

# 燃料 / 氣候與地理因素 對森林火災影響之定量分析

文 ■ 林誠興 ■ 元智大學機械工程研究所教授

黃家明 ■ 元智大學機械研究所碩士生

## 壹、前言

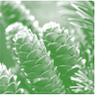
2003年10月美國加州發生森林大火，其損失相當慘重，共造成至少二十二人喪生、三千五百多戶住家遭焚毀，以及將近十一萬的居民撤離自己的家園，而其延燒的範圍更廣達數州，約為三十萬公頃，而此次火災，財產損失估計約為數十億美元；不論國內外，每年因為野火都造成相當大的損失，根據林務局的統計，在2002年，台灣共發生347次森林火災，延燒面積為741.63公頃，總損失為84,823,697元；從野火發生的環境以及原因來看，台灣多數的野火發生原因皆為人為因素，如在山區工作的人員或是遊客，由於缺乏公德心以及對野火的警覺心，菸蒂隨地亂丟、營火之殘火沒有處理得當，往往因為星星之火而造成大片森林資源遭焚毀，此外，台灣特有的祭祀文化，在清明掃墓時，亦容易造成野火災害。

發生野火災害，搶救的過程非常重要，雖然再大規模的野火終究也有熄滅的一天，然而若因搶救得當，滅火策略成功，往往能將損失降至最低，而滅火策略的制定，取決於野火的即時資訊是否能夠迅速且確實的取

得，以及對於野火擴散趨勢的預測是否準確，目前國內林務局在發生森林火災時，其對於野火資訊的搜集方式以及林火預測方式，我們可以以2001年2月11日所發生的梨山地區大甲溪事業區22、23林班地所發生的森林火災為例來探討。

在此次森林火災中，火場指揮所並無專責的火場觀測人員，因此讓指揮官無法掌握及時的燃燒範圍，不能制定出恰當的滅火策略，導致最後僅能憑救火員自行決定該如何滅火，然而若救火員對於林火特性認識不夠，可能就得背負著極大的生命風險來執行滅火的任務；而其對於林火擴散的趨勢，也必須藉指揮官的經驗來判斷。過去曾有學者研究，對於林火預測之依據主要靠以往經驗（47%），以及過去火場紀錄（32%），而借助儀器計算者僅約有1%；若能藉電腦模擬來輔助預測林火擴散趨勢，便可提高準確度，並可將有限的滅火資源運用於適合的地方，提高滅火效率。

林火電腦模擬系統在進行林火擴散預測時，需要相當多的靜態以及動態資訊，如地形、燃料、即時氣象資訊以及最新火場位置



等，一旦發生林火，運用此系統，輸入條件參數，便能迅速計算出未來火場可能發展的模式，若有必要，此系統亦可獨立成為林火行為預測系統，因此，不論在消極的撲救森林火災，或是積極的預防森林火災，一套本土化的林火電腦模擬系統都是不可或缺的。

隨著資訊科技的進步，近年來國內在森林經營方面亦逐漸趨向資訊化，尤其是運用林火資料庫結合地理資訊系統進行模擬分析，然而國內卻尚無一套屬於本土的林火電腦模擬系統，目前的林火模擬軟體都為國外所開發，雖然其理論背景相同，但因為影響林火的因子，如燃料類型、氣候以及地理環境，我國與其他國家大不相同，因此開發一套本土化林火電腦模擬系統已是刻不容緩的要務了。

本文利用林火模擬軟體FARSITE來探討燃料、氣候與地理因素對森林火災影響之定量分析，由於本文主要探討單因子與林火之關係，尚不考慮因子在不同國家之獨特性，因此國外模擬軟體的適用性並不會對模擬結果造成影響，而模擬結果趨勢可供日後建構本土化林火電腦模擬系統驗證及參考。

