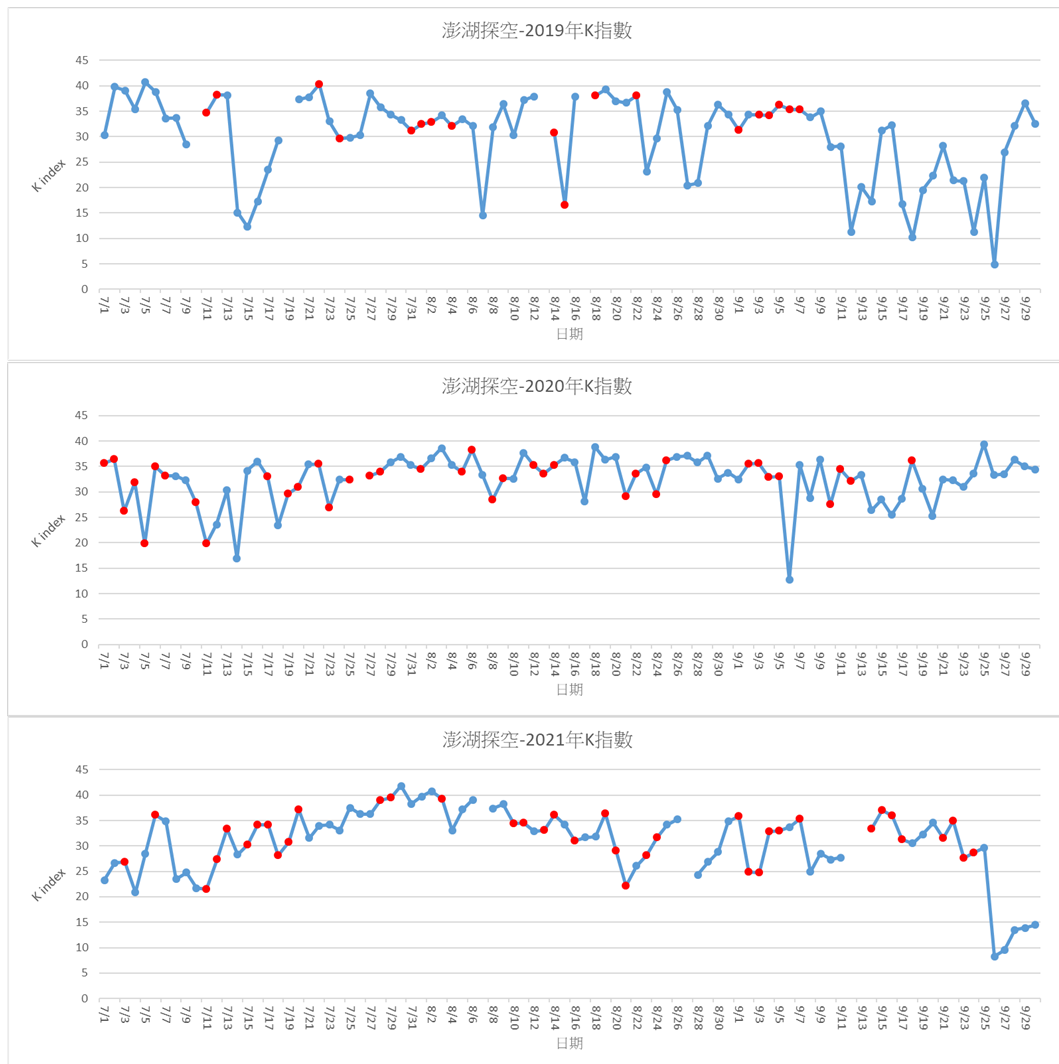


圖 10：澎湖探空 7 月至 9 月 K 指數，紅色資料點為有雷雨個案，由上而下分別為 2019 年、2020 年及 2021 年。

無熱雷雨具有一定程度之差異。除澎湖探空外，亦分析板橋及屏東探空，均有類似差異，但綜合 K 指數及 CAPE 值則為澎湖探空差異較為顯著。

本研究主要利用 K 指數及 CAPE 進行分析，旨在了解當日雷雨發生的機率及強度，並探討不同個案類別之間的差異性。然而，目前僅能觀察到有無熱雷雨之間的

區別。雖然 Sun(2023)提出風暴可以在沒有 CAPE 的情況下發展，而下坡風是由於抵抗正浮力的情況下形成，因此 CAPE 不一定是較適合的對流強度診斷參數。然而，我們認為可能是由對流系統本身動力或熱力主導的差異所造成，冷鋒或氣旋風暴與動力強迫更為相關，因此熱力條件下的 CAPE 可能不是主要的關鍵氣象參數。除



