

利用墾丁國家公園銀合歡製造木炭之研究

黃國雄^{1,3}，李金梅¹，王秋嫻²，余欣怡¹

¹林業試驗所森林利用組；²林業試驗所集水區經營組；³通訊作者 E-mail: gshwang@tfri.gov.tw

【摘要】 本研究以墾丁國家公園管理處為了熱帶海岸林復舊所伐除之銀合歡為原料，利用土窯製造木炭藉以達到廢棄物資源化與碳保存之目的。製造木炭時測定窯內炭化溫度與煙囪溫度，出窯時秤取木炭重量並計算收炭率，並由土窯內取不同炭化溫度之銀合歡木炭進行性質測試，試驗項目為表面電阻、pH、碳含量、真密度與比表面積，同時亦計算土窯製造木炭之碳保存率。由試驗結果得知土窯製造木炭過程中窯內上層溫度之上升較下層者快，完成炭化作業封窯時之煙囪溫度為 430°C，窯內上層溫度達 750°C 以上而下層溫度則約為 580°C，出窯時之收炭率為 29.97%。又由銀合歡木炭性質測試結果得知銀合歡木炭之表面電阻隨炭化溫度升高而明顯降低，pH 值受炭化溫度之影響不明顯，碳含量隨炭化溫度升高而增加，真密度與比表面積隨炭化溫度升高而明顯增大，利用土窯製造銀合歡木炭之碳保存率為 46.10%。

關鍵字：銀合歡、土窯、木炭、收炭率、碳保存

Making Charcoal from Wood of *Leucaena leucocephala* in Kenting National Park

Gwo-Shyong Hwang^{1,3}, Chin-Mei Lee¹, Chiu-Hsien Wang² and Hsin-Yi Yu¹

¹Division of Forest Utilization, Taiwan Forestry Research Institute, ²Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, ³Corresponding author E-mail: gshwang@tfri.gov.tw

ABSTRACT In a coastal forest restoration project supported by Kenting National Park charcoal were made from burnt wood of *Leucaena leucocephala* for conservation of natural resource and utilization of alien invasive species. A traditional earthen kiln was used to make the charcoal. The temperatures of the carbonization and chimney in the kiln were monitored using K-type thermocouple and the yields were recorded. Charcoals, taken from various vertical positions in the kiln, were sampled to study properties such as electric resistivity, pH, carbon content, true density and specific surface area, and yield to understand the effects of temperature on carbonization. The results showed that carbonization temperature at the upper part of the kiln increased more rapidly than that at the lower part of the kiln. The highest temperature of the upper part in the kiln at the end of carbonization was slightly above 750°C. The yield of leucaena wood charcoal averaged 29.97%. The electric resistivity of charcoal samples decreased substantially with increasing carbonization temperature. The

pH of leucaena wood charcoal ranged from of 9.3 to 9.80 and was independent of carbonization temperatures. The carbon content, true density, and specific surface area of charcoal rose with increasing temperature. The carbon conservation was 46.10%.

Keywords: *Leucaena leucocephala*, earthen kiln, wood charcoal, yield of charcoal, carbon conservation

前言

銀合歡係屬於引進入侵之木本植物，因其生長快速，萌芽力強，可用為飼料、木材加工材料、薪炭、紙漿以及綠覆蓋，曾被林業單位列為推廣之造林樹種，卻因品系差異及適應情形不同，大多不再進行經營管理，任其大量逸出歸化於全島各地。尤其在墾丁國家公園內大量分布，已嚴重威脅墾丁國家公園內原植物的生存，因此銀合歡入侵監測成為墾丁國家公園的重要保育課題(金絮之等 2007)。根據呂明倫等(2009)之研究結果顯示，1988與2007年銀合歡之面積呈現增加的趨勢，且入侵的規則性多偏好於低地、緩坡，以及近道路與農地等區域。另一方面，根據墾丁國家公園社頂生態旅遊路線整體規劃研究(陳東瑤 2005)之報告，於民國五、六十台灣經濟起飛之年代，高雄等地都會區開始發展，人口集中，因而木炭需求大增，恆春半島之山區木炭窯林立成為重要之產業。目前社頂公園附近保留之木炭窯遺跡已規劃為生態遊程之主要據點，除了可使民眾瞭解恆春地區經濟產業發展之歷史外，亦可對木炭相關之知識有多一層認識。

