

台灣林火危險度時空分布推估之研究

邱祈榮¹ 林朝欽² 蕭其文³ 堯明才⁴ 陳孫浩⁴

摘要

本研究以林火理論中之引燃機制為基礎，就1990年至2001年發生於台灣地區國有林之林火事件及氣象等因子來作為資料分析的來源，以當日最高氣溫、當日溫差、未降雨累積時數及乾旱指標作為自變數，林火事件作為應變數，以Logistic 迴歸模式建立林火引燃機率模式。此模式進一步考慮氣象因子的空間變異，藉由地理資訊系統進行氣溫及雨量之空間推估，以1Km²之網格圖層將林火引燃機率模式空間化，作為推算台灣地區國有林當日林火危險度預測之依據。模式以2002年1-6月間之數據進行測試，結果顯示預測發生林火事件的準確性為82.76%。事實上，本研究之結果已實際運用於林務局所建構的林火危險度預警系統中，運作正常。

The Study on Estimating temporal-spatial distribution of Forest Fire Danger Rating in Taiwan

Chyi-Rong Chiou¹ Chau-Chin Lin² Chi-Wen Hsiao³ Ming-Tsai Yao⁴ Suen-How Chen⁴

Abstract

Based on the concept of combustion process, the ignition probability of forest fire was used to determine the forest fire danger rating in the study using the fire history records between 1990 and 2001. Four kinds of weather variables, maximum temperature, temperature difference in a day, accumulated rainless hours and drought index, were used to derive the Logistic regression model. After the regression model was built, two estimating models, based on the GIS database of daily weather, were developed to estimate the temperature and precipitation information on the grid system at 1 Km resolution on Taiwan. Using the estimated temperature and precipitation information on each grid, the forest fire danger rating of each grid could be calculated by the regression model. Based on the fire data between Jan. 2002 and June 2002, the results shown that the accuracy of the regression model was 82.76%. It could be accepted in the practical operation for fire danger rating. In fact, the results of this study have been used as the core model in the fire danger rating alarm system operated by Taiwan Forestry Bureau.

一、前言

林火的發生不論是自然因素或是人為因素，在世界任何國家均難避免。當森林發生火燒的現象，除資源受損外，火燒期間大部分地區必須投入龐大之人力、物力進行撲救或監視的工作，火後更需花費巨大的費用進行恢復的工作，以避免引起不良之生態影

響。2003年初的澳洲森林大火，動員上萬人次之消防人員進行搶救，但仍有百萬公頃的林地及數百棟的建築物遭到焚毀，許多野生動物更是受到林火的威脅；2002年5月台灣武陵大火，動員上千人次加入滅火行動，林火焚毀林地達一百八十五公頃，更波及國寶魚

¹ 國立台灣大學森林系助理教授

Assistant Professor, Department of Forestry, National Taiwan University

² 行政院農委會林業試驗所森林保護組副研究員

Associate Research Fellow, Division of Forest Protection, Taiwan Forestry Research Institute

櫻花鉤吻鮭之棲息地七加灣溪，每每發生森林大火，皆需投入龐大的社會成本予以支援，而對於水土的流失以及森林生態的影響更是無法估計，因此防範林火發生較之撲救林火來得更為重要！故而瞭解林火發生之潛力及其影響因子，並確認林火危險度較高之地區，以作為平時加強防範的重點，一旦發生林火即可迅速加以掌握。

林火危險度預測系統(Fire Danger Rating System)係專供測定林火危險之用，為一可逐日預測並發布林火危險度之林火預警工具，世界各國林業單位普遍均設有此系統，以作為森林防火重要的參考指標(林朝欽，1995)。由於近年來國民大眾進入森林者眾，林火因而日漸頻繁，故建立一實務上測定容易、操作方便之林火危險度預測系統是相當迫切需要的。

本研究針對 1990 年至 2001 年間林火之記錄及氣溫、雨量的變化，探究與林火危險相關之敏感因子，分析其在空間與時間上之分布情形，並以 Logistic 迴歸分析建立一林火引燃機率模式，最後結合地理資訊系統進行空間推估，以探討林火危險度預測系統使用的可行性，期能提供林業單位在林火防救實務上之所需。

