

研究報告

台中港防風林區地面燃料型與潛在林火行爲之初探

盧守謙^{1*} 曾喜育² 呂金誠³ 盧昭暉⁴

【摘要】本研究參酌目前台灣所發展的地面燃料調查模式，以地表植群的特徵，進行各項燃料參數之測定。透過階層群集分析法，將地面燃料依組成之差異區分台中港防風林區爲4類燃料型；進一步使用BEHAVE林火模擬軟體探討各燃料型之林火行爲，分別預測出相關林火行爲（蔓延速率、單位面積熱量、火焰強度及火焰長度），最後將模擬結果分爲3種林火指標燃料等級，結果顯示台中港防風林區大部份（79%）屬於中度以上火行爲等級，此等級於林火發生初期須使用消防水線方能抑制火燒，在林火防救上於水源匱乏區域，建議考慮增設蓄水池，以備林火發生時有效抑制火勢蔓延。本研究所得之火指標燃料等級，可提供林區管理者制定出相應之林火防救對策。

【關鍵詞】木麻黃、燃料量、燃料型、林火行爲、林火模擬軟體

Research paper

Ground fuel types and potential fire behavior of *Casuarina* Spp. forests at the windbreak zone of Taichung HarborSohu-Chien Lu^{1*} Hsy-Yu Tzeng² King-Cherng Lu³ Jau-Huai Lu⁴

【Abstract】 Adopting current ground fuel inventory methodology in Taiwan we conducted the present study on modeling surface fuels which based on the property of the surface vegetation types. Using Hierarchical Cluster Analysis technique, 4 fuel types have been classified on Taichung Harbor windbreak forests. All the fuel types were then used as inputs to the BEHAVE plus fire behavior simulation model to simulate the fire behaviors. The result of these simulations show that fire behavior can be rated to 3 levels under the greatest situation of the average wind speed the summer of Taichung Harbor; and by this rating the potential fire behaviors (Surface fire spread rate, heat per unit area, flame intensity and flame length) are displayed. The result shows that most the windbreak forests are moderate fire level which hands are not able to put out the fires. Therefore, we propose that the windbreak forest needs to increase the reservoirs for the

-
1. 國立中興大學森林學系博士候選人，內政部消防署台中港務消防隊副隊長，*通信作者
Doctoral Candidate, Department of Forestry, NCHU. Taichung Taiwan;
Deputy Chief, THFD of National Fire Agency,*Corresponding Author, onefireman12@hotmail.com
 2. 國立中興大學森林學系助理教授
Assistant Professor, Department of Forestry, NCHU. Taichung Taiwan;
 3. 國立中興大學森林學系教授
Professor, Department of Forestry, NCHU. Taichung Taiwan;
 4. 國立中興大學機械工程系副教授
Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, NCHU. Taichung Taiwan.

place which is shortage of water source, so the potential fire can be effectively suppressed. We conclude that the result not only provide a theory based fuel models for forest manager, but also the way to easier for the forest fire prevention and control.

【Key words】*Casuarina* spp., fuel loading, fire behavior, fuel type, BEHAVE plus

一、前言

野地林火是森林生態系主要干擾因子之一，撲滅野火往往需要耗用龐大的人物力資源 (呂金誠，1990)。森林燃料能否起火燃燒並蔓延擴大，除明顯受燃料量及其分布特性外，還直接受外在環境之影響 (林朝欽、邱祈榮，2002)。森林燃料主要來自森林植物，是林火形成三要素之一 (Byram, 1959)，亦是林火環境之必要因子 (Countryman, 1972)。因此對各因子的瞭解與基本資料蒐集是林火管理的基礎，燃料更是最關鍵的資訊，亦即燃料的性質掌握是一個地區林火特性最需要的資料 (Brown and Davis, 1973; David and Biging, 1997)。因此，燃料量調查與分析是林火管理最基本且必要之工作之一 (林朝欽等，2007)。

林火燃燒過程極為複雜，從引燃、擴展、蔓延、減弱到熄滅是一系列連鎖反應之物理與化學現象 (Chandler *et al.*, 1983)。不同植群燃料型態 (fuel type) 會導致不同的林火行為 (林朝欽，1992；Pyne *et al.*, 1996)。因燃料類型不同，其火強度、蔓延速度及火焰長度等行為亦不同，對森林影響亦就各異。不同的植群反映了植群與環境，以及不同植群間關係，必然會影響到燃料分布、種類以及相應的林火特徵。因此，植群數量分布為燃料型劃分提供了重要之參考依據 (林朝欽、邱祈榮，2002)。而林火管理者須透過具有整體資訊的燃料型來瞭解燃料狀態，燃料型為區別不同林火之強弱程度，亦是協助進行火前的燃料管理與火中的林火控制最主要依據 (NWCG, 1981；Anderson, 1982；FCFDG, 1992；Wright *et al.*, 2002；邱祈榮等，2005)。另外從某一燃料型自身的特點，亦可模擬出潛在之林火行為，以作為林火行為分類。因不同燃料型的潛在火行為分類是

森林防火與計劃燃燒 (prescribed burning) 之一項重點工作 (Tanskanen, 2007)。因此本研究依據模式化燃料分類法 (周巧盈，2004)，透過地面調查的燃料模式來獲得特定區域高精度之地面燃料資訊；再依此模式化定量資訊，以作為潛在林火預測的輸入因子 (林朝欽等，2007)，模擬林區地表火行為以作為台中港木麻黃林之林火管理參考。

二、材料與方法

(一) 研究區域

台中港海岸防風林區 (N24°17'29.20" - 24°18'47.96"、E120°31'02.68" - 120°31'39.49") 從1974年起陸續栽植木麻黃(面積 >300 ha)，以降低東北季風漂飛沙對港區內碼頭裝卸起降之影響，為港口營運之重要命脈。於每年9月中旬後，東北季風來臨且降雨量少，林區持續乾燥至翌年2月，是林火發生之潛在季節。如此氣候型態在林火歷史發生上，由1984年至2009年期間之紀錄反應出此火燒季節，以過去林火紀錄平均林火發生頻率，亦大多在此段期間。為保護台中港區之木麻黃林，該區自1982年既設一消防分隊，作為駐區火災防護單位，以備林火發生時能快速抵達撲救以減少火燒面積。本研究以防風林區不同栽植年代作為調查樣區選取之參考，依環境區塊及樹種區分為中央區域 I₁ (37年生)、北側 I₂ (26年生)、西側海岸外緣填海新生地 I₃ (17年生) 等三種林齡木麻黃及由黃槿 (*Hibiscus tiliaceus*)、銀合歡 (*Leucaena glauca*) 與雀榕 (*Ficus superb*) 等組成林相改良林分 II₄ (15-20年生) (圖1)，其林相面積依序 175、42、70及 25 ha。本研究調查取樣點之決定，係由航空照片判釋林分均勻情形後決定，共選取33個調查樣區點 (表1)。



圖1. 台中港防風林區調查樣區分布圖

Fig. 1. Map of study sites at the windbreak forest zone of Taichung Harbor (details in Table 1).

表1. 台中港木麻黃防風林調查樣區屬性

Table 1. Study site characteristics at the windbreak forest zone of Taichung Harbor. See Fig. 1 an overview of location at I₁, I₂, I₃ and II₄ sites.