與煤炭、石油相異，木炭係以再生資源之木材為原料，屬永續資源。製造木炭時在炭化即熱分解之過程中，由於大部分之氫元素與氧元素脫離木材，並使得殘留於木材之大部分碳元素，在縮合與重排之過程中於細胞壁上產生數量龐大、直徑約1-5 nm之小孔，此為木炭之進行物理吸附之主要場所，使木炭具有卓越之調濕、除臭與淨化水質等功效。木炭之基本構造為微小碳結晶不規則排列之無定形碳，其結

晶程度隨炭化溫度之升高而增加並形成結晶程度較大之「石墨構造」，其層與層間存在游離之 π 電子而使得木炭具有良好之導電性(炭やきの会 2004)。由於在熱分解過程中由氫與氧組成含有各種不同官能基之化合物殘留於木炭表面，使得木炭亦具有化學吸附之效果。由上可知木炭除了作為燃料使用外，亦有鮮為人知之機能性，石原茂久(2002a, 2002b)提出木炭作為機能性碳素材料之利用，除了作為調濕材料之利用外，高溫炭化之木炭具高導電性，可作為靜電防止材料、導電性材料、燃料電池材料與電磁波遮蔽材料等，其用途非常廣泛。日本木炭新用途協議會(2004)亦提倡「新用途木炭」，推廣以木炭作為環保之新資材，如生活環境資材、住宅環境資材、農業資材、水處理資材與其他資材等。

墾丁國家公園為了進行海岸林之復舊須伐除屬入侵外來種之銀合歡，由於銀合歡徑級大都低於10cm，在加工利用上受到極大之限制，若砍伐後棄置於林地除了對海岸林復育作業造成妨礙外，亦會因腐朽而分解成CO₂並釋放至大氣中，可能對日受矚目CO₂減量之問題，帶來負面之評價，若能將其製成木炭，除了可達到碳素保存與並減少CO₂排放之效益外，亦可利用其調濕、除臭與淨化水質等效果，作為環保新資材以開發各種新用途。同時以墾丁地區之銀合歡為原料，利用土窯製成之木炭可保持原有之形狀與外觀，配合當地之觀光旅遊業並輔導業者加工成高附加價值之炭藝品、裝飾品、紀念品或日常用品，進而提高銀合歡之利用價值。

本研究以墾丁國家公園管理處進行「墾丁

熱帶海岸林生態復舊研究及監測計畫」，所伐除之銀合歡林地廢材為原料，利用自行建造之土窯製造木炭，除了檢討炭化過程窯內溫度上升情形、收炭率與土窯炭化溫度對銀合歡木炭性質之影響外，亦評估土窯製造銀合歡木炭之碳保存率。

材料與方法

一、試材備製與測試

以墾丁國家公園管理處伐除之銀合歡 (*Leucaena leucocephala*, white popinac) 為原料，將其裁斷成長度 1m 供製造木炭用。以逢機取樣測定試材端部直徑並計算其徑級分布，於進窯時由距離試材端部 10cm 處與中央處，鋸取長度 2cm 之小圓盤，測定其容積比重與含水率。

二、製造木炭與炭化溫度測定

1. 土窯之形狀與尺寸

製造木炭係使用自行建造之土窯，主要構造包括燃燒室、炭化室與煙囪，其尺寸與各部名稱，如圖 1 所示，其中炭化室底部之形狀如扇形，距後方 60cm 最寬之處為 2.8m，縱深長度為 2.8m，窯壁高度 1m，窯頂成拱形，最高處距地面 1.4 m。

2. 炭化溫度之測定

為了測定製造木炭過程中窯內與煙囪溫度之變化，於進窯作業時採用 K type 直徑 3.2 mm 之測溫棒，如圖 1 所示，共設置 10 處測溫點。分別於窯內中央位置(如圖 1 之測溫點 1 與 2)與窯內後方距煙口 50cm(如圖 1 之測溫點 3 與 4)，離地面 10cm 與 90cm 處，而測定煙囪溫度時，為了減少受到煙囪外較冷空氣之影響，其測溫點為煙囪口下方 5cm 之中心處(如圖 1 之測溫點 5)。