二、材料與方法

(一) 研究材料

1. 林火歷史記錄

蒐集林務局 1990 年至 2002 年歷年國有林所發生之林火記錄，共計 443 筆林火記錄。資料項目包括發生日期、發生時間、林區別、事業區別以及林班別。

2. 氣象資料

(1) 測站選取

由於林務局歷年來之林火記錄，其發生地點僅記載到事業區之林班為止，並未記錄發生地點確切的座標，故在查對林火發生當時之天氣狀況時，只能以林班為單位，來進行氣象資料的蒐集。且台灣山區的氣象測站分布較為稀少，因此在氣象資料的蒐集方面有其侷限性。

因此在選取氣象測站時，乃將林務局 1990 年至 2002 年歷年所發生之林火記錄，利用 GIS 技術，搜尋其發生地點周圍半徑 5 公里內是否有氣象局所設立之氣象站，氣象量測內容需包含氣溫及雨量兩項資料，並套合數值高程(DTM)，將氣象站到林火發生地點之間局部地形效應的影響納入考量。經篩選後，共計有 133 筆林火記錄符合上述條件；其中北部佔 3 筆，中部佔 53 筆，南部佔 71 筆，東部佔有 6 筆記錄。經篩選後的

林火記錄，其所涵括之氣象測站，計有 20 個。其中海拔 500 公尺以下的測站有 8 個，海拔 500~1000 公尺之間的測站有 3 個，海拔 1000~2000 公尺以上的測站分布有 5 個，海拔 2000 公尺以上則有 4 個測站。

另外，利用氣象局 1990 至 2001 年間逐日之雨量資料進行分析。其測站包括氣象局局屬測站、氣象局自動氣象站及雨量站，以及其他農業氣象站，共計 401 個測站。

(2) 時間資料選取

台灣歷年林火發生的時間分布，就月份分析，以 1 月至 4 月為林火發生的高峰期，6 月至 9 月林火發生的次數則較少(林朝欽，1992)。而 1990 年至 2002 年之林火記錄，經過篩選後之資料，其時間分布皆發生於 11 月至翌年 5 月間。故在氣象資料的選取上，亦採取同一時段來進行分析。

(二) 研究方法

1. 林火危險度預測模式之建立

首先須挑選出與林火危險度有關的因子及其所含各種潛在變數，經過資料來源之可能性及必要推估之可行性的評估之後，篩選出可能適用於台灣地區推估林火危險度的變數，本研究將收集到氣溫及雨量資料作為林火危險度因子，輸入資料庫，經處理後，選取以下資料當作林火危險度模式之預測變數。

(1) 當日最高氣溫(°C)，Tmax。

氣溫與林火天氣有著密切的關係，在其他條件相同的狀況下，溫度較高的天氣更容易發生林火。

(2) 當日溫差(°C)，Tdiff。

當日氣象測站最高溫度與最低溫度之差值。一般而言，當日溫差較大，較容易發生林火。

(3) 距離上次降雨之累積時數(Hour)，Hrcount。

凡當日每小時降雨量小於 0.1mm 者，皆視為未降雨。未降雨累積時數之資料有其絕對性，可以了解短時間內環境的乾濕程度。

(4) 當日累積降雨量(mm)，Dayprecip。

當日降雨量的多寡，會直接影響到燃料的含水情況，所以當日降雨量較大的天氣，是不容易發生林火的。

(5) 前 30 天累積降雨量(mm)，Precip30。

以連續 30 天的降雨量來描述環境長時間的乾濕程度。

(6) 當日乾旱量(mm)，Drought。

依歷史林火事件之氣象資料為基礎，找出一切割水準，並以同一時期之切割水準減去各測站前 30 天之累積降雨量，若為正值，表示累積降雨量在乾旱切

³ 國立台灣大學森林學研究所碩士

Former Graduate Student, Department of Forestry, National Taiwan University

⁴ 行政院農委會林務局科長、技士

Chief and Specialist, Taiwan Forestry Bureau

割水準以下，則林火發生之機率較大；若為負值，表示累積降雨量在乾旱切割水準以上，則林火發生之機率較小。

- (7) 累計當日前 n 天之累積乾旱量(mm)，Drought n 。運用聯程原理，分別計算前 30 天、14 天及 7 天之累積乾旱量(蕭政宗，2001)。由於燃料的含水率有累積性及延遲性，之前每日乾旱量的多寡亦會影響燃料的乾濕程度，因此必須考慮之前天氣的乾旱狀況，以前 7 天之累積乾旱量為例，計算方式如圖 1 所示。