樣區區塊	林相分類	林齡 (yr)	面積 (ha)	樣區編號 (樣區數)
I ₁	木麻黃	37	175	I ₁₋₁ - I ₁₋₁₃ (13)
I ₂	木麻黃	26	42	I ₂₋₁ - I ₂₋₇ (7)
I ₃	木麻黃	17	70	I ₃₋₁ - I ₃₋₆ (6)
II ₄	黃槿等改良林相	15-20	25	II ₄₋₁ - II ₄₋₇ (7)

(二) 研究方法

1. 野外樣區調查

依據樣區所選取之位置，離道路距離 3 m 以上，植被較均質且較能代表當地植被狀態者，地表層採複合式調查法進行分析 (Brown *et al.*, 1982; 林世宗等, 2003)，未包括生立之林木，以調查取樣點為中心 (圖2)，設置一個半徑 2m 之圓形樣區 (灌木)，圓形樣區邊界處另設置2個 1×1 m 方形次樣區 (草本植被層)，與上述圓形樣區相距 4 m 處再設置1個 2×2 m 的方形樣區及4個 0.5×0.5 m 之次樣區 (枯枝落葉層及分解層)，以及6條依圓周順時針方向，每隔60。取一條 15 m 長之樣線穿越線 (倒木)，分別調查 2 m、4 m、>4 m 內與樣線交叉之倒木中央直徑與數量，再分別取各級倒木之樣本 20個，攜回研究室進行密度分析。在單位面積之燃料量推估方面依 $W = (11.64 \times S \times \sum d^2) / n \times L$ 進行運算，式中 W 為每公頃數量， S 為各級倒木之比重， d 為各級倒木之口徑， n 為樣點數， L 為穿越線長度 (Brown *et al.*, 1982; 林朝欽等, 2007)。

2. 樣本處理

將攜回之各類燃料物質的次樣本，整理裝置於紙袋或布袋中，置於烘箱內，溫度設定為 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ ，視樣本之表體比不同烘乾 72~96 小時，樣本烘至絕乾後秤重。倒木物質之密度分析，為將攜回之各級倒木選擇較通直處，切成每段約 4~7 cm 長度之樣本後，浸泡於水中24小時，使之充分飽水後，求其生材體積，再進行比重計算。依 Brown *et al.* (1982) 從而發展出單位面積之燃料量推估式，推估式因此適用於各不同地區，其公式為 $W = (11.64 \times S \times \sum d^2) / n \times L$ ，式中 W 為每公頃數量， S 為各級倒木之比重， d 為各級倒木之口徑， n 為樣點數， L 為穿越線長度，倒木燃料量的推估式已被廣為使用 (Graca *et al.*, 1999; 林朝欽等, 2007)。

3. 統計分析及燃料型分類

(1) 本研究統計分析分為一般描述統計及迴歸

分析，首先將各樣區數據彙整進行一般描述統計分析，再利用迴歸分析進行燃料量推估式之推導，依迴歸分析所得之推估式進行各類燃料量估算 (枯立/枯斷木、灌木、草本及枯枝落葉暨分解層、倒木)，進行 ANOVA 及階層群集分析法 (Hierarchical Cluster Analysis) 進行樣區燃料型之界定；同時透過判別分析 (Discriminate Analysis) 發展各林型與燃料型界定之判別式，以獲得各類型區分之關鍵參數及提高判釋之效率 (邱祈榮等, 2005)；統計分析所使用的工具為 SPSS 17.0 之套裝應用軟體。

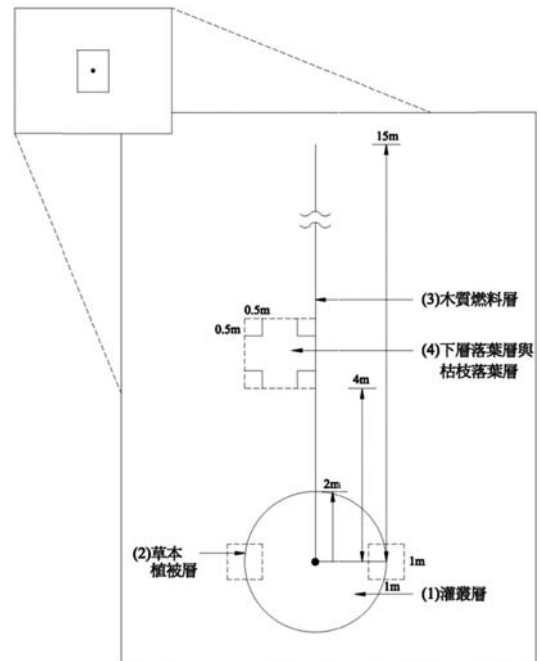


圖2. 地表層複合式調查取樣之結構與內容(修改自林世宗, 2003; 林朝欽等, 2007)。

Fig.2. Diagram of the structure of the sampling plot and line-intersect sampling (modified from Lin, 2003; Lin *et al.*, 2007).

(2) 燃料型分類

a. 選取變項：依據地面調查之生物性狀與燃料量等定量參數，進行燃料型之區分。本研究選擇枯立木、枯斷木、灌木、草本植被、枯

落層、分解層、III 級倒木、IV 級原木、IV 級朽木之燃料量與枯落層、分解層之厚度等 11個變項 (邱祈榮等, 2005)。

- b. 階層群集分析：由防風林區整個林分進行階層群集分析，樣區分類的結果將產生不同的燃料型。
 - c. 各燃料型分類之判別式建立：本研究將所選取的燃料量參數重新整理成新變項 (表2)與階層群集分析的分群結果，進行逐步迴歸判別分析，找出各分類階層的判別式。
 - d. 燃料型之命名
4. 林火行為模擬

本研究使用美國林務署林火研究所所發展之林火行為模擬軟體 BEHAVE plus，於林火環境各種簡化條件下 (如燃料理化、氣象與地形因數等)進行數學上的處理，而匯出林火行為與各種參數間的定量關係 (Burgan and Rothermel 1984, Andrews, 1986, Andrews and Chase 1989, Andrews and Bradshaw 1990)。利用這些關係式預測將要發生或正在發生的林火行為，作為野地林火管理、平時林火危險預測、林火即時 (real time) 行為預測及調度

派遣消防人員進行重點防禦佈署為目的之應用軟體 (Andrews and Rothermel 1982)。軟體運算以 Rothermel (1972) 數學模型為主，納入 Anderson (1982) 所發展全美地區13個燃料型，後由 Scott and Burgan (2005) 擴增53個內定標準燃料型，另外亦可由使用者依實際調查環境參數作自訂燃料型，應用性相當廣泛。

三、結果與討論

(一) 燃料型分類結果

台中港防風林區由33個取樣區含括 I₁, I₂, I₃及II₄ 區，整個林分按階層群集分析分群分類結果，分為4種燃料型 (圖3)；其中林分及林下植被差異性，區分出木麻黃林分 (I_A, I_B, I_C) 與非木麻黃之林相改良林分 (II_D)。二者分別進行逐步判別分析，於判別式 Y1 可將燃料型II_D 區分出來 (黃槿等林型)，依據參數為地面燃料總量 (TW)，因此可得知 II_D 所具有 TW 與木麻黃林分各燃料型十分不同。在判別式 Y2 可將木麻黃燃料型 I_A、I_B 與 I_C 加以區分，其所依據參數為地面燃料總量 (TW) 與灌木燃料量比 (SR)，在 I_C 地被型

表2. 各燃料型之生物性狀

Table 2. Bio-properties of 4 fuel types at Taichung harbor site. Standard errors in parentheses.

Fuel Types	P _N	TW* (tons/ha)	L _D (cm)	D _D (cm)	DR* (%)	SR* (%)	HR* (%)	DWR* (%)	LDR* (%)
I _B 木麻黃林分草本植被優勢型	7	23.58 ^a (1.74)	2.68 ^a (2.13)	3.92 ^a (3.25)	7 ^a (0.16)	1 ^a (0.07)	5 ^a (0.16)	24 ^a (0.04)	63 ^a (0.03)
I _A 木麻黃林分無植被優勢型	5	24.69 ^a (2.99)	2.72 ^a (1.63)	4.39 ^a (2.03)	3 ^a (0.67)	0 ^a (0)	2 ^{ab} (0.11)	12 ^{ab} (0.13)	83 ^b (0.15)
I _C 木麻黃林分灌木優勢型	14	29.43 ^a (2.08)	2.57 ^a (1.13)	3.81 ^a (2.81)	11 ^a (0.03)	9 ^{ab} (0.02)	3 ^a (0.01)	34 ^b (0.04)	42 ^c (0.02)
II _D 黃槿等林分	7	6.93 ^b (0.98)	1.75 ^a (4.76)	1.50 ^b (2.67)	5 ^a (0.05)	17 ^b (0.05)	13 ^b (0.07)	21 ^{ab} (0.06)	44 ^c (0.06)

*為本研究6個新變項參數, P_N=樣區數目、TW=地面燃料總量 (枯立木+枯斷木+灌木+植被+III級倒木+IV 級朽木+IV級原木+枯落層+分解層)、LD=枯落層厚度、DD=分解層厚度、DR=(枯立木+枯斷木燃料量) 與 TW 比、SR=灌木燃料量與 TW 比、HR=草本植被燃料量與 TW 比、DWR=倒木燃料量與TW比、LDR=(枯落層+分解層燃料量) 與 TW 比。Values with different letters are significantly different at 5% significant level by Tukey's HSD (a, b, c).