## 貳、影響林火之因子

影響森林火災的各種因子，可由下列之樹狀圖1表示。

燃料因子中之燃料型態，為燃料之類型，在不同燃料類型的背景下發生林火，其林火行為亦會有所不同，NFPL將燃料型態，依其特性分為草類、灌木類、枯枝及落

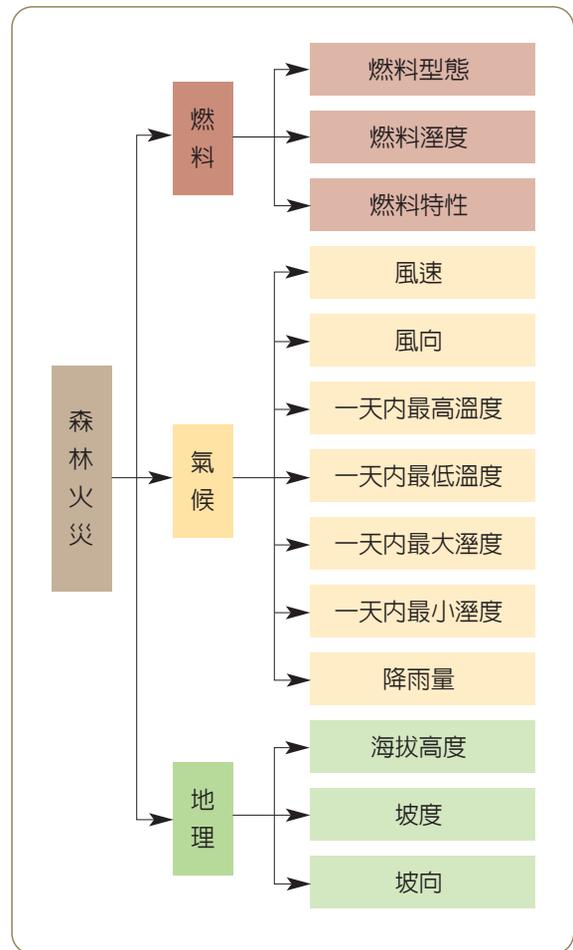


圖1 影響因子之樹狀圖

葉、殘枝等四類；而樹冠密度及樹幹密度，則為單位面積內的樹冠及樹幹濃密度，若不考慮熱傳性質，則樹幹與樹冠越濃密，可能會阻礙風的流動，造成延遲林火的擴散速率；氣候因子中的風對於林火的影響相當大，風速決定林火的擴散速率，而風向決定林火的走勢，此外，當天的天氣變化，亦會對林火造成影響，尤其是降雨量，往往是撲滅林火的關鍵。地形方面，則以坡度影響較大，然而有時候因為地勢的變化，亦會造成風向及風勢的改變，進而影響林火變化。

### 參、林火擴散電腦模擬模式

森林火災是一種複雜的物理現象，從微觀的燃料燃燒反應，到大範圍的氣層運動，相關的物理觀念包含預測林火擴散的 Huygens' principle，熱量傳遞的三種機制：熱傳導 (conduction)、熱對流 (convection) 以及熱輻射 (radiation)，計算氣層運動之速度場、溫度場的熱流3D統御方程式等。

欲以物理觀念來描述一場森林火災，必須同時考慮林火的擴散、廢氣及微粒的產生、林火猛烈度、熱流場的運動等，然而一旦考慮較複雜的物理觀念，往往就需要做許多複雜的假設以及比較久之模擬時間，因此通常利用複雜之物理觀念來研究森林火災時，必須有較充裕的時間；發生森林火災時，時間非常寶貴，且所需要的參數僅為林火的擴散趨勢以及速率，因此若能以簡單的物理觀念，輸入當時之即時資訊，便能預測出林火擴散的趨勢，且同時具備準確性，對於指揮官在制定滅火策略時，將能有極大的幫助。

林火擴散模式最初是由Rothermel推導出來，而最早被USDA Forest Service使用於計算具有分布不均勻的植物層之空間，發生林火時之林火擴散速率，林火點燃於空間上的某一點，擴散速率為R，其計算之方法如下：

$$(1) \quad R = \frac{I_R \xi = (1 + \phi_w + \phi_s)}{P_b \varepsilon Q_{ig}}$$

根據過去經驗，林火擴散曲線通常被假

設為橢圓曲線，而其幾何位置的計算如下：

$$(2) \quad \begin{aligned} x(s, t) &= at \cos s \\ y(s, t) &= bt \sin s + ct \end{aligned}$$

