

林火風險評估系統 氣象資料導入及加值運用

文、圖／柳婉郁（通訊作者 | 國立中興大學森林學系教授）

王世宇（美國猶他州立大學植物、土壤與氣象學系教授）

俞鈺文（國立中興大學森林學系研究生）

氣候變遷影響 全球林火風險顯著增加

在氣候變遷的影響下，21 世紀末期間全球乾旱事件程度、頻率皆呈現顯著增長趨勢，臺灣也不例外。根據臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平

臺（Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP）報告指出，近 30 年來臺灣的氣溫上升速率明顯增快。森林火災肆虐全球，帶來嚴重生態與經濟損失，近年在氣候變遷影響下，全球森林火災趨勢有更加嚴峻的現象。



■ 全球森林火災受氣候變遷影響趨勢更加嚴峻（豐年社提供）



■ 玉山大火延燒面積超過 79 公頃（林業保育署嘉義分署提供）

近年來，臺灣森林火災次數亦有增加趨勢，自 2012 年起，臺灣林火發生次數逐年上升，其中，2021 年因臺灣面臨嚴重乾旱的威脅，該年度共發生 93 起森林火災，為臺灣近年 2005 — 2021 年間，最嚴峻的一年，其中又以 2021 年 5 月玉山八通關發生的森林大火為嚴重，該事件共燃燒 72 公頃的森林面積，耗費 12 天方能撲滅，動員直升機 83 架次、投水 161 噸、總計 960 人次參與救援，付出龐大社會成本。

建置林火危險度預警系統

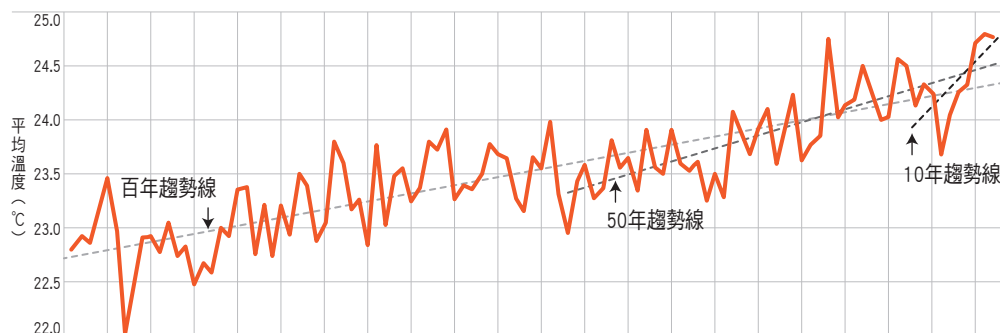
受到氣候變遷影響與威脅，在臺灣「預防性」觀念的災害處理政策扮演越來越重要的角色，為加強林火防範，林業及自然保育署（下稱林業保育署）自 2002 年始執行「林火危險度預警系統」的建置計畫，當時在臺灣森林地區架設 40 座林火危險度觀測站，藉由蒐集林地燃料棒濕度與氣象觀測資料，計算每日林火引燃機率。然而，當時林火危險度預警系統所使用的觀測站密度不足，加上衛星遙測資料運用有限，時常產生林火指數失準的問題。

面對當前氣候變遷影響與過去系統的推估限制，當前有必要針對我國的林火危險度預警系統進行更新。因此，林業保育署於 2022 年起委託國立中興大學研究團隊，運用現代科技，

納入高解析度衛星遙測影像、數值天氣預報模式，發展新一代我國林火風險評估系統。此外，為效法當代先進國家的管理策略，本研究亦透過回顧國際間林火預警作法，探討加拿大林火天氣指數（FWI）於臺灣的適用性，進而計算高解析度 FWI 指數，並設計操作友善的網頁呈現介面。新一代林火風險評估系統具備 FWI 指標查詢、預報資料開放下載、細胞廣播警示發布等增值功能，可作為臺灣森林火災風險預防與評估的有效工具。新一代系統導入氣象觀測與預報資料為關鍵創新，惟林火風險預警資訊對防災、救災、森林生態、空品等面向的經濟效益仍有待深入研析。林火風險評估系統的研發維運需投入大量人力物力，若能彰顯其經濟價值，更能凸顯投資的必要性與急迫性，並作為爭取研發資源的重要佐證。期盼氣象、地理資訊、資訊、林業、環境經濟等領域的專家共同投入，開創嶄新林火研究。