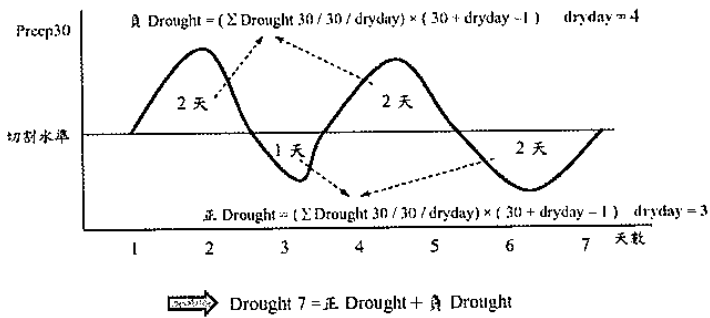


圖 1. 累積乾旱量計算方法示意圖

而後利用台灣 1990-2001 林火記錄資料，以所篩選出的氣象變數資料進行 Logistic 迴歸模式之建立與評估，推導出林火危險度模式。

2. 林火危險度空間模式之推估

透過氣象局所獲得之氣象測站即時資料(氣溫測站計 101 站；雨量測站計 413 站)，建立氣溫、雨量的推估模式，推算出台灣地區 1 Km^2 網格內林火危險度模式中所需參數，以這些參數導出 1 Km^2 網格解析度的台灣全島林火危險度。

(1) 氣溫因子之空間推估模式

本研究以地理座標與海拔高所組成的二次多項式，對每日之極值溫度進行複迴歸分析，Bolstad 等(1998)曾評估其誤差，結果優於以溫度與海拔高所作之直線迴歸式，其二次多項式之數學式為

$$T = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \beta_2 \cdot X^2 + \beta_3 \cdot Y + \beta_4 \cdot Y^2 + \beta_5 \cdot XY + \beta_6 \cdot Z$$

T 為每日之極值氣溫， X 為橫座標， Y 為縱座標， Z 為海拔高， $\beta_i (i = 0, 1, 2, \dots, 6)$ 為迴歸係數。

(2) 雨量因子之空間推估模式

本研究利用距離倒數加權內插法(Inverse Distance Weighted interpolation)求得空間未知點的雨量估計值，以下為距離倒數加權內插之推估方法：將每個網格點與各測站之距離取其平方的倒數，再將預估點鄰近之 n 個測站的資料予以合併計算，以求其未知預估

點的推估值，其公式如下：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n R_i / (d_i)^2}{\sum_{i=1}^n 1 / (d_i)^2}$$

式中 R ：預估點之推估值

R_i ：鄰近測站之雨量資料

d ：與測站之距離

n ：鄰近之測站數

若與距離次方愈大，則 R 值所推測出之內插值會愈趨減小。距離倒數加權內插法的特性主要取決於預估點與測站的距離，若測站個數多，且空間位置分布均勻，其網格點內插值之準確性也會相對地提高。

3. 林火危險度分級標準

本研究利用氣溫及雨量空間推估的結果，推算出林火危險度預測變數在每 1 Km^2 網格上分布的數值，最後以 Logistic 迴歸模式，算出每個網格的林火引燃機率，經分類後，加以分級，其分級內容如表 1 所示。

表 1. 林火引燃機率分級表

| 引燃機率 | 危險等級 | 等級說明 |
|----------|------|------|
| 0 - 20 | 1 | 安全級 |
| 21 - 40 | 2 | 注意級 |
| 41 - 60 | 3 | 警告級 |
| 61 - 80 | 4 | 危險級 |
| 81 - 100 | 5 | 最危險級 |

