

台灣本土野火實驗研究

Experimental research on wildfires in Taiwan

吳佳隆 Chia-Lung Wu*

摘要

在氣候變遷下，高溫、乾旱等現象的增加使極端氣候成為全球焦點，直接或間接地影響野火的發生並可能造成毀滅式災難，在 2025 年初加州洛杉磯野火多點齊發，重創該地區，使安全評估與相關議題刻不容緩。森林野火的發展，主要受到燃料含水量、燃料負載、體積密度、風向風速等因素。現行預測模型多以 Rothermel Model 為基礎，然而該模型過於簡化，缺乏各地本土化資訊作為判定資料庫，使得無法有效判斷火勢發展與蔓延。本研究針對中南部常見樹種進行森林野火實驗，重點觀察燃料（落葉）結構、含水量、體積密度等造成之火焰傳播影響。透過改變燃料負載和燃料含水量改變觀察火焰延燒與傳播情形。研究發現，燃料負載、燃料高度與體積密度之間存在相互關聯；其次，改變燃料含水量，觀察到未烘乾組與烘乾組之間的差異，當燃料含水量較低時，燃燒更為旺盛，增加野火災害風險；當濕度極高時，極可能終止火災蔓延。

關鍵字：氣候變遷、森林火災、Rothermel Model、燃料負載、燃料含水量

收稿日期：2025 年 1 月 13 日；通過日期：2025 年 8 月 1 日

*國立中央警察大學消防學系助理教授，E-mail: farianwu@gmail.com。

Abstract

Under the impact of climate change, phenomena such as rising temperatures and increased drought have brought extreme weather events into global focus. These conditions directly or indirectly influence the occurrence of wildfires, potentially leading to catastrophic disasters. In early 2025, multiple wildfires erupted across Los Angeles, California, causing extensive damage and highlighting the urgency of safety assessments and related issues. The development of forest wildfires is primarily influenced by factors such as fuel moisture content, fuel load, bulk density, wind direction, and wind speed. Current predictive models are mainly based on the Rothermel Model; however, its oversimplification and lack of localized data limit its effectiveness in accurately predicting fire behaviour and spread. This study focuses on forest wildfire experiments involving common tree species in central and southern regions, emphasizing the effects of fuel structure (e.g., leaf litter), moisture content, and bulk density on flame propagation. The study observes flame spread and propagation changes by varying fuel load and moisture content. Results indicate a significant interaction between fuel load, height, and bulk density. Additionally, altering fuel moisture content reveals notable differences between dried and non-dried groups. Lower moisture content leads to more intense combustion, increasing the risk of wildfire disasters. Conversely, excessively high humidity can effectively halt fire spread.

Keywords: climate change, wildfire, Rothermel Model, fuel loading, fuel moisture content

壹、前言

森林大火一直存在各國，在過去可能有助於土壤的肥沃以及生態迭代更新；在人類發人開墾下，便從自然環境變遷成為「災害」，且往往造成長時間的延燒與破壞。近年來對社會最大的衝擊在於，在有限土地資源下的與天爭地。AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 (AR6 SYR) (Lee et al. 2022) 報告中，總結氣候變化其影響和風險及減緩和適應氣候變化的狀況。造成世界變暖的原因主要是人為活動，由於溫室氣體的排放，導致全球暖化加劇，全球地表不斷升溫。氣候變遷影響全球多地極端天氣、氣候事件包含高溫熱浪、洪水、乾旱野火、風暴等相關災害（環境部，2023）。

2025 年初，發生在美國的洛杉磯大火，造成的重大影響，萬棟建築物遭受火災吞噬，截至 2025 年 1 月 11 日止，受燒面積與影響範圍已達半個台北之大。筆者投稿時，仍在控制與疏散撤離中。



圖 1 洛杉磯野火五處起火處的受燒情況

(L.A. Wildfire Photos: Widespread Destruction in Pacific Palisades, Malibu, Altadena & Beyond 2025)

森林大火（forest fires）對於台灣來說，在過去不算直接的災害風險型態，在台灣地理環境條件下，科學工作者多認為臺灣林相屬於常綠森林與屬於

濕潤氣候，在過去一直被認為是大規模森林火災發生的重要防護；且因為目前較少台灣居民居住在鄰近森林附近，即使有火災發生，對於民眾安全的影響較小。然而，受到世界極端氣候的影響下，整體台灣亦受到森林大火的衝擊。但實際上，台灣的森林大火的發生與威脅已與過去不同，有逐年成長趨勢，且其造成的未來可能影響不容小覷（Chen et al. 2024）。

荒地野火（wildfire）國際上廣泛的定義：包括森林、草原、灌木叢和其他生態系統，甚至包括耕地（吳珈誼、吳佳隆，2024）。隨著野火事件的發生的頻率與造成影響一直增加，野火議題也成了全球焦點，因此如何有效應對成了當務之急。目前國際間對於野火延燒，是透過 Rothermel model（Forest Service - Rocky Mountain Research Station, 1972）進行預測。此預測模型是由美國研究工程師（Richard C. Rothermel）在 20 世紀末所開發。該模型採用用於預測荒地燃料火災蔓延的數學模型，在野火研究和火災管理領域中被視為重要參考指標，因為可作為評估火災蔓延和強度的基礎。該模型不需要事先瞭解燃料特性，著重於物理和化學的構成及環境條件。但因此，忽略了野火延燒受到整體環境條件、密度等關聯性。

經查閱相關文獻，台灣目前野火研究缺乏實際燃燒試驗相關研究，且野火延燒應有在地化的實驗數據作為判定基礎。因此，本研究諮詢並參考英國愛丁堡大學森林大火學者 Dr Campbell 實驗設計（Campbell-Lochrie et al. 2021）進行火災實驗調查研究，目標提供可能解決現有評估預測缺陷與限制。以台灣中南部常見的樹種－桃花心木，進行實驗與分析。雖桃花心木非本土特有種，筆者於前研究中，透過林務局相關資料，比較台灣 2011~2022 年受延燒樹種，發現林火在台灣各區隨著地形及當地植被不同，其影響與好發程度不同，南部因以農墾為主種植竹林較多，因此在高雄市、台南市地區，受延燒樹種以以荊竹為主；而台中市、南投縣因地域分布不同，主要以闊葉林、針葉林為主，因此多為相思樹、二葉松、楠葉等為主要延燒樹種。對照桃花心木的樹種樹葉外觀與性質，應可對應於台灣相思樹、木荷類型，均屬常綠喬木類型。因此，本研究採用桃花心木落葉作為研究樹種，但其特性應可間接應用於台灣本土樹種（如相思樹），且能在未來取得類似樹種葉片後能夠比較分析其葉片、枝幹等特性，確認是否有顯著不同或僅有些許差異，則同時有助益林火防治。