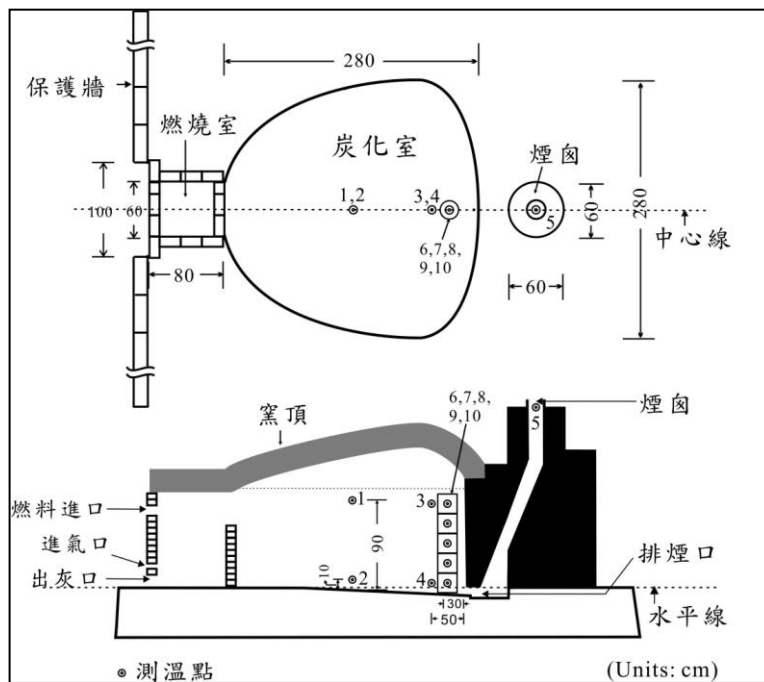


圖 1. 土窯之形狀尺寸與炭化溫度之測溫點(No. 1-10)

為了探討土窯內炭化溫度對木炭性質之影響，本研究另外使用 5 個直徑與高均為 20 cm 之有孔不銹鋼圓筒，其孔徑為 0.5cm、孔距為 1.5cm，該等圓筒內置滿長度 20cm 之銀合歡材，並於炭化室後方距煙口 30cm 處，將該等圓筒垂直堆疊成高度 1m(由上而下稱之最上層、第四層、第三層、第二層與最下層)，並不銹鋼圓條圍繞加以固定，每層圓筒之中央位置亦設置測溫棒(如圖 1 之測溫點 6 至 10)。

3. 製造木炭

進窯時將上述長度 1m 之銀合歡材料由窯內後方向前方緊密直立排列，其上與窯頂之空間則將銀合歡廢料橫向擺置作為引火材，稱之「上木」。完成進窯作業後以耐火磚砌築燃燒室(包括燃料口、進氣口與出灰口)，約經 3 天之預熱後，於燃燒室添加多量之薪材並將煙囪全開，使得窯內上層溫度明顯上升，首先由上木開始產生熱分解，當窯內上層達到所定溫度，則不必再添加薪材，並封閉進料口與出灰口而只留進氣口，同時亦將煙囪之排煙口縮小，隨窯內炭材自發炭化之進展使窯底之溫度明顯上升並完成一次炭化後，再將煙囪與進氣口逐漸放大至全開，以利大量空氣進入窯內並使窯內溫度迅速上升。

約經 4 天炭化作業窯內呈現炙熱之紅光則進行封窯作業。再經一週之冷卻俟窯內溫度下降後，進行出炭作業，將製造完成之木炭裝入紙箱，秤其重量並計算收炭率。

三、木炭性質測試

由窯內後方 5 層有孔不銹鋼圓筒(如圖 1 之測溫點 6 至 10)中，取出木炭試樣進行下列各項測試。

1. 表面電阻

本項試驗使用 AVO DLRO-10 數位式低電阻計或 AVO BMM-2580 數位式高電阻計兩種，兩測針之距離為 1cm 直接測定其表面電

阻，每一條件之試樣重複數為 8。

2. 酸鹼值

秤取 60-100 mesh 之木炭 1g，置入 100 ml 之燒杯中再加入 70ml 之蒸餾水攪拌後靜置 1 h，使用 Suntex pH 315i 手提式微電腦酸鹼度計測定其酸鹼值，每一條件之試樣重複數為 3。

