

# 集水區火燒嚴重度與植生恢復率關係之研究

詹杭勳<sup>(1)</sup> 蘇潘<sup>(2)</sup> 林昭遠<sup>(3)</sup>

## 摘 要

野火常造成水土資源與景觀破壞，對環境復育有長期影響，故瞭解集水區火燒嚴重度與植生恢復率之關係為重要課題。本研究以 1993 年玉山塔塔加野火事件為例，藉由 LANDSAT 衛星影像萃取環境指標，分析集水區野火前地覆類別、火燒嚴重度、以及火燒跡地植生恢復率 (VRR)，並透過統計檢定方法探討火燒影響與植生恢復能力之關係。結果顯示：火燒跡地於野火前之地覆可分為林地、疏林地及草地等三類；火燒嚴重度主要以低、中級為主，樣區之 VRR 與嚴重度呈顯著負相關。六年後各火燒嚴重度等級下各地覆類別之 VRR 分別是：低嚴重度以林地 105.80% 最高，疏林地 94.93% 次之，草地之 89.34% 最低；中嚴重度等級各地覆類別差異不大，其 VRR 介於 86% 至 82%；高嚴重度等級之 VRR 皆小於 80%，以野火前之草地其 VRR 為 71.74% 最差，可知火燒跡地之火燒嚴重度明顯影響後續植生之復育，火燒嚴重度指標可作為 VRR 之參考。

(**關鍵詞**：環境指標、火燒嚴重度、植生恢復率、塔塔加火燒)

## Relationship of Burn Severity and Vegetation Recovery Rate in a Watershed

*Hang-Hsun Chan*<sup>(1)</sup> *Chuphan Chompuchan*<sup>(2)</sup> *Chao-Yuan Lin*<sup>(3)</sup>

Graduate Student<sup>(1)</sup>, Graduate Student<sup>(2)</sup>, Professor<sup>(3)</sup>

Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University 402, Taiwan, R.O.C.

## ABSTRACT

Wildfire generally causes the increase of runoff and erosion, landscape breakage and other multiple effects, and it requires a long time to recover naturally. Therefore, identifying the relationships between burn severity and post-fire vegetation recovery rates is an important issue. In this research, the Tataka fire occurred at the Yushan National Park in 1993 was selected as the study case. Normalized Burn Ratio (NBR) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from LANDSAT satellite

---

(1) 國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

(2) 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

(3) 國立中興大學水土保持學系教授 (通訊作者 e-mail: cylin@water.nchu.edu.tw)

imageries were used to analyze the pre-fire land-cover, burn severity and Vegetation Recovery Rate (VRR) in the wildfire area. Furthermore, relationships of burn severity to VRR were examined statistically. Results show that the main land-cover types of the pre-fire sites are forest, sparse forest and grassland. The levels of burn severity are mainly low to medium. The VRR of the sampled sites is negatively correlated with burn severity. Forest with low burn severity has the highest VRR (105.80%), followed by sparse forest (94.93%), and grassland (89.34%). For the medium burn severity, the VRRs for each land-cover type ranges from 82% to 86% and the differences of VRRs between land-cover types are not significant. The VRRs for the three land-cover types with the high burn severity are all less than 80%, and among them the grassland has the lowest VRR of 71.74%. Results show that burn severity does significantly affect vegetation recovery, and the burn severity index can be used as a reference for VRR assessment.

(**Keywords** : Environmental index, Burn severity, Vegetation recovery rate, Tataka fire)

## 前言

植生為集水區重要資源，具有涵養水源、穩定邊坡與營造景觀生態等效益，故野火燒毀植生對環境影響極大。本研究擬探討火燒嚴重度(Burn Severity)與植生恢復率(Vegetation Recovery Rate, VRR)之關係，期提供集水區野火後植生復育規劃資訊。野火發生時；依燃料性質、燃燒位置、強度與時間不同，對環境之影響亦異(吳景陽，2004)，除破壞植生，改變土壤理化性質而形成斥水性，間接造成逕流增加與水源涵養能力下降(林昭遠，1991)；火燒適存物種也可藉此取得生態優勢，形成週期性火燒(廖天賜等，2005)。