目前研究對象（桃花心木葉材）取得相對容易，有助於低成本、多樣測試與模型之初步建構。未來將進一步加入本地具代表性樹種、與國際間森林樹種比較分析，除提升應用廣度並強化在地代表性。

值得注意的是，本研究所探討的野火是以廣義去定義：包括森林、草原、

灌木叢和其他生態系統。

貳、文獻探討

一、重大國際森林大火與現存預測模式問題

2019 年的澳洲森林野火，波及 832 種物種，影響面積高達 186,505 平方公里，影響 10 億隻野生動物，而此事件後讓全球更關注林火議題。此後，2020 年美國加州也發生了單年累積 9,917 起森林大火，燃燒面積約 17,199 平方公里（約 1/3 的台灣面積）（林嫩瑛, 蔡佳穎, and 張志新 2021）；加州因此成為美國唯一實行「荒地與城市交界區」（Wildland-Urban Interface, WUI）相關建築防火法規的州（Why is California burning? 2020）。由於當地的土地使用規劃與建築設計較為特殊，建築在內部中心區，而外圍則有樹林圍繞，造成野火一旦發生時，建築都市設施與人員將遭受嚴重危脅。

值得注意的是，即使有上述的法規規定，毀滅性野火仍不斷在世界上發生。

美國加州洛杉磯地區（Los Angeles area），在 2025 年 1 月 7 日起連續爆發數處野火。在當地狂風和乾燥條件下，助長火勢蔓延。目前已燒毀數萬英畝土地，數十萬人被迫撤離家園，造成該地區史上最具破壞性的災害之一，短短數日，其燃燒面積即達到 1/2 的台北市大小，且仍未受到明顯控制。

自 2025 年 1 月 7 日起，共計有五處野火，分別為斷崖山野火（Palisades Fire）伊頓野火（Eaton Fire）、肯尼思野火（Kenneth Fire）、赫斯特野火（Hurst Fire）及利迪亞野火（Lidia Fire）。截至 2025 年 1 月 11 日為止，仍有大範圍的地區與人民需要執行避難與受到避難預警，如圖 2 所示。除了造成重大的建築物損壞外，其對社會經濟層面、政治層面的衝擊，亦將造成不小的影響。



圖 2 洛杉磯大火影響範圍與撤離警戒區域 (2025.1.11)

(來源 : US Department of the Interior, Office of Wildland Fire | NOAA, Esri)

在台灣，森林大火亦逐年增加。自 2011 年到 2023 年，根據我國國有林火災發生次數統計（農業部林業及自然保育署，2024），總計發生 455 件，平均每年 41.3 起林火案例。2021 年更是發生 93 起，為歷年來最高。而林火主要分為人為引起 443 件，雷擊 12 件，人為因素高達 97.4%。自 2011 年至 2023 年台灣發生林火次數最多的三大縣市分別為台中市 100 件、高雄市 99 件及南投縣 86 件。發現到，台灣森林野火分布主要在中部山區及南部。

對於野火評估，國際間廣為使用的預測模型為 Rothermel model (Forest Service - Rocky Mountain Research Station, 1972)，由美國研究工程師 (Richard C. Rothermel) 在 20 世紀末所開發。該模型採用用於預測荒地燃料火災蔓延的數學模型，在野火研究和火災管理領域中被視為重要參考指標，因為可作為評估火災蔓延和強度的基礎。該模型不需要事先瞭解燃料特性，著重於物理和化學的構成及環境條件。構成包括燃料高度 (fuel depth)、燃料負載 (fuel loading)、燃料水分含量 (Fuel Moisture Content)、體積密度 (Bulk Density) 等參數；環境條件則是地形坡度 (slope of terrain) 和平均風速 (mean wind velocity) (Andrews 2018)。

Rothermel model 主要用於地表火 (Surface fire)，這是荒地火災中最常見的一種，起源於土壤表面的可燃物質，如落葉或垃圾，引燃而向上蔓延。相較之下，樹冠火 (Crown fire) 包含活葉和死葉/樹枝，其燃料高度與地表火有所不同，並可分為主動冠火與被動冠火，而主動冠火更為活躍，可以從單一樹冠蔓延至周圍 (Northwest Fire Science Consortium, 2017)。由於地表火和樹冠火性質與機制有很大不同，研究目的在於了解地表火的野火延燒，當野火之餘燼

透過風傳遞至數公里之遠，將可能將可燃物均點燃，即使非在起火處，然而這些會飛往多遠的研究，多以風洞試驗進行，非本研究欲探討範疇。本研究重點在了解地表火發生時之火災延燒模式，是否與樹葉類型、乾燥條件、環境濕度等等具關聯性；樹冠火之延燒機制與地表火之實驗模式不同（垂直延燒），將於未來設計實驗中探討。

然而，**Rothermel model** 是一個理想化的設計，假定在火災在均勻、穩定的環境中處於一個平衡狀態，並且忽略了實際野火的複雜和不穩定性。此外，模型對燃料是靜態的，不考慮火災蔓延過程的動態變化。因為實際情況中的燃料濕度、密度和組成屬性會不斷變化，這導致模型在某些特殊情況下難以準確預測，事實上與真實結果大相逕庭。

二、火災動力學與森林大火肇因

火災發生往往需要透過各項天時地利人和才會發生，而其關鍵在於燃燒三要素的同時提供，可燃物（**fuel**）、氧氣（**oxygen**）及能量（**energy**）。一般來說，火災的型態會與其火災發生的地方有顯著不同的差異。

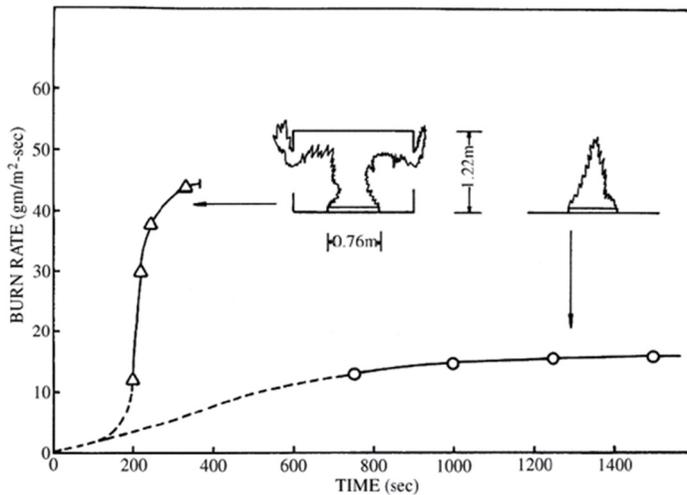


圖 3 環境條件與火災成長速度關聯（環境遮蔽與全開放）（Drysdale 2011）

從上圖中可看到燃燒速率（burn rate）受到周遭環境影響很大。在開放空間下，其燃燒速率，在約莫一分鐘後，即達到穩定，亦所謂的穩態燃燒，其火災規模、燃燒時間與其存的可燃物的多寡有關，但不容易產生期擴大延燒；然而，當火災發生時，上方有遮蔽物（如：室內空間、隧道等）將容易造成火災