為介紹我國新一代的林火風險評估系統，以下共分為 3 個面向進行：

1. 透過文獻回顧，探討國際間氣候變遷下森林火災的發展趨勢，並蒐集



■ 臺灣歷史氣候觀測全島年均溫（表中顯示臺灣近年氣溫上升速率有急劇上升情形）
資料來源：TCCIP（2018）

當代先進國家林火預警系統的作法；
2. 針對我國新一代林火風險預警評估系統的加值功能進行介紹，除了包含的大氣觀測同化資料、林火天氣指數（FWI）、大氣統計降尺度資料外，亦針對新一代系統的加值服務如：應用整合性圖資、開放資料與 API 服務、建置細胞廣播系統等進行介紹；3. 介紹我國新一代林火風險評估系統的建置成果，並針對相關重要議題如：加拿大發展的林火天氣指數（FWI）應用於臺灣的適用性、新一代林火風險評估系統的準確度、林火風險評估系統的經濟效益等議題進行探討。

國際林火趨勢與預警系統作法

氣候變遷下森林火災趨勢

在極端高溫、乾旱事件頻傳下，近年全球多地皆飽受森林大火肆虐之苦，火災規模與頻率不斷攀升（Stowell et al., 2019; Crockett and Westerling, 2018）。Parente 等（2019）分析葡

萄牙 1980—2017 年發生的 67,103 起森林火災，結果顯示有 81% 發生在乾旱期間，其中 86% 是乾旱直接導致。Russo 等（2015）預測，受全球暖化影響，未來 20 年歐洲熱浪的發生頻率、影響範圍、嚴重程度都將顯著提高。Martinuzzi 等（2019）分析顯示，在氣候變遷下，至 2070 年美國林火風險將上升 32—72%。可見在變遷的氣候型態下，森林火災正呈現日益嚴峻的發展態勢。

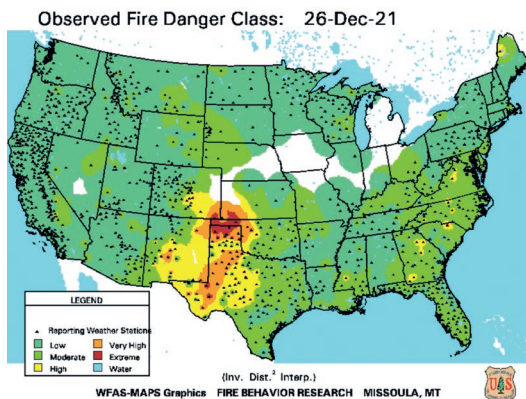
臺灣近年森林火災發生次數亦呈上升趨勢，尤其 2020 年代表性事件頻傳，2021 年更創下 2005 年以來新高，共發生 93 起。2021 年 5 月中旬，玉山國家公園八通關地區發生嚴重森林火災，燃燒面積達 72 公頃。2020—2021 年間臺灣亦歷經 60 年來最嚴重乾旱事件，亦是誘發林火頻發的因素之一。除此之外，Yu 等人（2024）研究指出，在氣候持續暖化的趨勢下，未來臺灣極端乾旱及森林火災風險將持續升高，並指出與近年來（1992—

2021 年) 平均林火發生次數的基準相比, 我國 21 世紀末 (2070—2099 年) 在 RCP8.5 氣候變遷悲觀情境下的林火次數將增加約為 35.6%。