$x(s, t)$  以及  $y(s, t)$  定義出一封閉的橢圓曲線，其中  $s$  的區間為  $0 \leq s \leq \pi$ 。圖2-1為使用模擬林火軟體FARSITE模擬之林火擴散邊界，FARSITE之林火擴散趨勢計算是以此觀念為基礎理論，因此可以(2)式來解釋圖2之林火擴散曲線。圖中有兩個不同的林火周長，時間差距為一小時，風速為5hr/km，風向由南朝北，由圖中可發現其擴散趨勢朝順風方向加速，且曲線為橢圓形。

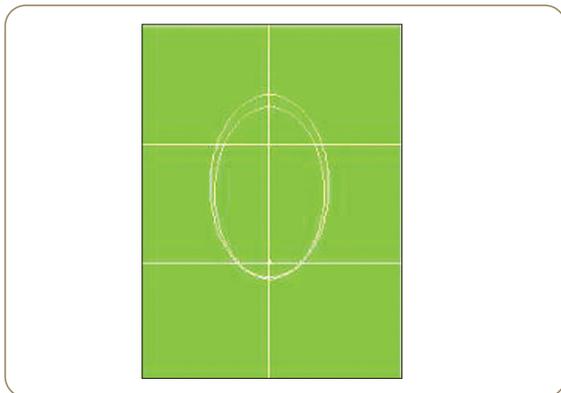
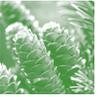


圖2 林火擴散曲線

FARSITE為美國林火實驗室所發展出之軟體，其火災成長模擬原理使用惠更斯原理 (Huygens' principle)，其擴散方式是以一個方向作橢圓形擴散，FARSITE的附加模型有樹冠火、團火、火勢的加速度、燃料以及溼度等，對於一個新的案例，這些附加的模型都必須重新加以定義，利用上述附加模型之綜合產生隨環境條件改變的林火成長和強度的空間模式。



FARSITE在建立一森林模型時，須先建立其周圍環境的附加模型，如天氣、風、燃料…等等，然後再綜合起來，組成一個完整的森林模型，最後選擇起火點，然後進行林火行為的模擬。由於其理論背景僅為簡單之光學原理，計算時間非常迅速，所需的計算器其功能亦不需非常強大，一般手提電腦通常就能夠使用；準確度方面，與過去歷史林火相比較，其假設林火以橢圓方式成長確實與實際情形相符合，因此，一旦發生林火，若能利用此模式來協助滅火策略的制定，將能夠將有限的消防人力運用於最佳的位置，以達最有效之滅火行動。

## 肆、各因子與林火之關係

表1 NFFL Fuel Models

Fuel model	Typical fuel complex	Fuel loading				Fuel bed depth	Moisture of extinction dead fuels
		1h	10h	100h	Live		
		— tons / acre —				Feet	Percent
<b>Grass and Grass-dominated</b>							
1	Short grass (1 ft)	0.74	-	-	-	1.0	12
2	Timber (grass and understory)	2.0	1.0	0.50	0.50	1.0	15
3	Tall grass	3.0	-	-	-	2.5	25
<b>Chaparrall and Shrub Fields</b>							
4	Chaparrall (6ft)	5.0	4.0	2.0	5.0	6.0	20
5	Brush (2ft)	1.0	0.50	-	2.0	2.0	20
6	Dormant brush Hardwood slash	1.5	2.5	2.0	-	2.5	25
7	Southern rough	1.1	1.9	1.5	0.37	2.5	40
<b>Timber litter</b>							
8	Closed timber litter	1.5	1.0	2.5	-	0.2	30
9	Hardwood litter	2.9	0.41	0.15	-	0.2	25
10	Timber (litter and understory)	3.0	2.0	5.0	2.0	1.0	25
<b>Slash</b>							
11	Light logging slash	1.5	4.5	5.5	-	1.0	15
12	Medium logging slash	4.0	14.0	-	16.5	2.3	20
13	Heavy logging slash	7.0	23.0	-	28.0	3.0	25

## 1. 燃料因子與林火

在整個森林火災的火場中，燃料因子扮演著相當重要的角色，然而燃料的定義，並非單指植物的種類，在森林火災中如何描述燃料，可以從下列五點來描述：燃料負載 (Fuel loading)、燃料表面積與體積比 (Surface area to volume ratio of each size group)、燃料床的孔性 (Fuel bed depth)、燃料密度 (Fuel particle density)、燃料溼度 (Moisture of extinction)；上述五點中，以燃料床的孔性對林火的擴散速率最具影響。在模擬的設定方面，所有的參數均固定，僅改變燃料的模式，不考慮風的因素以及地理因子，燃燒面積設定900公頃，燃燒時間為12天 (288小時)，時間步 (Time step) 取