最後將本模式實際應用於林務局，並針對所發展的模式為基礎所建構的林火預警資訊系統及對林火危險度推算所作的必要修正，加以評估。

三、結果與討論

(一) 乾旱之切割水準

以各林火樣本的發生日期，一一列出所對應之氣象站其林火當日前 30 天的累積降雨量，求出所有林火樣本之累積機率函數，如表 2 所示。故可知有 85% 的林火樣本，前 30 天累積降雨量皆位在累積機率分布函數第五個十分位數以下，顯示若當日前 30 天累積降雨量在累積機率分布函數的第五個十分位數以下者，發生林火的機率較大。故以第五個十分位數作為可能發生林火的切割水準。

表 2. 林火樣本前 30 天累積雨量之累積機率

| 十分位數 | 頻率 | 累積 % |
|------|----|-------|
| 10 | 42 | 31.5 |
| 20 | 30 | 54.1 |
| 30 | 16 | 66.1 |
| 40 | 12 | 75.1 |
| 50 | 14 | 85.7 |
| 60 | 6 | 90.2 |
| 70 | 9 | 96.9 |
| 80 | 1 | 97.7 |
| 90 | 3 | 100.0 |

(二) 林火危險度預測模式

以林火事件數據作為事件發生之樣本，計有 104 筆記錄，並且在資料庫中抽取 1990 年至 2001 年 11 月至隔年 5 月間，當日累積降雨量大於 0.1mm 者，以作為林火事件未發生之樣本，共計有 11404 筆記錄。

再者利用 Wald 檢定方法，檢驗 9 個林火危險度預測變數，並剔除在 Logistic 迴歸模式中，貢獻度較小的預測變數。由表 3 可知，在顯著水準 0.05 時，Dayprecip、Precip 30、Drought 30 及 Drought 14 等 4 個預測變數的貢獻性並不顯著，予以剔除。

表 3. 預測變數之 Wald 檢定

| 預測變數 | Wald | 自由度 | 顯著性 |
|------------|--------|-----|-------|
| Tmax | 10.496 | 1 | 0.001 |
| Tdiff | 8.249 | 1 | 0.004 |
| Dayprecip | 0.436 | 1 | 0.509 |
| Precip30 | 0.012 | 1 | 0.914 |
| Drought | 56.872 | 1 | 0.000 |
| Drought 30 | 0.001 | 1 | 0.978 |
| Drought 14 | 1.362 | 1 | 0.243 |
| Drought 7 | 7.911 | 1 | 0.005 |
| Hrcount | 59.491 | 1 | 0.000 |

最後求出林火危險度迴歸模式：

$$P = 1 / (1 + \exp(-y))$$

$$y = 0.074(Tmax) + 0.042(Tdiff) + 0.110(Drought) + 0.002(Drought 7) + 0.008(Hrcount) - 12.532$$

- P(%)：引燃機率
- Tmax(°C)：當日最高溫度
- Tdiff(°C)：當日溫差
- Drought (mm)：當日之乾旱量
- Drought 7(mm)：前 7 日之累積乾旱量

Hrcount(小時)：距離上次降雨之累積時數

分析結果該模式之判定係數 Nagelkerke $R^2 = 0.77$ 。

(三) 迴歸模式預測準確性之檢驗

將原始氣象數據代入迴歸模式中，以求得各樣本的引燃機率 P 值，根據 Logistic 機率函數 S 曲線的特性，將引燃機率 P 值等於 0.5(Logistic 機率分佈的中點)作為林火事件發生機率的臨界點(Garcia *et al.*, 1995)。P 值在 0.5 以上(包含 0.5)者，判定為發生林火事件；P 值在 0.5 以下者，判定為沒有林火事件發生。

茲分別將 1990 年至 2001 年間的原始資料一一判別，如表 4 所示；其後再以 2002 年的資料數據進行預測，其結果如表 5 所示。

表 4. 1990 年至 2001 年林火預測判別分析表

| 觀察值 | 預測值 | | | 判別率 |
|-------|-------|------|--|--------|
| | 無發生林火 | 發生林火 | | |
| 無發生林火 | 10987 | 417 | | 96.34% |
| 林火發生 | 51 | 15 | | 70.20% |

表 5. 2002 年林火預測判別分析表

| 觀察值 | 預測值 | | | 判別率 |
|-------|-------|------|--|--------|
| | 無發生林火 | 發生林火 | | |
| 無發生林火 | 1185 | 19 | | 98.42% |
| 林火發生 | 5 | 24 | | 82.76% |