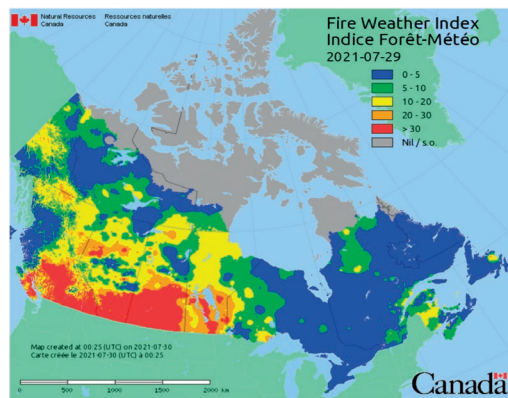
國際間森林火災預警評估系統發展概況

近年在高解析度衛星遙測、數值天氣預報等技術進步帶動下, 美國、加拿大、歐盟、澳洲等皆已發展出較為完善的森林火災預警評估作業系統。美

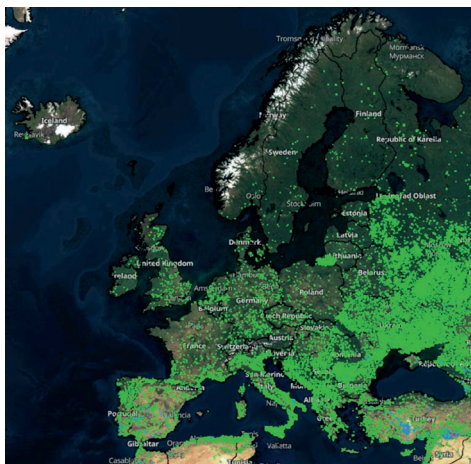
國的林火風險評級系統 (National Fire Danger Rating System, NFDRS) 整合天氣資訊管理系統 (Weather Information Management System, WIMS) 與野火評估系統 (Wildland Fire Assessment System, WFAS), 提供燃燒指標 (Burning Index, BI)、蔓延因子 (Spread Component, SC) 等林火風險指標, 並於每日公布當日與未來 7 天、未來季節期間的林火風險評估資訊。美國加



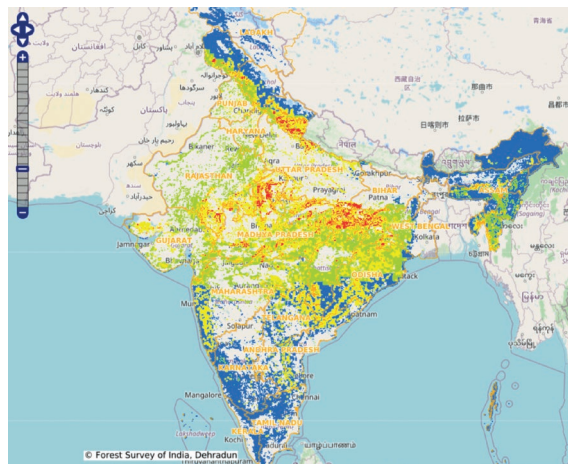
(a) 美國森林火災風險評估分析結果



(b) 加拿大森林火災風險評估分析結果



(c) 歐盟 EFFIS 即時災損評估系統



(d) 印度森林火災風險評估分析結果

世界各國森林火災風險評估分析結果

資料來源: CFFDRS (2021)、WFAS (2021)、EFFIS (2021)、FSI (2022)。

州則建置 CAL FIRE 系統，動態呈現林火對於社區威脅程度與林火優先防範地景區，並擬定完整的森林資源調查評估與林火管理預防計畫。

加拿大森林火災危險評級系統（Canadian Forest Fire Danger Rating System, CFFDRS）包含林火天氣指數（FWI）、火勢預測系統（Fire Behavior Prediction System, FBP）等子系統。其中 FWI 系統納入燃料濕度、火勢蔓延速率等 6 項指標，廣為各國採用。歐盟 EFFIS 系統、紐澳、英國、印度皆套用加拿大林火天氣指數（FWI）的架構並進行在地化調校。歐盟 EFFIS 系統除了包含林火風險評估外，也利用 NASA 衛星進行林火火點與過火面積的即時監測。印度的森林火災預警系統（Forest Fire Alert System）則整合 MODIS、VIIRS 等中低解析度衛星，提供即時火情監測、大火災區判識、未來林火風險預警等服務。綜觀上述案例可知，現今先進國家在林火研究領域，皆善用衛星遙測、數值天氣預報等新興科技，發展出兼具即時監測、未來預報的林火風險評估技術。