圖 11：同圖 10，但為 CAPE 值(單位：J/kg)。

此之外，林等人(2012)使用模糊邏輯客觀潛勢預報午後對流方法(ATOPFLO)時，將 CAPE 視為預報因子來進行熱對流預報。另外，國家災害防救科技中心(NCDR)所發展的大台北午後對流檢查表中，板橋探空 CAPE 高於 500 J/kg 也是其作業中判斷大台北暴雨的一項檢查指標，顯示國內已有不少學者將 CAPE 視為對流判斷指標條件之一。

四、結論

本研究挑選 2019~2021 年 7 月至 9 月有彩虹、有熱雷雨無彩虹及無熱雷雨個案，並透過探空、雷達、降雨、日月潭氣象站資料，分析其日月潭地區於個案日的大氣穩定度、降雨分布與強度及日照，了解彩虹出現天氣條件的差異。

利用板橋、屏東、澎湖探空比較個案之 K 指數及 CAPE 值，以了解不同類別個

案大氣綜觀環境差異，結果顯示，不論板橋、澎湖及屏東探空對於有彩虹及有熱雷雨無彩虹均觀測到較大的 K 指數，其數值代表個案當日大氣環境有利於對流發展，而有熱雷雨無彩虹個案中，板橋及屏東探空觀測之 K 指數平均值較高，澎湖探空則差異不大。相對地，無熱雷雨個案 K 指數無論何處探空，均為三類別最低，若比較板橋、澎湖及屏東三地的探空，澎湖可觀測較高的 CAPE 值，板橋及屏東在 CAPE 值表現並不顯著，綜合表現，澎湖探空對於日月潭午後熱雷雨發展較具有參考性。雷達分析結果顯示，有彩虹個案日月潭東側的降水回波較強，而西側的降水回波較弱或無回波。由於午後太陽位於日月潭西側，西測較弱或無降水回波的配置較有利於陽光射入，滿足形成彩虹的光學條件，對比有熱雷雨無彩虹，日月潭西側降水回波較強，在雲層較高較厚的情形下不利陽光射入，加上東側水氣不足，不易滿足形成彩虹所需條件。此結果也是形成彩虹關鍵決定性因素。

測站雨量分析資料結果顯示有彩虹個案累積雨量有較為零星與分散的特性，整體降雨情形並不顯著；有熱雷雨但無彩虹個案累積雨量明顯較多，且降雨範圍較大。

這可能由於大氣對流活動較強，導致整體降雨總量和範圍都較大。進一步透過日月潭測站逐時降雨及日照時數，並將其平均得出每一類別逐時平均日照及降雨，有彩虹個案之降雨情形在日落前降雨趨緩，僅剩微量降雨，並且在觀測到降雨同時同步觀測到一定日照時數；有熱雷雨無彩虹降雨情形雖然亦隨著日落而趨緩，但其降雨強度較有彩虹個案明顯，且觀測日照時數趨近於零，對於彩虹生成可能性幾乎微乎其微，因此，若要有利於彩虹生成，雷雨需在日落前趨緩並有陽光照射，且趨緩後仍有微弱降雨。

除了觀測資料，也利用 NCEP FNL 全球分析資料，分析 K 指數、CAPE 值與前述探空資料進行對比，分析結果發現有彩虹和有熱雷雨無彩虹個案的 K 指數較無熱雷雨個案高，其中有熱雷雨無彩虹稍高於有彩虹，無熱雷雨個案則為三者最低，與探空觀測資料分析的比對，澎湖探空及屏東探空也具有相似的差異。CAPE 值則為有熱雷雨無彩虹較高，但在三類別間的差異較小，與探空觀測分析的比對，澎湖探空在有熱雷雨無彩虹具有較高的 CAPE 值，有彩虹及無熱雷雨差異較小，屏東探空差異則較不明顯。透過模式中的 K 指數

與 CAPE 值分析得知，模式資料可反應出生成午後對流的大氣條件，且 K 指數表現較佳，適合作為預測對流強弱指標。此外，也分析 850hPa 高度場以了解不同類別個案高壓邊界位置，結果顯示有彩虹及有熱雷雨無彩虹個案高壓邊界較為偏東，無熱雷雨則相對西伸，風場也顯示，有彩虹和有熱雷雨無彩虹個案在近地面有明顯的南風分量，而無熱雷雨個案則為偏東風。另外將中央氣象署 QPF 預報資料加入分析，了解不同類別個案在預報資料的呈現與實際觀測之差異，其中，有彩虹及有熱雷雨無彩虹在個案分析上具有與實際累積降雨相近的降雨分佈，但無熱雷雨個案則雖然預估降雨區域小於前兩者，但與實際觀測結果呈現均無降雨有明顯高估情形，顯示 QPF 預報資料在預測降雨分佈有較佳的表現，僅在無熱雷雨的表現上有其不確定性。因此，針對彩虹預報，QPF 對於有彩虹及有熱雷雨無彩虹之降雨分佈有較明顯之區別，可做為參考指標。