發展迅速，即使是小規模的起火物，亦可能產生快速的火焰蔓延。但值得注意的是，這兩個圖示其火災面積（Area of fire）大小是不變的，僅能說明環境對於火災形狀、發展的關聯性。

森林大火與一般火災發展並無二致，亦須足夠的燃燒三要素供給。其中，可燃物包含枯枝落葉、垃圾堆放；氧氣也就是新鮮空氣的挹注；至於能量，一般來說，所需最低點火溫度約為 250°C~300°C。林火發生後是否造成嚴重延燒，亦受地形及環境因素影響。台灣是一個多山區域，受地形形成山谷風，順風坡使燃燒速率加快蔓延。火災時的環境因素也相當重要，例如：燃料水分含量（FMC）、燃料負載及體積密度、風速風向、是否有可燃物堆積均為重要因素，隨著燃料增加或體積密度降低，都可觀察到火焰擴散率、燃燒熱釋放率（Heat Release Rate, HRR）的增加（Campbell-Lochrie et al. 2023）。

三、氣候變遷及台灣森林火災風險關聯

極端氣候條件，將造成過去的歷史資料無法有效預測未來，尤其在應對各種災害時，無法以過去歷史分析結果增加安全係數，如：311 日本福島地震衍伸海嘯造成的核電廠失能事件。在 AR6 的分析報告中，提到近期的地球氣候系統與其各面向的變遷程度，是過去數世紀至數千年來前所未有的；另外，氣候系統的諸多變遷與全球暖化程度直接相關。這些變遷包括極端高溫、海洋熱浪、豪雨、部分地區農業與生態乾旱的發生頻率與強度增加、強烈熱帶氣旋比例增加（國科會 et al. 2021）。極度高溫與乾旱條件，目前已知條件下，與森林大火發生具關聯性。

2025 年 1 月 8 號 Forbes 專欄提到（Luna 2025）該區森林大火會成為常態 5 大理由（5 Reasons Why The Los Angeles Wildfires Are The Start Of A New Normal）：

第一，極端火災天氣條件增加（Increased Elevated Fire Weather Conditions）

高溫、乾燥、可燃燒物和強風的結合，造成了極端野火天氣。南加州自 7 月以來一直處於這種高風險狀態，且沒有緩解跡象，過去該地區的火災高發期集中在夏末秋初，如今卻是全年均受到威脅。

第二，乾旱和強風同時發生（Overlap of Dry Conditions and Wind Events）

南加州強風相當常見，但現在這些強風與持續的乾燥條件同時出現，往年秋冬會有降雨，減緩大風季節的火災風險，然而 2025 年

1 月依然相當乾燥。

第三，炎熱夏季後缺乏雨季（**Hot Summers Followed by Absent Rainy Seasons**）

南加州經歷異常炎熱夏天，卻沒有迎來往年秋冬降雨，導致地表乾枯。更糟的是，該地區在這次乾早前經歷連續兩年高於平均水平的降雨，大量降雨看似有利，卻導致植被過度生長，乾枯後成為助長大火的易燃燃料。

第四，全美各地野火天氣越來越普遍（**Extreme Fire Weather Is Becoming More Common Nationwide**）

美國幾乎每個地區極端火災天氣條件都變得更加普遍。近年的火災天氣趨勢，包括加州在內的大多數地區火災風險顯著上升。

第五，美國歷史上嚴重的野火與極端火災天氣有關（**The Most Devastating Wildfires in U.S. History Have Been Linked to Extreme Fire Weather**）

2018 年坎普大火、2020 年灣區大火、2021 年迪克西大火和 1988 年黃石公園大火，都發生在極端火災天氣期間。雖然起火原因各異，從閃電到人為都有，但正是極端野火天氣決定了火勢蔓延的速度和破壞程度。2001 年至 2020 年間，這些快速破壞性火災在美國造成了 189 億美元的損失（約新台幣 6227 億元）

如果探究美國加州野火本次發生的原因，那對於台灣，要注意的便是：第一、氣候變遷，第二、夏季延長且秋冬降雨量少。台灣在近百年的夏季日數有增加的趨勢，約 120 日至 150 日，冬季日數則呈現減少趨勢，甚至在近幾年是直線下降（國科會 et al. 2021）。中興大學研究團隊指出，2021 年到 2100 年臺灣森林在不同暖化程度下，淨生態系統交換（Net Ecosystem Exchange, NEE）、輻射因子、地下水位和森林火災之間具有顯著相關性，指出嚴重乾旱將導致森林從碳吸收轉向排放，以及臺灣森林火災風險呈現增加趨勢。臺灣森林火災的嚴重性未來將明顯增加，特別是在 11 月到 4 月的乾季。此結果顯示，森林火災高峰季節可能因降水特性和溫度上升的改變而提前到來。

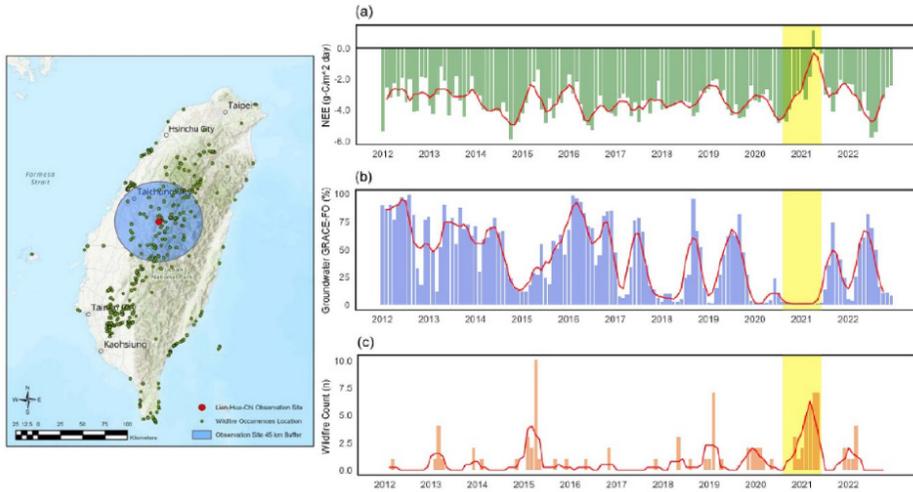


圖 4 台灣 2012 年至 2022 年歷史野火分佈與地下水位關聯性 (Chen et al. 2024)