30分鐘；並未採取任何滅火策略，因此除了model 8以外，其他的燃料都將預設的面積燒完而熄滅，因此所設定的燃燒時間足夠；因為是長時間的燃燒，所以可以忽略當天氣候因子對燃料的影響；表1為NFFL（National Forest Fire Laboratory）對燃料的定義，NFFL將燃料依其特性細分為13種燃料，又將性質類似的歸為同類，在FARSITE中，主要燃料類型就是這13種燃料；從燃料床的孔性（Fuel bed depth）來探討林火的擴散速率；在四大類中，以model 3、model 4、model 10、model 13為擴散速率較快的燃料模式；表2為模擬後計算出的計算時間，從表中可以觀察出model 3、model 4、model 10、model 13在四大類的燃料中，為最快將預設燃料燒完的燃料模式，與表1對照，符合

表2 Burning Time

	預熱時間 (hr)	熄滅時間 (hr)
Model 1	56	110
Model 2	55.5	130.5
Model 3	0.5	63.5
Mode 4	53.5	74.5
Mode 5	53	157
Mode 6	48.5	97.5
Mode 7	-	94
Mode 8	48	-
Mode 9	48.5	230
Mode 10	48.5	201
Mode 11	56.5	258.5
Mode 12	55	134
Mode 13	51.5	117

其燃料性質，因此判斷此模擬林火模型合理，可以繼續往下探討燃料因子與林火之間的關係。

圖3～圖6為林火擴散速率，其x軸為時間，以小時為單位，y軸為林火延燒面積，單位為公頃，曲線的斜率則為林火擴散速率；由圖3～圖6，可以更清楚的看出在各大類燃料中，model 3、model 4、model 10、model 13的林火擴散速率較快，即其林火行為較為明顯。

圖7～圖10為燃料燃燒後產生的廢氣比率，圖中1為CH<sub>4</sub>，2為CO，3為CO<sub>2</sub>；由之前的結果得知，model 3、model 4、model 10、model 13為各大類型的燃料中林火行為最明顯的燃料，因此取這四種燃料類型為觀察的燃料，圖中可以發現在森林火災中，不論何種燃料類型，其CO<sub>2</sub>的含量佔大部分，與室內火災不同，這是因為森林火災屬於開放空間的燃燒，燃燒的時候能夠不斷的獲得氧氣，造成完全燃燒。

## 2. 氣候因子與林火

在探討單一氣候因子與林火的關係時，我們探討每日最大與最小相對溼度、每日最高與最低溫、風速、降雨量；溼度方面，先固定最小溼度，討論最大溼度的影響，分別為50-20、60-20、70-20（%），再固定最大溼度，討論最小溼度影響，分別為60-10、60-20、60-30（%）。溫度方面，先固定最低溫，分別為25-20、30-20、35-20（℃），再固定最高溫，分別為30-15、30-20、30-25（℃）。風速改變範圍為0、20、50、100