3. 碳含量

將銀合歡木材與木炭分別研磨成 100 mesh 以下之粉末，經絕乾後秤取 2-4mg 之試樣裝入儀器專用之錫盒內，以元素分析儀分別測定其碳含量，每一條件之試樣重複數為 3。

4. 真密度

將木炭粉碎後，篩取粒徑大小為 36-60 mesh 之木炭，以秤量瓶秤取約 5g 試樣，置入 105°C 烘箱中 24-48 h，使其充分乾燥後，置入 Quantachrome ultrapycnometer 1000 之真密度測定儀中量測，測得 5 次數據並計算其平均值，每一條件之試樣重複數為 3。

5. 比表面積

試樣之粒度大小與真密度試驗者相同，以秤量瓶秤取約 5g 試樣，置入 105°C 烘箱中乾燥 24-48 h 後，再秤取約 1g 之試樣使用 PMI Automated BET Sorptometer BET-202A 比表面積與孔徑分析儀進行木炭比表面積之測定。

結果與討論

一、銀合歡試材之容積比重、進窯含水率與徑級分布

由銀合歡試材之容積比重與進窯含水率之試驗結果得知銀合歡之容積比重為 0.54-0.72，平均為 0.61，進窯前含水率為 35.60-53.34%，平均為 43.21%。

由銀合歡試材徑級分布之測試結果得知銀合歡試材之徑級以直徑 5cm、6cm 與 7cm 者居多，其佔有率分別為 21%、27%與 18%，其次為直徑 4cm、8cm 與 9 cm，其佔有率分別

為 13%、12%與 7%，而直徑 1cm 與 10cm 者之占有率各為 1%。

二、製造木炭過程之溫度變化

製造木炭過程可大分為預熱、炭化與冷卻，預熱時為避免引燃窯內上木而須將煙囪封閉，其目的為使窯體與炭材之溫度上升進而縮短窯內上木之引燃時間與增加收炭率。

如上所述，本研究於土窯內共設置 10 處測溫點，製造木炭時各測溫點之溫度變化，如圖 2 與圖 3 所示。圖 2 所示係測溫點 1-5 之溫度變化，因預熱時須將煙囪封閉，因此由圖 2 得知雖約經 3 天之預熱過程，窯內距地面 90cm 處之溫度(簡稱上層溫度)僅約 80-90°C，距地面 10cm 處之溫度(簡稱下層溫度)則約為 55°C，而煙囪溫度與下層溫度較為相近。

為使窯內上層達到炭化所須之溫度，預熱後將煙囪敞開並於燃燒室添加多量薪材，窯內上層溫度與煙囪溫度因而迅速上升，於煙囪溫度達 85°C 左右時，下層溫度與煙囪溫度相近，而上層溫度達 150°C 以上，則不再添加薪材，並適度縮小煙囪口與封閉窯門之燃料口與出灰口，僅留進氣口調節小量之空氣進入窯內，由於窯內無法獲得充分之空氣而使得窯內之溫度上升較為緩慢或略為下降，同時煙囪溫度亦略為下降。其後窯內上層溫度持續上升至 300°C 左右，而下層溫度則維持在 90°C 左右，顯示窯內炭化之進行係由上而下，於煙囪溫度 200°C 左右，下層溫度上升至 300°C 以上時，可推知窯內銀合歡材幾乎完成一次炭化。

為了提高木炭品質如增加碳含量、增大硬度與降低雜質成分，而須再以較高之溫度進行二次炭化，因此於煙囪溫度 250°C，下層溫度上升近 400°C 時，於窯內完成一次炭化後將煙囪口與進氣口逐漸放大，因較多量之空氣進入窯內而使得溫度急速升高，下層溫度雖快速上