火燒嚴重度評估，傳統上需配合現地調查，量測火燒對環境影響程度(Key and Benson, 2006)，然其用於大面積調查時將不符效益。應用遙測技術分析地覆類別、火燒嚴重度為近代研究趨勢(Escuin et al.,

2008; Key, 2005; 林朝欽等,2005)。本研究以 1993 年玉山國家公園塔塔加野火事件為例，利用 LANDSAT 衛星影像萃取常態化火燒指標(Normalized Burn Ratio, NBR)與常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)估算火燒嚴重度與 VRR，並藉由野火前地覆類別之空間分布，探討火燒嚴重度與 VRR 之關係，俾供火燒跡地 VRR 評估之參考。

## 材料與方法

### 1. 研究材料

塔塔加集水區位於玉山國家公園西北園區(圖 1)，經緯度約 23°29' 25" N，120°55' 43" E；據玉山國家公園管理處災害紀錄，該區於 1993 年 1 月 6 日發生野火事件，延燒約六天又七小時，波及 299.39 公頃。火燒跡地分布於玉山林業事業區第 24 與 25 林班地，麟趾山與玉山前峰間南向坡面，包含啞口地形(塔塔加鞍部)與道

路(楠溪林道與塔塔加步道)，海拔高度約 2600 公尺，坡度介於 55%至 100%，屬陡峭山勢(林朝欽，1994)。該區於野火前之植生主要為台灣鐵杉、台灣雲杉、台灣二葉松與華山松等針葉林群落(楊美玲，1996)，又以台灣二葉松為優勢(廖天賜，2005)，為水源涵養保安林(玉山國家公園

管理處，2012)。研究蒐集美國地質調查局 (U.S. Geological Survey, USGS) 之 LANDSAT5 衛星影像 (解析度為 30m x 30m)，包含野火前(1984/12/12、1990/07/06、1990/12/13)、野火後(1993/07/06)與評估期 (1994/09/03、1995/09/06、1996/07/06、1997/09/11、1999/08/16)共 10 期影像。

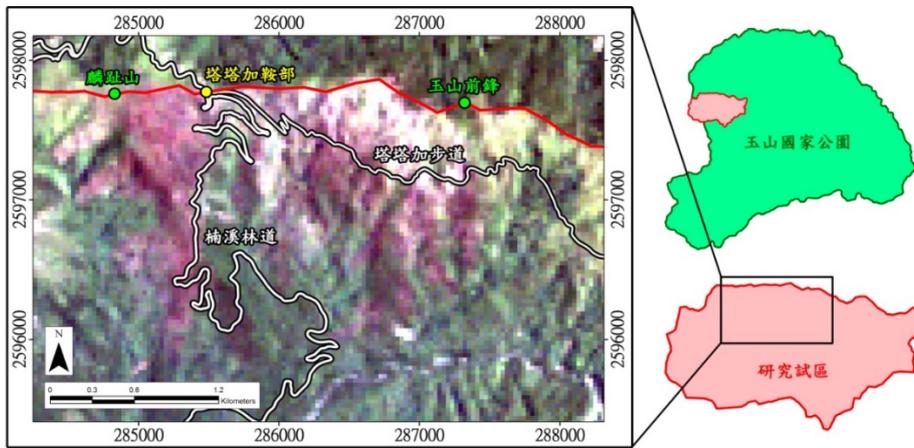


圖 1 研究試區

Figure 1 Study area

## 2. 研究方法

### (1)火燒跡地劃定

常態化火燒指標 (Normalized Burn Ratio, NBR)，為 Lopez and Caselles(1991) 首次提出之火燒跡地劃定指標；指標公式如下：

$$NBR = \frac{B4 - B7}{B4 + B7}$$

式中 B4 為近紅外光反射率；B7 為短波紅外光反射率。指標值介於正負 1，值大者表示植生密度高；值低者表示植生稀疏或受火燒影響。由於單期影像在劃定上可能納入裸地，為此採用 Key and Benson