新一代林火風險評估系統

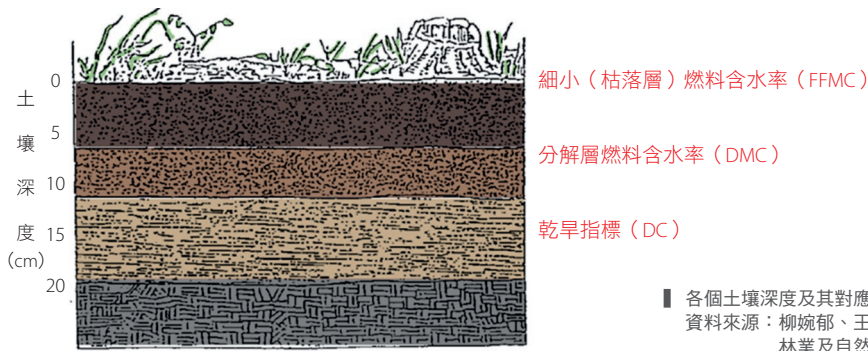
大氣觀測資料同化與未來氣象場模擬

為改善傳統僅倚賴地面測站觀測的林火指數計算方法，透過學術合作採用歐洲中期天氣預報中心（European Centre for Medium-Range

Weather Forecasts, ECMWF）的再分析資料（Reanalysis Data），並融合美國 NASA 衛星觀測與探空資料，透過資料同化（Data Assimilation）技術，提供涵蓋臺灣在內的東亞地區範圍均勻、準確的大氣狀態分析場。在此基礎上，進一步導入美國國家環境預報中心（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）的 GFS 0.25 度解析度全球預報系統，模擬未來 7 天的地表 2 公尺溫度、相對濕度、10 公尺平均風速、累積降雨量等氣象要素。利用上述數值預報產出的網格化氣象場資料，套用加拿大林火天氣指標系統（Canadian Forest Fire Weather Index System）的 6 項分量計算公式（Van Wagner, 1987），來獲得涵蓋臺灣全島未來 7 天的 1 公里解析度 FWI 指數預報。

其中，該 6 項 FWI 分量指標分別為：

- 細小燃料含水率指數（Fine Fuel Moisture Code, FFMC）：代表地表不超過 2 公分的落葉枯枝層（Litter Layer）、細小枯枝落葉等可燃物的含水量。
- 分解層燃料含水率指數（Duff Moisture Code, DMC）：代表深度約 5—10 公分的淺層落葉腐質層（Duff Layer）含水量。
- 乾旱指數（Drought Code, DC）：代表深度約 10—20 公分的深層有機質土壤含水量，乾旱指標（DC）反映著 1 個半月左右底層土壤的乾



旱狀態，越乾燥就有利林火的發生並提供森林火災的燃料。

- 初始蔓延指數 (Initial Spread Index, ISI)：綜合 FFMC 與風速，預測火勢蔓延速率，該指標為代表林火擴散速率，數值越大，林火擴散越快。
- 累積燃料指數 (Buildup Index, BUI)：綜合 DMC 與 DC，估計可供燃燒的燃料總量。
- 林火天氣指數 (Fire Weather Index, FWI)：融合了林火擴散率 (ISI) 及可供消耗的燃料量 (BUI)，代表林火發生強度與控制難度。

FWI 指數從加拿大落葉林、針葉林環境發展而來，雖已廣泛應用於全球各地，但如何因地制宜的校訂仍是一大挑戰。未來將進一步分析比對歷史實際發生的林火點位資料，探討如何調整指標門檻值以符合臺灣在地特性。

統計降尺度至更高空間解析度

由於 GFS 預報模式原始輸出格點解析度為 0.25 度（約 25 公里），

較難掌握臺灣複雜地形下的局部地區氣候變異性。為提高林火指數預報的空間解析度，採用統計降尺度方法，將預報資料配合高解析度地形資訊，內插至 1 公里網格。空間內插採用雙線性插值法，並以 ECDF (Empirical Cumulative Distribution Function) 法建立模式輸出與觀測資料的統計關係，進行網格點尺度的系統性偏差修正 (Bias Correction)。此法計算負荷遠低於動力降尺度，在合理的計算成本下仍可大幅提升空間解析度。