總結來說，有彩虹與有熱雷雨無彩虹個案由於均屬於有熱雷雨情形，在大氣穩定度及綜觀尺度參數分析上較為相似，但有熱雷雨無彩虹的降雨情形，無論是降雨頻率和累積雨量都較有彩虹明顯，並且平

均日照時數趨近於零，從雷達分析也可看出，降水回波與陽光間的相對位置為形成彩虹的重要關鍵因素。由於本研究為日月潭午後熱雷雨所形成彩虹初步分析，以及研究目的希望作為一般民眾判斷日月潭彩虹出現簡要參考，因此僅針對較易取得資訊，例如：雷達回波圖、累積雨量圖、氣象署定量降水預報等進行初步研究分析。我們利用上述研究結果製作彩虹天氣氣象參數檢查表(表 1)，透過各項條件的檢核以分析彩虹發生的機率，檢核通過的項目越多，彩虹發生的機會越高。此檢查表為夏季午後較弱降雨的判斷條件，概念上用於判斷短暫降雨的機率。除了研究地點南投日月潭適用外，此檢查表原則上也可作為台灣西半部地區預報午後彩虹出現的參考指引。然而，研究中彩虹出現日期是根據人為觀測、社群媒體及新聞報導確認的個案，這可能導致彩虹觀測的漏報。此外，研究時間段僅為 2019 年至 2021 年，因此個案數較為有限。由於當地缺乏全方位即時影像監測，我們期望未來能在日月潭地區建置相關設備，以增加觀測彩虹的機會並延長研究時間段，蒐集更多的個案數據。同時，若能在台灣其他容易出現彩虹的地區廣泛建置相關監測設備，也將有助於進

表 1：夏季午後降雨彩虹天氣條件氣象參數檢查表。其中板橋、屏東及澎湖探空之條件門檻值為有彩虹個案平均；日月潭測站條件值域為有彩虹個案平均。

夏季午後降雨彩虹天氣條件氣象參數檢查表						是否達標	
● 定量降水預報(11:30LTC) 判斷南投地區午後是否出現零星降水							
● 探空(00UTC) 判斷臺灣地區是否出現熱雷雨的機會 板橋探空：K>30；CAPE>600 J/kg 澎湖探空：K>33；CAPE>2510 J/kg 屏東探空：K>32；CAPE>958 J/kg	板橋	K					
		CAPE					
	澎湖	K					
		CAPE					
	屏東	K					
		CAPE					
● 雷達回波(15~17LTC) 判斷日月潭東側是否出現明顯降水回波						15LTC	
						16LTC	
						17LTC	
● 日月潭測站(15~17LTC) 判斷午後是否有零星降水及日照 降雨量介於 0mm 至 5mm 間並同時觀測 日照時數高於 0.1hr							
降水	15		日照	15			
	LTC			LTC			
	16			16			
	LTC		LTC				
	17		17				
	LTC		LTC				

一步探討彩虹形成的成因及預報。由於形成彩虹所需的條件是短暫陣雨或雷雨的天氣型態，我們期望未來的研究可以增加更多氣象參數的分析探討，或提高觀測時間解析度，以進一步探討彩虹預報的可行性及適用性。

致謝

本研究大部份研究文稿是由許宸瑋之碩士論文編撰而成，並在國科會計畫 MOST 110-2111-M-034-002 及 MOST 111-2111-M-034-001 的支持下完成研究。我們十分感謝日月潭氣象站張永政主任及日月潭氣象站提供相關觀測報告表及研究建

議，感謝大氣科學研究與應用資料庫提供天氣圖庫以供研究使用，感謝臉書社團山城美景(埔里)管理員陳琪元先生授權提供彩虹照片。另外，特別感謝 2 位審查委員之寶貴的建議與文圖修正，對於本論文之精進有很大的助益。

五、參考文獻

Businger, S. 2021: The Secrets of the Best Rainbows on Earth, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102, E338-E350, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0101.1>.

Können, G. P. 2017: Rainbows, Halos, Coronas and Glories: Beautiful Sources of Information, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 485-494, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0014.1>.

Sun, W.-Y. 2023: Challenges and Progress in Computational Geophysical Fluid Dynamics in Recent Decades. *Atmosphere* 2023, 14, 1324.

<https://doi.org/10.3390/atmos1409132>

4.