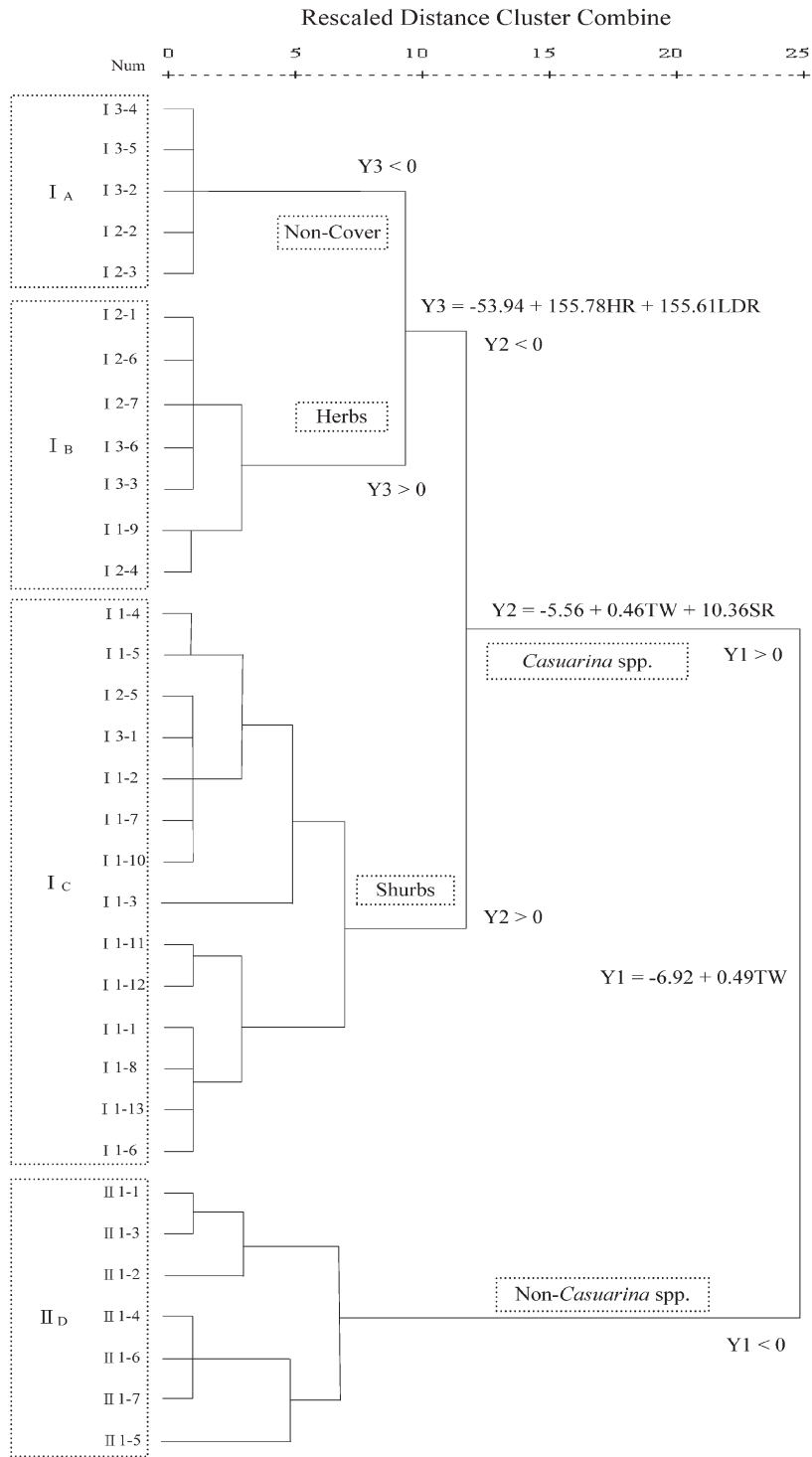


圖3. 台中港防風林區燃料型分類結果

Fig. 3. Dendrogram of classification based on the fuel types at the windbreak zone of Taichung Harbor; Variable abbreviations are explained in Table 2.

態主要為灌木與少許草本植被 (灌木型)，與其他二類燃料型所具有 TW 與 SR 參數特徵十分不同。最後透過判別式 Y3，將燃料型 I_A 與 I_B 加以區分，其所依據參數為草本植被燃料量比 (HR) 與枯落層 + 分解層燃料量比 (LDR)，在 I_A 地被型態主要為無植被型態與少許草本植被 (無植被型)，I_B 地被型態皆為草本植被 (草本型)，因此二類燃料型所具有 HR 與 LDR 十分不同。上述燃料型生物性狀 (表2) 與相關燃料參數 (表3)，其中地面燃料總量以灌木型之

I_C 為最高 (29.43 t/ha)、II_D 最低 (6.93 t/ha)；枯落層厚度 (LD) 以無植被型之 I_A 為最高 (2.72cm)、最低仍為 II_D (1.75cm)；分解層厚度 (DD) 仍以 I_A 為最高 (4.39cm)、最低仍為 II_D (1.50cm)。在 I_A 燃料型有較高枯落層、分解層、枯落層與分解層燃料量比例 (LDR, 83%)，因此其 1-h 燃料量 (5.07 t/ha) 與 10-h 燃料量 (2.38 t/ha) 亦較高，如此細小 (口徑 < 0.6cm) 之有效 (available) 燃料量對初期林火行為影響較大；在 I_C 燃料型主要以灌木 (Live shrubs,

表3. 各燃料型 BEHAVE plus 輸入參數測定

Table 3. Custom fuel model data assembled for Casuarina spp. and others species for Taichung Harbor site fuel models are used as input parameters driving simulation of fire behavior.

Fuel mode		I _B	I _A	I _C	II _D
FL (t ha ⁻¹)	1-h	4.87	5.07	4.14	1.66
	10-h	1.78	2.38	1.43	0.70
	100-h	2.42	1.73	3.12	0.84
	Live herbs	1.24	0.05	1.03	0.89
	Live shrubs	0.23	0.01	1.54	1.15
S/V ratio (cm ⁻¹) ^a	Dead 1-h	60.72	30.17	30.17	60.72
	Live herbs	80.20	0	28.22	80.20
	Live shrubs	15.08	0	15.08	15.08
FD ^b	(m)	0.27	0.15	0.32	0.34
ME	(%)	27	27	27	26
S	(deg)	5	3	0	0
HC (kJ kg ⁻¹)	DF	20740 ^c	20740 ^c	20740 ^c	18622 ^d
	LF	20740 ^c	20740 ^c	20740 ^c	18622 ^d
DFM (%)	1-h	15	15	15	15
	10-h	17	17	17	17
	100 -h	20	20	20	20
	herbs	180	180	180	180
	woody	150	150	150	150

FL = fuel loading; 1-h = 1-h (less than 0.6 cm diameter) timelag dead fuel moisture; 10-h = 10-h (0.6-2.5 cm diameter) timelag dead fuel moisture; 100-h = 100-h (2.5-7.6 cm diameter) timelag dead fuel moisture ; S/V = surface area to volume ratio; FD = fuelbed depth = average depth of litter/duff and slash, slash depth is about 63.3 percent of the distance from the top of the natural litter layer to the average high intercept; ME = dead fuel moisture content predicts spread rate will fall to zero (fraction of ovenry weight); S = site terrain slope of vertical rise/horizontal run (degrees); HC = heat content; DF= dead fuel; LF = live fuel; FMC = fuel moisture content (fraction of ovenry weight).

a S/V ratio were calculated from Plucinski (2003); b FD were calculated from Brown and Albin, 1978; c Viemeyer, 1986; d BEHAVE plus online documentation (USDA Forest Service, 2010).