根據表 4 及表 5，1990 年至 2001 年間，發生林火事件預測的準確性為 70.20%，沒有林火事件發生預測的準確性為 96.34%；2002 上半年間，發生林火事件預測的準確性為 82.76%，沒有林火事件發生預測的準確性為 98.42%。

(四) 氣象因子空間推估模式之檢定

將氣象局氣溫及雨量測站劃分為台灣北部、中部、南部及東部四部分，氣溫測站又區分為近海及內陸兩組，各組依上述劃分之區域，分別在各區中選取一個觀察測站；雨量測站則從各區中選擇二個分別位於山區及平地的測站當作觀察測站。隨機選取 2002 年任意 10 天，抽取觀察測站中該 10 天氣溫及雨量之觀測值，將氣溫(當日最高溫度及最低溫度)及雨量(當日降雨量)模式之推估值與測站之觀測值作配對 T 檢定，以判斷推估值與觀測

值之間有無明顯差異性。令 μ_1 表氣溫或雨量推估後之平均值； μ_2 表氣溫或雨量觀測之平均值，假設檢定問題為：

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ 即推估值與觀測值之間其平均數沒有差別
 $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ 即推估值與觀測值之間其平均數有明顯差異
 將氣溫及雨量之推估值與觀測值進行配對 T-test 雙尾檢定，在 0.05 的顯著水準下，得到其結果如表 6。

表 6. 氣溫及雨量推估值與觀測值配對 T 檢定之結果

| | | 平均值 | 變異數 | 自由度 | T 值 | 顯著性 | |
|------------|-----|-------|---------|--------|-------|--------|-------|
| 當日 最高溫度 | 內陸 | 觀測值 | 21.608 | 33.177 | 39 | 1.030 | 0.309 |
| | | 推估值 | 21.212 | 20.685 | 39 | | |
| | 近海 | 觀測值 | 25.048 | 18.552 | 39 | 0.798 | 0.430 |
| | | 推估值 | 24.848 | 22.853 | 39 | | |
| 當日 最低溫度 | 內陸 | 觀測值 | 14.157 | 13.593 | 39 | -0.986 | 0.330 |
| | | 推估值 | 14.543 | 10.338 | 39 | | |
| | 近海 | 觀測值 | 18.025 | 10.059 | 39 | -0.765 | 0.449 |
| | | 推估值 | 18.158 | 9.926 | 39 | | |
| 當日降雨量 | 觀測值 | 3.088 | 192.461 | 79 | 0.018 | 0.986 | |
| | 推估值 | 3.074 | 115.663 | 79 | | | |

由表 6 之結果可知，最高溫度、最低溫度以及日降雨量其推估值與觀測值之平均值，在 0.05 的顯著水準下並無明顯之差異；換言之，在沒有測站的地區，以氣溫及雨量模式所推估之結果，可以代表該地區當時之氣象狀況。

(五) 模式應用

由於林務局於去年度開始著手建置林火危險度預警系統，所以本模式經發展後，即架構為系統核心模式，並發展成一每日可操作使用之系統，系統的架構及功能詳述如下：

1. 系統功能架構

目前林火危險度預警系統已在林務局林火防救機制下運作。本系統之下又分為測站管理、氣象資料管理、資料分析、圖形顯示查詢及系統維護等五個次系統：

- (1) 測站管理次系統：主要功能在管理林務局林火測站之現況、量測資料之上傳以及工作人員資料之登錄與儲存。
- (2) 氣象資料管理次系統：其功能為將氣象局相關氣象資料下載並轉換至林務局之林火氣象資料庫。
- (3) 資料分析管理次系統：主要是檢核氣象資料之準確性，並進行林火危險度的計算。
- (4) 圖形顯示查詢次系統：主要是將林火危險度計算後之結果與成圖，在網路上供人查詢。
- (5) 系統維護次系統：其功能為資料備份以及系統連

作之記錄或是系統異常狀況之通知。

2. 林火危險度計算流程

本系統林火危險度計算模式主要是考慮短期內氣象因素之變動，對於植被或其他可燃物其易燃程度變化的影響。因此，根據林火歷史資料，並且結合當時的天氣狀況及林火危險度因子進行統計分析，以測定當大可燃物的燃燒機率，建立一林火危險度之數學模型及預測方法。一般而言，在穩定的天氣系統下，每日的大氣及環境因素（例如氣溫、相對溼度、燃料溼度等）會呈現類似 Sin 函數的循環，是以計算每日固定時刻的林火危險度來預測未來 24 小時林火引燃的機率。