可以確認的是，乾季、環境條件的改變將提升野火的好發機率，但其實際延燒影響模式無法單純以模擬模式概之。這些評估模式，或許可以描述森林野火起火風險，但其延燒才為重要課題。目前並有效的預測模型，更何況氣候變遷下，過去的研究資料亦可能無法有用使用，實際火災實驗的數據則為重要且寶貴的評估參考依據。

參、實驗設計

本研究主要探討地表火的野火延燒，特別在於實驗燃料床對燃料堆疊時，多孔燃料 (porous material) (落葉) 火焰擴散過程的影響。鑒於台灣在這方面的參考文獻有限，因此研究參考國際相似實驗相關文獻資料，並於此基礎上進行實驗規劃。為建構火焰擴散環境，本研究使用長 1.5 米、寬 0.67 米，矽酸鈣板基材底座和角鋼組成的火焰擴散台。在矽酸鈣板表面建造燃料床，而火焰擴散實驗則採用線點火源 (Line ignition)，能確保火勢發展為現狀延燒。此外，為了保持實驗環境的一致性，選擇無風水平環境，使火焰鋒能與燃料床垂直。因為在無風密閉環境進行實驗，同時亦透過風速計確保實驗中環境風速均為零。

K type 熱電偶測量溫度，直徑 1.6mm，熱電偶數測量每秒溫度變化 (°C)。其設置相對位置如圖 5 所示

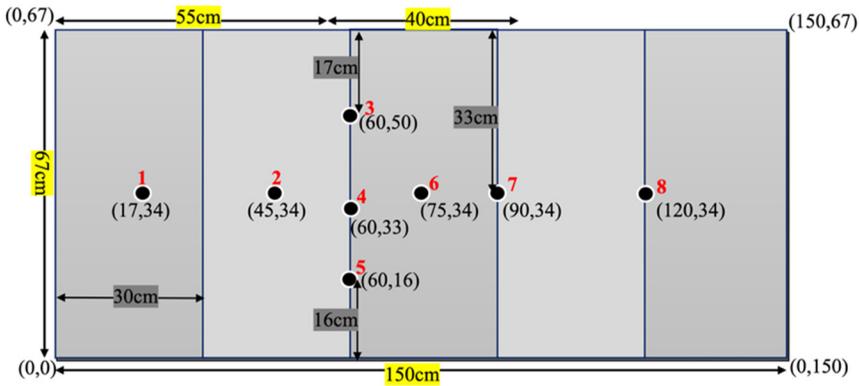


圖 5 野火擴散燃料實驗台示意圖

燃料以桃花心木落葉進行試驗。桃花心木 (*Swietenia macrophylla*) 屬於楝科 (Meliaceae)、桃花心木屬 (*Swietenia*) 的常綠性喬木，原產為中美洲區域，該植物的花期位於春季，而在台灣中、南部地區，由於氣候及雨量都相當適中，因此桃花心木在此地區生長良好，主要分佈於低海拔平地道路、校園、公園及造林地等，果實呈現卵形或錐狀橢圓形，外表有線條，成熟時會自基部縱向裂開，種子帶有翅膀四處飛散 (農業部 (MINISTRY OF AGRICULTURE), 2023)。

在實際環境中，地面的落葉枯枝層包含各種成分，包括落葉、果核、土壤、樹枝、垃圾等可燃物。為了降低複雜性與交互影響，本研究僅使用了落葉及樹枝，透過篩網排除土壤層與垃圾層的影響。

在火災中，燃料、氧氣、溫度為影響火災發生的關鍵因子。燃燒開始後，火焰擴散情況受點火方式和環境特性影響。點火模式分為線點火 (Line ignition) 和單點點火 (Point ignition)，前者是線性擴散，可以觀察到火焰的水平移動，如圖 2 所示 (Q: 圖 6 ?)，而後者通常從發火源開始向周圍擴散形近似圓形。為求穩定，本研究中選擇使用線點火進行實驗燃燒。



圖 6 實驗火災蔓延時序變化

(數字為燃燒時間(分:秒))

本研究同時調查落葉乾燥與否對於火災蔓延速度，因其與季節、乾濕度變化息息相關。調查燃料含水量 (Fuel Moisture Content, FMC) 對野火特性的影響，以及與季節進行比對，分為完全烘乾與未烘乾狀態。其方法係透過取樣 20 克落葉放入烘箱，設定溫度值為 60°C 熱風循環 24 小時後再測質量變化，單位為百分比%，計算模式如下。此模式經常用於荒地火災科學各領域，並已應用在野火相關研究 (Campbell-lochrie 2021)。

$$FMC_{Dry} = (m_{wet} - m_{dry} / m_{dry}) * 100\%$$

肆、結果與討論

火焰蔓延實驗是在實驗室環境內部進行，因為控制的環境條件，有助同時觀察野火是否受季節溫度影響而在蔓延速度上產生變化。如圖 7 所示，室內環境平均溫度 32.4 ± 1.9°C。

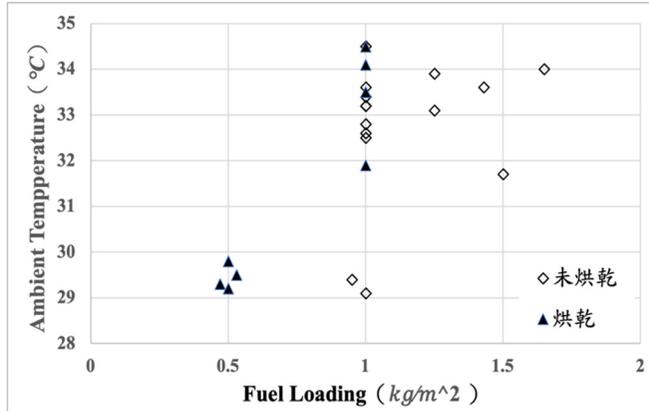


圖 7 實驗室環境溫度與燃料負載

本研究透過三種不同燃料負荷（1、1.25、1.5 kg/m²）的桃花心木落葉燃料床進行燃料負載影響的研究，如圖 8 所示（誤差線條表示該條件下所有實驗的最大與最小偏差）。本圖呈現的是未烘乾組的實驗，其中 1.65 kg/m² 及 1.43 kg/m² 皆與 1.5 kg/m² 一同計算。儘管本實驗以 1 kg/m² 為基值，但由於每次採集落葉受到環境或土壤層濕度影響而存在差異，在雨天過後，落葉含水量高，經過一天的烘箱處理，其重量可能減半，因此誤差值較為顯著。