1.54 t/ha) 為優勢，林冠鬱閉度較開闊，有較高之地面燃料總量、枯立/斷木燃料量比例 (DR, 11%)、倒木燃料量比例 (DWR, 34%) 與 100-h 燃料量 (3.12 t/ha)，但灌木細小燃料量相對較低，對林火行為影響變化較大。在草本為優勢 I_B 燃料型 (Live herbs, 1.24 t/ha) 特色為4類燃料型中皆居於次高燃料量：枯落層 (2.68cm)、枯立/斷木燃料量比例 (DR, 7%)、倒木燃料量比例 (DWR, 24%)、枯落層與分解層燃料量比例 (LDR, 63%)、1-h 燃料量 (4.87 t/ha)、10-h 燃料量 (1.78 t/ha) 與 100-h 燃料量 (2.42 t/ha)；因此，其細小及其他燃料量在4類平均值偏高，勢必會產生火蔓延加快現象。另外在非木麻黃之黃槿等林相改良林分 (II) 部份，灌木燃料量 (1.15 t/ha) 大於草本燃料量 (0.89 t/ha)，其地面燃料總量、枯落層、分解層、1-h 燃料量 (1.66 t/ha)、10-h 燃料量 (0.70 t/ha) 與 100-h 燃料量 (0.84 t/ha) 皆屬最低，可見其火燒熱量會相對偏低。

(二) 林火模擬分析

1. BEHAVE plus 參數測定結果 (表3)

a. 燃料量

測定出4型各級燃料量，1-h範圍為1.66-5.07 (t/ha)、10-h 為 0.70-2.38 (t/ha)、100-h 為 0.48-3.12 (t/ha)、草本為 0.05-1.24 (t/ha) 與灌木 0.01-1.54(t/ha)。

b. 燃料表面積及體積比

從野外樣區取回相關樣本，經測定及計算 (Plucinski, 2003) S/V 值，因灌木、草本植被型及無植被型均屬於木麻黃林分，地表分布 1-h 木麻黃燃料經測定 S/V (枝條) 為 30.17 cm^{-1} (n=100)，而林相改良之 II_4 樣區係屬無木麻黃枯落葉之草本型態，前者優勢種為大黍 (*Panicum maximum*) (枝條) 60.72 cm^{-1} (n=30)，後者為大花咸豐草 (*Bidens pilosa*) (枝條) 45.44 cm^{-1} (n=30) (圖4a)；鮮活草本 S/V 值大黍 (葉片) 為 80.20 cm^{-1} 、大花咸豐草 (葉片) 28.22 cm^{-1} ，鮮活叢木 S/V 值馬櫻丹 (*Lantana camara*) (葉片) 為 15.08 cm^{-1} (圖4b)。

c. 燃料床厚度

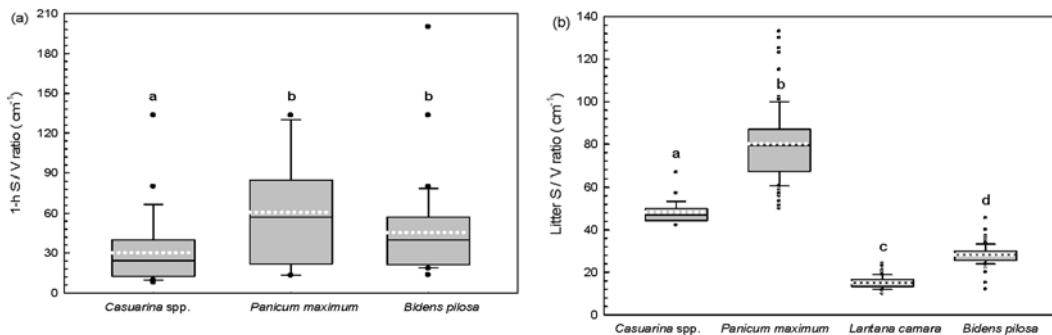


圖4. 台中港木麻黃防風林區地面燃料表體比 (S/V) (a) 木麻黃 (n=100)、大黍及大花咸豐草 (n=30) 等 1-h S/V (枝條) (b) 木麻黃 (小枝)、大黍、馬櫻丹及大花咸豐草 (n=100) 等 S/V (葉片) (白色虛線與黑實線表示平均數與中位數)。

Fig. 4. S/V ratio variation in fuel structure of (a) dead 1-h fuel size class for *Casuarina* spp. (n=100), *Panicum maximum* and *Bidens pilosa* (n=30) (small twigs < 0.6 cm, cm^{-1}) and (b) *Casuarina* spp., live *Panicum maximum*, live *Lantana camara* and live *Bidens pilosa* (n=100) (needles or leaves, cm^{-1}). Box ends indicate the 25th and 75th percentile values and whiskers indicate the 10th and 90th percentiles. The solid line indicates the median and the white dotted line indicates the mean. The outliers show as a circle. Values with different letters are significantly different at 5% significant level by Tukey's HSD (a, b, c, d).

從野外樣區依一般灌木或草本叢生平均深度63.3%計算 (Brown and Albini, 1978), 並依乾鮮比轉化率 (Scott and Robert, 2005) 估約出灌木植被型平均為 0.34 m、草本植被型平均為 0.27 m、無植被型平均為 0.15 m 及林相改良林分平均為 0.32m。

d. 枯死燃料熄滅含水率

依 Plucinski (2003) 實驗及 Lin (1999, 2004) 研究方法, 火燒實驗測定出台中防風木麻黃枯落物熄滅含水率為27%, 林下優勢種的大黍30%、馬櫻丹26%及大花咸豐草17% (圖5)。本研究除II₄區外, I₁、I₂與I₃林分地表層皆有木麻黃枯落物, 其熄滅含水率依實際情況皆設定為27%。

2. 林火模擬結果

防風林區4類燃料型, 經模擬出各群組潛在地表火蔓延速率 (圖6 a), 及其單位面積熱量 (圖6 b), 由高而低依序命名列出 Type-1 至 Type-4 林火行為群組, 其中草本型有最快蔓延速率, 火燒熱量最高為灌木型植群, 此與

Dimitrakopoulos (2002) 以 BEHAVE plus 模擬地中海岸植群, 顯示灌木型與草本型結果是一致的。

(a)蔓延速率高但單位面積熱量次低之草本型植群 (Type-1, 圖7)

此類為林火蔓延速率最高, 而單位面積熱量次低, 樣區為 I_B 之草本型植群。此植群林冠鬱閉度分二族群, 一為1985-1995年栽植木麻黃林, 鬱閉度濃密 (75-90%), 林下有塊狀分布大咸豐草與大黍植被; 一為1974年栽植其林冠鬱閉度適當開闊 (40-60%), 林下植被分布為緊密連續之大黍。在 1-h, 10-h, 100-h 分布燃料量較高及較厚燃料床深度, 以致形成火燒蔓延速率高, 但因地面燃料總量 (TW) 較低, 致單位面積熱量亦偏低。整體上, 一旦地表火形成因有大量易燃物 (1-h) 累積使濕度較高之大黍亦能相對燃燒起來, 因而可形成較大火強度與火焰長度。於 1-h 含水率10%情況下, 中火焰平均風速 1m/s 火蔓延速率 1.1 m/min, 當風速增至 8 m/s 時為 19.2 m/min (圖7a), 可見

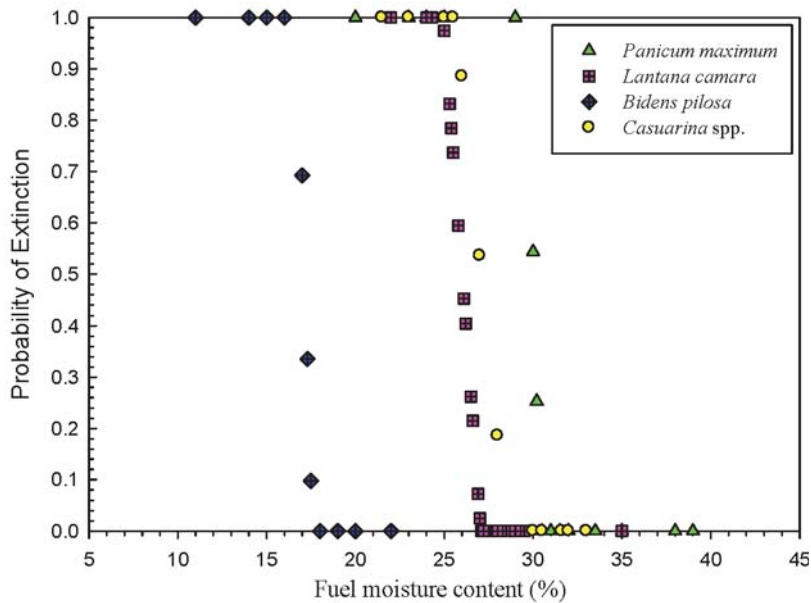


圖5. 本研究主要植群枯落葉熄滅含水率測定值

Fig. 5. Plot of data points and logistic regression model showing extinction probability changes with fluctuations in 4 different forest litter types fuel moisture content.