(2006) 提出之差異常態化火燒指標 (Difference Normalized Burn Ratio, dNBR)，即以野火前與野火後 NBR 指標值相減，最後再以 k-mean 集群分析將 dNBR 分為火燒跡地與非火燒區域兩類。

### (2)火燒嚴重度

火燒嚴重度之定義為火燒對環境影響之程度(林朝欽，2005)；本研究以 dNBR 指標參照 Key and Benson (2006)提出之分級標準則進行嚴重度分級如表 1。

表 1 火燒嚴重度分級

Table 1 Classification of burn severity

dNBR 值域	分級
$dNBR < 0.27$	低嚴重度
$0.27 \leq dNBR < 0.44$	中嚴重度
$0.44 \leq dNBR$	高嚴重度

(3)野火前地覆類別萃取

因火燒嚴重度受野火前植生類型影響甚鉅(Miller and Thode, 2007)，有必要萃取火燒前之地覆類別；NDVI 指標之應用為遙測影像萃取地覆類別常用方法之一。

(a) 常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

NDVI 為 Rouse 等(1973)首次提出概念之植生生長監測指標；指標公式如下：

$$NDVI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}$$

式中 B3 為紅光反射率；B4 為近紅外光反射率。指標值介於正負 1，值大者表示植生密度高或光合作用強；值低者表示植生密度低或裸地區位。故可藉野火前之多期衛星影像，萃取 NDVI 之平均值與標準差作為地覆類別分類之依據(林政侑，2012)。

(b)野火前地覆分類

萃取 NDVI 之平均值與標準差並利用 k-mean 集群分析法進行地覆分類。鑒於 k-mean 分析法於多參數演算會受參數尺度之差異影響，故需先對各項參數進行標準化分數轉換；轉換公式如下(Allan, 2009)：

$$X' = \frac{X - \bar{X}}{S_x}$$

式中 X'為轉換後參數值；X 為轉換前參數值； $\bar{X}$ 為 X 值試區樣本平均數； $S_x$ 為 X 值樣本標準差。轉換後各項參數之樣本平均值皆為 0，樣本標準差皆為 1，達成尺度均一化，使集群分析等權重藉由各參數之特性進行分類。

(4)火燒跡地植生恢復率

(a)植生恢復率(Vegetation Recovery Rate, VRR)

VRR 為植生在干擾後之狀態與完全恢復相比之程度(Lin et al., 2005)。因 NDVI 可展現植被狀態，故可採用多期影像指標值計算 VRR(林昭遠，2001)；計算公式如下：

$$VRR = \frac{NDVI_2 - NDVI_1}{NDVI_0 - NDVI_1} \times 100\%$$

式中  $NDVI_2$  為評估期指標值； $NDVI_0$  為野火前指標值； $NDVI_1$  為野火後指標值。當 VRR 值小於 0%，表示植生呈現劣化；值大者表示植生恢復佳；值趨於 100% 表示植生接近完全恢復。

(b)影像選取分析

火燒跡地之 VRR 受非火燒區植被下種距離影響甚鉅(Key and Benson, 2006)，然火燒嚴重度無法反映該項因素，致使初期之 VRR 與火燒嚴重度之關係展現受影響(且該因素為連續變數，影響性不利劃分)，故需選取適當起始分析影像計算 VRR。研究藉假設下種距離對 VRR 之影響主要為植生入侵速度，故影響隨時間而

減少，後期 VRR 在同組樣本(以嚴重度與地覆類別劃分)之變化相近，納入評估期 NDVI 值計算相近程度，並以 F 檢定為選取依據；檢定之 F 值計算式如下：

$$F = \frac{\sum_1^n (dNDVI_2 - \overline{dNDVI_2})^2 / (n - 1)}{\sum_1^N (dNDVI_0 - \overline{dNDVI_0})^2 / (N - 1)}$$