本系統林火危險度計算流程如圖 2，其計算模式為依循本研究所發展的林火危險度推估模式，連算過程主要是以氣象局下載的資料為基礎，而氣象局測站資料須經模式計算限制條件之檢核後，方能計算當天的林火危險度。

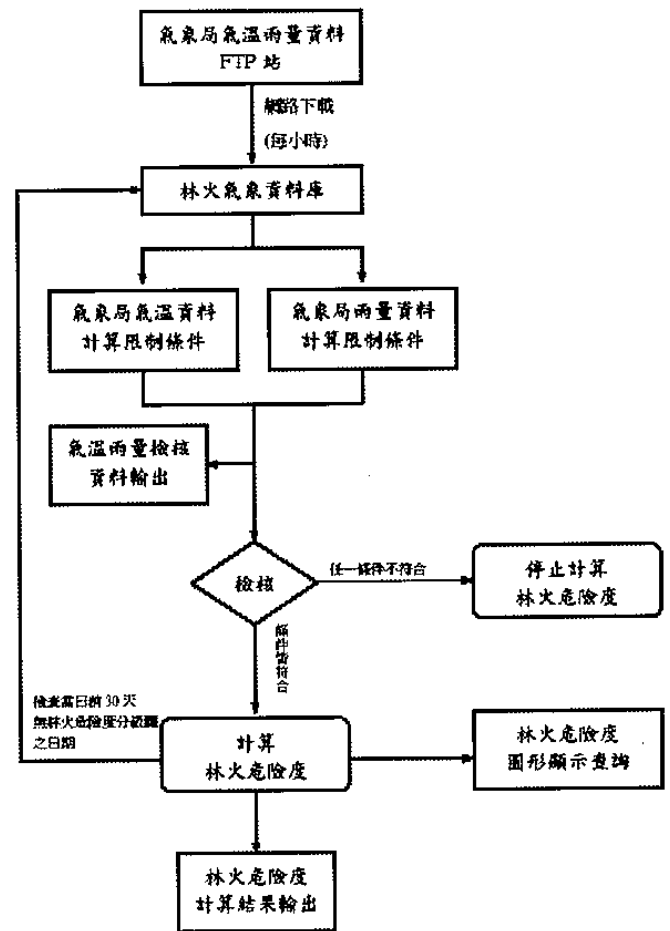


圖 2. 林火危險度計算流程圖

林火危險度氣象模式之計算限制條件為：

(1) 溫度測站限制條件：當日 12:00~17:00 間，各單一測站若無任何溫度資料，則該測站在溫度推估時忽略不計；當內陸溫度測站總數超過 1/3 不列入計算時，則停止計算當日之林火危險度。

(2) 雨量測站限制條件：各雨量站以當天計算的前七日中，任何一日之前 30 天累積降雨量，若其雨量空缺或無效記錄筆數累計超過 48 筆(小時)者，則該測站在雨量推估時忽略不計；當雨量測站總數超過 1/4 不列入計算時，則停止計算當日之林火危險度。

以每日下午五時作為林火危險度計算的時間點，利用林火危險度預測變數之空間推估的結果，推算出台灣每個 1Km² 網格上分布的數值，最後以 Logistic 迴歸模式算出每個網格的林火引燃機率，求得全林區的引燃機率分佈後，並加以分級，得到林火危險度分級圖，如圖 3 所示。