升，但仍較上層溫度低，煙囪溫度亦隨之迅速上升至溫度達 430°C 並進行封窯時，測溫點 1 與測溫點 3 之溫度相當接近，均達 750°C 左右，而測溫點 4 之溫度較低於測溫點 2，其原因係與土窯之構造有關，於二次炭化過程所產生之二氧化碳經過窯內後方底部之煙口(如圖 1 所示)時，產生降溫作用而使得窯內後方下層溫度最低(林裕仁等 2008)。封窯作業係將進氣口與煙囪封閉藉以隔絕窯外空氣，完成後窯內溫度則明顯下降，同時煙囪因無熱氣通過，其溫度下降程度更為明顯。

如上所述，為了探討土窯內炭化溫度對木炭性質之影響，本研究使用 5 個置滿長度 20 cm 之銀合歡材之不銹鋼圓筒，垂直堆疊並置於窯後方之煙口前 30cm 處，於炭化過程中該等圓筒內之溫度變化，如圖 3 所示。由圖 3 可得知距窯內地面 90cm 之最上層之溫度上升最早，依序為距窯內地面 70cm 之第四層、距窯內地面 50cm 之第三層、距窯內地面 30cm 之第二層，而距窯內地面 10cm 之最下層者最慢，亦明顯顯示土窯內炭化過程之熱分解係由上而下，封窯時各層之最高炭化溫度由上而下分別為 767°C、726°C、688°C、636°C、584°C。

三、燃料使用率與收炭率

製造木炭之進窯重量、燃料重量、木材含水率與出窯重量之試驗結果，如表 1 所示，同時表 1 亦顯示燃料使用率與收炭率，其中收炭率係木炭出窯重量與進窯絕乾重量之百分率。由於本所自行建造之土窯於木炭製造過程中可充分利用木質材料具有自發炭化之特性，於一次炭化與二次炭化均不須藉由外熱，所需之熱源甚少且使用木質系燃料，如表 1 所示，僅使用 372kg 之銀合歡作為燃料，約佔銀合歡進窯量 2337kg 之 15.92%，對節能具有正面之義意。

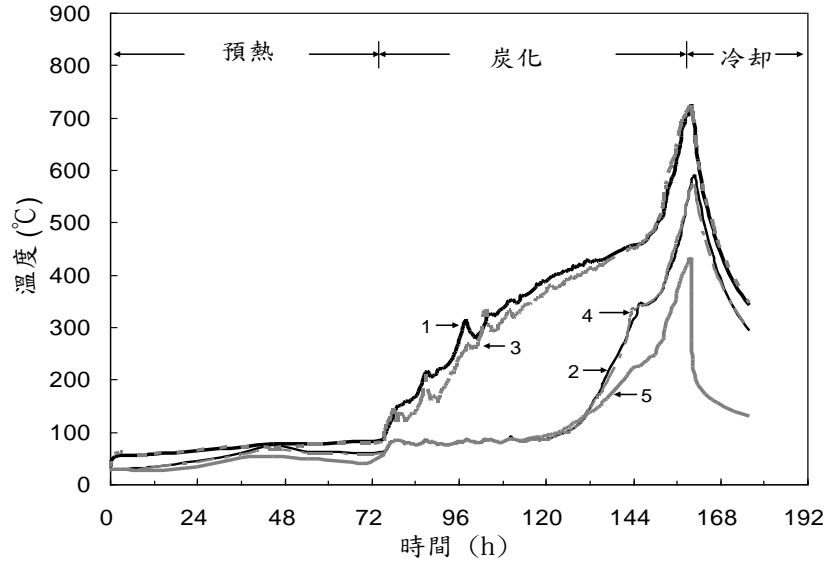


圖 2. 木炭製造炭化過程中窯內不同位置之溫度曲線 (測溫點 1-5 如圖 1 所示)