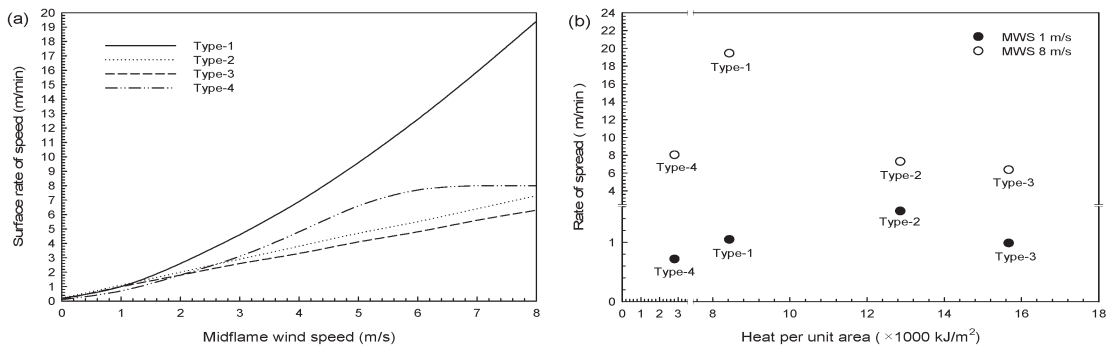


圖6. 台中港防風林區4種群組之潛在林火蔓延速度(a)與單位面積熱量(b)關係對照圖

Fig. 6. Comparison of predicted fire spread values(a) and heat per unit area(b) for the different midflame wind speed using BEHAVE plus fire model in 4 types at the wind- break forest of Taichung Harbor. MWS = midflame wind speed.

風速大幅影響林火蔓延速率；另於 1-h 含水率 20% 情況下，中火焰平均風速 1m/s 火蔓延速率 0.8 m/min，當風速增至 8 m/s 時為 15.5 m/min，如此不同燃料含水率亦顯然影響林火蔓延，但當燃料含水率在24%以上時則風速影響火蔓延則趨於緩和。而此類植群單位面積熱量於含水率從10%增至20%，差異量達 1,432 kJ/m² (圖7b)；火強度 (flame intensity) 於較嚴重情況下 (FMC10%、MWS 8m/s) 達到 2726 kW/

m (圖7c)，此種情況下火嚴重度已達到高(指標等級 [IV]) (表4)，控制火燒將成爲一個嚴重問題 (Alexander and Lanoville, 1989; Scott and Burgan, 2005)；此結果類同於 Stott *et al.* (1990) 指出東南亞熱帶草本型火強度爲 2000-5000 kW/m，在該區控制草本型火燒同樣是難以處理之問題 (de Groot *et al.*, 2007)。

(b)初期蔓延速率次高而單位面積熱量亦次高之無植被群 (Type-2，圖8)

表4. 台中港防風林區調查樣區林火指標燃料等級

Table 4. Summary of fire rating of sampling sites at the windbreak forest site of Taichung Harbor.

Fire Rating ^a	Fire Class ^a	Plot Type	FI ^{a,b} (kW/m)	FL ^{a,b} (m)	UDT ^b	Plot Number	FSA ^b (m ²)	PSA ^b (%)
[II]	Low	4	50-350	0.3-1.2	Shrubs Herbs	II _{D-1} - II _{D-7}	1432	21
[III]	Moderate	2,3	350-1750	1.2-2.4	Shrubs Non-cover	I _{A-2} , I _{A-8} , I _{A-10} , I _{A-13} , I _{B-2} , I _{B-3} , I _{B-5} , I _{C-1} , I _{C-2} , I _{C-4} , I _{C-5}	3630	54
[IV]	High	1	1750-5200	2.4-3.6	Herbs	I _{A-1} , I _{A-9} , I _{B-1} , I _{B-4} , I _{B-6} , I _{B-7} , I _{C-3} , I _{C-6}	1688	25

^a Adapted from Andrews and Rothermel, 1982; Alexander and Lanoville, 1989; Scott and Burgan, 2005.

^b Abbreviations are: FI = Fireline Intensity; FL = Flame Length; FSA= Forested Sampling Area; PSA= Percentage of study area.



燃料定性資訊	
樹種／林齡：	木麻黃(1974-94年栽植)
樹冠鬱閉度：	適當開闊-濃密的 水平連續性
灌木：	無-零星的
草本植被：	散落-緊密連續的
倒木物質：	零星-散落的
枯枝落葉層：	緊密連續的

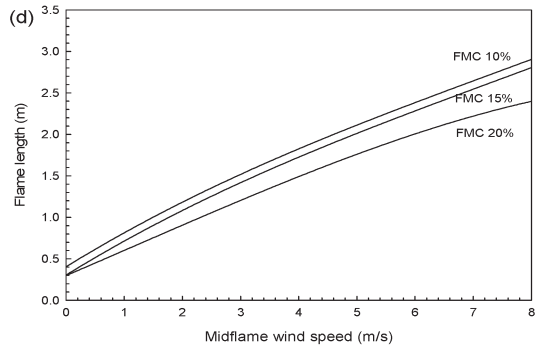
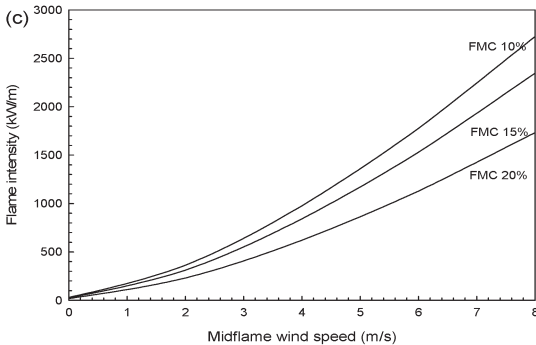
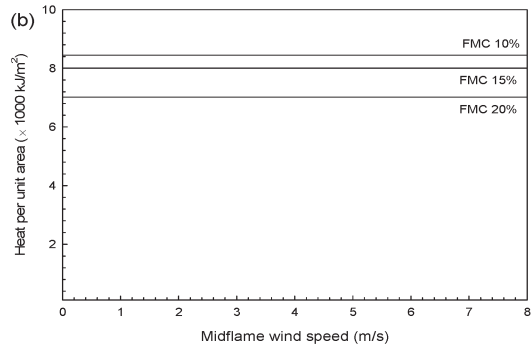
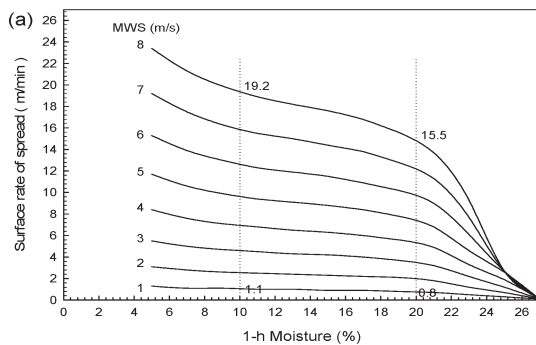


圖 7. 台中港防風林區Type-1 (草本型)照片、燃料資訊與潛在林火行為

Fig. 7. Photo, fuel properties and fire behavior simulations of Type-1 site at the wind-break forest of Taichung Harbor; MWS = midflame wind speed, FMC = fuel moisture content.