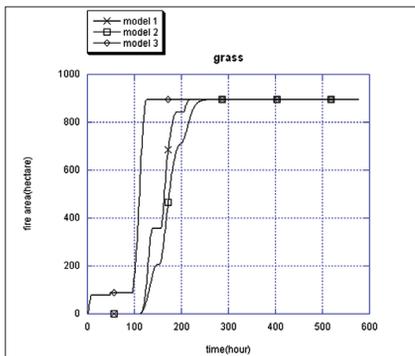


圖3 Grass林火擴散速率

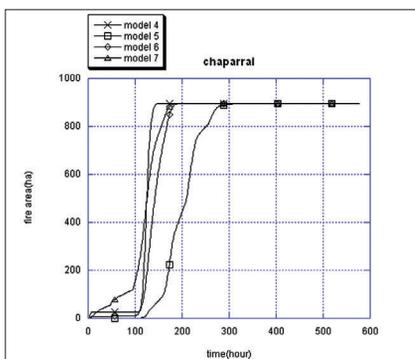


圖4 Chaparral林火擴散速率

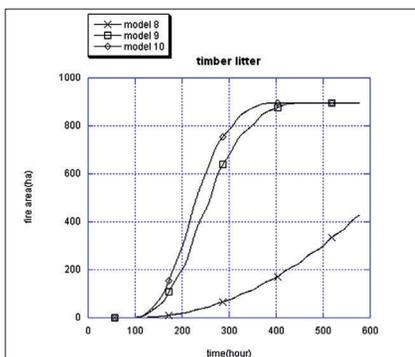


圖5 Timber litter林火擴散速率

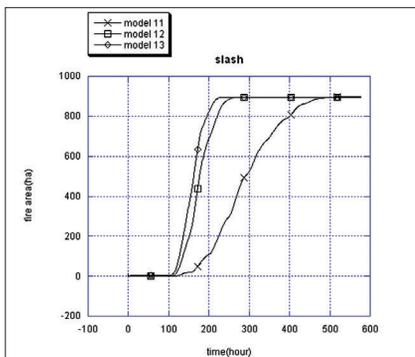


圖6 Slash林火擴散速率

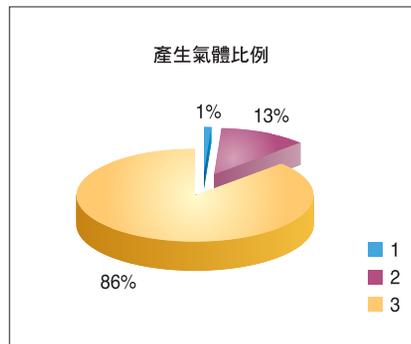


圖7 Tall Grass產生氣體比例

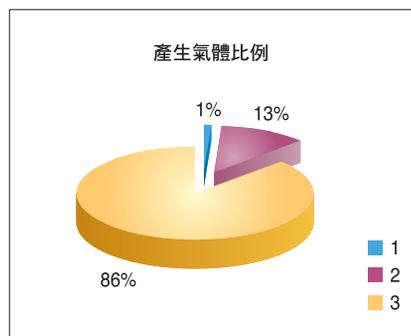


圖8 Tall Chaparral產生氣體比例

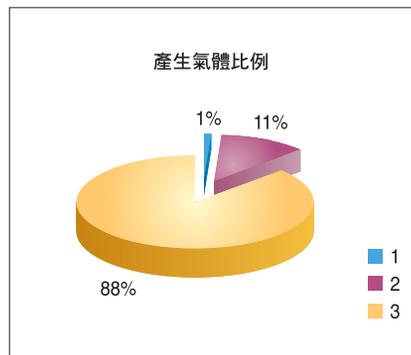


圖9 Timber產生氣體比例

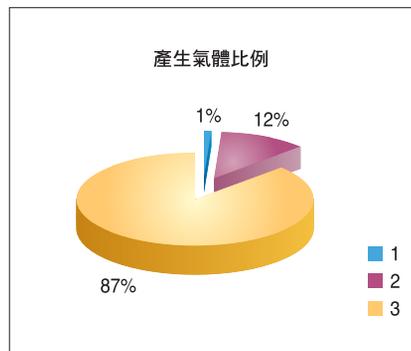


圖10 Heavy Slash產生氣體比例

(km/hr)。降雨量方面，分0、10、50 (mm) 來討論。

### 2.1 相對溼度

圖11為以最大溼度為變動邊界條件，其他參數固定，模擬之後得到的林火擴散速率，以已被焚燒的林地面積與時間表示，其斜率為林火擴散速率，圖12為熱釋放率，其曲線下面積則為總熱釋放量，觀察兩圖可發現，當天最大溼度值越大，則林火越不易擴散，此外，由於一天之中最大溼度約在凌晨2~4點會出現，我們可以發現，林火在經過最大溼度的時間時，會被抑制住，被焚燒面積的呈現停止成長的趨勢，而熱釋放率也會下降至零，待溼度下降，其熱釋放率才再度上升。