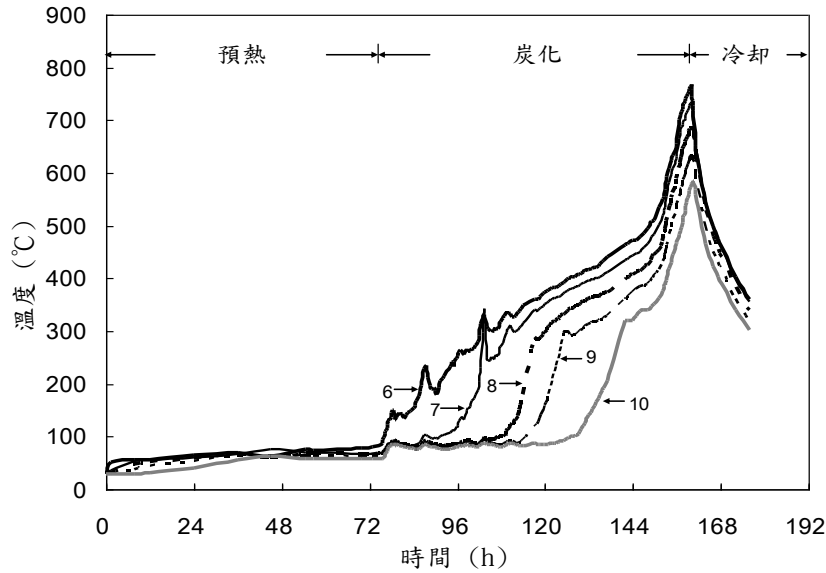


圖 3. 木炭製造炭化過程中窯內不同高度之溫度曲線(測溫點 6-10 如圖 1 所示)

由於不使用煤、天然氣或柴油等化石燃料，同時燒炭時所使用木質系燃料之碳元素係來自大氣中之二氧化碳，作為製造木炭之燃料後又以二氧化碳回歸至大氣，因此以『碳中和』而言，對減碳即不增加大氣中之二氧化碳亦具有正面之意義。

又如表 1 所示，銀合歡進窯重量為

2337kg，而製成木炭之出窯重量為 489kg，出窯重量為進窯重量之 20.92%，可知以土窯生產 1kg 之木炭約須 5kg 之木材，若以進窯量之絕乾重量為基準即扣除木材中 43.21% 之水分，則其收炭率達 29.97%，與柳杉枝梢材製造木炭之收炭率 29.0% 相近(林裕仁等 2008)。

表 1. 銀合歡製造木炭之燃料使用率與收炭率

進窯重量 a, (kg)	燃料重量 b, (kg)	木材含水率 c, (%)	出窯重量 d, (kg)	燃料使用率 e*, (%)	收炭率 f**, (%)
2337	372	43.21	489	15.92	29.97

* e = (b/a)×100； ** f = d/(a/(1+c))

四、木炭之性質

五種不同炭化溫度銀合歡木炭性質之測試結果，如表 2 所示，由表 2 得知銀合歡木炭之表面電阻為 2.1×10^{-1} - $2.2 \times 10^6 \Omega/\text{cm}$ ，隨炭化溫度升高而明顯降低，顯示炭化溫度較高者具有較佳之導電性，一般而言，木炭之炭化程度亦以精煉度表示，係指其表面電阻以底數為 10 之指數值，並以整數 0-9 表示，如電阻值為大於 $10^4 \Omega/\text{cm}$ ，而小於或等於 $10^5 \Omega/\text{cm}$ 時，其精煉度為 5，因而可知表 2 炭化溫度 767°C 與

726°C 者之精煉度為 0，688°C 者之精煉度為 1，636°C 者之精煉度為 5，584°C 者之精煉度為 7。pH 值介於 9.39-9.80，較柳杉枝梢材木炭者小(林裕仁等 2008)，且受炭化溫度之影響不明顯，碳含量為 83.58%-86.96%，隨炭化溫度升高而有增加之趨勢，但炭化溫度於 688°C 以上時，則無明顯之增加，真密度為 1.55-1.93 g/cm^3 ，比表面積為 165.59-340.39 m^2/g ，兩者均隨炭化溫度升高而明顯增大，其趨勢與柳杉枝梢材木炭者相同(林裕仁等 2008)。

表 2. 不同炭化溫度銀合歡木炭性質之測試結果

炭化溫度 (°C)	表面電阻 (Ω/cm)	pH 值	碳含量 (%)	真密度 (g/cm^3)	比表面積 (m^2/g)
767	2.1×10^{-1}	9.78	86.96	1.93	340.39
726	6.7×10^{-1}	9.80	86.28	1.84	316.68
688	7.7×10^0	9.58	86.41	1.74	298.03
636	2.0×10^4	9.60	85.28	1.65	226.58
584	2.2×10^6	9.39	83.58	1.55	165.59