整合 Web GIS 圖資發布

整合內政部國土測繪中心公開的通用版電子地圖 (Taiwan Geospatial One Stop, TGOS MAP) 圖磚服務，以及林業保育署提供全臺林班、保安林、國有林、土地利用型等基本圖資。在網頁前端，採用 Leaflet 等輕量化網頁地圖函式庫 (Web Mapping Library)，開發跨平臺的 Web GIS 使用者查詢介面，使系統可順暢在個人電腦、智慧型手機、平板等不同裝置中操作。

開放預報資料 API 服務

為促進防救災單位及學研機構活化運用林火風險預警資訊，本系統提供符合 REST (Representational State Transfer) 風格的 Web API 服務，可透過標準 HTTPS 協定，取得 GeoTIFF、NetCDF 等通用地理資訊格式的預報圖資，供外界直接套疊或進行加值整合應用。

高風險區域細胞廣播警示

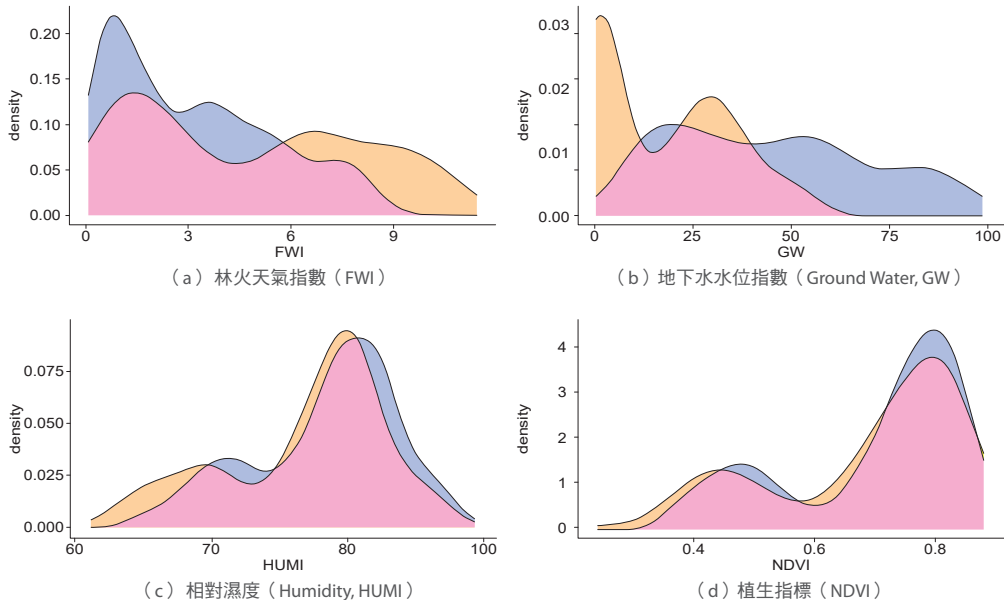
本系統於每日凌晨執行批次評估作業，若判定某鄉鎮有 8 成以上林地範圍，在未來連續 7 天皆達 FWI 最高危險級，即自動將該區列為高風險熱區。系統進一步編製熱區的共通示警協定 (Common Alerting Protocol, CAP) 警示訊息檔，透過內政部消防署的災防告警細胞廣播系統 (Cell

Broadcast Service, CBS)，針對熱區發布國家級警報。考量過度頻繁示警將引發使用者警覺疲乏，同一區域 2 次警示發布間隔至少相隔 5 天。透過地理圍欄技術，可大幅提高林火風險預警的時空準度，避免不必要的廣播干擾。

預警評估系統成果與優化

FWI 指標於臺灣林火風險評估的適用性分析

為檢視 FWI 指標能否有效反映臺灣林火風險程度，系統性地分析 1964—2021 年間的歷史林火發生紀錄與模式模擬的 FWI 指數。根據結果顯示，在林火較為嚴重的年分期間，FWI 指數明顯高於林火較少的年分，且 FWI 數值與歷史臺灣林火次數