圖13與圖14為以最低溼度為變動邊界條件，其他參數固定，經模擬之後得到的林火擴散速率及熱釋放率，其關係為隨最低溼度降低，林火行為就越明顯。然而最高溼度以及最低溼度，何者對林火行為的表現影響較大，由圖12與圖14作一比較，可以發現，改變最高溼度時，其熱釋放率的差異性較改變最低溼度時大，因此可以判斷，一天之中的最大溼度對於林火的影響大於一天之中最低溼度對林火的影響。

### 2.2 溫度

從圖15、圖16可以發現，溫度對林火行為的影響較大，當一日內之最低溫較高時，其林火行為反而較不明顯，仔細觀察，林火行為是否較活躍，取決於一日內之溫度差，而非最高溫。

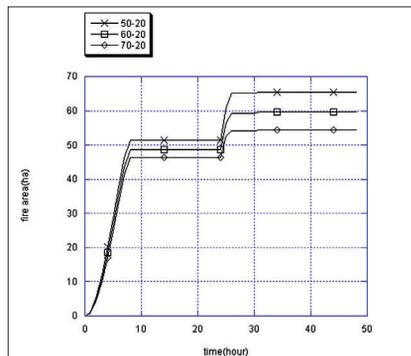


圖11 最大溼度—林火擴散速率

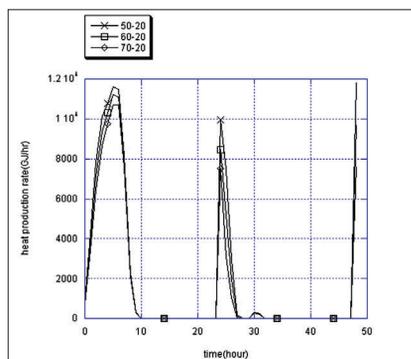


圖12 最大溼度—熱釋放率

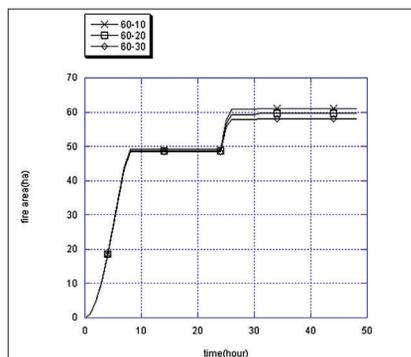


圖13 最低溼度—林火擴散速率

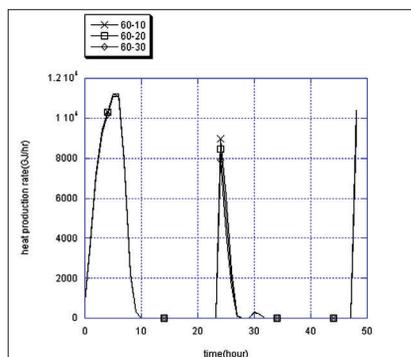


圖14 最低溼度—熱釋放率

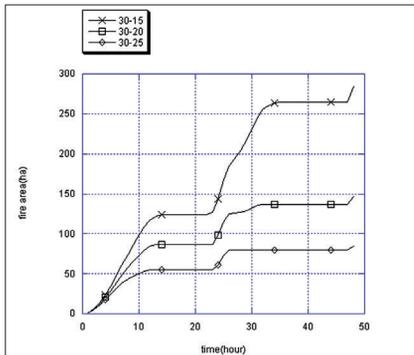
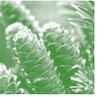


圖15 最低溫度—林火擴散速率

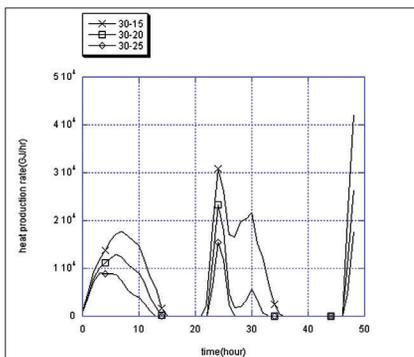


圖16 最低溫度—熱釋放率

## 2.3 風速

風向會造成火勢成長方向的改變，而風勢大小會影響林火成長的快慢，然而並非風勢越大，林火擴散速率就會越快，圖17為以風速為變數，探討延燒面積與時間的關係，風速 (km/hr) 為0、20、50時可以發現，在相同時間裡，延燒面積隨風速變大而增加，而當風速為100km/hr時，其延燒面積在同一時間裡，反而減少了，因此，風速對林火的影響有一臨界值，由圖19可知，風速約為40km/hr時為一臨界值，超過40km/hr延燒面積會逐漸變小，然而此值乃是針對某一特定燃料型態，並不適用於任何燃料型態。