式中  $dNDVI_2$  為樣本於兩評估期影像之 NDVI 差值(相減值)； $\overline{dNDVI_2}$  為分組之差值平均數， $n$  為樣本數； $\sum_1^N (dNDVI_0 - \overline{dNDVI_0})^2 / (N - 1)$  為檢定基準，考量各組基準均一性，本處是以火燒跡地總體樣本，配合野火前影像建置， $N$  為火燒跡地總體樣本數。檢定為不顯著者，表示組內 VRR 變化相近，兩評估期影像皆可選取計算 VRR。

(5)變異數分析(Analysis of Variance, ANOVA)

研究在此採用二因子變異數分析法，檢定火燒嚴重度分級與野火前地覆類別此兩因子之 VRR 差異；並配合兩因子對 VRR 進行分組之敘述統計，探討 VRR 與火燒嚴重度之關係。

## 結果與討論

### 1. 火燒跡地劃定與火燒嚴重度

本研究之火燒跡地劃定面積為 234.45 公頃(圖 2)，小於過去調查結果之波及面積(299.39 公頃)，差異原因為野火後影像與實際發生日期時隔半年，部份燒毀情形輕微之植被已顯著恢復；此因素也使劃定於邊緣處呈現破碎。火燒跡地之火燒嚴重度，

則是低、中嚴重度分別占區位 44.18%與 40.38%面積為主(合計約 84%)；高嚴重度僅占 15.43%(表 2)。空間分布上(圖 3)，可看出跡地邊緣多屬低嚴重度，而高嚴重度在左上角(麟趾山頭處)集中分布，藉參照林朝欽(1994)對該事件之紀錄資料，推論該處為火燒起始位置。

表 2 火燒嚴重度百分比  
Table 2 Percentage of burn severity classification

嚴重度	面積 (公頃)	百分比 (%)
低	94.68	40.38%
中	103.59	44.19%
高	36.18	15.43%

### 2. 野火前地覆類別萃取

利用兩期衛星影像其 NDVI 之平均數與標準差，藉由統計之 k-mean 集群分析將試區火燒前之地覆類別分為五類(圖 4 與表 3)；NDVI 平均值為高等級且標準差屬低等級之類別為林地；平均值與標準差皆為高等級之類別為草地；平均值與標準差皆屬低等級之類別為裸地；平均值中等級與標準差屬低等級之類別為疏林地；另考量試區在濱水區或地形無法修除陰影處，此類別具平均值低且標準差高之特性歸為其他之類型；火燒前地覆類別之分布如圖 5 所示，主要以林地 41.23%、疏林地 31.55%與草地 26.87%三者合計約占總面積 99%，因此僅針對該三類地覆類別進行變異數分析。