朱瑞鼎、陳昭銘、張家治，2017：臺南地區弱綜觀天氣之降雨分析，106 年中央氣象局天氣分析與預報研討會。

李紀恩、劉崇治、趙俊傑、葉南慶，2005：衛星資料在夏季午後對流潛勢環境之初步分析。*大氣科學*，33，189-214。

林品芳、張保亮、周仲島，2012：弱綜觀環境下台灣午後對流特徵及其客觀預報。*大氣科學*，40，77-107。

周昆炫，2020：東亞冬季風和台灣北部中尺度山脈所形成之長延時彩虹研究，109 年中央氣象局天氣分析與預報研討會。

陳柏言、吳建銘，2019：陸地大氣交互作用對於熱帶島嶼日降水強度之影響。*大氣科學*，47，120-137，<https://doi.org/10.3966/025400022019064702001>

陳泰然、周鴻祺、廖珮娟、楊進賢，2009：暖季弱綜觀強迫下中北臺灣午後對流的氣候特徵。*大氣科學*，37，69-108。

張永政，2017：臺中（台灣中部）地區雷雨特性初步分析。交通部中央氣象

- 局自行研究發展計畫成果報告，第 賴曉薇、洪景山，2021：中央氣象局定量
CWB 106-1A-11 號，共 90 頁。 降水預報指引評估。大氣科學，
張雅惠、黃婉如，2016：2016 年臺灣梅 49，52-78，
雨季午後對流降雨分析。大氣科 <https://doi.org/10.3966/02540002202>
學。44，289-304， 1074901003
<https://doi.org/10.3966/02540002201>
6124404001

Analysis and Application of Rainbow Weather Conditions in Sun Moon Lake Area

Chen-Wei Hsu¹ and Kun-Hsuan Chou*^{1,2}

¹Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan

²Graduate Institute of Earth Science, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan

(manuscript received 17 October 2023; in final form 12 January 2024)

Abstract

Rainbows are unique atmospheric optical phenomena, and many regions on Earth are prone to forming rainbows due to various natural conditions, often becoming local tourist attractions. Sun Moon Lake Scenic Area in Nantou, Taiwan, is located in a mountainous region where thermal thunderstorms often occur in the summer afternoons. After the rain, rainbows frequently appear and are captured by nearby meteorologists and tourists. Therefore, if we can analyze the meteorological conditions that lead to the formation of rainbows at Sun Moon Lake using meteorological data or even predict them, it would not only enhance the academic research value of local atmospheric phenomena but also provide a richer experience for local tourism.

In this study, we first categorized cases into three groups: those with rainbows, those with thermal thunderstorms without rainbows, and those without thermal thunderstorms. We confirmed the occurrence of rainbows through online images and then compared the atmospheric conditions around Sun Moon Lake, including precipitation patterns and sunlight hours, using data from the Sun Moon Lake weather station, radiosonde data, rainfall maps, radar data, and sunshine duration records for both cases with and without rainbows. We also composited data from the NCEP FNL global model to analyze parameters such as CAPE (Convective Available Potential Energy), K-index, 850 hPa high-pressure edges, and wind fields for these three categories of cases. Finally, we compared the forecasting performance of the Central Weather Bureau's QPF (Quantitative Precipitation Forecast) data to assess its reliability.

From the radiosonde data, it is evident that most cases with rainbows and cases with thermal thunderstorms but without rainbows have higher K-index values, while cases without thermal thunderstorms tend to have lower values. The differences between cases with rainbows and cases with thermal thunderstorms but without rainbows are relatively small, and a similar trend is observed for CAPE values. Radar analysis results show that the majority of cases with rainbows exhibit precipitation echoes on the eastern side of Sun Moon Lake, with little or weaker echoes on the western side, whereas other cases without rainbows lack one or both of these conditions. This result plays a crucial and determining role in the formation of rainbows. Comparing Sun Moon Lake weather station data on sunshine duration and precipitation reveals that cases with rainbows often exhibit both

minimal sunlight and precipitation, while cases without rainbows show greater discrepancies and lower synchronicity between these factors. Analysis of K-index and CAPE values from the NCEP FNL model data closely aligns with the radiosonde data analysis. Cases with rainbows and cases with thermal thunderstorms but without rainbows have higher K-index and CAPE values, whereas cases without thermal thunderstorms tend to have lower values. Regarding the high-pressure edge, cases without thermal thunderstorms tend to be westward compared to cases with thermal thunderstorms and rainbows. Near-surface wind directions for cases with thermal thunderstorms and rainbows are predominantly from the south to southeast, while cases without thermal thunderstorms exhibit an eastward wind bias. Comparing the QPF data reveals that cases with rainbows forecast more scattered rainfall patterns, whereas cases with thermal thunderstorms but without rainbows have broader and more intense rainfall coverage. In contrast, cases without thermal thunderstorms tend to overestimate rainfall when compared to actual observations.

Keywords: Rainbow, thermal thunderstorm, K index, CAPE, QPF.

doi: 10.53106/025400022024045201001