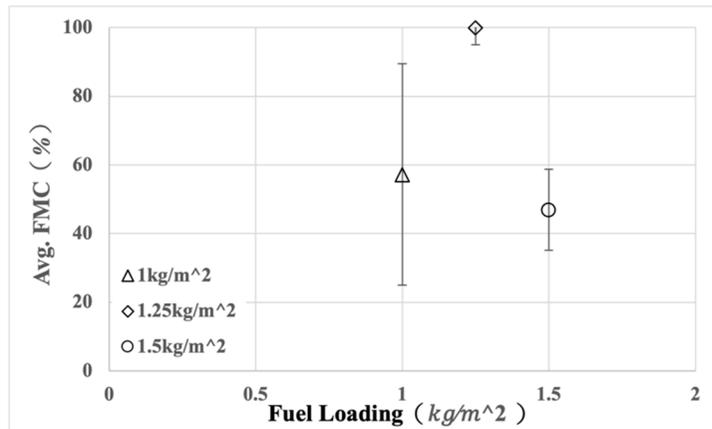


圖 8 燃料水分含量與燃料負載

(一) 單位面積燃料對平均擴散率的影響

本研究所觀察到火焰平均擴散率 (Avg. RoS) 與其他燃料類型研究存在差異。在 Campbell 博士的研究中 (Campbell-lochrie 2021)，透過僅有松針所組成的燃料床，在 0.5、1、1.5 kg/m² 的燃料負載下，其平均擴散率分別為 129、135、146 mm/min。然而，在本研究，燃料床 (未烘乾組) 之 1、1.25、1.5 mm/min 的燃料負載下，平均擴散率為 42.6、27.3、51.8 mm/min; 在完全烘乾實驗組，於 0.5、1 kg/m² 的燃料負載下，平均擴散率為 36.8、115 mm/min，如圖 9 所示。

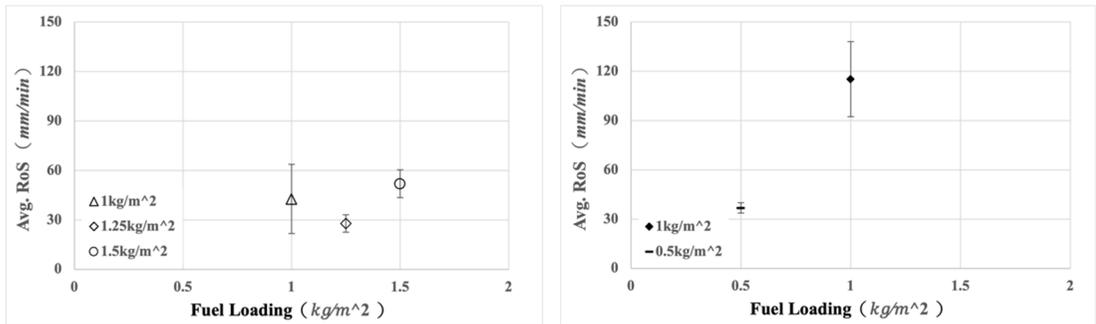


圖 9 單位面積燃料量對平均擴散率的影響 (未烘乾，左圖；烘乾，右圖)

雖然存在差異，但可以觀察到落葉烘乾後，平均擴散率都有明顯增加。值得注意的是，在本實驗中，烘乾後由於燃料含水量下降，以及負載增加，導致燃料平均擴散率加快。

縮小尺度的燃料床實驗中觀察到火焰平均擴散率或與體積密度之間可能存在相關性，如圖 10 所示。在未烘乾組 (左圖) 中，隨著體積密度的增加，平均擴散率呈現下降趨勢 ($y = -0.8712x + 66.118$, $R^2 = 0.858$)；而烘乾組 (右圖) 中，隨著體積密度 (Bulk density) 增加，曲線卻並無固定成長，無法確定兩者是否存在相關聯。

(二) 體積密度對平均擴散率的影響

當提升燃料負載使得燃料高度亦提升時，固定體積密度，對擴散率僅有輕微影響；然而在不改變燃料高度的前提下，新增燃料或壓實燃料，使得體積密度增加時，擴散率也會增加。因此，若欲提高火焰擴散率速度，可以透過從壓實燃料改變燃料高度或增加燃料兩種方式進行。Campbell 也曾對於研究提出關

於燃料床對火焰蔓延的影響 (Campbell-Lochrie et al. 2023)，對於小尺度或固定燃料床物種，透過燃料負載或燃料床高度改變填充比。

燃料負載固定時可以透過壓實燃料床，從而降低燃料高度並增加體積密度。或者，在改變燃料負載時，保持恆定體積密度，進而改變燃料高度，從此觀點更確認這三個影響因子的確相互作用，而在本研究中，所進行的實驗組僅針對改變燃料負載改變討論，未進行壓實燃料改變體積密度。

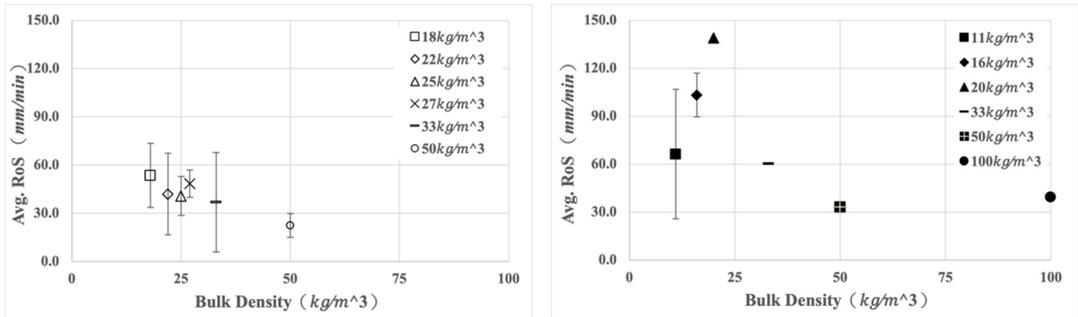


圖 10 單位體積密度對平均擴散率影響 (未烘乾，左圖；烘乾，右圖)

(三) 燃料狀態與平均火焰高度

本研究的平均火焰高度，如圖 11 所示。在燃料未烘組，分別為 1、1.25、1.5 kg/m² 燃料負載下，平均火焰高度分別為 0.1m-0.13m；燃料受烘 1 kg/m² 燃料負載下，其平均火焰高度為 0.2m。烘乾組與過去的研究所呈現火焰高度相似 (Campbell-lochrie 2021)。