## 2.4 降雨量

由圖20、圖21可以發現，降雨量可以很明顯的阻止林火成長，由森林火災的歷史來看，一些規模非常大的林火，演變到最後，通常是人力所無法撲滅的，最後都是靠下雨或是下雪才能夠熄滅林火，美國黃石公園大火便是一個最佳的例子；此結果也帶來了

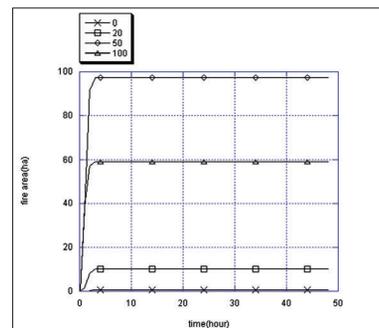


圖17 風速—林火擴散速率

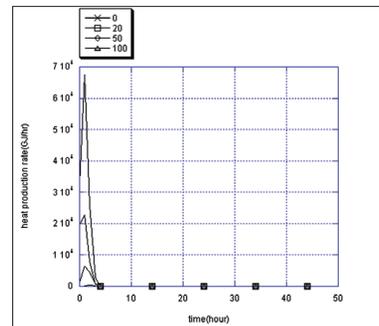


圖18 風速—熱釋放率

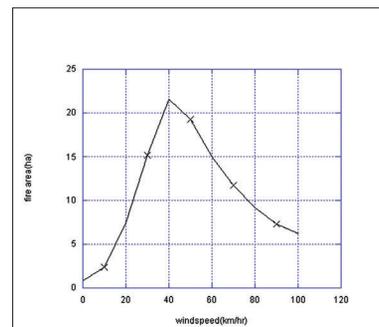


圖19 風速對林火影響之臨界值

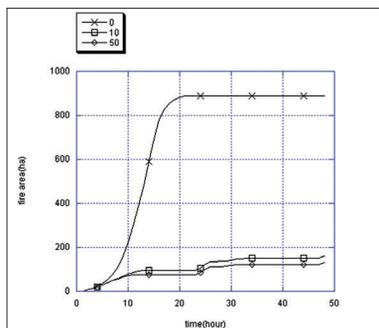


圖20 降雨量—林火擴散速率

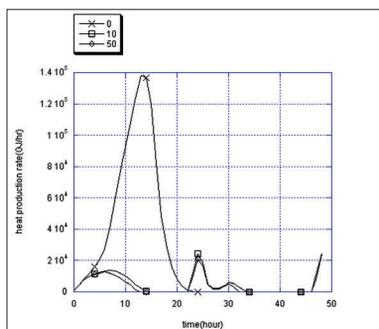


圖21 降雨量—熱釋放率

另一個資訊，當降雨量為零時，其林火擴散速率相當快，在模擬的設定中，預設林地面積為900公頃，在缺乏降雨量之情形下，林火於24小時內就已燒完所有預設林地，其熱釋放量，在24小時內會釋放出非常高的熱量。

### 3. 地理因子與林火

地理因子對於林火的影響最主要有兩個，一為因高度不同，造成植物層的不同，燃料的不同對林火的影響之前所討論；二為坡度對林火的影響，坡度對於林火的影響相當大，因為坡度的變化，可能造成風速的變化，上坡峰與下坡峰亦會對林火產生影響。圖22為坡度為0%時與林火的關係，可以發現其水平延燒面積與具坡度延燒面積相等，圖