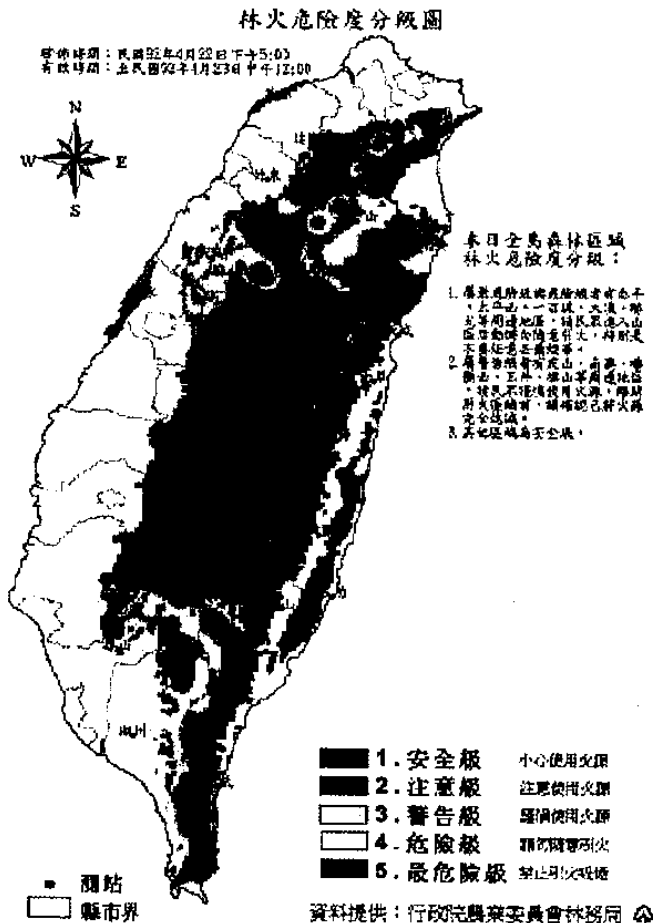


圖3. 台灣地區林火危險度分級圖

台灣地區乃為高溼度之氣候型態，應屬林火較不易發生之範疇，但每年仍然不斷有林火發生，其主要原因乃台灣地理環境特殊，局部地形之微氣候常能在短期內營造有利於燃燒之氣象條件。而植群為林火燃燒之主要可燃物，當其燃料累積達一定程度時，易於在有利之氣候條件下發生林火，因此林地內可燃物長久的累積，再遇上高溫及久旱不雨的氣候型態，將使植物含水率降低，引燃機率增加，如用火不慎，常造成林火發生頻繁，所以氣溫與降雨兩氣象因子，對於林火有密切的關係。

本研究結合林火歷史資料及氣象資料，並考慮台灣地理區域的影響，找出林火危險之敏感因子，利用 Logistic 迴歸分析，建立台灣地區林火危險度預測模式，經模式驗證及對預測結果進行分析，證明本預測模式有一定的準確性。進而考慮模式本身預測變數空間上的變異，利用氣候對於空間的相關性，進一步探就其推估模式，以得到氣象因子在地理相關位置的空間資料，研究結果顯示，利用氣溫及雨量模式所得到的推估值，在空間的分布上具有其代表性。

雖然氣象因子是一非線性動態過程，但就林火危險預測的需求而言，只要在時間固定的靜態條件下，反映出具有空間結構性質的預測數據，即可進行林火危險度空間分布的預測。一般而言，在穩定的大氣系統下，每日的大氣及環境因素會呈現 Sin 函數的週期性循環，故計算每日固定時刻的林火危險度，應可預測未來 24 小時林火引燃機率。以現今氣象測站分布的廣度與即時的傳輸效率，再配合 GIS 技術以及電腦運算的能力，即可進行逐日林火危險度的預測。實務上，本研究之研究成果已實質技術轉移至林務局所建置的林火危險度預警系統中運用，期能符合林業單位在林火防救實務上的需要。

五、參考文獻

林朝欽,1992: "台灣地區國有林之森林火分析 (1963-1991 年)",林業試驗所研究報告季刊, 7 卷,2 期,169-178

林朝欽,1995: "森林火災危險度預測系統之研究",林業試驗所研究報告季刊,10 卷,3 期,325-330

蕭政宗,2001: "以連續累積降雨量定義氣象乾旱之研究",臺灣水利,49 卷,3 期,52-62

Bolstad, P. V., L. Swift, F. Collins and J. Regniere,1998: "Measure and predicted air temperature at basin to regional scales in the southern Appalachian mountains", Agricultural and Forest Meteorology 91:161-176

Garcia, C. V., P. M. Woodard, S. J. Titus, W. L. Adamowicz and B. S. Lee ,1995: "A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest fires", Idland Fire 5(2),101-111

四、結論