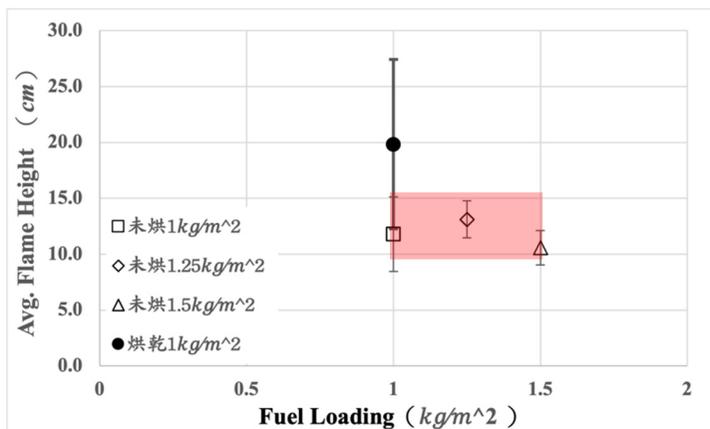


圖 11 不同燃料負載和平均火焰高度的影響

實驗結果顯示，當燃料負載增加時，不僅影響火焰擴散率，更間接影響火焰高度。Morandini 等學者 (Morandini et al. 2018) 曾進行大尺寸的野火蔓延實驗，藉由影像流速計和影片成像分析火災蔓延速度，研究在不同坡度下（無坡和上坡（30°））對火災蔓延的差異，並將燃料負載與火焰高度進行分析，並提出燃料負載與火焰高度與熱釋放率大小有關。Xu & Lei (Xu and Lei 2022) 也曾透過木塊實驗觀察火焰高度與熱釋放率之間的關係，說明當熱釋放率下降時，火焰高度也會下降，透過典型的火焰影像進行分析，在快速燃燒階段，火焰高度高且連貫，燃料供應充足，而後火焰逐漸降低，出現單獨火焰，形成薄膜火焰 (Filmy flame)，當熱釋放率下降時，火焰高度也會隨之下降，如圖 12 所示。

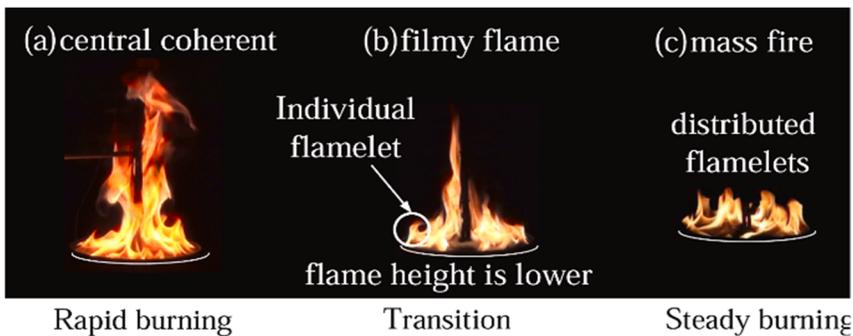


圖 12 典型火焰變化 (Xu and Lei 2022)

值得注意的是，是否仍有其他因子影響火焰高度，將在未來實驗設計與研究中進一步探討。

(四) 燃料含水狀態與火焰高度變化

火焰高度與時間的關係，如圖 13 所示。圖中可以看到實驗編號 A~G 的各階段火焰高度發展曲線，大約在前 150 秒前有一段高峰，但這段與落葉燃料本身沒有太直接關係，其原因在於本實驗點火前會先將防火棉均勻浸泡在丙酮進行點火，提供額外的點火能量，使其能迅速燃燒，在受熱過程中溫度提高，當周圍溫度達到落葉燃點便開始燃料燃燒。

表 1 研究實驗相關背景資訊

編號	乾燥狀態	環境溫度 (°C)	環境濕度 (%)	燃料高 (cm)	燃料負載 (kg/m ²)	體積密度 (kg/m ³)	燃料含水量 (%)
A	未烘	35.9	59	5.5	1.0	18.1	33.3
B	未烘	34.5	63	5.5	1.0	18.1	11.1
C	未烘	33.4	68	2.0	1.0	50.0	100.0
D	未烘	33.4	61	2.0	1.0	50.0	53.8
E	未烘	31.7	57	5.5	1.5	27.3	33.3
F	未烘	34	62	5.0	1.6	33.0	53.8
G	未烘	33.6	62	5.0	1.4	28.6	53.8
H	烘乾	34.5	63	6.3	1.0	15.8	N/A
I	烘乾	33.5	66	5.8	1.0	17.2	N/A
J	烘乾	34.1	60	3.0	1.0	33	N/A
k	烘乾	31.9	52	5.0	1.0	20	N/A

圖 13 (a)，在未烘狀態及燃料負載 1 kg/m² 相同情況下，但由於燃料含水量 (FMC)、燃料高度的不同的情況使得實驗時間與火焰高度皆有差異。表 2 為各實驗中之相關參數。實驗結果中，A、B 相對 C、D 燃料相對濕度更低，這將影響燃燒情況，需要同時考量，如：燃料水分含量、燃料負載、體積密度、風向風速、環境溫濕度等因子。

燃料含水量在越低的情況下，代表在燃料在燃燒中可蒸發的速度相對更慢更少，使火災燃燒效率提高。且堆放體積的高度也有差別，實驗 A、B 燃料高度 5.5 公分，然而 C、D 燃料高度僅有 2 公分，相對體積密度更大，而在燃料濕度越高的情形下，落葉燃料更容易悶燒或產生白煙，而使得燃燒效率更慢，甚至抑制其燃燒，悶燒在燃燒情況下也存在一定危險性。

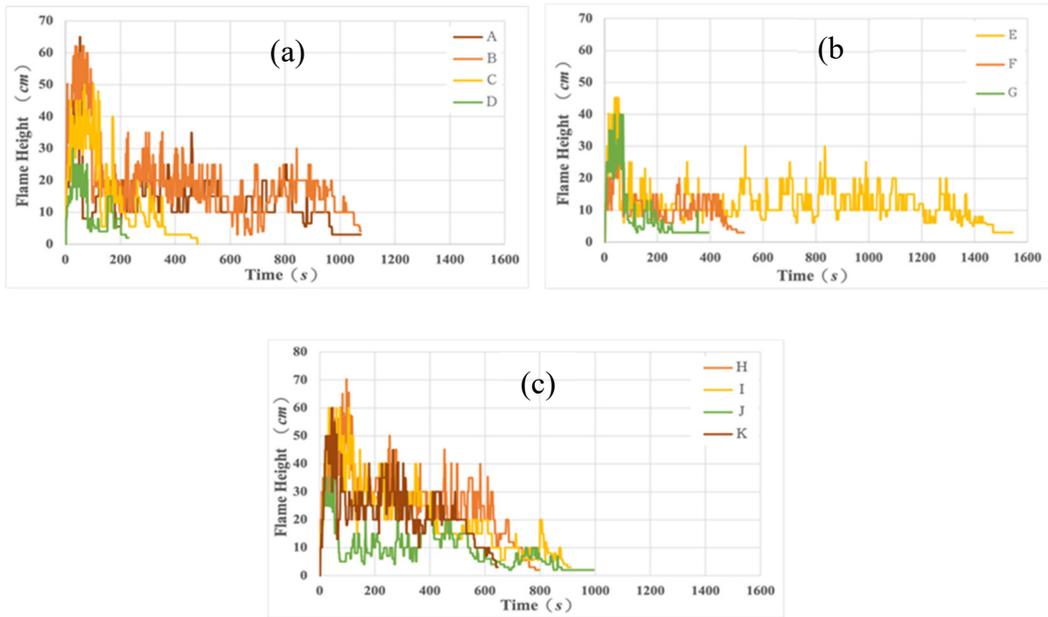


圖 13 火焰高度變化與燃燒時間關係

(a圖：未烘， 1 kg/m^2 ; b圖：未烘， 1.5 kg/m^2 ; c圖：烘乾， 1 kg/m^2)