此類為 I_A 之無植被與少許草本植被樣區植群，木麻黃林於1985年及1994年栽植，位處防風林北側及西側外緣地帶，長期受東北季風影響，立木生長分枝多且枝下高，林冠鬱閉度處於75-95%之濃密狀態。1-h 及 10-h 燃料量豐富密集，有較厚枯落層暨分解層及產生明顯

之斥水層 (林昭遠等，1996)，呈現地面有機質分解不良狀態；地面上部份有草本塊狀大黍與大花咸豐草散落分布，亦有零星散落之較大徑級 (>100-h) 倒木物質。於1-h含水率10%情況下，中火焰平均風速 1m/s 火蔓延速率 1.2 m/min，當風速增至 8 m/s 時為 7.4 m/min；於

含水率增至20%情況下，中火焰平均風速 1m/s 火蔓延速率 0.8 m/min，當風速增至 8 m/s 時為 4.8 m/min (圖8a)，與上述 Type-1 趨勢是相似的，當燃料含水率增至25%以上時則風速影響火蔓延趨緩。而此類植群單位面積熱量於含水率從10%增至20%時差異量達 2,097 kJ/

m² (圖8b)；火強度於嚴重情況下 (FMC10%、MWS 8 m/s) 達到 1562 kW/m (圖8c)，地表火焰長度 2.30 m (圖8d)，火指標等級為中度 [III]，一旦進行搶救時火蔓延前鋒因火強度關係，而無法靠近使用火把及鐵鍬等手工工具進行撲火動作，須使用推土機或消防水帶進行射水等始有



燃料定性資訊	
樹種／林齡：	木麻黃(1985-94年栽植)
樹冠鬱閉度：	濃密的
水平連續性	
灌木：	無-零星的
草本植被：	無-零星的
倒木物質：	零星-散落的
枯枝落葉層：	緊密連續的

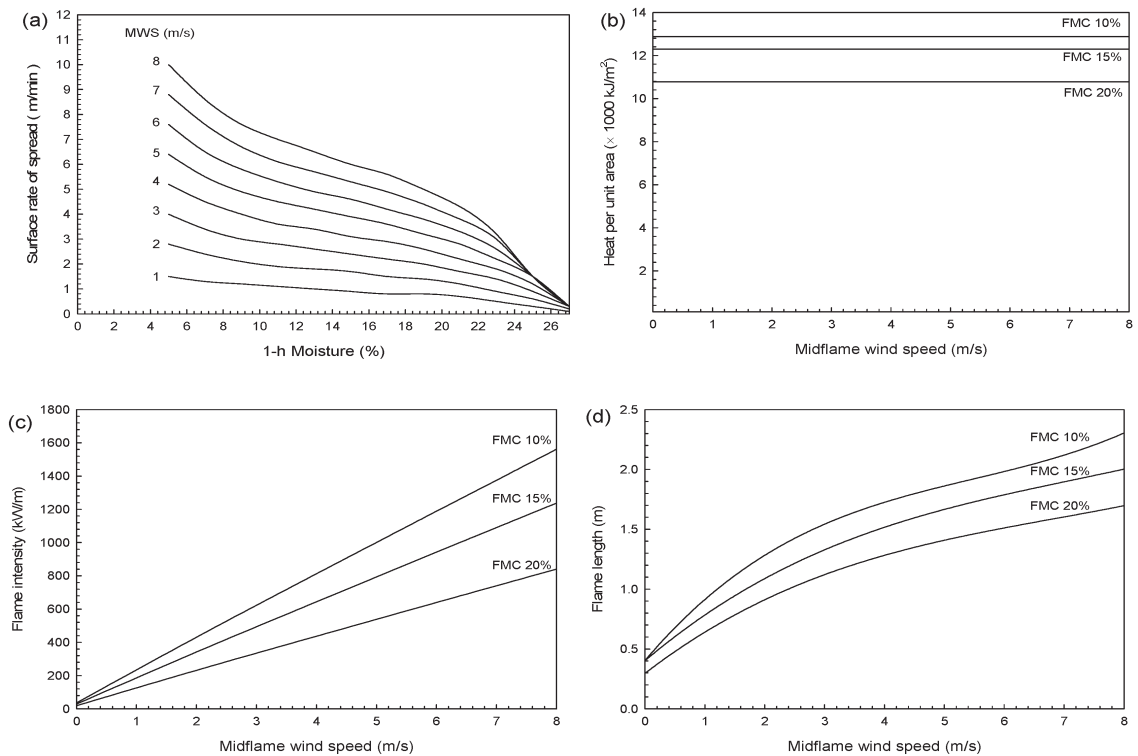


圖8. 台中港防風林區Type-2 (無植被型)照片、燃料資訊與潛在林火行為

Fig. 8. Photo, fuel properties and fire behavior simulations of Type-2 site at the wind-break forest of Taichung Harbor; MWS = midflame wind speed, FMC = fuel moisture content.

效益 (Alexander and Lanoville, 1989; Scott and Burgan, 2005)。

(c)蔓延速率低但單位面積熱量相當高之灌木植群 (Type-3, 圖9)

此類為 I_C 之灌木與少許草本植被樣區

群，為木麻黃林冠鬱閉度變化幅度較大植群，有林冠鬱閉度較開闊狀態 (30-50%) 之1974年栽植；另有鬱閉度濃密 (75-90%) 之1994年栽植。前者樣區內有比較發達之緊密連續灌叢，平均高度 1.2-1.6 m 之馬櫻丹，後者為構樹



燃料定性資訊	
樹種／林齡：	木麻黃(1974-94年栽植)
樹冠鬱閉度：	較開闊-濃厚的
水平連續性	
灌木：	零星-緊密連續的
草本植被：	無-零星的
倒木物質：	零星-散落的
枯枝落葉層：	緊密連續的

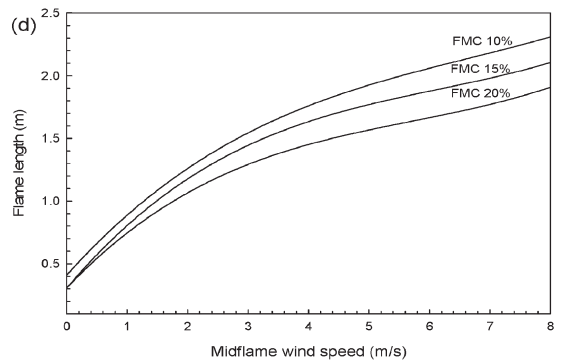
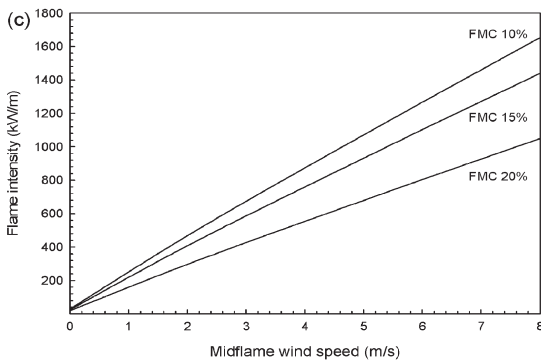
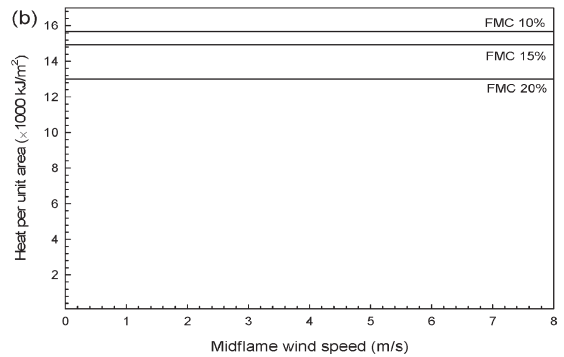
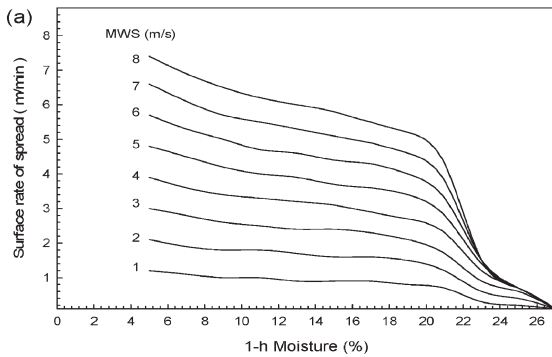


圖9. 台中港防風林區Type-3(灌木型)照片、燃料資訊與潛在林火行為

Fig. 9. Photo, fuel properties and fire behavior simulations of Type-3 site at the wind-break forest of Taichung Harbor; MWS = midflame wind speed, FMC = fuel moisture content.