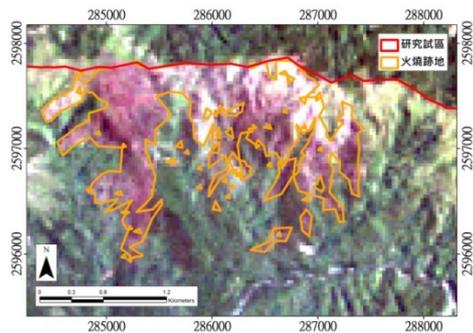


圖 2 火燒跡地

Figure 2 Wildfire area

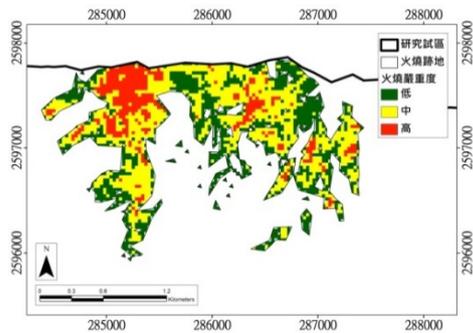


圖 3 火燒嚴重度分級之空間分布

Figure 3 Spatial distribution of burn severity

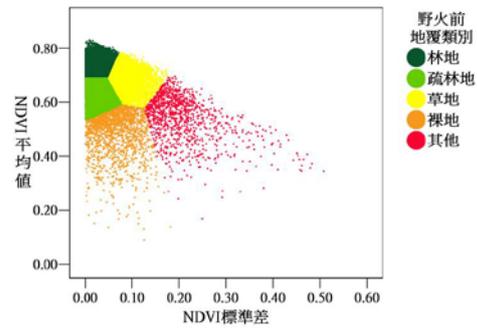


圖 4 各地覆類別 NDVI 平均值與標準差之  
 散布圖

Figure 4 Scatter plot of mean and standard deviation of NDVI for each land-cover

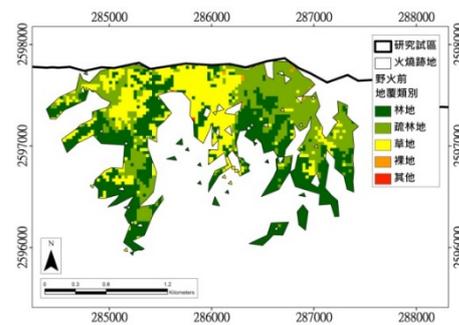


圖 5 火燒跡地野火前之地覆類別

Figure 5 Pre-fire land-cover

表 3 野火前地覆類別特性

Table 3 Characteristics of pre-fire land-cover

NDVI 特性 (平均值/標準差)	地覆類別	特性	面積 (公頃)	百分比 (%)
高 / 低	林地	木本植生覆蓋度高，地貌不易受季節變化。	96.66	41.23%
中 / 低	疏林地	木本植生覆蓋度低，地貌不易受季節變化。	73.98	31.55%
高 / 高	草地	草本植生覆蓋度高，地貌容易受季節變化。	63.00	26.87%
低 / 低	裸地	植生覆蓋度低，地貌不易受季節變化。	0.72	0.31%
低 / 高	其他	濱水或陰影無法修除之區位。	0.09	0.04%

### 3. 火燒跡地植生恢復率

經影像選取分析，得出各組之 F 值有逐年減小趨勢(表 4)，表示 VRR 變化逐漸不受下種距離影響。藉由 F 檢定，判定火燒跡地在 1995 年之前各組 F 值仍顯著；但在 1995 年後，低、中嚴重度之林地已不顯著；1996 後，各組皆不顯著。由於 F 值於 1997 年至 1999 年最小，故本處採用 1999 年影像進行 VRR 計算。經計算後將其結果以火燒嚴重度與野火前地覆類進行

分組敘述統計(表 5)，可看出 VRR 平均數排序上皆遵從嚴重度分級：即低嚴重度者 VRR 最高，高嚴重度 VRR 最低；VRR 之標準差在低嚴重度皆大於 30%，其因為 VRR 計算在此情境較為敏感所致；藉信賴區間計算，則顯示低嚴重度之林地與疏林地已達完全恢復水準(VRR 信賴區間有包含 100%)，草地之 VRR 亦有 89.34%；各類地覆在中嚴重度之 VRR 則介於 82%至 86%；高嚴重度則皆在 80%以下，並以草地之 VRR 最低(71.74%)。

表 4 影像選取結果(標線者為顯著)

Table 4 Results of image selection (marking for significant F value)

嚴重度	地覆類別	臨界值	評估期影像 F 值				
			1993/07/14 1994/09/03	1994/09/03 1995/09/06	1995/09/06 1996/07/06	1996/09/06 1997/09/11	1997/09/11 1999/08/16
低	林地	1.12	<u>3.52</u>	<u>2.14</u>	<u>1.48</u>	0.71	0.51
	疏林地	1.14	<u>4.44</u>	<u>1.50</u>	<u>1.14</u>	0.91	0.61
	草地	1.15	<u>4.66</u>	<u>4.80</u>	<u>2.01</u>	0.82	0.60
中	林地	1.12	<u>4.58</u>	<u>2.38</u>	1.01	0.84	0.81
	疏林地	1.13	<u>4.06</u>	<u>3.24</u>	<u>1.78</u>	0.87	0.62
	草地	1.15	<u>7.10</u>	<u>4.23</u>	<u>2.59</u>	1.03	0.81
高	林地	1.20	<u>4.20</u>	<u>1.32</u>	1.08	0.90	0.87
	疏林地	1.24	<u>3.76</u>	<u>1.30</u>	<u>1.68</u>	0.85	0.62
	草地	1.22	<u>2.73</u>	<u>1.25</u>	<u>1.64</u>	0.59	0.62