除能見度降低外，也可能產生有毒氣體或救災人員未注意或無法預測情況。例如 2023 年 6 月發生在苗栗的森林大火，因為大量廢棄木材堆放，加上降雨潮濕，造成悶燒濃煙及一氧化碳毒氣，更因風向改變，救災人員吸入，導致 10 位救災人員身體不適（山林大火救災風向變 10 警義消吸入一氧化碳送醫 2023）。本實驗中，亦有因相對濕度高，導致燃燒過程產生大量白煙或悶燒情況，誤以為燃燒已經結束，實際過了半分鐘後又有火焰燃燒的情形出現，如圖 14 所示。



圖 14 實驗中產生白煙悶燒

圖 13 (b) 與 (a) 相比，不同的點在於，相同的未烘狀態下，不同負載的燃燒情形，可以比較實驗 A 和實驗 E，兩者僅改變燃料負載，在未壓實的狀態下透過增加燃料，進行觀察，發現隨著體積密度增加，燃燒時間隨之改變，實驗 A 燃燒時間 17 分 22 秒，實驗 E 燃燒時間 25 分 43 秒。觀察實驗 E 和 G 的燃燒條件，發現兩者其實極為相似，僅有燃料含水量有明顯差異。

圖 13 (c) 與 (a)、(b) 相比，不同的點在於狀態的改變，在落葉燃燒前，增加了烘乾的步驟，此目的主要比較，在同一天實驗並採用相同燃料，若燃料含水量改變會如何影響火災蔓延。由實驗 C 和實驗 I 可知，在相同環境、溫度和燃料負載下，僅改變了含水量，但堆放的燃料高度、體積密度及燃燒時間皆有所變化。未烘組實驗 C 燃燒時間 7 分 9 秒，烘乾後，燃燒時間如實驗 I 所示 15 分 33 秒，延燒面積由 0.067 平方公尺，增加為 0.97 平方公尺；接著觀察實驗 D 和實驗 J，這組測試與前組相同，在落葉烘乾後的燃燒行為皆較未烘組強烈，實驗 D 燃燒時間 3 分 49 秒，延燒面積 0.067 平方公尺；實驗 J 燃燒時間 16 分 34 秒，延燒面積 0.533 平方公尺。

值得注意的是，如圖 13 所示，可以發現 (c) 烘乾組的平均火焰高度均比 (a)、(b) 未烘組的平均火焰高。其中平均火焰高度分別為 (a) 圖：14.2 公分；(b) 圖 10.6 公分；(c) 圖 19.8 公分。

伍、結論與建議

本研究透過探討國際森林大火問題探討與分析，瞭解影響森林大火（野火）延燒的核心因素，氣候變遷影響、森林與城市使用間的 WUI 問題以及現有 Rothermel 模型的限制，進而顯示實際進行火災實驗的重要性，以取得火焰擴散率、熱釋放率、火焰高度、熱傳遞等參數，未來才能據以優化相關預測模型。

在本實驗研究中，探討了不同質量密度、燃料乾燥程度等因子，下述為本研究發現：

(一) 燃料負載大容易引發長時間的延燒

本研究主要以改變燃料負載，未實際控制燃料高度（進行壓實燃料），進行體積密度觀察。由於每次試驗燃料含水量不同，因此在隨機堆疊的狀態下，也間接發現，當相對濕度越高，落葉含水量越大，所含落葉量越少，能堆疊高度越低，從而影響體積密度（填充比），進而影響火焰燃燒情況。觀察到燃料

負載越大，可燃物質量將更多，若在環境濕度固定的情況下，如：乾燥或久旱未雨的區域，當土壤層的可燃物到達燃點將可能引發火災發生，也同時印證了相關研究發現（Yu, Wang, and Liu 2024）。

譬如台灣秋冬過後，隨著落葉大量掉落累積，若未及時清除，來年春夏季，正值野火高風險月份，將可能因為落葉燃料等可燃物累積，和冬季未降雨含水量下降，而導致野火災害風險提升，因此平時就應注意土壤層是否有可燃物的堆積，若有砍林，也應及時清除，執行有效減災。

（二）環境濕度越高，延燒速率越慢，甚至停止燃燒

本研究同時進行燃料含水量改變，分為烘乾組與正常的未烘組，在實驗結果發現當落葉進行烘乾後，由於水分減少，在進行燃燒實驗時，會比一般未烘組火焰更旺盛。

這可對應台灣春夏季 3~5 月為野火高風險階段，因環境溫度漸暖，加上全球暖化，使得夏季日數延長，未來勢必也需要提早進入警戒，在經常發生或危險區域，可以執行撒水降溫。可行方案：1. 增加含水量，使森林大火發生延燒機率下降；2. 降低環境溫度，減少周圍可燃物達到起火最小能量發生火災情況。但此狀況需格外注意的是，若依然發生森林起火延燒，則悶燒機率會提升，救災人員需注意即時風向風速，避免意外吸入有毒氣體，此外，亦有可能發生飛火延燒，如：2025 年加州洛杉磯森林大火，點燃中的碎片（firebrand）為造成火災延燒重要原因。