(*Broussonetia papyrifera*)、朴樹 (*Celtis sinensis*) 散落分布及塊狀大黍與大花咸豐草等草本散落分布。此型植被群落對火反應變化大，因灌叢燃燒易表現出複雜之火行為 (Davies *et al.*, 2009)，地表火形成時，因植被含水率關係蔓延速率偏低，但因灌叢之垂直性燃料使單位面積釋熱量偏高。於 1-h 含水率10%情況下，中火焰平均風速1m/s時火蔓延速率僅 1.0 m/min，當風速 8 m/s 時為 6.4 m/min (圖9a)。而此類植群單位面積熱量於含水率從10%增至20%時降低 2,887 kJ/m²，顯見燃料含水率對灌叢燃燒強烈影響；火強度於嚴重情況下 (FMC10%、MWS 8 m/s) 達到 1653 kW/m，地表火焰長度達到 2.3 m，火等級與 Type-2 同為中度 [III] 指標，進行搶救時火蔓延前鋒因火強度關係，而無法靠近使用打火把及鐵鍬等手工工具進行撲火動作，須使用推土機或消防水帶進行射水等始有效益 (Alexander and Lanoville, 1989; Scott and Burgan, 2005)。

(d) 初期蔓延速率及單位面積熱量皆低之黃槿等林型 (Type-4，圖10)

此類樣區植群為 II_D 非木麻黃之黃槿等林相改良林分 (1990年栽植)，植物組成較豐富，此植群林冠鬱閉度變化幅度大，有黃槿林分群落分布 (林冠鬱閉度濃密)，有稀疏小徑級倒木分布之無植被型態；植被亦有草本型態 (林冠鬱閉度開闊) 之大黍與大花咸豐草等呈塊狀分布。地面燃料總量 (TW) 平均僅 6.93 t/ha，地表枯枝落葉層薄，1-h 燃料量相當少 (1.66 t/ha)，10-h 燃料量亦少 (平均 0.70 t/ha)，地表火缺乏易燃物 (1-h) 供應使地表上植被難以受燒，往往形成不完全鑲嵌塊狀燃燒痕跡。於 1-h 含水率10%情況下，中火焰平均風速 1m/s 火蔓延速率僅 0.6 m/min，當風速增至 6 m/s 時以上因燃料量供應不足關係火蔓延速率保持常數為 8.2 m/min。此植群單位面積熱量於含水率從10%增至20%時降低 1,202 kJ/m²；火強度於嚴重情況下 (FMC10%、MWS 8 m/s) 僅 206 kW/m，地表火焰長度僅 0.90 m，火等級為低

度指標 [II]，火勢初期時能輕易於火蔓延前鋒及側翼進行攻擊撲滅 (Alexander and Lanoville, 1989; Scott and Burgan, 2005)。

所以，由以上從台中港防風林取樣33區所得出4類燃料型林火行為，分為3群林火指標燃料等級，由高而低為木麻黃林草本型 (I_B) > 木麻黃林無植被型 (I_A) 與灌木型 (I_C) > 非木麻黃之黃槿等林型 (II_D) (表4)；就地表火而言，火強度在 1500-2000 kW/m 時就有可能發生顯著飛火 (spotting) 現象 (Taylor and Wendel 1964; Hough and Albin 1978; Hirsch *et al.*, 1979)，而上述之 I_B、I_A 及 I_C 型皆達到此值以上，而增加林火難以控制之程度。在林火預防方面，在火規模高度指標 [IV] 之草本型可進行如燃料減量、混合林栽植或燃料隔絕等燃料調整方式 (fuel modification) (周巧盈, 2004)，考慮進行低強度計劃燃燒，燒除林下豐富之 1-h 燃料量，以達快速降低樣區火指標等級。在林火搶救方面，可進行預測最短路徑及進行搶救資源之配置著手，從台中港大部份屬於中度以上火指標等級 [III] (佔取樣面積79%)，因此在消防水源匱乏地區，應考慮增設消防栓或蓄水池等方式，方能有效壓抑火勢蔓延。

(三) 結論

本研究根據33個樣區之地面燃料組成差異性，分群4種燃料類型，經林火模擬結果顯示，火燒時除 I_D 型(黃槿等林型)較不會發生飛火現象外，餘皆可能發生；其中灌木型火燒熱量最高，而草本型火燒蔓延速率是最快，以整體林火強弱程度為木麻黃林草本型 (I_B) > 木麻黃林無植被型 (I_A) 與灌木型 (I_C) > 非木麻黃之黃槿林型 (II_D) 等3級林火強弱指標燃料；其中顯示台中港大部份屬於中度以上火指標等級 [III] (佔取樣面積79%)，這對林區管理人員具有相當指導意義，一旦進行火勢搶救時，能利用這種分類指標，充分考慮天氣狀況選用哪種滅火方式與方法，考量所需滅火人員與相應裝備器材；如對於火等級 [II] 或 [III] 可直接將消防水線資源佈署在火線前鋒進行撲滅，當火等級



燃料定性資訊	
樹種／林齡：	黃槿等(1990年栽植)
樹冠鬱閉度：	開闊-濃密的
水平連續性	
灌木：	零星-緊密連續的
草本植被：	無-緊密連續的
倒木物質：	無
枯枝落葉層：	稀疏-連續的

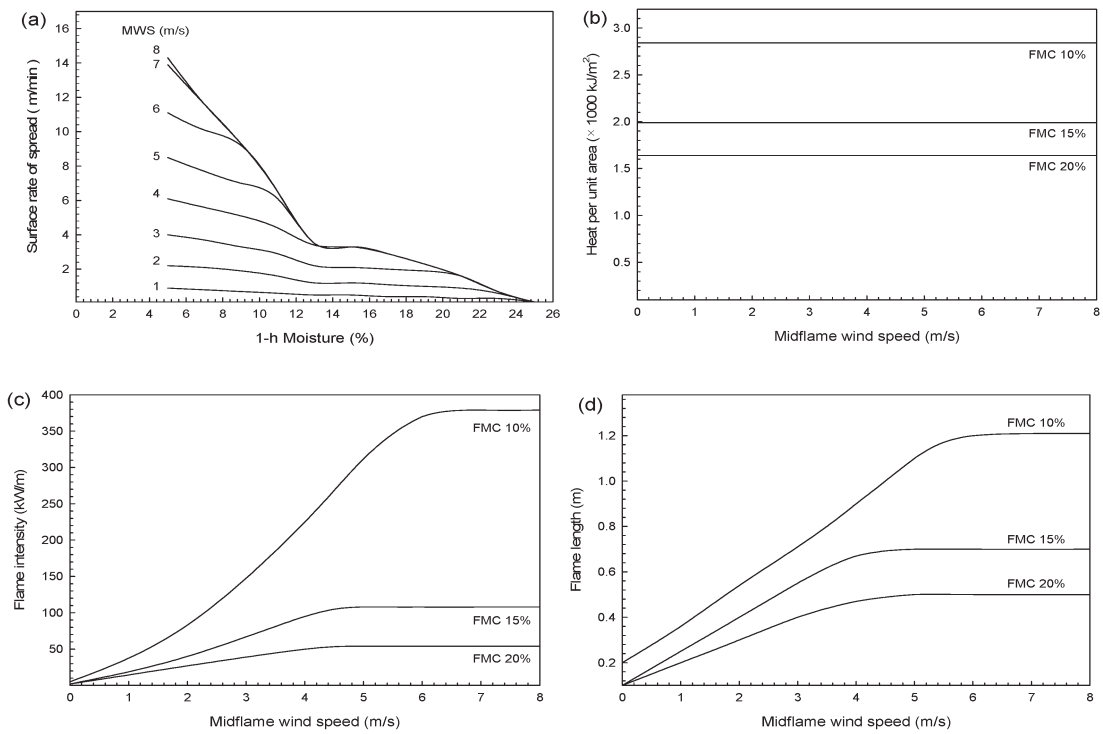


圖 10. 台中港防風林區Type-4(黃槿等林型)照片、燃料資訊與潛在林火行為

Fig. 10. Photo, fuel properties and fire behavior simulations of Type-4 site at the wind-break forest of Taichung Harbor; MWS = midflame wind speed, FMC = fuel moisture content.