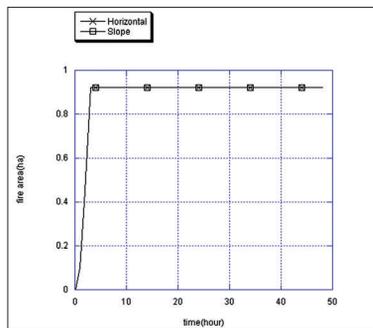


圖22 坡度0—林火擴散速率

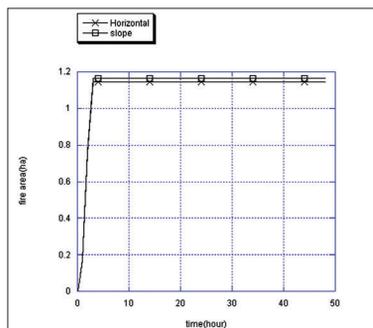


圖23 坡度20—林火擴散速率

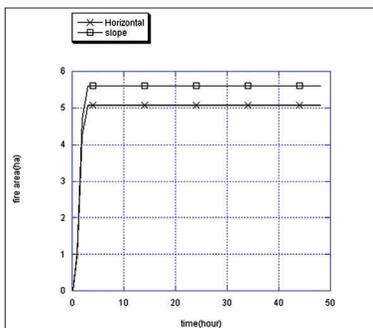
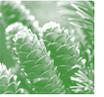


圖24 坡度50—林火擴散速率

23與圖24分別為坡度為20%及50%時之延燒面積，由圖中可以發現，當坡度越陡，其水平延燒面積與具坡度之延燒面積的差距就會加大。

### 伍、結論

在預測林火擴散趨勢時，燃料型態、樹冠密度、樹幹密度以及地形方面的因子，皆



是屬於靜態資訊，而氣候之變化屬於動態資訊，動態資訊必須及時更新，方能令模擬結果符合現況，以更具合理性，在氣候因子內，風速對於林火行為的影響屬於全面性的，在林火開始點燃至熄滅，皆扮演著重要角色。風速越大，越容易將新鮮的空氣補充給火場，然而一旦風速過大於臨界值，燃料則容易因缺乏足夠熱量而無法點燃或持續燃燒，且不同的燃料會有不同的臨界值。

溫度及溼度對於林火的影響，在單一天中較明顯，因為溫度與溼度的變化，以至於林火會有週期性的燃燒，如一日中，上午十時到下午二時，火勢燃燒較為旺盛，太陽輻射強，溫度高，風向不穩定，上山風風速大，火星容易飛散，若發生林火，較難控制。下午六時至次日上午四時，火勢變弱，溫度變低，溼度變高，地形風也減弱，改為下山風，火勢易控制。清晨四至六時，火勢最弱，火場最易控制。溫度最低，相對濕度最高，風速最小，風向最穩定，若發生大規模林火時，此刻為最佳撲滅及控制的時機。上午六時至十一時，火勢逐漸變強，溫度逐漸上升，風速亦逐漸增強。降雨量則往往是林火撲滅的關鍵。

本文使用之林火模擬軟體FARSITE為美國國家林火實驗室所發展出之軟體，因此其內建設定多以美國國內資訊為背景，然而我國在林相、氣候以及地理環境方面，都與美國有許多不同的地方，因此利用外國之模擬軟體來研究國內森林火災，其適用性還有許多值得討論的地方；建構一套本土化電腦

模擬林火系統是一件刻不容緩的事情，而建構本土化電腦模擬林火系統之前還有些問題必須去克服，如GIS系統的建構及普及、國內特有樹種的性質研究等。

目前我國國家森林經營目標以森林資源保育以及永續利用為主，林務局每年編列超過五十億元之預算執行「加強造林及森林永續經營」計畫等四項施政計畫所列之二十一項子計畫，其中包含森林火災的項目，由此可以發現森林火災的問題已逐漸受到重視；然而，在森林火災的問題中，積極的預防以及消極的滅火行動中，都需要一套電腦模擬林火系統，在沒發生林火時，可以具備預警林火危險度的功能，一旦發生林火，可以迅速預測林火擴散趨勢，以將有限的滅火人力資源，做最有效率的分配，因此，政府在擬定林業政策時，亦應注重林火模擬模式的建構及其發展。▲

### 符號說明

$a, b, c$	林火擴散軌跡之形狀因子
$Q_{ig}$	點燃燃料所需熱量
$R$	林火擴散速率
$s$	林火擴散之軌跡
$t$	時間
$\phi_w, \phi_s$	風及坡度的影響效應
$\xi$	通量傳播率
$P_b$	樹幹濃密度
$\varepsilon$	點燃燃料所需溫度

### 參考文獻（請逕洽作者）