表 5 植生恢復率(VRR)敘述統計

Table 5 Descriptive statistics of VRR

嚴重度分級	地覆類別	樣點數	平均數 (%)	標準差 (%)	平均數 95%信賴區間	
					下界(%)	上界(%)
低嚴重度	林地	449	105.80	123.44	94.35	117.25
	疏林地	321	94.93	52.16	89.20	100.66
	草地	274	89.34	31.04	85.65	93.03
中嚴重度	林地	468	82.06	18.38	80.39	83.73
	疏林地	390	85.55	18.58	83.70	87.40
	草地	292	84.63	18.95	82.45	86.81
高嚴重度	林地	157	77.99	12.56	76.01	79.97
	疏林地	111	77.70	12.16	75.42	79.99
	草地	134	71.74	11.06	69.85	73.63

#### 4. 變異數分析結果

研究藉二因子變異數分析，檢定火燒嚴重度分級與野火前地覆類別此兩因子分組之 VRR 差異，並以檢定機率值(P 值)展現其顯著性。結果顯示火燒嚴重度之主要效果顯著；地覆類別則不顯著，但兩者之交互效果呈顯著(表 6)，顯示 VRR 在特定情境會受野火前地覆類別顯著影響。

繼交互效果檢定後，再藉單純主要效果與多重比較檢定(表 7)，發現在低嚴重度限定條件下，林地與草地之 VRR 差異顯著；而中、高嚴重度限定條件下，各地覆類別之 VRR 無差異。而林地限定條件下，低嚴重度之 VRR 差異顯著，經多重比較顯示差異於各級嚴重度皆存在，配合分組敘述統計(表 5)推得其值與嚴重度有顯著

負相關；而在疏林地與草地限定條件下，嚴重度之 VRR 差異雖不顯著，但其 P 值皆與臨界值相近，因此本處亦進行多重比較(表 7)；配合分組敘述統計(表 5)，推論疏林地之 VRR 亦與嚴重度有顯著負相關；草地則是在高嚴重度與中、低兩分級之成對比較才顯著，配合低嚴重度限定條件之檢定結果(表 7)，推論顯著成因是草地之 VRR 較其他兩類地覆為低所致。

表 6 因子對 VRR 之主要效果與交互效果檢定(標線者為顯著)

Table 6 Tests of main and interaction effect (marking for significant P value)

檢定效果	P 值	檢定結果 (臨界值=0.05)
火燒嚴重度	<u>≤ 0.0001</u>	顯著
地覆類別	0.0846	不顯著
交互效果	<u>0.0193</u>	顯著

表 7 因子對 VRR 之單純主要效果與多重比較檢定(標線者為顯著)

Table 7 Tests of simple main effect and posteriori comparison (marking for significant P value)

檢定效果	限定條件	P 值	檢定結果 (臨界值=0.0083)	多重比較 P 值 (臨界值=0.05)
地覆類別	低嚴重度	<u>0.0004</u>	顯著	林地與疏林地(0.2177)；林地與草地( <u>0.0201</u> )；疏林地與草地(0.2409)
	中嚴重度	0.6499	不顯著	不適用
	高嚴重度	0.5961	不顯著	不適用
火燒嚴重度	林地	<u>≤ 0.0001</u>	顯著	低與中嚴重度(0.0002)；低與高嚴重度( <u>≤ 0.0001</u> )；中與高嚴重度( <u>0.0059</u> )
	疏林地	0.0108	不顯著	低與中嚴重度(0.0066)；低與高嚴重度( <u>≤ 0.0001</u> )；中與高嚴重度( <u>≤ 0.0001</u> )
	草地	0.0134	不顯著	低與中嚴重度(0.0790)；低與高嚴重度( <u>≤ 0.0001</u> )；中與高嚴重度( <u>≤ 0.0001</u> )