五、碳保存率

銀合歡木材與木炭之碳含量試驗結果，如表 3 所示，分別為 48.06%與 85.70%，其中木炭之碳含量係為表 2 中五種不同炭化溫度者之平均值。為了計算碳保存率，表 3 中之木材重量係包括進窯重量與燃料重量，而木材之碳重為木材絕乾重與木材碳含量之乘積，木炭之

碳重為木炭出窯重量與木炭碳含量之乘積，再由木炭之碳重除以木材之碳重，可計算出銀合歡製造木炭之碳保存率為 46.10%，不過嚴格地說於製造木炭時仍有少部分之碳元素於熱分解之過程中轉換成木醋液之有機物而應有較高之碳保存率。

表 3. 銀合歡製造木炭之碳保存率

木材重量 g [*] , (kg)	木材碳含量 h, (%)	木材之碳重 i ^{**} , (kg)	木炭碳含量 j, (%)	木炭之碳重 k ^{***} , (kg)	碳保存率 l ^{****} , (%)
2709	48.06	909.1	85.70	419.1	46.10

* g = a + b ; ** i = (g/(1+c)) × h ; *** k = d × j ; **** l = (k/i) × 100 ; 其中 a、b、c 與 d 請參照表 1

結論與建議

以林業試驗所研發自行建造之土窯製造木炭時，窯內之最高溫度達 750°C 以上，生產出碳含量高且具導電性之優質木炭，又由於銀合歡直徑小，於二次炭化即精煉過程時，炭化溫度較易傳導至炭材中心而適合製造木炭。同時其一次炭化係利用木質材料自發性炭化之特性，且二次炭化不須藉由外熱，因此所需之熱源甚少，燃料使用率僅為進窯量之 15.92%，對節能具有正面之義意，又由於不使用煤、天然氣或柴油等化石燃料，而使用木質燃料之碳元素係來自大氣中之二氧化碳，作為燃料經燃燒後又以二氧化碳回歸至大氣，本研究之收炭率與碳保存率，分別為 29.97%與 46.10%，因此以『碳中立』與『碳保存』而言，對減少二氧化碳排放量即減碳亦具有正面之意義。

林業試驗所目前對土窯建造與木炭製造等關鍵技術均已充分掌握，可立即進行技術轉移給相關單位、民間團體或墾丁地區民眾，土

窯建造包括週邊設施約須費用 40-50 萬元，由開始建造土窯至正式生產須時約 3 個月。因此建議今後可配合政府節能減碳之政策加強推廣土窯製造木炭之產業，除了可達到碳保存之目的外，亦可達到資源有效利用之目的。

誌謝

本研究承林業試驗所提供經費，以及墾丁國家公園管理處提供銀合歡試驗材料與經費，得以順利完成，特此誌謝。

引用文獻

- 金絮之、魏浚紘、陳朝圳。2007。墾丁國家公園銀合歡入侵之研究。華岡農科學報 20: 41-51。
- 呂明倫、黃靜宜、鍾玉龍。2009。恆春半島銀合歡入侵分布之動態與區位分析。航測及遙測學刊 14(1):1-9。
- 林裕仁、何振隆、余欣怡、黃國雄。2008。土

- 窯燒製柳杉枝梢材木炭之研究。中華林學季刊 41(4):549-558。
- 陳東瑤。2005。墾丁國家公園社頂生態旅遊路線整體規劃研究。內政部營建署墾丁國家公園管理處委託研究報告。
- 日本木炭新用途協議會。2004。木炭の新しい使い方—新用途木炭の用途別基準。社團法人全國燃料協會。
- 石原茂久。2002a。新しい機能性炭素材料素材としての木炭の利用(I)。木材工業 57(1)：2-7。
- 石原茂久。2002b。新しい機能性炭素材料素材としての木炭の利用(II)。木材工業 57(2)：48-50。
- 炭やきの會。2004。炭と木酢液。家の光協會。p.36。