■ 臺灣歷年林火次數與氣候環境指數的關係 (紅色：林火嚴重年分；藍色：林火輕微年分)

呈現顯著的正相關 ($R\text{-Square}=0.68$, $p\text{-value}<0.01$)，尤其在中南部地區、春冬季節更為明顯。顯示 FWI 指標確實能掌握臺灣火害發生頻率的時空分布特性。進一步分析其他環境因子，發現乾旱指數、地表土壤濕度、NDVI 等因子與林火數量亦存在顯著統計關聯。整體而言，水文、大氣、植被等多重因素交互影響下，共同導致臺灣山區呈現明顯的季節性林火風險高峰期。在林火風險評估上，FWI 指標能綜合考量焚風、乾旱、燃料等因子，可視為適用於臺灣環境的林火風險綜合指標。

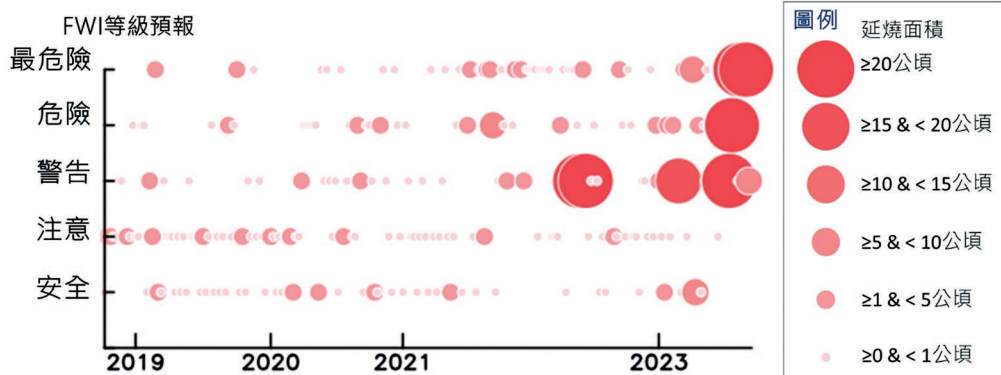
FWI 預報準確度驗證

為了驗證 FWI 預報準確度，針對 FWI 指數的一日預報準確度，進行驗證評估。由於重新產製數值天氣預報 (Reforecasts) 需要龐大電腦計算資源，受限於有限的計算資源下，僅以 2018—2021 年及 2023 年第一季實

際發生的重大林火事件為樣本，進行 FWI 指數一日預報準確度驗證，其結果如圖顯示，圖中橫軸為事件日期，縱軸為 FWI 危險等級，每個圓點為一個林火事件，圓點大小為延燒面積。結果顯示有 81% 的林火事件發生時，該處 FWI 預報等級皆達注意級以上。而延燒面積大於 15 公頃的重大案例，發生位置的預報指數更全數達警告級以上。上述結果顯示本系統預報產品具有一定的可靠度，可作為林火風險預警與防救災部署的重要參考。未來將透過更長時間的持續監測，進一步優化指標門檻值，以提升預警的時效性與空間準確度。

預警評估系統建置成果

本計畫建置的「林火風險預警評估系統」，一般使用者可任意切換查看未來 7 天各時間的 FWI 指數預報與 6 項分量指標空間分布圖，並可自由套疊各式基本圖資，如森林遊樂區、



■ 2018—2021 年及 2023 年第一季重大林火事件的 FWI 一日預報等級

保安林、國有林、林班、臨時避難收容處等地理資訊或切換使用內政部通用地圖等。系統亦提供定位功能，使用者可快速瞭解所在位置的林火風險分級。系統每日更新最新預報資訊，使一般民眾得以隨時掌握未來一週的林火風險變化趨勢，提高警覺並採取必要的防範措施。

對於防救災單位與學研機構等進階用戶，本系統亦提供 API 查詢介面與開放資料下載服務，可取得 GeoTIFF、NetCDF 等標準地理資訊格式的預報資料，直接匯入災防決策支援系統或進行其他加值應用。此外，系統也透過自動化排程，於每日凌晨執行鄉鎮尺度林火風險評估，針對預判有高度風險的區域，適時發布細胞廣播警示訊息，提醒身處於高風險區域的居民與旅客提高警覺。透過更在