## 結論

本研究以衛星影像萃取環境指標，計算火燒嚴重度、植生恢復率(VRR)，與萃取野火前地覆類別，並藉二因子變異數分析探討火燒嚴重度與 VRR 關係。結果顯示部分火燒跡地於野火後半年顯著恢復；各組樣本之 VRR 變化有逐漸相同趨勢。各級火燒嚴重度之 VRR 存有顯著差異，且兩者呈現顯著負相關；各地覆類別於中、高嚴重度之 VRR 差異不顯著，惟林地與

草地在低嚴重度之 VRR 差異顯著。低火燒嚴重度之林地與疏林地，在野火後六年之 VRR 已達到完全恢復水準(信賴區間包含 100%)。由此可知火燒跡地之火燒嚴重度指標可作為 VRR 之參考。

## 參考文獻

1. 玉山國家公園管理處(2012)，「玉山國家公園(第 3 次通盤檢討)計畫書」，內政部營建署玉山國家公園管理處。

2. 吳景揚(2003),「林火與氣象指標因子之研究—以南投林區為例」,國立屏東科技大學森林系碩士學位論文。
3. 林昭遠(1991),「野火影響森林土壤性質之研究」,國立中興大學水土保持學系博士論文。
4. 林昭遠(2001),「集水區崩塌地植生復育監測與評估」,水土保持植生工程研討會論文集,第 50-58 頁。
5. 林政侑(2012),「應用環境指標劃定集水區地覆類別及熱點區位監測之研究」,國立中興大學水土保持學系碩士論文。
6. 林朝欽(1994),「國有林玉山事業區塔塔加之森林火災研究」,中華林學季刊,第二十七卷,第一期,第 23-32 頁。
7. 林朝欽、邱祈榮、周巧盈(2005),「火燒嚴重度之界定與評估:以武陵森林火災為例」,台灣林業科學,第二十卷,第三期,第 203-213 頁。
8. 邱浩政(2008),「量化研究與統計分析:SPSS 中文視窗版資料分析範例解析」,五南圖書出版股份有限公司。
9. 楊美玲(1996),「塔塔加地區森林火災對松類造林地之植群、微氣候及土壤性質的影響」,內政部營建署玉山國家公園管理處。
10. 詹靜怡(2012),「以衛星遙測多光譜影像探討台中環山地區森林火燒嚴重度分類及植生恢復」,國立中興大學森林學系碩士論文。
11. 廖天賜、陳忠義、陳信惟、潘冠良、楊凱愉、韓明琦、黃立彥、陳宜敏(2005),「塔塔加地區森林火災後植群演替及重要木本植物生態生理特性之研究」,內政部營建署玉山國家公園管理處。
12. Allan, G.B. (2009), *Elementary statistic a step by step approach seventh edition*, McGraw-Hill.
13. Escuin, S., Navarro, R., and Ferná ndez, P. (2008), "Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images," *International Journal of Remote Sensing*, 29(4): 1053-1073.
14. Miller, J.D., and Thode, A.E. (2007), "Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)," *Remote Sensing of Environment*, 109: 66-80.
15. Key, C.H. (2005), Remote sensing sensitivity to fire severity and fire recovery, , *Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management, Spain*.
16. Key, C.H., and Benson, N. (2006), "Landscape Assessment (LA)," *USDA Forest Service Gen.*
17. Lin, W.T., Chou, W.C., Lin, C.Y., Huang P.H., Tsai, J.S. (2005), "Vegetation recovery monitoring and assessment at landslides caused by earthquake in Central Taiwan," *Forest*

- Ecology and Management, 210: 55-66.
18. Lopez García, M. J., and Caselles, V. (1991), "Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data," *Geomorphology Geocarto International*, 6(1): 31-37.
19. Rouse, J.W., Jr.Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. (1973), "Montoring vegetation systems in the great plains with ERTS," 3rd ERTS-1 Symposium: 309-317.

---

104 年 06 月 08 日收稿

104 年 06 月 22 日修改

104 年 06 月 24 日接受

水土保持學報 48 (2): 1697–1708 (2016)

Journal of Soil and Water Conservation, 48 (2): 1697–1708(2016)