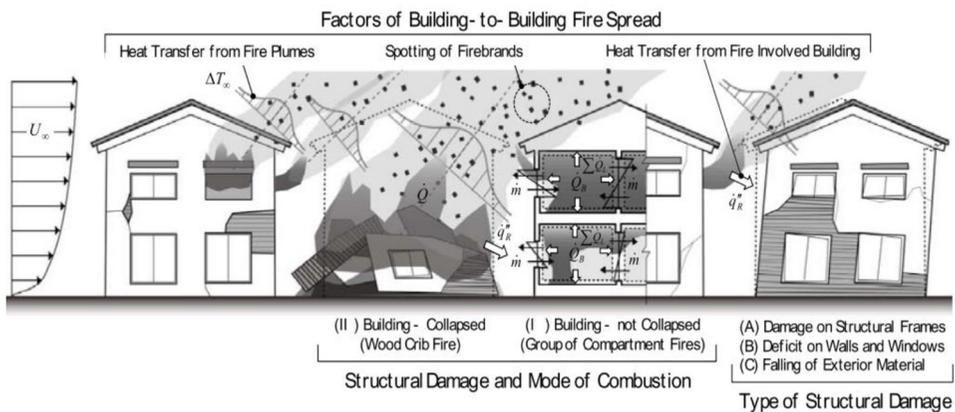


圖 15 野火發生後可能的延燒（firebrands）模式（Himoto et al. 2011）

未來研究建議，需要同時考量以下：

（一）考量其他物理因素對於火災蔓延影響

本研究目前僅對改變含水量、燃料負載進行實驗，但實際上野火延燒相當複雜。因此未來將考量，不同傾斜角與不同的堆疊方式進行比較，此外並將同時測量其熱釋放率、熱通量、及質量損失等物理特性測量。

（二）理想化小尺度實驗與實際狀況差異

在目前實驗為初階段目標探討也火基本特性，因此僅先進行小尺度試驗，未來這部分也會規劃擴大尺度、蒐集台灣常見野火發生的樹種進行實驗。實際野火火場由於變化因子過多，隨時可能與上一秒的情形有所不同，而小尺度好處便是能在可控制的範圍觀察。雖與實際火災有所不同，但小尺度試驗模擬多為改善模型，提出可改善方案的重要步驟。

（三）森林野火產生碳排放量影響

淨零碳排為世界發展趨勢，且為永續發展的重要目標，僅僅一次的失控的野火就將造成減碳目標失效。因此，需同時測量產生之氣體評估整體永續發展產生影響，及研擬將低其排碳的可行減災方案。

從這次加州野火可以看到野火的發生所帶來的損害不可估計，不管是財產或是對大自然的損害都是很難復原的。實現淨零碳排及有效防災不簡單，一場火災便將數片的森林全部燒毀，間接導致原先的努力也付諸流水，或許氣候變遷所帶來的災害我們無法預知，但平常的預防或許可以更努力施行，至少在災害來臨時，可以讓損失減到最低。

值得注意的是，本研究重點在於透過都市常見樹種桃花心木作為研究初探與實驗建構，雖無法直接作為火災受延燒樹種，如：相思樹、二葉松、楠葉等燃燒模式、堆疊與火勢延燒發展之使用，但成果如「燃料堆疊負載」與「濕度」等，或可作目前林火防治手段之參考。

致謝

本文承蒙國科會研究計畫編號：NSTC 111-2625-M-309-004 之經費補助得以順利完成，特此感謝。另感謝國立中興大學循環經濟研究學院特用作物及代謝體學位學程曹乃文教授與吳珈誼碩士生協助本實驗之完成。

參考文獻

- Andrews, Patricia L. 2018. 2018 USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR *The Rothermel Surface Fire Spread Model and Associated Developments: A Comprehensive Explanation.*
- Campbell-lochrie, Zakary. 2021. “Physical Phenomena Controlling Quiescent Flame Spread in Porous Wildland Fuel Beds Physical Phenomena Controlling Quiescent Flame Spread in Porous Wildland Fuel Beds.”
- Campbell-Lochrie, Zakary et al. 2021. “Investigation of the Role of Bulk Properties and In-Bed Structure in the Flow Regime of Buoyancy-Dominated Flame Spread in Porous Fuel Beds.” *Fire Safety Journal* 120(xxxx): 103035. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103035>.
- . 2023. “Effects of Fuel Bed Structure on Heat Transfer Mechanisms within and above Porous Fuel Beds in Quiescent Flame Spread Scenarios.” *International Journal of Wildland Fire* 32(6): 913–26.
- Chen, Yi Ying, S. Y.Simon Wang, Hong WenYu, andWan YuLiu. 2024. “When Forests Hold Their Breath: Will Increasing Drought Further Disrupt Carbon Sequestration?” *Environmental Research Letters* 19(3).
- Drysdale, Dougal. 2011. An Introduction to Fire Dynamics: Third Edition *An Introduction to Fire Dynamics: Third Edition.*
- Himoto, Keisuke et al. 2011. “A Post-Earthquake Fire Spread Model Considering Damage of Building Components Due to Seismic Motion and Heating of Fire.” *Fire Safety Science* (December): 1319–30.
- “L.A. Wildfire Photos: Widespread Destruction in Pacific Palisades, Malibu, Altadena & Beyond.” 2025. *Deadline*. <https://deadline.com/gallery/palisades-fire-photos-los-angeles/us-weather-fire-40/>.
- Lee, Hoesung et al. 2022. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023 *IPCC Sixth Assessment Report - Synthesis Report.*
- Luna, PhilDe. 2025. “5 Reasons Why The Los Angeles Wildfires Are The Start Of A New Normal.” *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/phildeluna/2025/01/08/5-reasons-why-the-los-angeles-wildfires-are-the-start-of-a-new-normal/>.
- Morandini, Frédéric, XavierSilvani, Jean LucDupuy, andArnaudSusset. 2018. “Fire

- Spread across a Sloping Fuel Bed: Flame Dynamics and Heat Transfers.” *Combustion and Flame* 190: 158–70.
- Vacca, Pascale et al. 2023. “Methodology for the Analysis of Structural Vulnerability of WUI Settlements.” *Fire Safety Journal* 140: 103853. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711223001212>.
- “Why Is California Burning?” 2020. *The Economics*.
- Xu, Tong, and Peng Lei. 2022. “Experimental Study on Flame Height and Heat Release Rate Estimation of Diesel-Wetted Wood Powder Fire.” *Case Studies in Thermal Engineering* 33(March): 101906. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101906>.
- Yu, Hong Wen, S Y Simon Wang, and Wan Yu Liu. 2024. “Estimating Wildfire Potential in Taiwan under Different Climate Change Scenarios.” *Climatic Change* 177(1): 13. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03669-z>.
- 吳珈誼, and 吳佳隆*. 2024. “野火延燒影響因子研究.” 燃燒季刊 33(2).
- 國科會 et al. 2021. *IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告*.
- “山林大火救災風向變 10警義消吸入一氧化碳送醫.” 2023. 公視新聞網. <https://news.pts.org.tw/article/640048>.
- 林嫩瑛, 蔡佳穎, and 張志新. 2021. “2020 年美國加州野火探討.” 行政法人國家災害防救科技中心.
- 環境部. 2023. *國家氣候變遷調適行動計畫 (112-115年)*.
- 農業部林業及自然保育署. 2024. “歷史森林火災點位分布.” 農業部. <https://mapportal.forest.gov.tw/portal/apps/opdashboard/index.html#/f912faeb33614c3f85ba304d3566faca> (May 19, 2024).