地化的預警發布機制，可望進一步提升整體火災預防成效。

預警資訊應用的經濟效益評估

建立完善的林火風險預警系統可產生諸多社會經濟效益，包括：1. 縮短林火撲救時間，降低森林生態的損害；2. 減少防救災資源投入；3. 維護森林生態系服務功能；4. 降低濃霧、煙霾衝擊，減少健康、交通損失等。惟林火風險評估系統的建置與維運需投入大量人力物力，如何評估林火風險預警資訊的整體經濟價值，進而彰顯研發投資效益，仍有待深入研析。

過去國內外已有零星研究嘗試估算預警資訊的效益，例如：Mavsar 等（2013）評估歐盟 EFFIS 系統一年約可減少 3,800 萬歐元的災損；美國 Rim 大火事後評估發現，若能及早一



■ 林火風險預警評估系統網頁畫面 2023 年 4 月 18 日系統畫面（左 1 為首頁；左 2 為點選主選單後，出現資料清單的畫面；右 2 為點選圖層調整工具後的畫面；右 1 為選用內政部國土測繪灰階地圖後的畫面。）

天發布警報，約可減少 35% 的延燒面積 (Moeltner et al., 2013)；德州農工大學估算，美國政府每投入 1 美元建置林火風險預警系統，約可創造 11 美元的效益 (Kaulfus et al., 2017)。國內學者鄧屬予等 (2013) 分析八八風災個案，認為若提早一天預警，農損約可減少 40 億元；黃宏斌等 (2016) 則利用條件評估法 (Contingent Valuation Method, CVM)，推估臺灣民眾對一週天氣預報的平均願付價格約為 658 元／年。

綜合上述文獻可知，林火風險預警系統所提供的資訊確實孕育龐大且重要的應用潛力。然而目前研究仍偏零散，尚缺乏系統性評估框架。未來宜結合大數據、統計迴歸、效益移轉、願付價格、避免成本等方法，更全面估算林火風險預警系統對火場周遭社區的直接效益，以及對空品、觀光、公共衛生的效益，並進一步評估其對森林碳吸收、水源涵養、棲地保育等生態系服務的價值。唯有闡明林火風險預警系統的科學意涵與經濟效益，才能獲得各界支持，爭取更多研發資源投入。

科技助力林火防減災

為提升我國林火防治效能，透過彙整近年國際間林火預警評估作法與趨勢，分析加拿大 FWI 指標於臺灣的適用性，運用衛星遙測、數值天氣預報等創新技術，建置新一代林火風險

預警評估系統。為適合廣大行動裝置使用族群，於林火風險預警評估系統中採用跨平臺網頁地圖操作介面，並提供未來 7 天、1 公里解析度的林火風險預報資訊。除此之外，新一代的林火預警系統亦提供網頁地圖查詢、API 介接、開放資料下載、細胞廣播警示等多元服務。預報模式與網站皆已完成初步建置並正式上線。系統畫面流暢穩定，歷史案例驗證結果顯示，FWI 指標能有效評估臺灣林火風險程度與空間分布特性，系統可作為預防與評估臺灣森林火災風險的有效工具，可望提升政府機關與民眾及時掌握火災風險，協助進行防範部署與應變行動。

未來建議可持續精進預報模式，導入更在地化的植生、地形參數，提高山區預報準度。並發展林火火場模擬、衛星火點偵測、物聯網整合、人工智慧和機器學習應用等輔助模組，提供救災人員更及時、更空間精準的決策依據。此外，林火風險預警資訊的經濟效益評估亦有待深入研究。建議未來結合環境經濟學、林學、災害防救、大氣科學等跨領域專長，以多元方法論估算預警資訊於火場周邊、下游社區、生態系等不同尺度的綜合效益。唯有闡明林火風險評估預警所孕育的減災商機，才能爭取各界持續支持相關研究，共同為臺灣森林永續管理盡一份心力。♾

(參考文獻請逕洽作者)