在 [IV] 時會出現火勢控制問題，在無相當消防水線支援下，佈署在火線前鋒人員應考慮林火快速蔓延性，攻擊防禦及緊急退避動線是須要考慮的，而能及時調度大量消防資源到現場，是控制初(中)期火勢先決條件之一。

四、致謝

本文研究方向及樣區燃料調查工作，承行政院農委會林業試驗所森林保護組林火研究室之指導協助，及提供相關調查研究工具；調查作業上另蒙中興大學森林學系森林分類暨生態研究室團隊野外協助，在此一併致謝。

五、引用文獻

- 呂金誠 (1990) 野火對臺灣主要森林生態系影響之研究。國立中興大學植物研究所博士論文。
- 林世宗、林朝欽、邱祈榮、周巧盈 (2003) 林火燃料分類與地面複合式調查方法概述。臺灣林業29(5): 20-30。
- 林昭遠、謝顯宗、陳明義 (1996) 木麻黃防風林斥水層復育之研究。中華水土保持學報27(2): 107-117
- 林朝欽 (1992) 森林燃料系統及其對林火之影響。台灣林業18(12): 22-25。
- 林朝欽、邱祈榮 (2002) 解析林火行為—2001年梨山林火個案研究。中華林學季刊35(2): 183-192。
- 林朝欽、邱祈榮、黃清吟、林世宗、周巧盈 (2007) 國有林大甲溪事業區燃料量推導模式之建立。中華林學季刊40(1): 43-54。
- 周巧盈(2004)大甲溪事業區二葉松林地燃料型之建立。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。
- 邱祈榮、周巧盈、林朝欽、林世宗 (2005) 台灣二葉松人工林燃料型之建立。中華林學季刊38(3): 305-321。
- Alexander, M. E. and R. A. Lanoville (1989) Predicting Fire Behavior in the Black Spruce-Lichen Woodland Fuel Type of Western and Northern Canada. For. Can., North. For. Cent., Edmonton, Alberta, and Gov. Northwest Territ., Dep. Renewable Resour., Territ. For. Fire Cent., Fort Smith, Northwest Territories. Poster (with text).
- Anderson, H. E. (1982) Aids to determining fuel methods for estimating fire behavior. USDA: Forest Service General Technical Report INT-122.
- Andrews, P. L and R. C. Rothermel (1982) Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics. Gen. Tech. Rep. INT-131. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 21 pp.
- Andrews, P. L. (1986) BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system--BURN subsystem, Part 1. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. INT-194. 130 pp.
- Andrews, P. L. and C. H. Chase (1989) BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system--BURN subsystem, Part 2. USDA Forest Service, Gen. Tech. Rep. INT-260. 93 pp.
- Andrews, P. L. and L. S. Bradshaw (1990) RXWINDOW: Defining windows of acceptable burning conditions based on desired fire behavior. USDA Forest Service, Gen. Tech. Rep. INT-273. 54 pp.
- Brown, A. A. and K. P. Davis (1973) "Forest Fuel" in Forest Fire Control and Use(second edition). McGraw-Hill Book Company. 79-111.
- Brown, J. K. and F. A. Albini (1978) Predicting slash depth for fire modeling. Ogden, Utah: Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station
- Brown, J. K., R. D. Oberheu and C. M. Johnston (1982) Handbook for Inventorying Surface Fuels and Biomass in the Interior West. USDA Forest Service General Technical Report INT-129. 22 pp.
- Burgan, R. E. and R. C. Rothermel (1984) BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system-FUEL subsystem. USDA Forest Service, Gen. Tech. Rep. INT-167. 126 pp.
- Byram, G. M. (1959) Combustion of forest fuels. In 'Forest Fire: Control and Use'. McGraw-Hill: New York.

- Chandler, C. G., P. Thomas, P. Trabaud and D. Williams (1983) *Fire in Forestry. Volume I.* John Wiley & Sons, New York. 450 pp.
- Countryman, C. M. (1972) The fire environment concept. Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Pacific and Range Experiment Station, Berkeley, California. 12 pp.
- David, R. W. and G. S. Biging (1997) A qualitative comparison of fire spread models incorporating wind and slope effects. *Forest Science*, 43(2): 170-180.
- Davies, G. M., C. J. Legg, A. A. Smith and A. J. MacDonald (2009) Rate of spread of fires in *Calluna vulgaris*-dominated moorlands. *Journal of Applied Ecology*. 46: 1054-1063.
- de Groot, W. J., R. D. Brady, M. A. Roswintiarti and R. M. Mohamad (2007) Development of the Indonesian and Malaysian fire danger rating systems. mitigation and adaptation strategies for global change. 12: 165-180.
- Dimitrakopoulos, A. P. (2002) Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 11: 127-130.
- Forest Canada Fire Danger Group (FCFDG) (1992) Development and structure of the Canadian forest fire behavior prediction system. Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate. Information Report ST-X-3. 49 pp.
- Graca, P. M. L., P. M. Fearnside, and C. C. Cerri (1999) Burning of Amazonian forest in Ariquemes, Rondonia, Brazil: biomass, charcoal formation and burning efficiency. *Forest Ecology and Management* 120: 179-191.
- Hirsch, S. N., G. F. Meyer and D. L. Radloff (1979) Choosing an activity fuel treatment for southwest ponderosa pine. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report RM-67. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado.
- Hough, W. A. and F. A. Albin (1978) Predicting fire behavior in palmetto-gallberry fuel complexes. USDA Forest Service, Southeast Forest Experiment Station Research Paper SE-174. Asheville, NC. 44 pp.
- Lin, C. C. (1999) Modeling probability of ignition in Taiwan red pine forests. *Taiwan Journal of Forest Science* 14(3): 339-344.
- Lin, C. C. (2004) Modeling fine dead fuel moisture in Taiwan red pine forests. *Taiwan Journal of Forest Science* 19(1): 27-32.
- National Wildfire Coordinating Group (NWCG) (1981) The fire environment and Fuel classification in S-390. *Fire Behavior*.
- Plucinski, M. P. (2003) The investigation of factors governing ignition and development of fires in heathland vegetation. Ph.D Thesis, University of New South Wales, ADFA, Canberra.
- Pyne, S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven (1996) *Introduction to Wildland Fire*, 2nd Ed. Wiley Publishers, New York. NY.
- Rothermel, R. C. (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service; Res Pap INT-115.
- Stott, P. A., J. G. Goldammer and W. L. Werner (1990) The role of fire in the tropical lowland deciduous forests of Asia. New York, Springer-Verlag. 32-44
- Scott, J. H. and R. E. Burgan (2005) Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72 pp.

- Scott, J. H. and E. B. Robert (2005) A comprehensive set of standard fire behavior fuel models for use with Rothermel's surface fire spread model, USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153.
- Tanskanen, H. (2007) Fuel conditions and fire behavior characteristics of managed *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in Finland. University of Helsinki, Department of Forest Ecology. 1 pp.
- Taylor, D. F. and G. W. Wendel (1964) Stamper Tract prescribed burn. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper SE-14. Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina. 12 p.
- USDA Forest Service (2010) BEHAVE plus online documentation. Rocky Mountain Research Station. Retrieved November 1, 2010, from <http://fire.org>.
- Vietmeyer, N. (1986) Casuarina: weed or windfall? *American Forests* 92(2): 22-25.
- Wright, C. S., R. D. Ottmar, R. E. Vihnanek and D. R. Weise (2002) Stereo photo series for quantifying natural fuels: grassland, shrubland, woodland, and forest types in Hawaii. USDA Forest Service General Technical Report PNW-GTR-545. 60pp.